

Otimização Elétrica de Motores de Indução Trifásicos

SARA BEATRIZ LEITÃO BARBOSA

Julho de 2023

OTIMIZAÇÃO ELÉTRICA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Sara Beatriz Leitão Barbosa



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2023

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de
TEDSEE – Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas
Elétricos de Energia

Candidato: Sara Beatriz Leitão Barbosa, Nº 1180707, 1180707@isep.ipp.pt

Orientação científica: José António Beleza Carvalho, jbc@isep.ipp.pt

Empresa: WEGEuro Indústria Elétrica S.A.

Supervisão: Ricardo Rodrigues, ricardor@weg.net



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2023

Agradecimentos

Vou começar por agradecer ao Engenheiro Ricardo Rodrigues, o meu orientador na empresa, que forneceu todos os meios para que a realização deste projeto fosse possível e pela sua disponibilidade. Também à restante equipa da empresa WEG que foi sempre prestável perante todas as dúvidas que ocorreram.

Ao Engenheiro José Carvalho, o meu orientador do ISEP, agradecer a disponibilidade e as rápidas respostas nesta reta final de conclusão do curso.

Em terceiro lugar, agradecer ao ISEP pelo ensino proporcionado, pelas memórias e experiências e pelo grupo de pessoas, tanto amigos como colegas de curso, com quem partilhei vários momentos e que, de alguma forma, contribuíram para o meu sucesso ao longo destes cinco anos.

Por último, agradecer aos meus pais e à minha família por estarem sempre do meu lado, por me incentivarem e darem o máximo de apoio possível durante a minha vida académica. Por todo o esforço investido para a minha formação e educação, por apoiarem todas as minhas decisões e oferecerem sempre as melhores condições para que tudo fosse possível.

Resumo

Com a redução do tempo de resposta para o mercado e aumento da competitividade, bem como o aumento exponencial dos preços de materiais no quotidiano, torna-se crucial a adoção de métodos cada vez mais automatizados que reduzam os custos para cliente e fabricante.

O foco deste projeto é realizar uma otimização de uma determinada gama de motores de indução trifásica da WEG, com o objetivo de reduzir a utilização de matérias-primas e, consequentemente, o custo global do motor.

Neste documento, inicialmente, é feita uma introdução sobre o princípio de funcionamento do motor elétrico de indução trifásico e as suas principais vantagens, e de seguida são apresentados alguns exemplos de gamas de motores fabricados pela WEG. O capítulo seguinte é referente ao detalhamento de critérios, que influenciam o projeto elétrico dos motores e que são necessários atender para cumprir limites mínimos de norma. É ainda apresentado o processo de bobinagem de motores de baixa tensão, o qual será essencial para que seja possível desenvolver o trabalho prático proposto.

Por último, será apresentado o projeto realizado para a otimização, os seus resultados e ganhos.

É, assim, objetivo deste trabalho compreender o funcionamento do motor elétrico de indução trifásico, de forma a perceber o impacto da sua construção e dos materiais que o constituem nos diferentes critérios requeridos, como por exemplo, no nível de eficiência. Desta forma, é possível chegar à melhor otimização do projeto elétrico de motores de baixa tensão, tendo em vista a redução do custo.

Palavras-Chave

Otimização, indução eletromagnética, norma, eficiência, bobinagem, ranhuras

Abstract

With reduced response time for the market and increased competitiveness, as well as the exponential increase in prices of materials in everyday life, it is crucial to the adoption of increasingly automated methods that reduce costs for customers and manufacturers.

The focus of this project is to optimize a given range of WEG three-phase induction motors, with the aim of reducing the use of raw materials and, consequently, the overall cost of the motor.

In this document, initially, an introduction is made on the principle of operation of the three-phase induction electric motor and its main advantages, and below are some examples of engine ranges manufactured by WEG. The following chapter refers to the detailing of criteria, which influence the electrical design of the motors and that are necessary to meet minimum limits of norm. It is also presented the process of winding low voltage motors, which will be essential for the development of the proposed practical work.

Finally, the project for the optimization will be presented, as well as its results and gains.

Thus, the objective of this work is to understand the operation of the three-phase electric induction motor, to understand the impact of its construction and the materials that constitute it in the different criteria required, such as on the level of efficiency. In this way, it is possible to arrive at the best optimization of the electric design of low voltage motors, to reduce the cost.

Keywords

Optimization, electromagnetic induction, norm, efficiency, winding, slots

Índice

RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
SIGLAS E ACRÓNIMOS	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.APRESENTAÇÃO DA EMPRESA.....	2
1.4.CALENDARIZAÇÃO.....	2
1.5.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	5
2.1.DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS VANTAGENS	5
2.2.CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	6
2.3.CONSTRUÇÃO BÁSICA	7
2.4.PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	8
2.5.MOTOR AC	13
2.6.MOTOR AC DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	15
2.7.CIRCUITO EQUIVALENTE	16
3. EXEMPLOS DE MOTORES ELÉTRICOS PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS	19
3.1. W22	19
3.2.W22X.....	20
3.3.HGF/W50.....	21
3.4. W40	21
3.5. W60	22
3.6.SMOKE	23
4. CRITÉRIOS CÁLCULO ELÉTRICO – W22	25
4.1.REGIME DE SERVIÇO.....	25
4.2.AMBIENTE E ALTITUDE.....	28

4.3.ISOLAMENTO E ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA	29
4.4.RENDIMENTO.....	31
4.5.TOLERÂNCIAS PARA CÁLCULO ELÉTRICO	32
4.6.MÉTODOS DE ARREFECIMENTO	32
5. BOBINAGEM.....	35
5.1.CONCEITOS DE BOBINAGEM.....	35
5.2.PROCESSO DE BOBINAGEM EM BAIXA TENSÃO	36
5.3.RANHURAS	40
6. FERRAMENTAS UTILIZADAS.....	43
6.1.PYOTM	43
6.2.NEWTON.....	45
6.3.OTM4E5.....	46
7. DESENVOLVIMENTO.....	49
7.1.OTIMIZAÇÃO SEM NOVAS FERRAMENTAS	49
7.2.OTIMIZAÇÃO COM NOVAS FERRAMENTAS.....	55
8. CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO A. LIMITES DE EFICIÊNCIA NOMINAL PARA IE1	69
ANEXO B. LIMITES DE EFICIÊNCIA NOMINAL PARA IE2	71
ANEXO C. LIMITES DE EFICIÊNCIA NOMINAL PARA IE3	73
ANEXO D. LIMITES DE EFICIÊNCIA NOMINAL PARA IE4	75
ANEXO E. 1º ALGARISMO DO CÓDIGO IC	77
ANEXO F. 2º E 3º ALGARISMOS DO CÓDIGO IC	78
ANEXO G. CUSTOS DA FERRAGEM ATUAL VS. FERRAGEM PROPOSTA.....	79

Índice de Figuras

Figura 1	Modelos bifásicos de Galileo, 1886, e Tesla, 1886. [4]	6
Figura 2	Constituição de um Motor de Indução Trifásico	7
Figura 3	Bobina condutora [8]	9
Figura 4	Rotação de um motor elétrico [8]	9
Figura 5	FEM na bobina [10]	10
Figura 6	Correntes de Foucalt em núcleo sólido e laminado [11]	12
Figura 7	Campo magnético girante [2]	14
Figura 8	Rotor de gaiola de esquilo [2]	15
Figura 9	Circuito equivalente de um motor de indução [12]	16
Figura 10	Circuito equivalente do estator [12]	17
Figura 11	Circuito equivalente do rotor [12]	17
Figura 12	Circuito final simplificado [12]	18
Figura 13	Gama W22	20
Figura 14	Gama W22X	20
Figura 15	Gama HGF	21
Figura 16	Gama W40	22
Figura 17	Gama W60	22
Figura 18	Motor WEG Smoke	23

Figura 19	Funcionamento do Regime S1 [10]	26
Figura 20	Funcionamento do Regime S2 [13]	27
Figura 21	Funcionamento do Regime S3 [13]	28
Figura 22	Fatores para altitude e temperatura ambiente [15]	29
Figura 23	Isolamento do fio e da ranhura [8]	30
Figura 24	Margens de segurança por classe térmica [15]	31
Figura 25	Exemplos de códigos IC [17]	34
Figura 26	Camada única, dupla e mista	35
Figura 27	Fio de cobre esmaltado	37
Figura 28	Espira, Bobina e Grupo	37
Figura 29	Rasgos e isolantes	38
Figura 30	Passo da bobinagem	38
Figura 31	Ligação	39
Figura 32	Amarração	39
Figura 33	Impregnação por gotejamento	40
Figura 34	Formatos das ranhuras do rotor e curvas velocidade-binário das classes NEMA [18]	41
Figura 35	Diferentes formas de ranhuras do rotor [18]	42
Figura 36	Interface do software pyOTM	43
Figura 37	Interface da otimização no pyOTM	44
Figura 38	Tela “Geral” do Newton	45

Figura 39	Explorador do Newton	45
Figura 40	Tela “Previsão” do Newton	46
Figura 41	Interface do OTM4E5	47
Figura 42	Bobinagem atual do motor 355M/L 4P 37kW	51
Figura 43	Perdas do motor atual – 355M/L 4P 37kW	51
Figura 44	Perdas do motor com bloco de 510 mm – 355M/L 4P 37kW	51
Figura 45	Diferença no fator de potência – 355M/L 4P 37kW	52
Figura 46	Bobinagem do motor proposta – 355M/L 4P 37kW	52
Figura 47	Caraterísticas do projeto proposto – 355M/L 4P 37kW	53
Figura 48	Comparação dos projetos atual e proposto - 355M/L 4P 37kW	54
Figura 49	<i>Saving</i> anual previsto – primeira otimização	55
Figura 50	Tela Opç/Plc – OTM4E5	56
Figura 51	Indicação das ranhuras no OTM4E5	57
Figura 52	Lâmina de estator e rotor	57
Figura 53	Condutividade dos materiais	58
Figura 54	Resultados OTM4E5	58
Figura 55	Definição das variáveis	60
Figura 56	Fluxo de otimização no OTM4E5	61
Figura 57	Dimensões das ranhuras após otimização	62
Figura 58	Exemplificação da ranhura do rotor	63

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização	3
Tabela 2	Níveis de eficiência	32
Tabela 3	Principais fluídos de arrefecimento	33
Tabela 4	Saving anual previsto – segunda otimização	64

Siglas e Acrónimos

AC	–	Alternating Current
BT	–	Baixa Tensão
DC	–	Direct Current
FEM	–	Força Eletromotriz
IEC	–	International Electrotechnical Commission
NEMA	–	National Electrical Manufacturers
TEFC	–	Totally Enclosed Fan Cooled
WEG	–	Grupo das empresas WEG
WEGeuro	–	WEGeuro Indústria Elétrica S.A.
WPT	–	WEG Portugal

1. INTRODUÇÃO

O presente documento, no âmbito da unidade curricular de TEDSEE (Dissertação/Estágio), do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia apresenta o desenvolvimento de um projeto de otimização a realizar no contexto empresarial da organização WEG em que o seu foco é a produção de motores elétricos.

Ao longo deste capítulo, será feita uma breve contextualização acerca do tema, objetivos, uma pequena apresentação da empresa e a descrição da organização do documento.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Esta proposta surgiu devido à necessidade de realização de um estudo que permita uma redução de custos. O motor elétrico de indução fabricado na WEGeuro é constituído por imensos materiais relevantes para a sua construção, como ferro, cobre, chapa magnética e alumínio, sendo que a escalada de preços do quotidiano não é favorável tanto para o fabrico dos motores como para quem os requisita. Desta forma, chegar a meios de redução do consumo de matérias-primas consumidas para o fabrico dos motores torna-se essencial, não só pela redução do custo, mas também pelo impacto ambiental que os desperdícios acarretam.

1.2. OBJETIVOS

Como já referido anteriormente, o objetivo deste trabalho é a otimização de projetos elétricos de forma a obter um ganho económico e ambiental. Para que isso aconteça, é essencial a exploração de critérios indispensáveis para a análise coerente do que pode ou não ser benéfico no processo de otimização, tais como, o funcionamento, vantagens, características e construção de um motor de indução, bem como de critérios e valores mínimos a cumprir aquando do projeto elétrico do mesmo.

1.3. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A WEGeuro Indústria Elétrica S.A. (WEGeuro), é fabricante de motores elétricos para aplicações industriais. A WEGeuro era, até 2002, a EFACEC Universal Motors, altura em que foi adquirida pelo grupo multinacional brasileiro WEG, sediado em Jaraguá do Sul, no Brasil, com o objetivo de penetrar no mercado europeu. Neste momento, para além da fábrica localizada na Maia, encontra-se em construção e preparação de uma mudança geral para a fábrica de Santo Tirso.

Embora também fabrique outros tipos de motores ocasionalmente, a WEGeuro especializou-se no fabrico de motores de corrente alternada de indução trifásicos totalmente fechados com ventilação externa, destinados a áreas seguras ou áreas perigosas.

A minha colaboração na WEGeuro, desde 2021 até o momento é feita no Departamento de Engenharia do Produto, na secção de Projeto Elétrico.

1.4. CALENDARIZAÇÃO

Toda a calendarização das diferentes etapas a realizar encontra-se apresentada na Tabela 1, desde a data de início do trabalho, ainda na unidade curricular de PTEDE, até o término do mesmo, final de junho. Apesar da mesma ter sofrido algumas alterações de forma a ajustar o máximo possível à realidade, não houve uma disparidade significativa relativamente ao conteúdo e estrutura face ao que foi apresentado inicialmente.

Tabela 1 Calendarização

ETAPA	ÍNICIO	FIM	Fevereiro	Março					Abril				Maio				Junho					Julho
			4ºs	1ºs	2ºs	3ºs	4ºs	1ºs	2ºs	3ºs	4ºs	1ºs	2ºs	3ºs	4ºs	1ºs	2ºs	3ºs	4ºs	5ºs	1ºs	
Estudo da documentação	01/12/2022	11/03/2023																				
Testagem da ferramenta de otimização no pyOTM	13/03/2023	08/04/2023																				
Listagem, seleção e organização dos motores a testar	03/04/2023	22/04/2023																				
Simulação dos motores no pyOTM	26/04/2023	05/05/2023																				
Ajuste de cálculo no Newton	08/05/2023	27/05/2023																				
Análise - Parte 1	23/05/2023	03/06/2023																				
Formação de OTM4E5	23/05/2023	09/06/2023																				
Otimização no OTM4E5	07/06/2023	16/06/2023																				
Análise - Parte 2	19/06/2023	23/06/2023																				
Elaboração do relatório final	01/12/2022	03/07/2023																				

1.5. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em oito capítulos.

O capítulo 1 consiste na presente introdução, onde é feito o enquadramento do tema do documento, contextualização, objetivos, apresentação da empresa onde o trabalho se desenvolve e calendarização do projeto.

O capítulo 2 descreve o funcionamento de um motor elétrico. O detalhamento destes princípios de funcionamento é necessário para a compreensão de todo o trabalho.

O capítulo 3 descreve vários exemplos de motores elétricos para aplicações industriais atualmente da gama da WEG. É feita uma breve apresentação de cada um dos modelos bem como da sua aplicação.

No capítulo 4 são detalhadas as características elétricas do motor elétrico de corrente alternada de indução trifásico, tendo por base conceitos de norma.

No capítulo 5 é descrito o processo de bobinagem de baixa tensão, que serão os motores estudados durante este trabalho.

A partir do capítulo 6, é onde começa a exploração da parte prática do projeto, com a apresentação das ferramentas utilizadas para o mesmo.

No capítulo 7, é detalhado o procedimento realizado durante o processo de otimização, bem como os seus respetivos resultados e ganhos.

O capítulo 6 é dedicado a observações finais e conclusões do documento elaborado.

2. MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

2.1. DEFINIÇÃO E PRINCIPAIS VANTAGENS

O motor elétrico é a máquina destinada a transformar energia elétrica em energia mecânica, sendo que o mais utilizado entre os vários tipos de motores é o motor de indução. Este, principalmente o do tipo trifásico, é responsável pela conversão de cerca de metade da energia elétrica produzida mundialmente, sendo que é aplicado diversas máquinas industriais ou de uso diário essenciais à vida moderna, como bombas, compressores, furadoras [1]. A máquina de indução é uma máquina de dupla excitação, na qual é aplicada uma tensão alternada aos enrolamentos tanto do estator como do rotor. A tensão aplicada ao enrolamento da armadura é uma tensão de excitação de frequência, normalmente constante, e de potencial também constante. A tensão aplicada ao rotor é uma tensão induzida, de frequência e potências variáveis, produzida como a consequência da velocidade do rotor em relação à velocidade síncrona [2].

Este tipo de motor opera normalmente com uma velocidade constante que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo. É um motor muito utilizado devido à sua simplicidade e robustez, tornando-se bastante adequado para praticamente todo o tipo de máquinas acionadas [3]. As grandes vantagens do motor de indução com rotor de gaiola em

relação ao de rotor bobinado são o facto da sua construção ser mais rápida, prática e barata. Pela razão de ser um motor robusto e não exigir coletor, leva à redução da quantidade de componentes e, conseqüentemente, que a sua manutenção seja bastante simplificada.

2.2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A invenção do motor de indução é atribuída a Nikola Tesla, 1886, e Galileo Ferraris, 1885, com algumas divergências. As diferenças das suas patentes residem principalmente na construção do rotor.

Na patente de Ferraris, o rotor era composto por um cilindro sólido de cobre, envolvido por dois pares de bobinas. Por outro lado, na patente de Tesla, as bobinas dos dois polos são enroladas no estator, enquanto o rotor é constituído por um núcleo ferromagnético envolvido por um enrolamento em curto-circuito [4].

A atribuição da invenção do motor de indução a Tesla é devido ao facto de que a sua patente se assemelha mais ao que é usado atualmente. Na figura 1, são apresentados os esboços do modelo bifásico de Galileo e de Tesla, respetivamente.

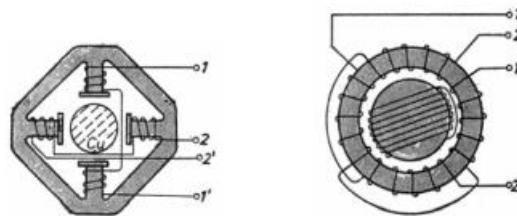


Figura 1 Modelos bifásicos de Galileo, 1886, e Tesla, 1886. [4]

Mikhail Dolivo-Dobrovolsky, em 1889, desenvolveu o primeiro motor de indução com rotor de gaiola, cuja construção se assemelhava bastante à dos motores de indução atuais. Pouco tempo depois, em 1891, a *General Electric* iniciou o desenvolvimento do seu modelo trifásico, que demonstrou rapidamente ser mais económico em comparação aos motores bifásicos equivalentes.

Nikola Tesla, em colaboração com a Westinghouse Motores e Benjamin Garver Lamme, foi responsável pelo desenvolvimento da primeira versão em série de um motor de indução bifásico em 1892 [5]. Posteriormente, em 1896, através de um acordo bilateral entre a *General Electric* e *Westinghouse Motores*, foi patenteada uma versão modificada do projeto

de Dolivo-Dobrovolsky, desenvolvida por Lamme. Este novo motor, conhecido como motor de indução de rotor em gaiola de esquilo, substituiu os modelos anteriores que utilizavam bobinagem no rotor e anéis coletores, conhecidos como motores de slip ring [4][5].

2.3. CONSTRUÇÃO BÁSICA

Um motor elétrico é constituído por componentes comuns a vários tipos, sendo, portanto, os mais impactantes. O estator é a parte do motor que se mantém fixo à carcaça e tem como objetivo conduzir o fluxo magnético. É constituído por um conjunto de chapas de ferro magnético empilhadas e tem a forma de uma coroa circular com ranhuras na parte inferior do mesmo, que é onde se alojam as bobinas. O estator está alojado na carcaça do motor, que é fechada por uma tampa em cada lado, como é possível verificar na figura 2. Por outro lado, o rotor é a componente rotativa do motor e responsável por gerar o segundo campo magnético. É constituído igualmente por chapas de ferro e contem a mesma quantidade de ranhuras que o estator, mas na parte exterior do mesmo. Estes condutores encontram-se alojados num veio, estando este assente em rolamentos ou chumaceiras, permitindo-o rodar livremente. Estes rolamentos ou chumaceiras estão alojados nas tampas e a ponto do veio exterior à carcaça é o que, acoplado a uma outra máquina, transmite o binário, ou seja, a energia mecânica [6] [7].

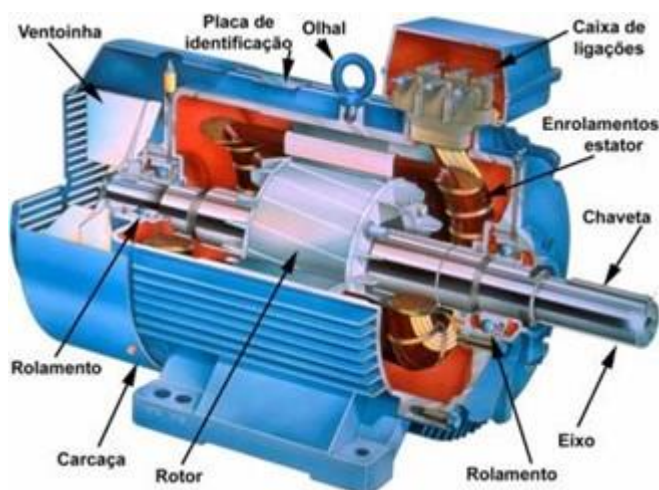


Figura 2 Constituição de um Motor de Indução Trifásico

2.3.1. ESTATOR

O estator de um motor de indução é composto por um empilhamento de lâminas feitas de Aço-Silício, também conhecido como aço elétrico. Estas lâminas são ranhuradas na região onde estão localizados os enrolamentos correspondentes aos polos do motor. Cada lâmina possui uma espessura entre 0,3 a 0,5 mm e é revestida com verniz, a fim de reduzir as perdas causadas pelas correntes de Foucault.

Os enrolamentos do estator podem ser configurados tanto como monofásicos quanto trifásicos, sendo que a configuração trifásica é a mais comum em motores de grande porte. As conexões dos enrolamentos podem ser feitas em estrela ou em triângulo. O número de passagem de um enrolamento ao longo do estator determina o número de polos do motor, o que, por sua vez, define a velocidade síncrona do motor. Geralmente, os motores possuem 2, 4, 6, 8 ou 12 polos [1].

2.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

De forma que o motor elétrico seja capaz de transformar energia elétrica em energia mecânica, a passagem de corrente elétrica é aproveitada para criar um campo magnético que vai gerar uma força que faz o motor rodar. Assim, a energia mecânica pode ser transmitida a outra máquina acoplada.

Para que seja possível uma melhor compreensão deste magnetismo, o campo magnético é gerado à volta de um condutor por onde há passagem de corrente elétrica, como é o caso de um íman permanente e o seu campo magnético inerente cujo é gerado pelas propriedades magnéticas do próprio material que o constitui. Tal acontece com um condutor elétrico em forma de bobina. Como é possível verificar na figura 3, as linhas de fluxo magnético geradas por cada uma das voltas criam um campo magnético mais forte, semelhante ao que acontece no campo dum íman permanente [8]. O facto de as bobinas estarem enroladas à volta do núcleo de ferro torna o campo magnético muito maior do que se o campo fosse em torno de um condutor retilíneo, devido ao facto de que o núcleo de ferro tem uma menor resistência ao fluxo magnético do que o ar.

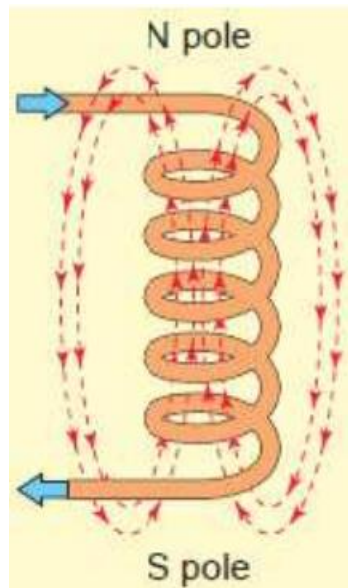


Figura 3 Bobina condutora [8]

A interação dos dois campos magnéticos (de estator e rotor) conduz, então, à rotação de um motor elétrico. A rotação inicial do motor é provocada pelo facto dos dois polos magnéticos serem da mesma polaridade (N-N) ou (S-S), o que significa que estes se vão afastar. Durante a rotação, haverá um ponto em que a força de atração entre os polos opostos será suficientemente forte para manter o rotor a rodar. Seria de esperar que quando os polos opostos ficassem alinhados, devido à sua atração, o rotor pararia de rodar. No entanto, de forma a provocar uma rotação contínua, a corrente elétrica do rotor é comutada, invertendo assim a polaridade do campo magnético [8].

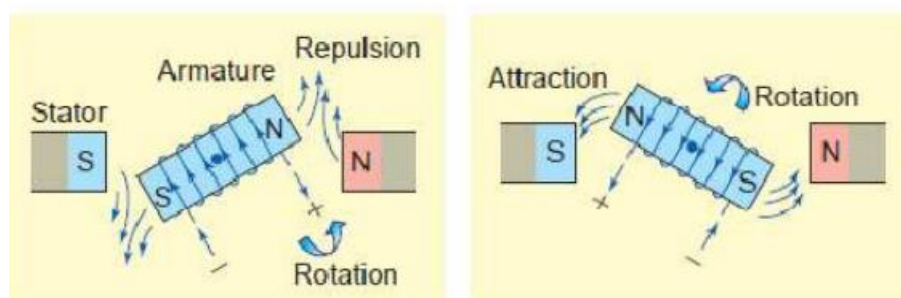


Figura 4 Rotação de um motor elétrico [8]

2.4.1. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Michael Faraday descobriu que, ao introduzir um íman numa bobina, esta acusa a presença de uma corrente elétrica. Essa corrente mantinha-se apenas enquanto o íman estava em movimento, sendo que o seu sentido dependia a aproximação ou afastamento do íman. Este fenómeno ficou caracterizado qualitativamente e quantitativamente e deu origem à Lei da Indução de *Faraday*, expressa matematicamente como [9]:

$$|\varepsilon| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| \quad (1)$$

Ou seja, a intensidade da força eletromotriz induzida (ε) é igual à variação do fluxo magnético no interior da espira. Quando o circuito se encontra fechado, circula nele uma corrente igualmente induzida.

Já a Lei de *Lenz* afirma que a sentido da corrente induzida é tal que, de acordo com os seus efeitos magnéticos, vai ter tendência a opor-se à causa que lhe deu origem [10].

O valor final da FEM induzida pode ser calculado considerando as N espiras que constituem uma bobina. Pela Lei de *Lenz*, a expressão de FEM virá afetada de um sinal negativo:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

Quando o fluxo através da espira é máximo, a FEM é nula. Quando o fluxo através da espira é nulo, a FEM é máxima [10].

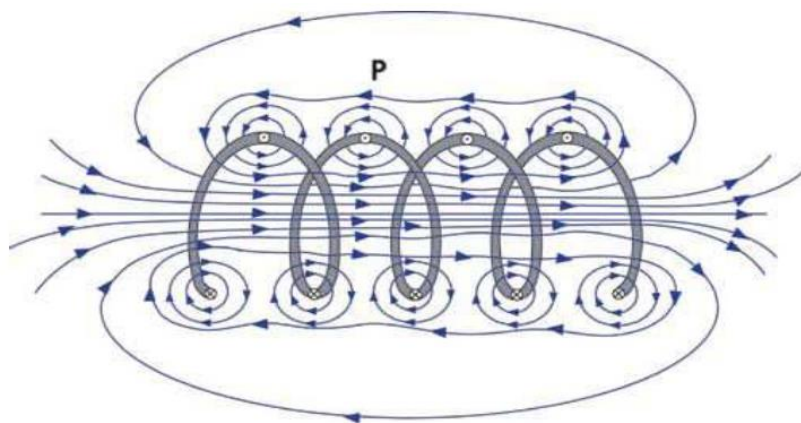


Figura 5 FEM na bobina [10]

O campo magnético que a corrente origina dentro e em torno da bobina vai desenvolver-se em círculos concêntricos que, à medida que o campo aumenta, se vão somando, dando origem a linhas de fluxo que abraçam toda a bobina, continuando a evolução do fenómeno

em formato decrescente, invertendo o sinal. Estas linhas de fluxo, no seu crescimento e decrescimento, provocam indução FEM ou corrente se o circuito estiver fechado [10].

2.4.2. CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Os circuitos magnéticos das máquinas elétricas têm como objetivo conduzir o fluxo magnético, que dá origem ao campo magnético. No caso das máquinas elétricas rotativas, os circuitos magnéticos são geralmente constituídos conjuntamente com um meio de ar – entreferro. São constituídos por materiais condutores da corrente elétrica como o cobre, alumínio e limitados pelo efeito de Joule.

O efeito de Joule consiste na libertação de calor em consequência da passagem de corrente elétrica nos condutores, que proporciona um aumento da temperatura, daí a necessidade de ventilação. Se a temperatura ultrapassar o limite suportável pelos isolantes, estes deixam de cumprir a sua função, levando a um curto-circuito. Este efeito depende da resistividade e dimensão dos condutores, bem como da intensidade da corrente que os percorre [10].

2.4.3. PERDAS

Qualquer transformação de energia acarreta desvios de energia, considerados perdas. Quanto menores estas forem, menor será o aquecimento da máquina e maior o rendimento da mesma. A principal estratégia utilizada para a minimização destas perdas passa pela escolha dos materiais com melhores propriedades, como por exemplo: baixa resistividade; o aumento da secção dos condutores, o que pode ser prejudicial a nível económico; diminuição do comprimento do circuito.

- **Perdas do núcleo magnético**

As perdas elétricas num motor de indução não dependem da carga mecânica, mas sim da tensão aplicada, da frequência da corrente e das características das lâminas do núcleo. Essas perdas podem ser divididas em duas subcategorias: perdas por corrente de Foucault e perdas por histerese.

As perdas por corrente de Foucault são a principal razão pela qual os blocos magnéticos do motor são construídos com lâminas empilhadas. De acordo com a Lei de Lenz, um campo magnético induzido por uma corrente elétrica gera uma corrente elétrica com um campo magnético associado de sentido oposto. Essas correntes

elétricas circulam dentro do componente magnético e contribuem apenas para a geração de calor. O uso de lâminas isoladas entre si ajuda a interromper a circulação dessas correntes e reduzir o desperdício de energia na forma de calor.

Dessa forma, o empilhamento de lâminas isoladas no estator e no rotor do motor de indução é uma estratégia eficaz para reduzir as perdas por corrente de *Foucault* e melhorar a eficiência energética, uma vez que evita o aquecimento excessivo e minimiza a dissipação de energia indesejada.

Tal como exemplificado na figura 6, a região no interior das curvas representa a energia desperdiçada. Uma área menor corresponde a um menor desperdício, ou seja, a uma coercitividade menor, o que exige menor energia para magnetizar [4].

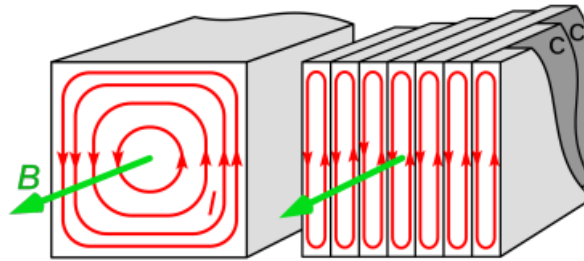


Figura 6 Correntes de Foucault em núcleo sólido e laminado [11]

- **Perdas no cobre**

As perdas no cobre das ligações elétricas, tanto no rotor como no estator, são de natureza térmica e ocorrem devido ao efeito de Joule, que é proporcional à resistividade do material e ao quadrado da corrente que circula. A corrente na gaiola do rotor depende da frequência induzida e do escorregamento em relação à velocidade síncrona, dependendo da fase de funcionamento do motor. A potência térmica perdida, considerando a contribuição de ambas as partes, pode ser expressa pela equação:

$$P_{diss} = I^2 r_r R_r + I_e^2 R_e \quad (3)$$

Uma vez que a área em que a corrente circula no rotor é afetada pelo efeito pelicular da corrente alternada, uma maneira de reduzir as perdas é aumentar a área da secção das barras e dos anéis de curto-circuito. Isso ajuda a diminuir a resistência elétrica e, consequentemente, reduzir as perdas por efeito Joule no cobre.

- **Perdas por atrito**

As perdas por atrito são referentes ao atrito cinético, que ocorre principalmente nos rolamentos que suportam o rotor e o eixo e ao atrito viscoso, influenciado pela área de superfície do rotor e refrigeração do motor. Estas perdas dependem da velocidade de rotação do motor, da área superficial do rotor, da massa do mesmo, entre outros. Melhorar o design dos componentes de refrigeração contribuem para a diminuição destas perdas, uma vez que facilitam o fluxo do ar, bem como a utilização de rolamentos com um baixo coeficiente de atrito.

2.5. MOTOR AC

O motor AC é o mais utilizado atualmente uma vez que a corrente elétrica é alternada o que significa que não é necessária utilização de um transformador de corrente. Este tipo de motor possui um campo magnético do estator girante, o que significa não será necessário inverter a corrente de alimentação e, consequentemente, o seu campo magnético. Desta forma, o campo magnético do rotor vai sempre rodar de acordo com a rotação do campo do estator, o que torna a sua construção e manutenção mais simples e económica tendo em conta o motor DC.

Na figura 7 está exemplificado o funcionamento do campo girante e, tal como se pode observar, trata-se de três correntes alternadas sinusoidais, com a mesma amplitude e desfasadas de 120° . Estas circulam por três bobinas fixas, cujos eixos magnéticos distam 120° entre si e produzem um campo magnético girante de intensidade constante.

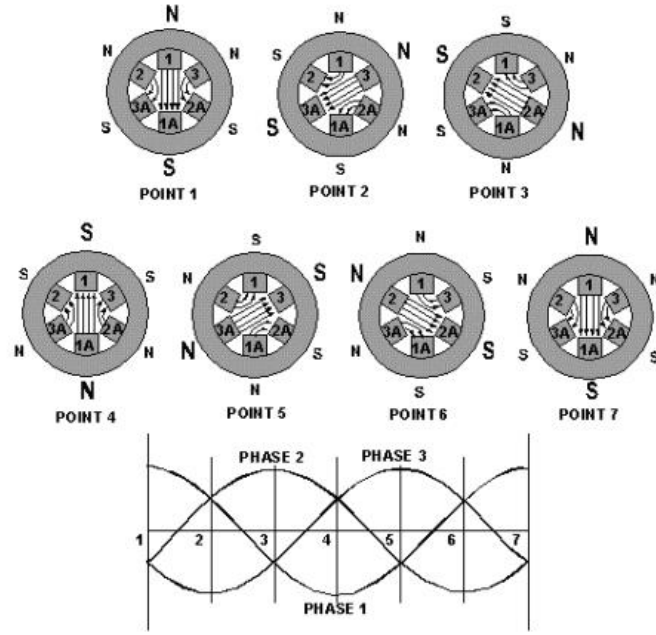


Figura 7 Campo magnético girante [2]

A velocidade de rotação do campo girante é calculada pela velocidade síncrona do motor, que dependerá do número de polos ($2p$) do motor e da frequência (f) da rede. Os enrolamentos são construídos por um ou mais pares de polos que se vão distribuir alternadamente (um “norte” e um “sul”) ao longo da periferia do núcleo magnético. O campo girante percorre, então, um par de polos (p) a cada ciclo. A velocidade de rotação depende da carga a mover, sendo que para mover uma carga maior, ou para se obter um maior binário, os campos magnéticos terão que ser maiores e, conseqüentemente, as correntes induzidas terão que ser também maiores.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [rpm]} \quad (4)$$

O motor AC de indução é assim apelidado uma vez que o rotor não é alimentado diretamente com a corrente elétrica, mas sim por uma corrente elétrica induzida pelo campo magnético do estator, através do espaço entre o estator e rotor, o chamado entreferro. Esta corrente induzida no rotor tem um efeito de escorregamento (“*slip*”), ou seja, o campo do rotor roda a uma velocidade inferior à do campo do estator [8].

2.6. MOTOR AC DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores AC de indução trifásicos representam a maioria dos motores elétricos utilizados em aplicações industriais e em grandes potências, como por exemplo, em bombas, ventiladores, compressores, trituradoras.

Podem ser divididos em motores de rotor de gaiola de esquilo ou de rotor bobinado. Os primeiros são constituídos por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são inseridas barras de cobre, dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto-circuitam as barras tal como se pode observar na figura 8. As barras podem ainda ser fabricadas de alumínio injetado ou liga de latão [2].

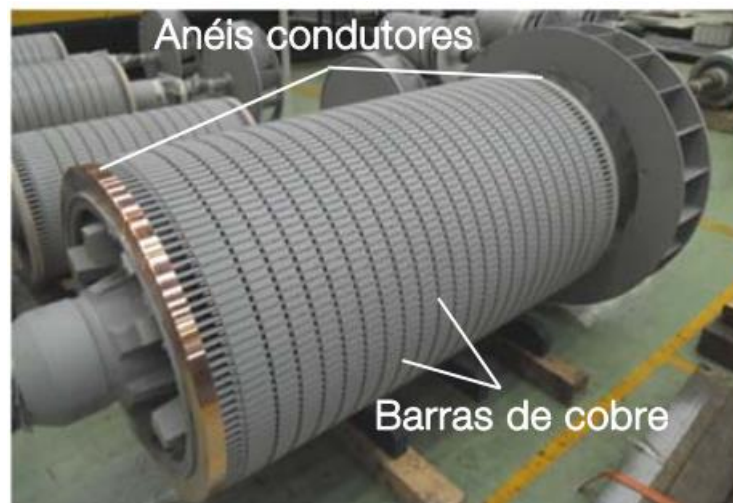


Figura 8 Rotor de gaiola de esquilo [2]

Já o motor AC de indução trifásico de rotor bobinado é uma variante do rotor em gaiola de esquilo, sendo que é constituído por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas as espiras que constituem o enrolamento trifásico. Os três terminais livres de cada uma das bobinas do enrolamento trifásico são ligados a três anéis coletores deslizantes, que se ligam externamente a um reóstato de partida, constituído por resistências variáveis de forma a variar a corrente no rotor, o que permite aumentar o binário de arranque do motor [2]. Estes motores são, portanto, utilizados em aplicações onde o binário de arranque num motor de gaiola de esquilo seja insuficiente.

2.7. CIRCUITO EQUIVALENTE

Num estudo do funcionamento em regime permanente de um motor de indução, é útil construir um circuito equivalente para compreender a relação entre a corrente induzida e o torque gerado pelo motor. A figura 9 ilustra o circuito equivalente de um motor de indução, considerando que o acoplamento entre a bobinagem do estator e a do rotor constitui um transformador ideal:

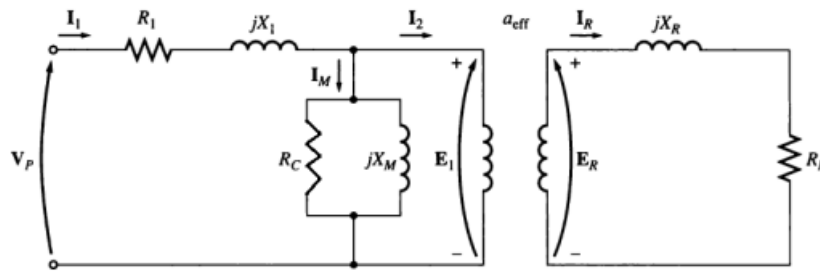


Figura 9 Circuito equivalente de um motor de indução [12]

Como é possível observar, R_1 e X_1 representam, respetivamente, as componentes real e imaginária da impedância do estator. As mesmas componentes com índice R ou 2, representam as do rotor.

I_1 corresponde à corrente total que circula no estator e I_m representa a componente da corrente de perdas.

Tendo em conta o circuito da figura 9, é possível obter o circuito equivalente para o estator e rotor separadamente (figuras 10 e 11, respetivamente) e o circuito final simplificado (figura 12).

V_ϕ representa a tensão de alimentação, sendo que, através das restantes componentes é possível obter a tensão equivalente, ou de Thevenin, e respetiva resistência e reatância equivalente.

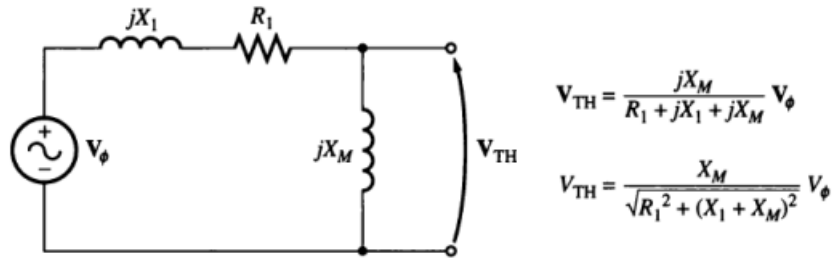


Figura 10 Circuito equivalente do estator [12]

No circuito equivalente do rotor, são representadas a tensão induzida, E_r e a sua reatância X_r , que dependem da velocidade de rotação do motor e, conseqüentemente, da frequência da corrente induzida no rotor. Esses valores podem ser relacionados com os valores iniciais, indicados pelo índice R_0 , através do escorregamento (slip).

É importante notar que, para valores baixos de escorregamento, a reatância do rotor é muito menor do que a resistência, sendo que a resistência varia linearmente com o escorregamento. Essa fase corresponde ao funcionamento nominal do motor.

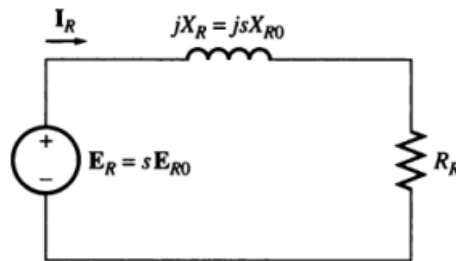


Figura 11 Circuito equivalente do rotor [12]

A equação abaixo permite determinar a tensão elétrica induzida no rotor no instante inicial, E_{R0} . A relação α_{eff} reflete a relação de espiras entre o rotor e o estator, similar a um transformador.

$$E_1 = \alpha_{eff} E_{R0} \quad (5)$$

Desta forma, consegue-se construir um circuito equivalente simplificado do motor de indução, que depende apenas da tensão induzida pelo estator E_1 , tal como exemplificado na figura 12.

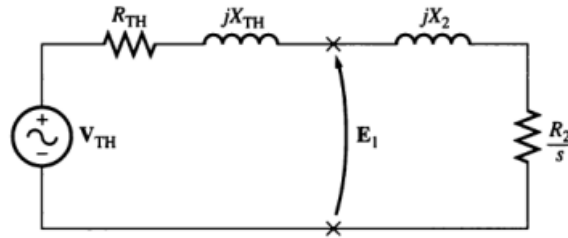


Figura 12 Circuito final simplificado [12]

3. EXEMPLOS DE MOTORES ELÉTRICOS PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

A WEGeuro especializou-se no fabrico de motores de elétricos para aplicações industriais, especificamente em motores AC de indução trifásicos. No catálogo de motores elétricos, as principais características identificativas de cada um são o modelo ou gama, a altura de eixo (distância entre o eixo de rotação do rotor e a superfície de apoio das patas do motor), potência, tensão, frequência e polaridade.

3.1. W22

A gama W22 é o produto mais reconhecido da empresa. É um motor de aplicação industrial generalizada, tais como bombas, ventiladores, compressores, moinhos, prensas. Mantem o foco em conceitos como eficiência energética e produtividade: redução do consumo de energia elétrica, baixos níveis de ruído e de fácil manutenção.

Altura de Eixo: 63 a 355mm

Potência: 120W a 500kW

Tensão: Baixa ($\leq 1100V$) e Média ($\leq 6600V$)

Polaridade: 2, 4, 6 e 8 polos



Figura 13 Gama W22

3.2. W22X

É um motor destinado a áreas perigosas, em que estejam presentes vapores ou poeiras. Destaca-se pela sua segurança e vida útil o que permite a capacidade de acionamento de equipamentos em ambientes com a presença de Atmosferas Explosivas (Segurança Aumentada Ex Ec).

Altura de Eixo: 315 a 560mm

Potência: 90 a 1600kW

Tensão: Baixa, Média e Alta ($\leq 14000V$)

Polaridade: 2, 4, 6 e 8 polos



Figura 14 Gama W22X

3.3. HGF/W50

São duas gamas de motores equivalentes, destinadas essencialmente a aplicações de maiores potências, como é o caso de setores da mineração, do papel e da celulose. Destacam-se pela sua forma compacta e pela sua rigidez mecânica, o que lhes oferece durabilidade e baixos níveis de vibração.

Altura de Eixo: 315 a 630mm

Potência: 120W a 3000kW

Tensão: Baixa, Média e Alta

Polaridade: 2, 4, 6, 8, 10 e 12 polos



Figura 15 Gama HGF

3.4. W40

Motores W40 são indicados para locais limpos e onde a humidade é mínima. Para além da durabilidade e resistência mecânica, oferece máxima ventilação e dissipação térmica.

Altura de Eixo: 160 a 450mm

Potência: 11 a 1500kW

Tensão: Baixa e Média

Polaridade: 2, 4 e 6 polos

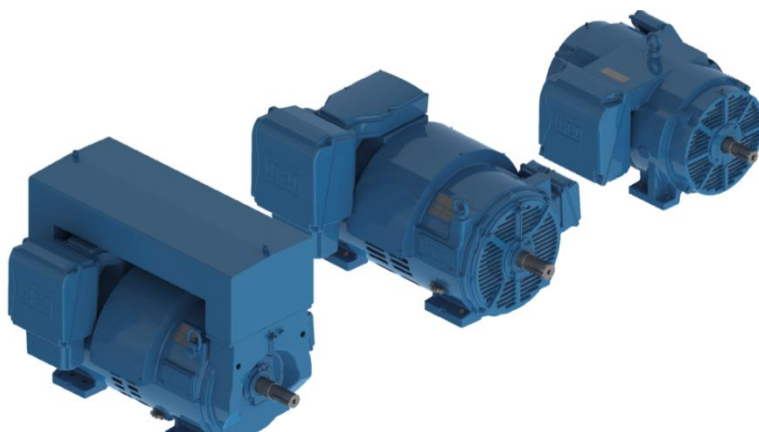


Figura 16 Gama W40

3.5. W60

É o motor mais compacto disponível no mercado, permitindo, assim, um menos espaço de instalação, como é possível observar na figura 17. Outra das vantagens é o facto de garantir níveis de vibrações e ruídos mínimos, assim como a alta eficiência o que permite a aplicação em diversos ramos como em compressores, bombas e ventiladores.

Altura de Eixo: 450 a 710mm

Potência: 500 a 16000kW

Tensão: Baixa e Média

Polaridade: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16 polos



Figura 17 Gama W60

3.6. SMOKE

Estes motores são direcionados para aplicações de ventilação e exaustão como, por exemplo, edifícios e túneis. Para ventilação normal e de emergência, onde funciona a altas temperaturas durante algumas horas até queimar.

Altura de Eixo: 80 a 355mm

Potência: 120W a 400kW

Tensão: Baixa

Polaridade: 4, 6 e 8 polos



Figura 18 Motor WEG Smoke

4. CRITÉRIOS CÁLCULO ELÉTRICO – W22

Serão detalhadas as características elétricas do motor elétrico AC de indução trifásico da gama W22, que serão necessárias para entender os critérios envolvidos em projeto elétrico. Apesar do projeto elétrico ser realizado tendo em conta requisitos do cliente provenientes na *datasheet* do motor, existem critérios mínimos a cumprir. Estes são resultantes de um conjunto de normas internacionais fundamentais que regulam os projetos publicadas pela *International Electrotechnical Commission* (IEC).

4.1. REGIME DE SERVIÇO

Os diferentes tipos de serviços podem ser contínuos, curtos ou periódicos, compreendendo uma ou mais cargas constantes para a duração especificada ou então um serviço não periódico em que a carga e a velocidade geralmente variam dentro da gama de exploração admissível. É responsabilidade do cliente declarar o tipo de serviço, sendo que se não houver qualquer especificação, é declarado regime contínuo S1. Apesar de serem conhecidos dez regimes de serviço de funcionamento distinto, serão abordados neste subcapítulo os três primeiros, pela sua influência.

4.1.1. REGIME S1/REGIME CONTÍNUO

No regime S1 o funcionamento é a carga constante de duração suficiente para que se alcance o equilíbrio térmico. É utilizado essencialmente em bombas, compressores, etc.

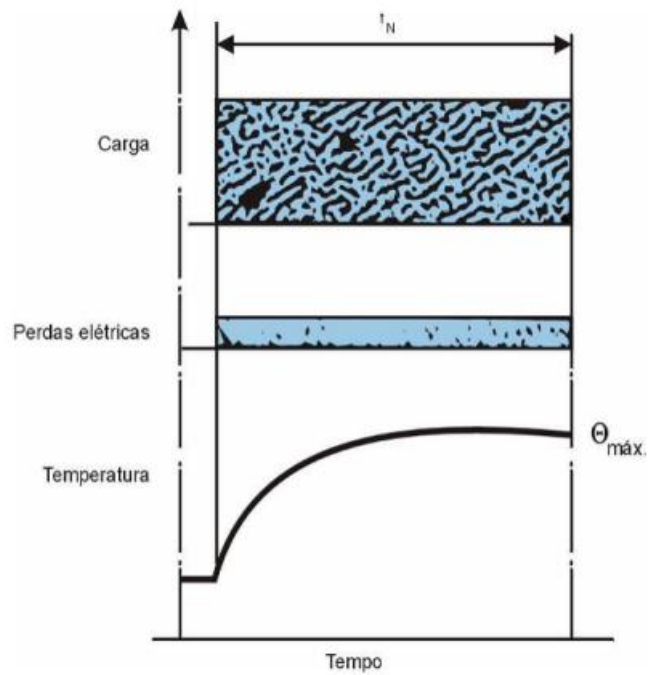


Figura 19 Funcionamento do Regime S1 [10]

4.1.2. REGIME S2/REGIME DE TEMPO LIMITADO

Neste segundo regime, apesar de funcionar igualmente a carga constante, o tempo de funcionamento é inferior ao necessário para atingir o equilíbrio térmico, seguido de um período de repouso de duração suficiente para restabelecer a igualdade de temperatura com o meio refrigerante [13]. Para cálculo deste regime, é necessário ter informação do tempo de funcionamento em carga. Os principais exemplos de aplicações do mesmo são portões eletrónicos e elevadores de carros.

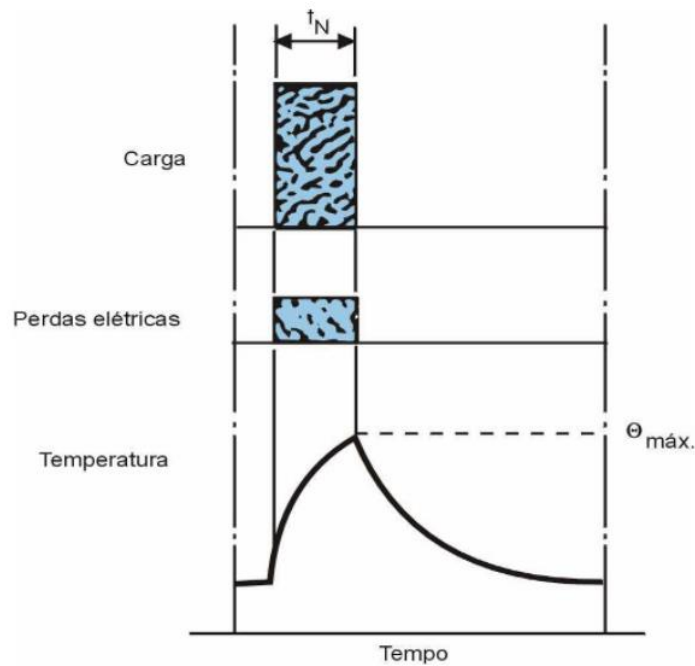


Figura 20 Funcionamento do Regime S2 [13]

4.1.3. REGIME S3/REGIME INTERMITENTE PERIÓDICO

No caso do regime S3, trata-se de uma sequência de ciclos idênticos em que cada um inclui um período de funcionamento a carga constante e um período de repouso. Cada um destes períodos são suficientemente curtos para não ser possível atingir o equilíbrio térmico durante um ciclo de regime nem que a corrente de partida afete de modo significativo a elevação de temperatura [13]. São necessários saber os seguintes dados para cálculo do mesmo: número de partidas por hora, que caso não seja informado, terá de se considerar 6 partidas por hora; Tempo de funcionamento e tempo de repouso; Dados da carga acionada (tipo de carga, torque e inércia da carga).

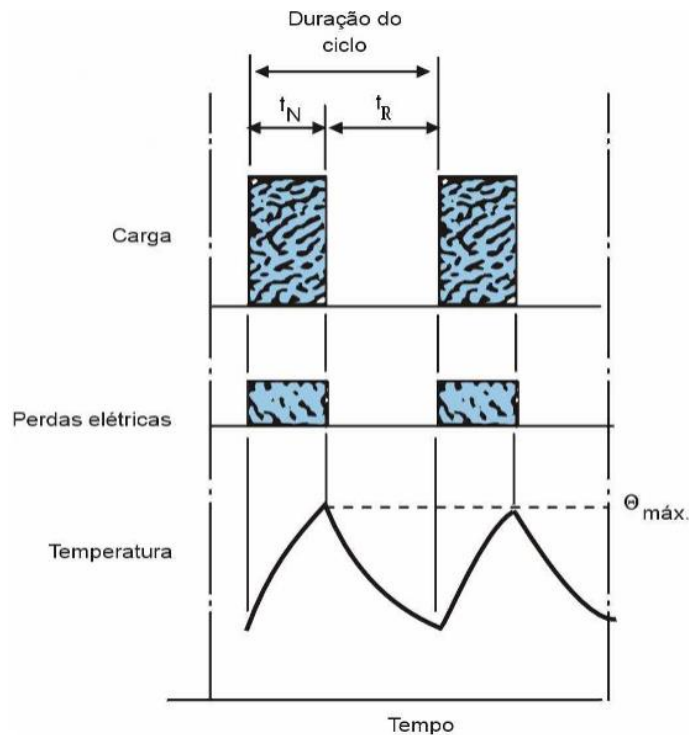


Figura 21 Funcionamento do Regime S3 [13]

4.2. AMBIENTE E ALTITUDE

De acordo com a norma IEC 60034-1 [13], as saídas nominais indicadas nos quadros de dados elétricos constantes do catálogo W22 referem-se às seguintes condições: operação de serviço contínuo S1, intervalo de temperatura ambiente de -20 °C a +40 °C e altitudes até 1000 metros acima do nível do mar. Para temperaturas de funcionamento e altitudes diferentes, são aplicados os fatores descritos na figura 22, que devem ser aplicados à potência nominal do motor.

$$P_{\text{max}} = P_{\text{nom}} \times \text{fator} \quad (6)$$

T (°C)	Altitude (m)								
	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
10							0,97	0,92	0,88
15						0,98	0,94	0,90	0,86
20					1,00	0,95	0,91	0,87	0,83
25				1,00	0,95	0,93	0,89	0,85	0,81
30			1,00	0,96	0,92	0,90	0,86	0,82	0,78
35		1,00	0,95	0,93	0,90	0,88	0,84	0,80	0,75
40	1,00	0,97	0,94	0,90	0,86	0,82	0,80	0,76	0,71
45	0,95	0,92	0,90	0,88	0,85	0,81	0,78	0,74	0,69
50	0,92	0,90	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,72	0,67
55	0,88	0,85	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73	0,70	0,65
60	0,83	0,82	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70	0,67	0,62
65	0,79	0,76	0,74	0,72	0,70	0,68	0,66	0,62	0,58
70	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,62	0,58	0,53
75	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,58	0,53	0,49
80	0,65	0,64	0,62	0,60	0,58	0,56	0,55	0,48	0,44

Figura 22 Fatores para altitude e temperatura ambiente [15]

4.3. ISOLAMENTO E ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

O isolamento da bobinagem do estator é o que impede a passagem de corrente elétrica dos fios condutores para a chaparia do estator, portanto, direciona a corrente do sentido desejado e serve ainda para proteger a bobinagem do meio ambiente e transferir o calor gerado pelas perdas para o exterior [3]. A vida útil do sistema de isolamento da bobinagem do estator determina a vida útil do motor de indução para qual a mesma foi dimensionada. O isolamento vai enfraquecendo devido à ação do calor, humidade e vibrações até não conseguir suportar a tensão aplicada e dar-se o curto-circuito, o que significa que um aumento do limite da classe térmica do sistema de isolamento pode levar à redução significativa da sua vida útil.

O sistema de isolamento implica uma combinação de isolamentos da bobinagem, desde o isolamento da ranhura onde a bobinagem está inserida (figura 23), resina de impregnação da bobinagem nas ranhuras, esmalte de cada fio da bobinagem (figura 23), isolamento entre fases, etc. [8].



Figura 23 Isolamento do fio e da ranhura [8]

Salvo especificações em contrário, os motores W22 são fornecidos com isolamento de classe F (105K) e elevação de temperatura de classe B (80K) em condições normais de funcionamento. A diferença entre os dois termos significa, na prática, que os motores W22 são adequados para atingir *outputs* acima dos valores classificados até um limite, onde a elevação de temperatura atinge o valor da temperatura da classe de isolamento [14], como se verifica na equação abaixo.

$$\Delta T_{FINAL} = (S.F.)^2 \times \Delta T_{INICIAL} \quad (7)$$

Calculando o fator de serviço para as condições habituais, conclui-se que o mesmo é aproximadamente 1.15, o que significa que os motores W22 com classe B de elevação de temperatura podem operar continuamente acima 15% do valor nominal (considerando 40°C de temperatura ambiente e 1000 metros de altitude).

Na figura 24 estão representadas as margens de segurança por classe térmica, que são estabelecidas pela norma IEC 60034-1 [14].

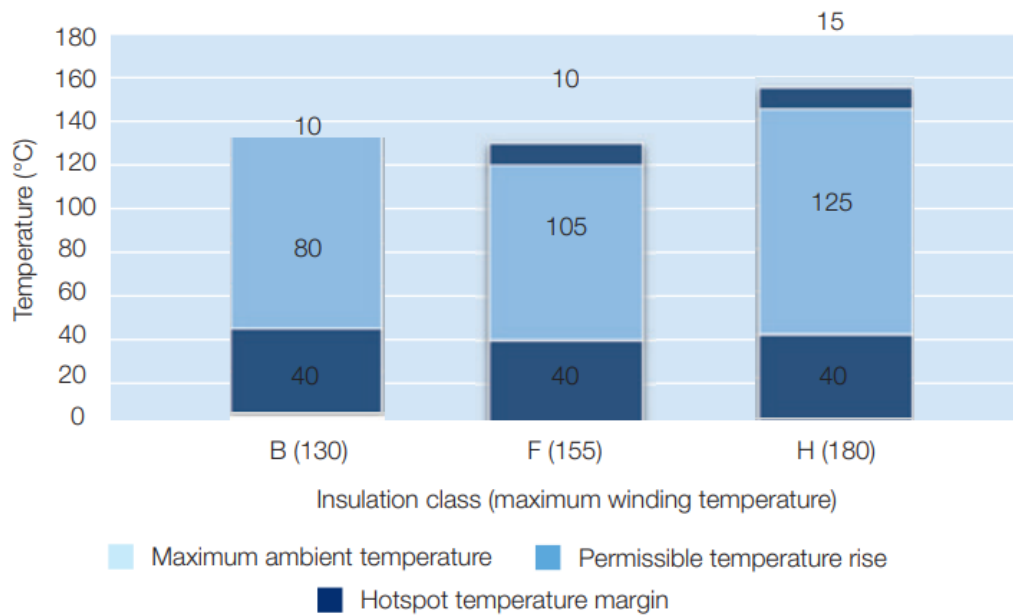


Figura 24 Margens de segurança por classe térmica [15]

4.4. RENDIMENTO

O rendimento num motor elétrico define a eficiência com que é feita a transformação da energia elétrica em energia mecânica, portanto é importante que o rendimento do mesmo seja alto. Um dos motivos está relacionado com as perdas baixas consistirem num menor aquecimento do motor, o que indica um motor mais compacto e menor dissipação para o ambiente; e ainda, quanto maior for o rendimento, menor é a potência absorvida na linha e, portanto, menor o custo da energia elétrica paga nas contas mensais [2].

A norma IEC 60034-30-1 [16] define os vários níveis de eficiência a cumprir tendo em conta uma potência nominal, tensão classificada e a frequência e deve-se ter em conta algumas considerações aquando da realização dos projetos:

- A eficiência declarada pelo fabricante na placa de classificação (eficiência nominal) deve ser maior ou igual à eficiência nominal definida na norma;
- A eficiência de carga completa de qualquer motor, quando for testada a uma tensão e frequência nominal, não deve ser inferior à eficiência nominal menos a tolerância das perdas totais.

A designação da classe de eficiência energética encontra-se definida na tabela 2.

Tabela 2 Níveis de eficiência

Designação	Descrição
IE1	Motores com uma eficiência de carga completa nominal igual ou superior aos limites numerados no anexo A.
IE2	Motores com uma eficiência de carga completa nominal igual ou superior aos limites numerados no anexo B.
IE3	Motores com uma eficiência de carga completa nominal igual ou superior aos limites numerados no anexo C.
IE4	Motores com uma eficiência de carga completa nominal igual ou superior aos limites numerados no anexo D.

O rendimento de um motor é sempre inferior a 100%, ou seja, há sempre uma diferença entre a potência total e a potência útil, que representa as perdas de potência através de calor, o qual aquece a bobinagem do estator e que tem que ser dissipado para fora do motor para evitar um aumento excessivo da temperatura interior.

4.5. TOLERÂNCIAS PARA CÁLCULO ELÉTRICO

Para efeitos de dados de projeto elétrico, são consideradas tolerâncias de acordo com a norma IEC 60034-1 [14]:

- Fator de potência: $\frac{1-\cos\theta}{6}$;
- Corrente de partida: 20% (sem limite inferior);
- Binário de arranque: - 15% + 25%;
- Binário máximo: - 10%;
- Momento de inércia: $\pm 10\%$.

4.6. MÉTODOS DE ARREFECIMENTO

Os diferentes métodos de arrefecimento de uma máquina elétrica rotativa estão definidos na norma IEC 60034-6 [17], atribuindo a cada um deles um código IC.

O arrefecimento é o procedimento por meio do qual o calor resultante de perdas ocorridas na máquina elétrica girante é transferido para um fluido de arrefecimento primário, o qual pode circular continuamente ou pode ser arrefecido por um fluido de arrefecimento secundário, num trocador de calor. O fluido de arrefecimento primário é o meio, líquido ou gasoso, que, estando a uma temperatura inferior à parte de uma máquina e em contato com esta, remove o calor da mesma. Já o fluido de arrefecimento secundário, estando a uma temperatura inferior à do fluido primário, remove o calor transmitido por este fluido, através de um trocador de calor ou através da superfície externa da máquina elétrica girante.

4.6.1. DESIGNAÇÃO

Exemplificando, um motor TEFC tem o código IC411, sendo que esta forma é a compacta do código. A forma geral é IC4A1A1, em que o 1º algarismo refere-se ao arranjo do circuito de arrefecimento (Anexo E), a 1ª letra ao fluído de arrefecimento primário, o 2º algarismo ao método de circulação do fluído de arrefecimento primário (Anexo F), a 2ª letra ao fluído de arrefecimento secundário e 3º algarismo ao método de circulação do fluído de arrefecimento secundário (Anexo F).

A tabela 3 extrai os principais fluídos de arrefecimento indicados na norma [17].

Tabela 3 Principais fluídos de arrefecimento

Letra caraterística	Fluído de arrefecimento
A	Ar
F	Freon
H	Hidrogénio
N	Azoto
C	Dióxido de carbono
W	Água
U	Óleo

Na figura 25 estão expostas as principais formas de arrefecimento e os respetivos códigos IC.

Characteristic numeral for circuit arrangement (see clause 4)						Characteristic numeral for method of movement (see clause 6)	
4 Frame surface cooled (using surrounding medium)		5 Integral heat exchanger (using surrounding medium)		6 Machine-mounted heat exchanger (using surrounding medium)		of primary coolant (see note)	of secondary coolant
IC410	IC4A1A0	IC510	IC5A1A0	IC610	IC6A1A0		0 Free convection
IC411	IC4A1A1	IC511	IC5A1A1	IC611	IC6A1A1		1 Self-circulation
							5 Circulation by integral independent component
IC416	IC4A1A6	IC516	IC5A1A6	IC616	IC6A1A6		6 Circulation by machine-mounted independent component
							7 Circulation by separate and independent component or by coolant pressure system
IC418	IC4A1A8	IC518	IC5A1A8	IC618	IC6A1A8		8 Circulation by relative displacement

Figura 25 Exemplos de códigos IC [17]

5. BOBINAGEM

5.1. CONCEITOS DE BOBINAGEM

Neste subcapítulo são apresentados alguns conceitos de bobinagem essenciais para complementar a compreensão do trabalho realizado.

5.1.1. ENROLAMENTO – CAMADA ÚNICA, DUPLA OU MISTA

No enrolamento de camada única, cada ranhura é preenchida por uma única saída de bobina, enquanto na camada dupla, cada ranhura recebe duas saídas de bobina, tal como mostra a figura 26. Normalmente é colocado um material isolante entre as duas camadas. Já o enrolamento em camada mista, como o próprio nome sugere, é uma mistura dos dois casos.

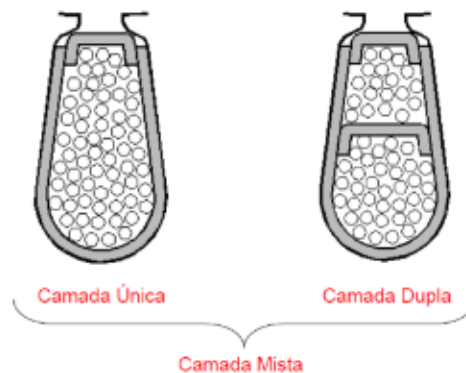


Figura 26 Camada única, dupla e mista

5.1.2. FATOR DE ENCHIMENTO

O fator de enchimento indica o quanto a área da ranhura do estator está ocupada.

- a) Enchimento cobre – Considera a área útil do fio e a área total da ranhura:

$$E_c = \frac{\text{Área total do fio nú [mm}^2\text{]} \times \text{Número de espiras} \times \text{Camada}}{\text{Área total da ranhura [mm}^2\text{]}} \quad (8)$$

- b) Enchimento total – Considera a área total do fio isolado como se fosse quadrado e a área útil da ranhura:

$$E_t = \frac{\text{Quadrado do diâm.do fio nú [mm}^2] \times \text{Número de espiras} \times \text{Camada}}{\text{Área útil da ranhura [mm}^2]} \quad (9)$$

Este valor é geralmente limitado a um mínimo de 0.73 e a um máximo de 0.77, aproximadamente.

5.1.3. RELAÇÕES DE BOBINAGEM

1. Mudança de camada única para dupla e vice-versa
 - De única para dupla, divide-se o número de espiras por 2.
 - De dupla para única multiplica-se o número de espiras por 2.
2. Mudança de ligação triângulo para estrela e vice-versa
 - De triângulo para estrela divide-se o número de espiras por $\sqrt{3}$.
 - De estrela para triângulo, multiplica-se o número de espiras por $\sqrt{3}$.
3. Mudança de ligação série para N x paralelo e vice-versa
 - De ligação série para N x paralelo multiplica-se o número de espiras por N.
 - De ligação N x paralelo para série divide-se o número de espiras por N.

Na mudança de camada conserva-se a secção do fio, enquanto nas restantes situações faz-se a relação inversa para a secção do fio.

5.2. PROCESSO DE BOBINAGEM EM BAIXA TENSÃO

O processo de bobinagem de um motor é fundamental para o funcionamento do mesmo e está dividida em várias etapas. No entanto, todo este processo requer cuidados especiais visto que a forma como um motor é bobinado determina o seu desempenho.

As bobinas elétricas são constituídas maioritariamente por fio de cobre visto que representa uma alta condutividade elétrica e resistência à corrosão, assim como é facilmente soldado.



Figura 27 Fio de cobre esmaltado

Quando estes fios são enrolados várias vezes, formam-se espiras e fortalecem o campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa pelo fio.

Terminologias:

1. Espira: Uma volta completa do fio, variando dimensões conforme projeto (1ª imagem da figura 28).
2. Bobina: Conjunto de uma ou mais espiras (2ª imagem da figura 28).
3. Grupo: Conjunto de bobinas distribuídas ao longo de um passo (3ª imagem da figura 28).

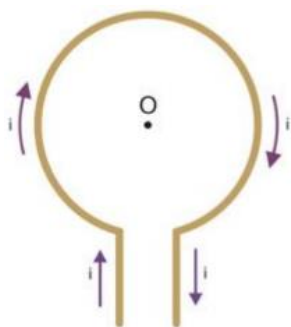


Figura 28 Espira, Bobina e Grupo

- Isolantes

O isolamento é um dos aspetos mais importantes para determinar a durabilidade do motor, uma vez que basta uma pequena falha em qualquer ponto para que todo o bobinado fique prejudicado.

Os isolantes de ranhura (rasgo) são utilizados para proteger o contato do fio com a chapa e devem estar devidamente posicionados após o processo de bobinagem.



Figura 29 Rasgos e isolantes

- Passo da bobinagem: Trata-se da distância em rasgos entre as duas partes retas de uma bobina, como representado na figura 30.



Figura 30 Passo da bobinagem

- Ligação: Uma bobinagem trifásica é formada por três fases e cada uma destas fases é formada por um grupo de bobinas ligadas entre si.



Figura 31 Ligação

- **Amarração:** A função da amarração é compactar as cabeças das bobinas, e ligações, de modo a não permitir torções que possam danificar os materiais isolantes, como é possível observar na figura 32.

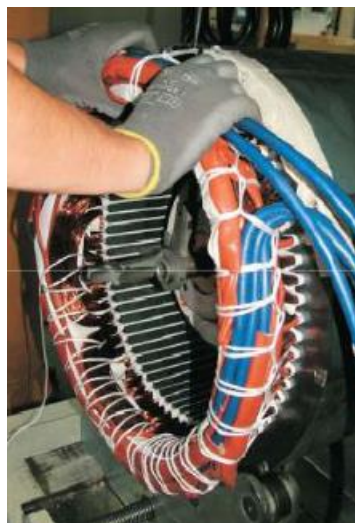


Figura 32 Amarração

- **Impregnação BT:** A impregnação consiste em envolver toda a bobinagem num verniz ou resina, tem a finalidade de compactar o estator de tal modo que durante o seu funcionamento nenhuma das partes se desloque, vibre ou mova. A impregnação aumenta a capacidade de isolamento dos materiais. Esta é feita essencialmente por

gotejamento, que consiste em manter o estator em rotação e inicialmente inclinado, e no preenchimento das ranhuras com resina. De seguida, o estator é colocado na horizontal e toda a bobinagem é envolta em resina.

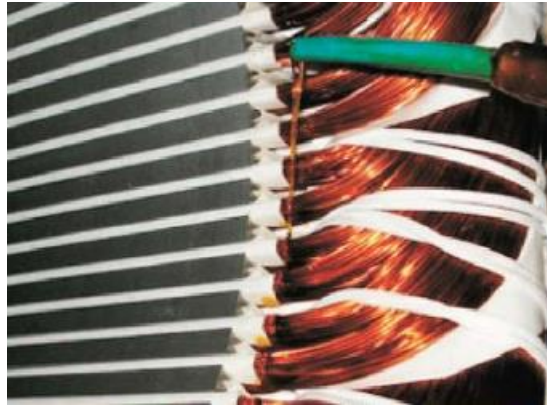


Figura 33 Impregnação por gotejamento

- **Produção:** a produção de motores de baixa tensão é feita nas carcaças de 225 a 355, de 2, 4, 6 e 8 polos. Um dos critérios mais relevantes a ter em conta no projeto elétrico é o comprimento do bloco e sua localização na carcaça. Sempre que for possível a redução do mesmo, atendendo aos critérios de norma e exigências do cliente, mais económico fica o projeto devido à diminuição de chapa magnética.

5.3. RANHURAS

Os motores para atender aos requisitos de desempenho e confiabilidade desejados, devem ter características como binário alto, ampla faixa de velocidade, capacidade de sobrecarga, alta eficiência, baixo custo e peso, durabilidade em condições ambientais adversas, longa vida útil e baixa vibração/ruído.

Para combinar alto binário de partida e baixa corrente de partida com alta eficiência, é possível obter uma resistência do rotor que varia naturalmente alterando a forma e as dimensões da ranhura do rotor. Grande resistência da barra em baixas velocidades ajuda a aumentar o binário de partida, enquanto grande resistência em alta velocidade diminui a eficiência [18].

A NEMA definiu formas típicas das ranhuras do rotor e as respectivas curvas velocidade-binário de forma que a seleção do motor adequado tendo em conta a sua aplicação, fosse mais facilitada para a indústria. Na figura 34 estão representadas as quatro classes de projeto padrão NEMA.

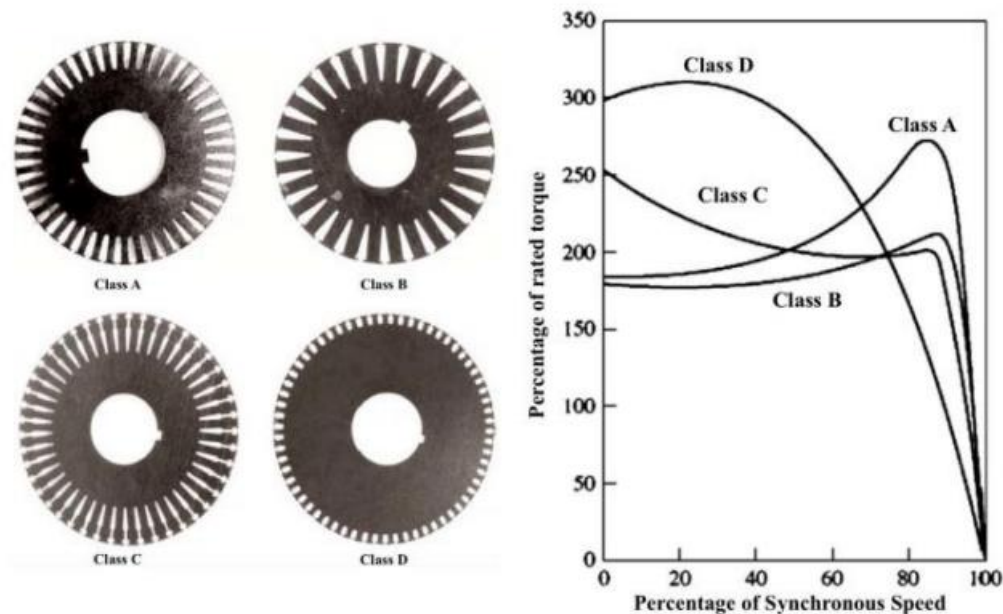


Figura 34 Formatos das ranhuras do rotor e curvas velocidade-binário das classes NEMA [18]

Como é possível verificar, as ranhuras de rotor na classe A são grandes, enquanto as da B são grandes e profundas. A classe C representa o rotor de gaiola dupla e a classe D representa as pequenas ranhuras. De acordo com pesquisas [18], concluiu-se que os motores de gaiola dupla são melhores tanto para partida quanto para operação nominal.

Os desempenhos elétricos e magnéticos de um motor estão diretamente relacionados às geometrias das ranhuras do estator e do rotor. A mudança na geometria da ranhura do rotor afeta diretamente a resistência do mesmo e em todas as grandezas operacionais e valores nominais, incluindo corrente do estator, binário e potência no eixo.

As formas de ranhura do rotor têm diferentes tipos de forma, tal como se pode observar na figura 35. Estas são divididas essencialmente em três classes que são em retangulares, ovais e de trapézio.

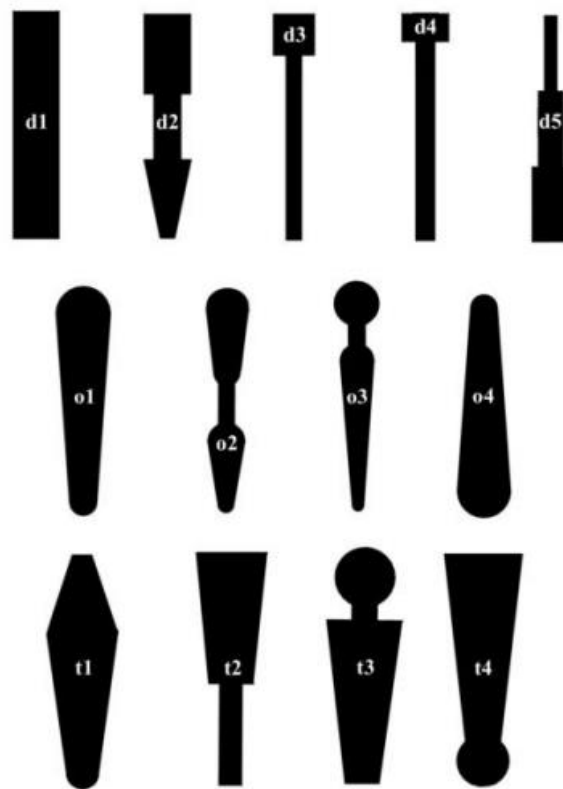


Figura 35 Diferentes formas de ranhuras do rotor [18]

Tendo por base estudos realizados, em que o objetivo é obter o melhor desempenho para cada forma de ranhura do rotor, o melhor desempenho médio inicial pertence à família de ranhuras retangulares, seguida das ovais e de trapézio. As ranhuras estreitas até ao centro fornecem melhor binário de partida do que as ampliadas. Quando ao nível de desempenho médio de corrente de partida, as ovais são as que se destacam e as ranhuras de trapézio são as de pior desempenho.

A maior eficiência pertence às famílias oval, de trapézio e retangular, respetivamente. Já a nível de capacidade de carga (binário nominal) segue-se a ordem de trapézio, retangular e oval.

6. FERRAMENTAS UTILIZADAS

6.1. PYOTM

O pyOTM foi a ferramenta utilizada para a otimização em massa de projetos de motores. Esta foi implementada na WEG Brasil em 2021 e na WEG Portugal em 2022.

Além de permitir a pesquisa e otimização de motores trifásicos, tem a capacidade de considerar os limites de norma e fabrico. Através dela é possível fazer uma avaliação custo-benefício, ou seja, do custo dos motores versus a probabilidade de atendimento de desempenhos.

Esta ferramenta é atualmente utilizada apenas em motores de baixa tensão e a sua pesquisa é feita tendo em conta os motores salvos na base de dados da organização. No momento da otimização de projetos, realiza a variação de parâmetros como as espiras, número e diâmetro do fio, comprimento do pacote e passo.

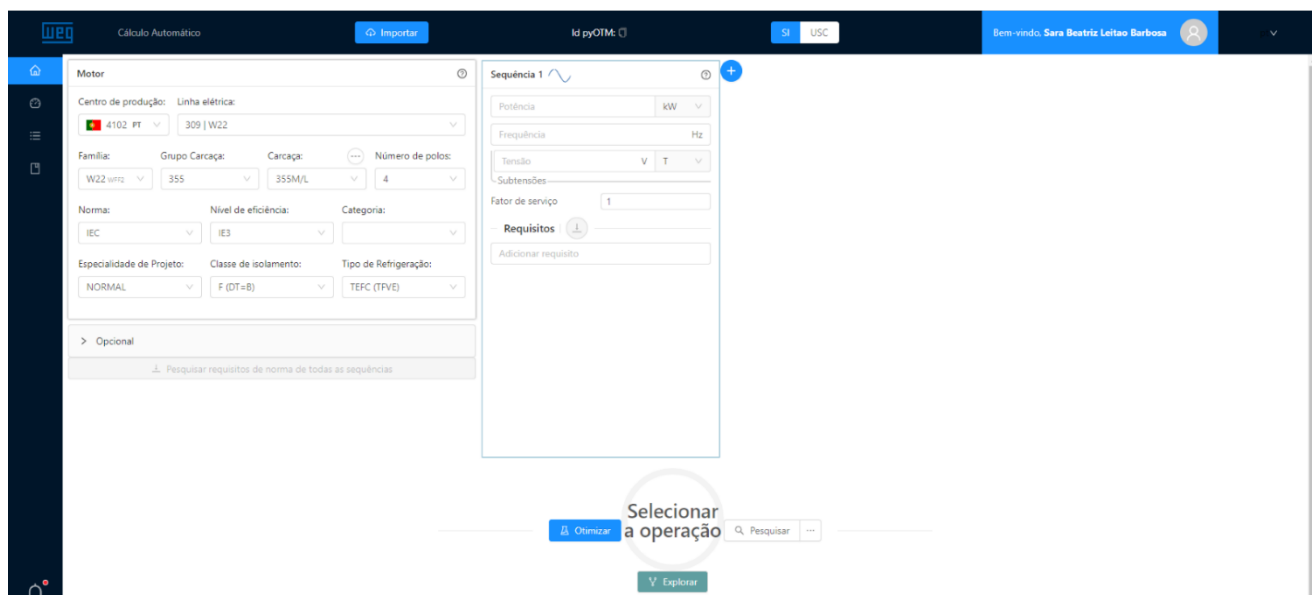


Figura 36 Interface do software pyOTM

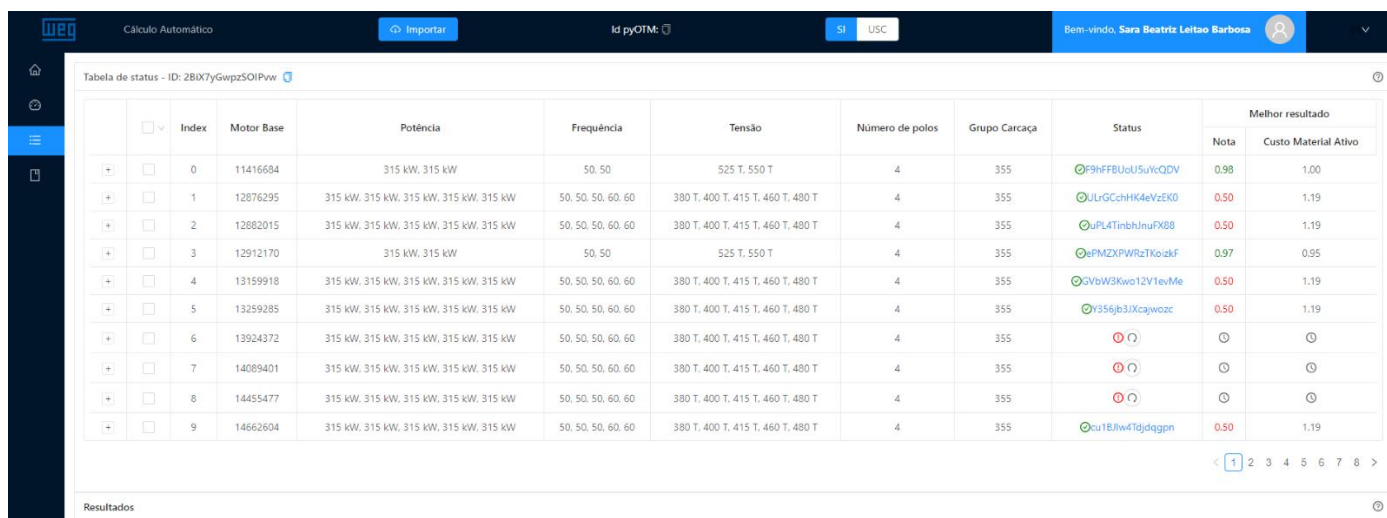
6.1.1. PARÂMETROS

- De forma que as limitações de fabrico sejam corretamente definidas é necessário a escolha do centro produtivo (neste caso, centro da WPT);
- Linha elétrica e grupo de carcaça: de acordo com a linha elétrica do motor escolhido, são preenchidos os parâmetros de norma (nível de eficiência, especialidade de projeto, classe de isolamento, refrigeração, aplicação do projeto, alguns requisitos de desempenho como elevação de temperatura e corrente de partida);
- Possibilidade de seleção de especialidades para motores com características diferentes do padrão;
- Teste para o caso de o motor operar como inversor de frequência.

6.1.2. OTIMIZAÇÃO

A funcionalidade de otimização no pyOTM foi a mais utilizada para o projeto realizado, uma vez que permite a otimização em lote de um conjunto de projetos.

Para a realização da otimização, está disponível na interface um ficheiro Excel modelo, onde é colocada a lista de motores a otimizar bem como os parâmetros a que se pretende atender. Depois disto, é gerado um ID do lote para que os resultados possam ficar guardados e possíveis de consultar sempre que necessário.



The screenshot displays the pyOTM optimization interface. At the top, there's a header with the logo, 'Cálculo Automático', an 'Importar' button, 'Id pyOTM:', a unit selector (SI/USC), and a user profile 'Bem-vindo, Sara Beatriz Leitao Barbosa'. Below the header, a table titled 'Tabela de status - ID: 2BIX7yGwpzSOIPvw' shows the results of an optimization process. The table has columns for Index, Motor Base, Potência, Frequência, Tensão, Número de polos, Grupo Carcaça, Status, and a 'Melhor resultado' section with 'Nota' and 'Custo Material Ativo'. The table contains 10 rows of data, with the first row highlighted. The 'Status' column uses colored icons to represent different optimization states: green for good, yellow for warning, and red for error. The 'Nota' column shows values like 0.98, 0.50, and 0.97. The 'Custo Material Ativo' column shows values like 1.00, 1.19, and 0.95. At the bottom, there's a 'Resultados' section and a pagination bar showing 1 to 8 results.

	Index	Motor Base	Potência	Frequência	Tensão	Número de polos	Grupo Carcaça	Status	Melhor resultado	
									Nota	Custo Material Ativo
+	0	11416684	315 kW, 315 kW	50, 50	525 T, 550 T	4	355	🟢F9HFFBuoLSuYeQDV	0.98	1.00
+	1	12876295	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🟢ULrGCcHKK4eVzEK0	0.50	1.19
+	2	12882015	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🟢uPL4TinbhJnuFX88	0.50	1.19
+	3	12912170	315 kW, 315 kW	50, 50	525 T, 550 T	4	355	🟢ePMZXPWRzTKoakf	0.97	0.95
+	4	13159918	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🟢GVbW3Kwo12V1evMe	0.50	1.19
+	5	13259285	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🟢Y356jb3jXcagwozc	0.50	1.19
+	6	13924372	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🔴🔴	🔴	🔴
+	7	14089401	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🔴🔴	🔴	🔴
+	8	14455477	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🔴🔴	🔴	🔴
+	9	14662604	315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW, 315 kW	50, 50, 50, 60, 60	380 T, 400 T, 415 T, 460 T, 480 T	4	355	🟢cu1BjIw4Tjdagpn	0.50	1.19

Figura 37 Interface da otimização no pyOTM

6.2. NEWTON

Esta ferramenta é a principal ferramenta de cálculo de motores de baixa tensão.

A maneira mais simplificada de utilizar a ferramenta é encontrar um motor base já estudado anteriormente que tenha características semelhantes aos do motor a trabalhar. Na tela “Geral”, como apresentado na figura 38, é onde são inseridos os dados de entrada, ou seja, onde o motor é caracterizado para iniciar o cálculo.

MAESTRO NEWTON

NEWTON: 1396823260* - [Released - 0.0]

Explorador

- Grupo
 - OTM4E
 - Geral**
 - Resumo dos Desempenhos
 - Identificação
 - Lâminas
 - Ranuras do Estator
 - Ranuras do Rotor
 - Núcleo Estator/Rotor
 - Resultados
 - Inversor
 - Enrolamentos
 - Enrolamento - 1
 - Desempenho / Previsão - 1
 - Desempenho
 - Previsão
 - Desempenho / Previsão - 2
 - Desempenho
 - Previsão
 - Relatório

Geral

Identificação do Motor

Tipo: Enrol. Único
Pol.C: 06
Cat: N
Ef. Lev.: IE4 / SPE
Centro: 4102
Regime Serviço: S1

Dados da Carcaça

Grupo: 250
Carc.: 250S/M
Tp. Fun.: NÃO
Mat.: Ferro Fundic
Enc.: TEFC
Fam.: WFF2

Identificação do Cálculo

Pot [W]: 37000.0
Ten [V]: 400.0
Fq [Hz]: 50.0
Pmec [W]: 110.0
FDC: 310.0
Cod:

Lâminas

Est: 6003.9333
Rot: 6003.9336
NR1: 72
NR2: 58
De1: 380.0
Di2: 85.0

Informação dos Cabos

Qtd: 6
Tipo: AWG
Bit/Sec: 8
Cmd [mm]: 799.0
Cab. Par: NÃO
PWS: NÃO

Núcleo Estator/Rotor

Cp [mm]: 310.0
Ent [mm]: 0.85
Hpu [mm]: 0.25
Hx [mm]: 2.0
Ba [mm]: 15.0
Al. Rot: EC 99.5%
Ch. tér.: SIM
Inc [mm]: 12.2
Inc [pu]: 1.0
Da [mm]: 38.5

Enrolamento Estator

Nc1: 1
Dc1: 1.32
Cam: Mista
Mat.: Cobre
Con: Triângulo
Nc2: 3
Dc2: 1.18
Passo: 1.8:10:12
Tip. Fio: WG4GR3
Lig: 2xParalelo

Induções [T]

	Vazio	Carga
Bc2 [T]	0.488	0.472
Bd2 [T]	1.328	1.286
Ben [T]	0.708	0.687
Bd1 [T]	1.406	1.375

Figura 38 Tela “Geral” do Newton

Depois disso, são inseridos os dados das lâminas do estator e rotor, correspondente ao número 1 na figura 39, dados do inversor de frequência se for o caso de ser acionado dessa forma (2) e os dados de bobinagem (3).

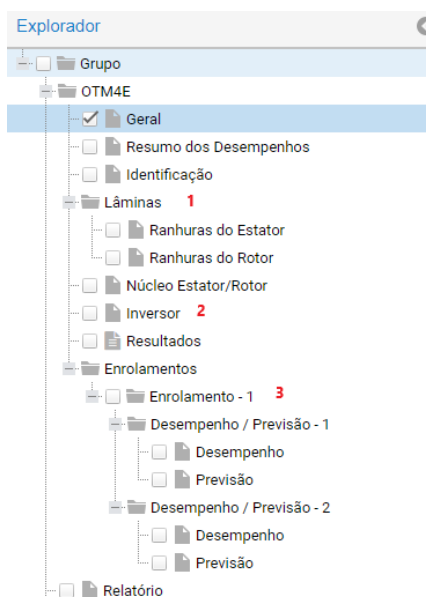
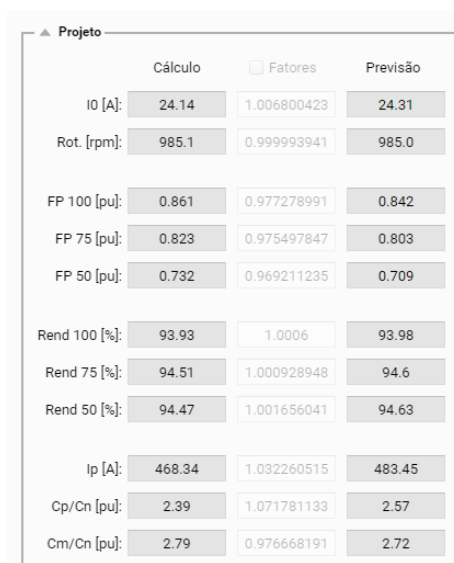


Figura 39 Explorador do Newton

Depois de todas as variáveis estarem preenchidas, é realizado o cálculo. Uma das grandes vantagens no Newton, é a utilização de fatores de previsão. Estes são multiplicadores aplicados ao desempenho calculado, resultando nos valores previstos.

A figura 40 mostra parte da tela “Previsão” no Newton. Os fatores foram criados com base num modelo estatístico que analisou a variação do desempenho dos ensaios realizados versus o calculado para uma grande amostra de motores. Estes são agrupados em lotes com o mesmo desenho de lâmina de estator e rotor, a mesma polaridade e frequência.



	Cálculo	Fatores	Previsão
IO [A]:	24.14	1.006800423	24.31
Rot. [rpm]:	985.1	0.999993941	985.0
FP 100 [pu]:	0.861	0.977278991	0.842
FP 75 [pu]:	0.823	0.975497847	0.803
FP 50 [pu]:	0.732	0.969211235	0.709
Rend 100 [%]:	93.93	1.0006	93.98
Rend 75 [%]:	94.51	1.000928948	94.6
Rend 50 [%]:	94.47	1.001656041	94.63
Ip [A]:	468.34	1.032260515	483.45
Cp/Cn [pu]:	2.39	1.071781133	2.57
Cm/Cn [pu]:	2.79	0.976668191	2.72

Figura 40 Tela “Previsão” do Newton

6.3. OTM4E5

O OTM4E5 é um software de cálculo de motores de indução e tem como principais características: a alimentação monofásica, bifásica ou trifásica, calcula até 6 tipos de enrolamento no estator e qualquer tipo de ligação dos enrolamentos do estator (estrela, triângulo, etc), alimentação PWM.

Esta ferramenta é a mais antiga das ferramentas utilizadas neste projeto, sendo que o Newton foi criado na sequência do OTM4E5. Apesar disso, é o único software disponível na Organização que permite a otimização de motores através da alteração da dimensão das ranhuras, ou seja, permite alterar dimensões ainda que não existam ferramentas em stock para a realização da mesma.

Pgc: WEG (OTM4E5/WEG)

Ini	Exp	<Ent>	Padrão	Gravar	Relat	TrfSai	TrfEnt	SelExt	SelInt	SelSeg	<Esc>	Tela	INI	
Fmt	Dad	>	Ins Seg	InsInt	Replic	Colar	Copiar	Cortar	Elimin	Inform	AltTel	Foco	Sel.	Farol
Lot	Eim	<	P2	>	Msg.:							Lot:		

Por	eng													
Apl:	OTM4E5/WEG	Senha:		Pad:	2	Usu:								
Dir:	otm_arq	Sel:	n1cT	L/P:	56	Imp:	Microsoft Print to PDF							
Dir. Trab.							Dir. Leit.							
RAIZ	%appdata%\OTM2E_DATA							Q:\APPS_\NONSTD\PGC\DATA\BASIC_DATA						
.jan	\Janelas							\Janelas						
.nor	\Janelas							\Janelas						
.exp	\ArqExp							\ArqExp						
.trf	%tmp%							%tmp%						
.prj	\Projetos							\TRIF_BASE\Projetos						
.oot	\0pc0tn							\TRIF_BASE\0pc0tn						
.opc	\0pcCalc							\0pcCalc						
.mot	\Motores							\TRIF_BASE\Motores						
.amb	\AmbN							\TRIF_BASE\AmbN						
.lam	\Laminas							\Laminas						
.mgn	\MatMag							\MatMag						
.inv	\Inversor							\Inversor						
.apr	\ArqPrecos							\ArqPrecos						

Figura 41 Interface do OTM4E5

7. DESENVOLVIMENTO

O processo de otimização dividiu-se em duas partes: utilizando apenas ferramentas já existentes e com recurso a possíveis novas ferramentas que auxiliem na máxima otimização dos motores. Para a primeira, foram necessárias as ferramentas do pyOTM e Newton e, para a segunda, as ferramentas Newton e OTM4E5.

7.1. OTIMIZAÇÃO SEM UTILIZAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS

Nesta primeira fase, o foco incide na diminuição do comprimento do bloco, tendo em conta que se pretende atender às restantes características, de forma que o projeto não perca credibilidade. De todas as características foi dada especial atenção ao rendimento, para que se cumpra com o nível de eficiência exigido nos motores em trabalho.

7.1.1. CRITÉRIOS DA LISTAGEM DE MOTORES

A lista de motores a otimizar foi obtida tendo em conta uma série de requisitos.

- O primeiro passo foi obter a listagem dos motores vendidos no ano anterior, 2022, começando a otimização dos motores com maior número de vendas para os motores com menor número de vendas. Estes foram agrupados por carcaça, polaridade e potência;
- Outra questão que teve de se ter em atenção, foi o facto de o Brasil já ter trabalhado em motores comuns aos da WPT. Desta forma, foi realizada uma seleção de motores já otimizados pela casa mãe e excluídos da listagem;
- Os motores a utilizar na ferramenta pyOTM foram escolhidos considerando motores padrão, sem variantes, como por exemplo, atmosferas explosivas, uma vez que necessitam de precauções especiais;
- Foram ainda apenas considerados motores com a tensão padrão de 400V ou motores multi-tensão com tensão centrada em 400V;

- Para que este processo possa ser padronizado, o estudo foi feito apenas para potências catalogadas;
- A escolha dos motores a otimizar também teve de ter em consideração nova etapa do Regulamento da União Europeia, que restringe a conceção de um conjunto de motores ao nível de eficiência IE4 na Europa a partir do dia 1 de julho de 2023. Desta forma, os motores de 2, 4 e 6 polos, com potências 75kW a 200kW vendidos no ano anterior com oferta de nível de eficiência IE3, deixam de fazer parte da lista de otimização uma vez que deixam de poder ser ofertados.

Depois de realizada toda esta seleção, foram a teste 1341 motores, correspondentes a 24 gamas distintas.

7.1.2. OTIMIZAÇÃO

Como já referido anteriormente, a otimização foi feita pela ordem de maior volume de vendas no ano anterior, depois da contabilização dos mesmos feita tendo em conta carcaça, polaridade e potência. Considerando que o foco desta primeira parte é reduzir o comprimento do bloco, é necessário ter em atenção as consequências que advém da diminuição da chapa magnética.

Demonstrando através de um exemplo dos testes realizados:

- **355M/L 4P 315kW:** neste primeiro caso, através da simulação no pyOTM obteve-se uma proposta de diminuição do bloco de 530 mm para 510 mm.

Através da figura 42, retirada do Newton, consegue-se visualizar a bobinagem atual do motor. Esta está realizada em camada dupla, com 8 espiras (4 +4) e 16 fios de 1.32 mm.

Enrolamento

Polaridade: 4 Enrolamento: Fio circular Observação:

Camada: Dupla Material: Cobre

Passo de Bobina: 1:10:12:14:16:18:20 Tipo de Fio: WG4GR3

Tipo de Enrolamento: Concêntrico G/F: 4 B/G: 6 PB: 19

Multipl. Cabeça Bobina: 1.05 Fio 1: 16 x 1.32 [mm]

Posição Enrolamento: M Fio 2: x [mm]

Espiras/Bobina

Espiras Maestro [1-8]: 4.0

Figura 42 Bobinagem atual do motor 355M/L 4P 315kW

Com a passagem para um bloco menor (510 mm), o primeiro impacto reflete-se no aquecimento do motor. Com a diminuição da chapa magnética, as perdas magnéticas aumentam e, conseqüentemente, o aquecimento do motor também sofre o aumento. Como é possível observar, na figura 43 (que corresponde às perdas atuais do motor), as perdas no ferro, P_{fe} [W], são inferiores às perdas representadas na figura 44, que correspondem às perdas após a alteração para um bloco menor.

	I [A]	P [W]	Rot. [rpm]	Pm [W]	Pfe [W]	Pj1 [W]	Pj2 [W]	Ps [W]	Ph [W]	Pt [W]
Vazio	220.11	5089.5	1500.0	1579.9	2893.2	570.1	0.0	0.0	46.2	5089.5
Carga	555.53	326126.2	1491.3	1564.0	2778.6	3631.4	1850.3	870.7	431.2	11126.2

Figura 43 Perdas do motor atual – 355M/L 4P 315kW

	I [A]	P [W]	Rot. [rpm]	Pm [W]	Pfe [W]	Pj1 [W]	Pj2 [W]	Ps [W]	Ph [W]	Pt [W]
Vazio	237.39	5410.4	1500.0	1579.9	3161.2	623.4	0.0	0.0	45.8	5410.4
Carga	562.64	326019.2	1492.0	1565.3	3013.9	3502.1	1701.1	837.2	399.5	11019.2

Figura 44 Perdas do motor com bloco de 510 mm – 355M/L 4P 315kW

Para além disso, o aumento das perdas levou a uma diminuição do fator de potência face ao motor base, tal como mostra a figura 45. Do lado do “projeto”, é possível observar as características do motor alterado e do lado “Folha de Dados”, as características originais do projeto.

Projeto			Folha de Dados	
	Cálculo	☐ Fatores	Previsão	
I0 [A]:	237.39	0.960044398	227.9	I0 [A]: 211.0 99.9%
Rot. [rpm]:	1492.0	0.999901027	1491.9	Rot. [rpm]: 1491.0 79.1%
FP 100 [pu]:	0.836	0.982775027	0.821	FP 100 [pu]: 0.83 99.9%
FP 75 [pu]:	0.788	0.986708389	0.777	FP 75 [pu]: 0.79 99.9%
FP 50 [pu]:	0.683	0.98959431	0.675	FP 50 [pu]: 0.69 99.9%

Figura 45 Diferença no fator de potência – 355M/L 4P 315kW

Uma vez que não se pretende que o projeto seja menos rentável do que o original, é necessário que seja feita uma compensação na bobinagem do projeto proposto, para que a diminuição do valor de fator de potência não seja um ponto crítico na otimização dos motores.

Desta forma, como apresentado na figura 46, foi aumentado o número de espiras e colocado um menor número de fios, ou seja, diminuiu-se a quantidade de cobre utilizada. Assim, passou-se de um número total de espiras de 8 para 9 (5+4).

Enrolamento

Polaridade: 4
Enrolamento: Fio circular
Observação: Created by pyOTM ID: Y22v

Camada: Dupla
Material: Cobre

Passo de Bobina: 1:10:12:14:16:18:20
Tipo de Fio: WG4GR3

Tipo de Enrolamento: Concêntrico
G/F: 4
B/G: 6
PB: 19

Multipl. Cabeça Bobina: 1.05
Fio 1: 11 x 1.32 [mm]

Posição Enrolamento: M
Fio 2: 3 x 1.18 [mm]

Espiras/Bobina

Espiras Maestro [1-8]: 5.0 4.0 5.0 4.0 5.0 4.0

Figura 46 Bobinagem do motor proposta – 355M/L 4P 315kW

A diminuição do cobre também não é um fator favorável no que toca ao aquecimento, no entanto, conseguiu-se ainda assim mantê-lo dentro do limite exigido, no caso de 80K.

Relativamente à eficiência, tal como é possível observar na figura 47, o facto de ser diminuído o comprimento do bloco conduz a uma redução do rendimento, mas foi possível manter ainda assim o nível de eficiência estabelecido, no caso, nível IE3.

▲ Identificação do Cálculo

Ten [V]:	400.0	Con:	Triângulo	Ef. Lev.:	IE3 / PE
Fq [Hz]:	50.0	Lig:	4xParalelo	FDC:	339.0
Pot [W]:	315000.0	Norma:	IEC	Ta [°C]:	25.0
Pm [W]:	1580.0	Categoria:	N	DTi [K]:	79.0
Regime:	S1	Pol:	4	DTe [K]:	79.1

▲ Projeto

	Cálculo	☐ Fatores	Previsão
I0 [A]:	171.95	0.960044398	165.08
Rot. [rpm]:	1489.2	0.999901027	1489.0
FP 100 [pu]:	0.87	0.982775027	0.855
FP 75 [pu]:	0.844	0.986708389	0.833
FP 50 [pu]:	0.772	0.98959431	0.764
Rend 100 [%]:	96.27	1.0009	96.35
Rend 75 [%]:	96.47	1.000218836	96.49
Rend 50 [%]:	96.21	1.001063674	96.31

▲ Folha de Dados

	Atribuído	Prob. At.
I0 [A]:	160.0	99.9%
Rot. [rpm]:	1488.0	89.1%
FP 100 [pu]:	0.83	100.0%
FP 75 [pu]:	0.79	100.0%
FP 50 [pu]:	0.69	100.0%
Rend 100 [%]:	96.6	84.5%
Rend 75 [%]:	96.5	92.8%
Rend 50 [%]:	96.1	94.2%

Figura 47 Caraterísticas do projeto proposto – 355M/L 4P 315kW

É possível atingir desta forma uma redução substancial do custo do projeto deste motor, tanto pela quantidade de chapa magnética que diminuiu, mas também pela redução da quantidade de cobre. Na tabela abaixo, está representada a comparação do projeto atual com o projeto proposto.

Descrição	Projeto atual	Projeto proposto
Grupo de carcaça	355	355
Diâmetro Externo Estator [mm]	600	600
Diâmetro Interno Estator [mm]	395	395
Comprimento Bloco [mm]	530	510
Espiras	[4.0]	[5.0, 4.0, 5.0, 4.0, 5.0, 4.0]
Fios	16.0 x 1.32	11.0 x 1.32 / 3.0 x 1.18
Passo de Bobina	1:10:12:14:16:18:20	1:10:12:14:16:18:20
Enchimento	0.749	0.744
Camada	Dupla	Dupla
Peso condutor Rotor [kg]	43.176	41.916
Peso do Enrol. [Kg]	102.522	94.956

Figura 48 Comparação dos projetos atual e proposto - 355M/L 4P 315kW

7.1.3. RESULTADOS

Dos motores submetidos a teste, foi possível otimizar 490 projetos, correspondentes a 10 gamas diferentes, o que corresponde a uma otimização de, aproximadamente, 37% dos motores testados.

Após esta análise, o próximo passo foi o cálculo do ganho obtido, através de uma comparação com o projeto atual de cada gama de motor e o projeto a ser proposto. Dessa forma foi necessário obter as seguintes informações do projeto atual e do projeto proposto:

- Listagem dos itens de referência dos circuitos de estator e rotor correspondentes ao respectivo comprimento de bloco utilizado;
- Listagem dos quilogramas de cobre utilizados no enrolamento;

Posto isto, com o auxílio do Departamento de Compras e Suprimentos, obteve-se a lista dos custos associados ao projeto elétrico atual e proposto de cada motor (anexo G):

$$\text{Custo Ferragem} = (\text{Cus. estator bobinado} + \text{Cus. do cobre}) + \text{Cus. Rotor Injetado} \quad (10)$$

Desta forma, foi possível calcular o ganho obtido através da seguinte equação:

$$\text{Ganho obtido} = (\text{Ferragem atual} - \text{Ferragem Proposta}) \times n^{\circ} \text{ motores vendidos} \quad (11)$$

Na figura 49 estão apresentados os ganhos finais obtidos com a otimização dos motores listados. O resultado obtido está relacionado com as vendas do último ano (2022) e com os custos dos materiais à data da realização da análise. É importante que seja feita esta ressalva, uma vez que o custo dos materiais, em especial do fio de cobre, é um fator que varia bastante num curto espaço de tempo.

Descrição	Saving		
	Consumo anual previsto (Último ano)	Variação custo	Saving anual previsto (Último ano)
MOTOR 315kW 4P 355M/L WFF2 IE3	165	135.80 €	22 407.17 €
MOTOR 315kW 4P 355M/L WFF2 IE4	9	215.46 €	1 939.15 €
MOTOR 355kW 4P 355M/L WFF2 IE3	91	193.04 €	17 566.51 €
MOTOR 260kW 4P 355M/L WFF2 IE3	69	232.22 €	16 023.51 €
MOTOR 300kW 4P 355M/L WFF2 IE3	18	153.23 €	2 758.23 €
MOTOR 220kW 4P 315L WFF2 IE3	59	255.59 €	15 079.83 €
MOTOR 37kW 6P 250S/M WFF2 IE4	11	121.11 €	1 332.22 €
MOTOR 45kW 6P 280S/M WFF2 IE4	7	143.47 €	1 004.27 €
MOTOR 220kW 2P 315L WFF2 IE3	23	52.80 €	1 214.43 €
MOTOR 315kW 2P 355M/L WFF2 IE3	38	219.34 €	8 334.77 €
		Total	87 660.10 €

Figura 49 Saving anual previsto – primeira otimização

7.1.4. PERSPETIVAS PARA FUTURO

Este resultado, como é possível observar, foi bastante positivo e promissor para a empresa. As perspetivas para futuro são apresentar e discutir estas propostas em Comissão, não só internamente como à WEG Brasil, uma vez que a linha W22 em que se trabalhou, é ampla a várias organizações.

Se, efetivamente, as mesmas forem devidamente clarificadas e aprovadas, será atualizada a base de dados com esta nova padronização, o que significa que o desperdício será muito menor a nível mundial e, consequentemente, obtém-se ganhos exponencialmente maiores.

7.2. OTIMIZAÇÃO COM UTILIZAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS

A simulação de utilização de novas ferramentas foi feita através no OTM4E5. O primeiro requisito incide sobre encontrar projetos em que já tenham um cálculo no software Newton.

Procedimento:

1. Inicialmente é necessário preencher toda a informação do motor no programa, como por exemplo:

- Tela “Opç/Plc” – Definição de campos básicos como frequência, tensão, potência e perdas mecânicas.

Figura 50 Tela Opç/Plc – OTM4E5

- Ranhuras - Ao preencher as dimensões da ranhura (Figura 46), é aberta uma tela onde é possível visualizar o desenho lâmina de estator e rotor, tal como na figura 51.

Pgc: WEG (OTM4E5/WEG)

Ini	Exp	<Ent>	Aplic	Gravar	Relat	TrfSai	TrfEnt	SelExt	SelInt	SelSeg	<Esc>	Tela	TRB	OTMTRI
Fmt	Dad	>	FchUm	FchTd	Lig/Des	Colar	Copiar	Cortar	Eliminar	Inform	AltTel	Foco	Sel.	Farol
Lot	Fim	<	P2	>	Msg:							Tela	Ore	A G R

otn.	Projeto	OpçOtin.	Val0tin1	Val0tin2	pro:ndimo
prj.	1	355m14p	Geral	Opç/Plc	Motor
mot.	355ML4P	Núcleo	Enj.Enr.	Material	Ext/Pesos

nuc.	lan.*3	Ranhura do estator	ie:	ir:
Ranhura	1	2	3	4
ran.	2	3	4	5
Ent	Sai	Er	eR	Sbr
loc	Sbr	Sbr	Sbr	
ocr	1.00000	2.40000	6.40000	
hp	4.00000	0.00000	2.20000	
bp	0.00000	0.00000	0.00000	
rp	1.66000	0.91000	1.31000	
hc1	8.00000	3.15000	9.75000	
bc1	0.00000	0.00000	0.00000	
rc1	34.47000	6.74000	47.90000	
hc2	0.00000	3.15000	0.00000	
bc2	5.50000	0.00000	2.30000	
ac1	22.53846	30.01838	15.04109	
acm	2.50041	0.00000	3.07319	
st	380.1414	22.66425	358.2121	

Área da	Ranh. (mm2)
Re	384.14
Ar	394.95
Largura do	Dente (mm)
bde	
bdr	
Altura da	Coroa (mm)
hce	
hcr	
n	0.807
Bp	3.042

gap.	g:	2.1000
hpu	0.3000	
a1	0.9320	
a2	1.0000	
pac.	cp:	600.0
ai:	1.000	
hx:	2.000	
dcr:	0.000	
exr:	0.000	
dcg:	0.000	
inc:	17.2	

Comprimento bloco

Ranuras do rotor

Figura 51 Indicação das ranhuras no OTM4E5

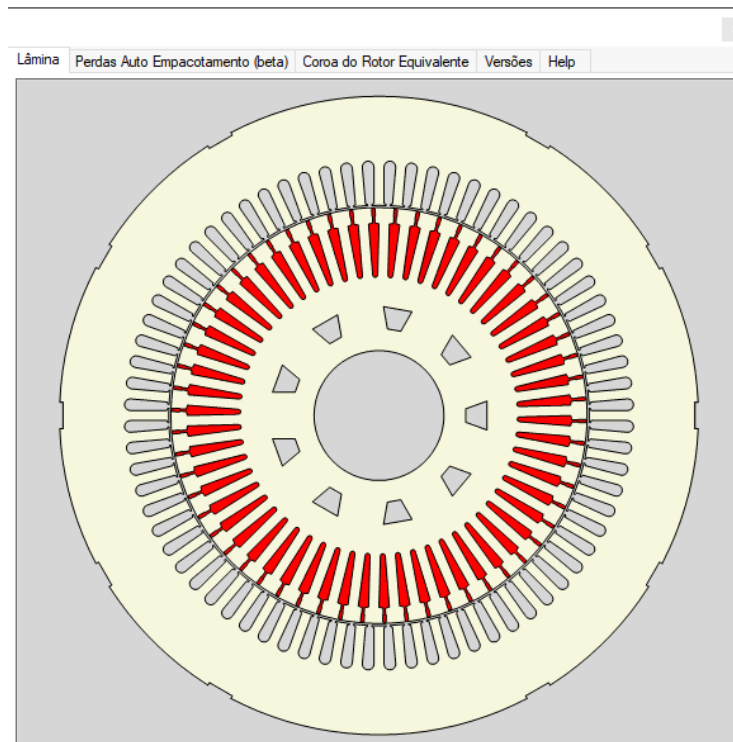


Figura 52 Lâmina de estator e rotor

- Materiais – Outro ponto necessário a inserir é a definição dos materiais a utilizar, o seu peso específico e respetiva condutividade. No caso, são

Nome:	qma	Unidade:		Atributos:	Ent Fra	Sair
Definição:	<u>Condutividade do material (relativa ao cobre)</u>					
Observ.:	Valores usuais: ESTATOR: Cobre: 1; Alumínio: .63 ROTOR: Cobre .9; Alumínio 99,7%: 0.52; Liga A210: 0.27 Este valor deve ser SEMPRE informado					

- Tela “Cnj. Enr.” – Nesta tela são inseridos todos os valores referentes à bobinagem do motor retirados do Newton, tais como, as espiras, fios e passo.

[illegible]

58

3. Otimização: De forma a iniciar uma otimização de um motor, é necessário limitar as variáveis que podem ser deixadas “livres”, ou seja, as que serão alteradas na otimização (independentes) e definir as variáveis que são necessárias restringir. Na figura 55 está representada a tela onde estas informações são colocadas.

- Variáveis Independentes:

- “eb”: corresponde ao número de espiras;
- “dc1”: correspondente ao número de fios de cobre;
- “cp”: comprimento do bloco;
- “st”, “bc1”, “hp”, “bp”: correspondentes às dimensões das ranhuras do estator e ranhuras do rotor.

- Restrições:

- “wp”: variável que limita as perdas totais, tendo em conta o rendimento. Isto confere uma melhor precisão na otimização, principalmente quando se tratam de motores com rendimento elevados. A determinação da restrição é feita segundo a equação:

$$wp = \frac{1}{\eta} - 1 \quad (12)$$

- “i “: corresponde ao limite máximo para a corrente nominal. Esta restrição é importante, uma vez que restringe de forma indireta o fator de potência. É determinada através das equações:

$$i = \frac{I_A}{I_{base}} \quad (13)$$

$$I_A = \frac{W_n[W]}{\sqrt{3} \times U [V] \times \eta \times FP} \quad (14)$$

$$I_{base} = \frac{W_n[W]}{U [V]} \quad (15)$$

- “je”, “ja”, “jb” e “bm”: fatores relacionados com valores já impostos no código fonte para controlo de induções;

- “dte”: limitação do valor máximo de aquecimento pretendido;
- “s%”: correspondente ao limite de deslizamento;
- “fc”: ao utilizar este parâmetro da ranhura, é imposto como limite máximo, o maior enchimento já realizado em projeto, sendo que o mínimo considera-se 0.73.

otm. Projeto OpçOtim. Val0tim1 Val0tim2 pro: ndlmo						
oot. 355ml4p				cmp: 8081.5		
mxi: 5 pas: 9 3 1 eti: 0 cut: 1.000						
fo:		def: 1.146		sol:		etp:
v.		nom		no		it:
npr. 1 r. nom no acp tp lim vab vre pso						
1	eb	1	0	5.000	5.000	1.000
2	dc1	1	0	1.320	1.320	1.000
3	cp	0	0	600.0	600.0	1.000
4						
5	st	1	0	380.1	380.1	1.000
6	bc1	1	0	8.000	8.000	1.000
7	st	2	0	22.66	22.66	1.000
8	bc1	2	0	3.150	3.150	1.000
9	st	3	0	358.2	358.2	1.000
10	bc1	3	0	9.750	9.750	1.000
11	hp	3	0	6.400	6.400	1.000
12	bp	3	0	2.200	2.200	1.000
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

↑

↑

Restrições

Variáveis independentes

Figura 55 Definição das variáveis

- Fluxo de otimização:



Figura 56 Fluxo de otimização no OTM4E5

7.2.1. RESULTADOS

No caso desta segunda otimização, foi utilizada uma das gamas de motores que não foi possível otimizar com as ferramentas pyOTM e Newton: motores de carcaça 355M/L, de polaridade 4 e potência 330kW.

Na figura 57 estão apresentadas as dimensões das ranhuras do motor após a otimização.

otm.	Projeto	OpçOtim.	Val0tim1	Val0tim2	pro: Ndim0								
prj.	1	355ML4P\$1	Geral	Opç/Plc	Motor	Elementos	Desemp.	Resumo	Valores				
mot.	355ML4P\$1	Núcleo	Cnj.Enr.	Material	Ext/Pesos								
nuc.													
lam.	355ML4P\$1	ie:				ir:							
Ranhuras	Dimens.	obs:											
ran.	1	2	3	4	5	Área da		gap.					
Ent Sai						Ranh. (mm2)		g: 2.1000					
loc	Er	eR	eR			Ae: 400.37		hpu: 0.3000					
ocr	Sbr	Sbr	Sbr			Ar: 383.00		a1: 0.9320					
hp	1.00000	2.40000	5.19693					a2: 1.0000					
bp	4.00000	0.00000	2.74955					pac.					
rp	0.00000	0.00000	0.00000			Largura do		cp: 546.8					
hc1	1.56486	1.04702	1.23929			Dente (mm)		ai: 1.000					
bc1	7.54148	3.62429	9.22369			bde:		hx: 2.000					
rc1	0.00000	0.00000	0.00000			bdr:		dcr: 0.000					
hc2	37.67874	7.61396	50.34985					exr: 0.000					
bc2	0.00000	3.62429	0.00000			Altura da		dcg: 0.000					
rc2	5.41094	0.00000	1.90588			Coroa (mm)		inc: 17.2					
ac1	22.53846	30.01838	15.04109			hce:							
acm	2.50041	0.00000	3.07319			hcr:							
st	396.3784	29.49249	339.2181			m: 0.735							
						Bp: 2.542							

Figura 57 Dimensões das ranhuras após otimização

- Comprimento do bloco: com a otimização, foi possível a redução do bloco de 600 mm para 550 mm;
- Ranhura do estator:

Uma vez que com a redução do bloco, o aquecimento do motor tende a aumentar, uma solução para compensar esse aumento passa pelo aumento da altura ranhura do estator. Assim, a proporção de cobre utilizado aumenta, o que é favorável para a elevação da temperatura. Houve, assim, um aumento da altura de cerca de 3 mm (hc2) e da área total da ranhura do estator (“st” passou de 380 mm² para 396 mm²).

➤ Ranhura do Rotor:

De forma a compensar o valor de fator de potência, ao contrário do que aconteceu com a área da ranhura do estator, a do rotor aumentou. “st” passou de 381mm^2 para 368mm^2 . O principal parâmetro afetado foi o raio, RC2, que tinha um valor de 2.3 mm e passou a ter um valor de 1.9 mm, de forma que a densidade do fluxo magnético seja menor.

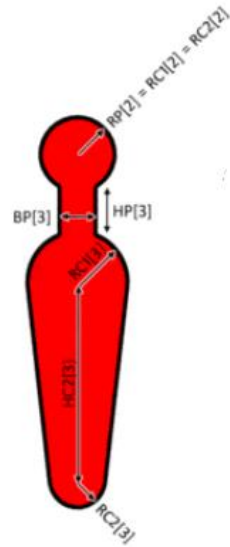


Figura 58 Exemplificação da ranhura do rotor

7.2.2. GANHO

Para o cálculo do ganho, é utilizada a variável “cmp” existente no OTM4E5. Esta corresponde ao custo médio do material ativo do projeto, tendo em conta a lista de materiais que foram inicialmente colocados. Apesar do mesmo não ser exatamente o correspondente na realidade, é fidedigno fazer a análise do ganho que se pode obter com a otimização realizada.

Desta forma, na tabela 4 é possível identificar o custo retirado do software. Como já realizado anteriormente, o cálculo foi realizado considerando as vendas do ano anterior e, assim, foi feito o cálculo do custo total anual para cada um dos casos.

No entanto, foi necessário ter em consideração o custo adicional da compra de novas ferramentas para ranhuração do estator e rotor. Esta informação foi obtida com a ajuda do Departamento de Engenharia Industrial e, depois disto, foi calculado o real custo do projeto otimizado.

Ainda com o acréscimo das ferramentas, obteve-se um *saving* positivo e é de realçar que, seria um investimento efetivo na empresa, o que significa que a obtenção da mesma seria viável e compensaria os seus custos iniciais.

Tabela 4 Saving anual previsto – segunda otimização

355M/L 4P 330kW	Custo (€)	Consumo anual previsto (2022)	Preço Ferramenta estator (€)	Preço Ferramenta rotor (€)	Custo total anual (€)
Projeto atual	4 499.20 €	44			197 964.80 €
Projeto otimizado	4 177.10 €	44	1200	1000	185 992.40 €
					SAVING
					11 972.40 €

7.2.3. PERSPETIVAS PARA FUTURO

No caso deste segundo processo, este não se encontrava num plano de ações, ao contrário do caso anterior. Desta forma, esta otimização servirá como base para um estudo mais completo para as diferentes gamas a realizar no futuro, de forma a entender se a aquisição de novas ferramentas e os valores de desempenho obtidos são soluções viáveis capazes de formular uma proposta íntegra.

Apesar do resultado ter sido bastante positivo neste motor em estudo, é necessária uma amostragem substancial para avaliar a viabilidade da proposta.

8. CONCLUSÕES

O motor elétrico de indução trifásico é uma máquina que precisa de ser minuciosamente preparada e explorada uma vez que está presente em imensas ferramentas do quotidiano, estando muitos deles expostos a ambientes altamente perigosos.

Para além de serem vários os materiais que o constituem e que são necessários ter em conta para o projeto, são também vários os critérios mínimos a ter em conta. Apesar dos requisitos do cliente serem os prioritários aquando da realização do projeto, as normas internacionais (*IEC*), por exemplo, apresentam diferentes critérios que são obrigatoriamente de ser cumpridos, bem como aspetos da construção e forma física de certos componentes, como é o caso das ranhuras nas chapas ferromagnéticas.

Desta forma, para que no projeto realizado em prol da disciplina de TEDSEE fosse possível chegar a uma redução significativa do custo, foi necessário ter em conta que a otimização tem de ser feita tendo em conta todos estes aspetos.

Ao longo da realização deste projeto, foram encontradas algumas adversidades como o facto de ter de se conciliar a otimização já realizada pela WEG Brasil e, desta forma, estar pendente da disponibilidade dos colegas e do seu fuso horário para marcação de reuniões para discussão do trabalho. A grande dificuldade prendeu-se com a conciliação entre as tarefas do trabalho e a realização do projeto dedicado à disciplina. O processo tornou-se, assim, mais lento e exigiu uma capacidade de organização extra.

Relativamente a resultados, conseguiu-se efetivamente chegar ao objetivo proposto, com um ganho para a primeira otimização de, aproximadamente, 87 000 €, o que impacta substancialmente tanto a nível económico para a empresa, como a nível ambiental com a redução da utilização de matérias-primas. Já na segunda fase do projeto, apesar de se ter conseguido otimizar integralmente uma gama de motores, devido às adversidades já referidas anteriormente, não foi possível explorar uma quantidade substancial que permitisse já a realização de uma proposta. No entanto, o processo de obtenção de resultados foi

explorado, facilitando a continuação do estudo para diferentes gamas no futuro, sendo que os resultados obtidos oferecem uma perspectiva promissora.

Em conclusão, a realização deste projeto foi uma grande vantagem a nível de experiência pessoal, no que toca à conciliação de tantas e diferentes tarefas e foi possível atingir um resultado bastante positivo relativamente aos objetivos propostos antes da realização do mesmo.

Referências Bibliográficas

- [1] Austin Hughes e Bill Drury (2019). Induction motor – Rotating field, slip and torque, páginas 161-190. Newnes.
- [2] WEG. Motores Elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção.
- [3] WEG. Motores Elétricos: Guia de especificação.
- [4] I Boldea; S A Nasar (2002). The induction machine handbook. Electric power engineering series. (2ª edição). CRC Press.
- [5] P. L. Alger e R. E. Arnold (1976). The history of induction motors in america. Proceedings of the IEEE, 64(9).
- [6] Hambley, A. R. (2011). Electrical Engineering – Principles and Applications. (5ª edição). Upper Saddle River: Prentice Hall.
- [7] Rizzoni, G. (2004). Principles and Applications of Electrical Engineering. (4ª edição). Boston: McGraw-Hill.
- [8] Petruzella, F. D. (2009). Electric Motors and Control Systems. New York: McGraw-Hill.
- [9] Universidade de São Paulo. Lei da Indução de Faraday. Acedido em: 15, fevereiro, 2023, em: Microsoft Word - 11LeiFaraday.doc (usp.br).
- [10] Gonçalves, M. J., Neves, B. C. (2020). MELEC: Motores de Indução Trifásicos. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Eletrotécnica.
- [11] Wikipedia. Eddy current. Wikimedia Foundation, 2021. Disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Eddycurrent>.
- [12] Stephen J. Chapman. (2012). Chapter 6 – Induction Motors. McGraw-Hill, 5ª edição.
- [13] WEG. Recomendações e análise de projetos.
- [14] IEC 60034-1. (2022). Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance.
- [15] WEG. W22 – Three-Phase Electric Motor.
- [16] IEC 60034-30-1. (2014). Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motores (IE code)

- [17] IEC 60034-6. (2013). Rotating electrical machines – Part 6: Methods of Cooling.
- [18] Abdulsamed Lordoglu; Mehmet Onur Gulbahce; Derya Ahmet Kocabas. (2021). A comprehensive Disturbing Effect Analysis of Multi-Sectional Rotor Slot Geometry for Inducion Machines in Electrical Vehicles. IEEE Journals & Magazine. Vol. 9.
Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9386112>

Anexo A. Limites de eficiência nominal para IE1

Para 50 Hz:

P_N kW	Number of poles/synchronous speed min ⁻¹			
	2/3000	4/1500	6/1000	8/750
0,12	45,0	50,0	38,3	31,0
0,18	52,8	57,0	45,5	38,0
0,20	54,6	58,5	47,6	39,7
0,25	58,2	61,5	52,1	43,4
0,37	63,9	66,0	59,7	49,7
0,40	64,9	66,8	61,1	50,9
0,55	69,0	70,0	65,8	56,1
0,75	72,1	72,1	70,0	61,2
1,1	75,0	75,0	72,9	66,5
1,5	77,2	77,2	75,2	70,2
2,2	79,7	79,7	77,7	74,2
3	81,5	81,5	79,7	77,0
4	83,1	83,1	81,4	79,2
5,5	84,7	84,7	83,1	81,4
7,5	86,0	86,0	84,7	83,1
11	87,6	87,6	86,4	85,0
15	88,7	88,7	87,7	86,2
18,5	89,3	89,3	88,6	86,9
22	89,9	89,9	89,2	87,4
30	90,7	90,7	90,2	88,3
37	91,2	91,2	90,8	88,8
45	91,7	91,7	91,4	89,2
55	92,1	92,1	91,9	89,7
75	92,7	92,7	92,6	90,3
90	93,0	93,0	92,9	90,7
110	93,3	93,3	93,3	91,1
132	93,5	93,5	93,5	91,5
160	93,8	93,8	93,8	91,9
200	94,0	94,0	94,0	92,5
250	94,0	94,0	94,0	92,5
315	94,0	94,0	94,0	92,5
355	94,0	94,0	94,0	92,5
400	94,0	94,0	94,0	92,5
450	94,0	94,0	94,0	92,5
500 up to 1 000	94,0	94,0	94,0	92,5

Para 60 Hz:

P_N kW	Number of poles/synchronous speed min ⁻¹			
	2/3600	4/1800	6/1200	8/900
0,12	57,5	62,0	48,0	36,0
0,18	62,0	66,0	52,5	40,0
0,25	64,0	68,0	57,5	50,5
0,37	70,0	70,0	62,0	57,5
0,55	72,0	74,0	66,0	59,5
0,75	74,0	77,0	72,0	64,0
1,1	78,5	79,0	75,0	73,5
1,5	81,0	81,5	77,0	77,0
2,2	81,5	83,0	78,5	78,0
3,7	84,5	85,0	83,5	80,0
5,5	86,0	87,0	85,0	84,0
7,5	87,5	87,5	86,0	85,0
11	87,5	88,5	89,0	87,5
15	88,5	89,5	89,5	88,5
18,5	89,5	90,5	90,2	88,5
22	89,5	91,0	91,0	90,2
30	90,2	91,7	91,7	90,2
37	91,5	92,4	91,7	91,0
45	91,7	93,0	91,7	91,0
55	92,4	93,0	92,1	91,5
75	93,0	93,2	93,0	92,0
90	93,0	93,2	93,0	92,5
110	93,0	93,5	94,1	92,5
150 up to 1 000	94,1	94,5	94,1	92,5

Anexo B. Limites de eficiência nominal para IE2

Para 50 Hz:

P_N kW	Number of poles/synchronous speed min ⁻¹			
	2/3000	4/1500	6/1000	8/750
0,12	53,6	59,1	50,6	39,8
0,18	60,4	64,7	56,6	45,9
0,20	61,9	65,9	58,2	47,4
0,25	64,8	68,5	61,6	50,6
0,37	69,5	72,7	67,6	56,1
0,40	70,4	73,5	68,8	57,2
0,55	74,1	77,1	73,1	61,7
0,75	77,4	79,6	75,9	66,2
1,1	79,6	81,4	78,1	70,8
1,5	81,3	82,8	79,8	74,1
2,2	83,2	84,3	81,8	77,6
3	84,6	85,5	83,3	80,0
4	85,8	86,6	84,6	81,9
5,5	87,0	87,7	86,0	83,8
7,5	88,1	88,7	87,2	85,3
11	89,4	89,8	88,7	86,9
15	90,3	90,6	89,7	88,0
18,5	90,9	91,2	90,4	88,6
22	91,3	91,6	90,9	89,1
30	92,0	92,3	91,7	89,8
37	92,5	92,7	92,2	90,3
45	92,9	93,1	92,7	90,7
55	93,2	93,5	93,1	91,0
75	93,8	94,0	93,7	91,6
90	94,1	94,2	94,0	91,9
110	94,3	94,5	94,3	92,3
132	94,6	94,7	94,6	92,6
160	94,8	94,9	94,8	93,0
200 up to 1 000	95,0	95,1	95,0	93,5

Para 60 Hz:

P_N kW	Number of poles/synchronous speed min ⁻¹			
	2/3600	4/1800	6/1200	8/900
0,12	59,5	64,0	50,5	40,0
0,18	64,0	68,0	55,0	46,0
0,25	68,0	70,0	59,5	52,0
0,37	72,0	72,0	64,0	58,0
0,55	74,0	75,5	68,0	62,0
0,75	75,5	78,0	73,0	66,0
1,1	82,5	84,0	85,5	75,5
1,5	84,0	84,0	86,5	82,5
2,2	85,5	87,5	87,5	84,0
3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
5,5	88,5	89,5	89,5	85,5
7,5	89,5	89,5	89,5	88,5
11	90,2	91,0	90,2	88,5
15	90,2	91,0	90,2	89,5
18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
22	91,0	92,4	91,7	91,0
30	91,7	93,0	93,0	91,0
37	92,4	93,0	93,0	91,7
45	93,0	93,6	93,6	91,7
55	93,0	94,1	93,6	93,0
75	93,6	94,5	94,1	93,0
90	94,5	94,5	94,1	93,6
110	94,5	95,0	95,0	93,6
150	95,0	95,0	95,0	93,6
185	95,4	95,0	95,0	93,6
220 up to 335	95,4	95,4	95,0	93,6
375 up to 1 000	95,4	95,8	95,0	94,1

Anexo C. Limites de eficiência nominal para IE3

Para 50 Hz:

P_N kW	Number of poles/synchronous speed min ⁻¹			
	2/3000	4/1500	6/1000	8/750
0,12	60,8	64,8	57,7	50,7
0,18	65,9	69,9	63,9	58,7
0,20	67,2	71,1	65,4	60,6
0,25	69,7	73,5	68,6	64,1
0,37	73,8	77,3	73,5	69,3
0,40	74,6	78,0	74,4	70,1
0,55	77,8	80,8	77,2	73,0
0,75	80,7	82,5	78,9	75,0
1,1	82,7	84,1	81,0	77,7
1,5	84,2	85,3	82,5	79,7
2,2	85,9	86,7	84,3	81,9
3	87,1	87,7	85,6	83,5
4	88,1	88,6	86,8	84,8
5,5	89,2	89,6	88,0	86,2
7,5	90,1	90,4	89,1	87,3
11	91,2	91,4	90,3	88,6
15	91,9	92,1	91,2	89,6
18,5	92,4	92,6	91,7	90,1
22	92,7	93,0	92,2	90,6
30	93,3	93,6	92,9	91,3
37	93,7	93,9	93,3	91,8
45	94,0	94,2	93,7	92,2
55	94,3	94,6	94,1	92,5
75	94,7	95,0	94,6	93,1
90	95,0	95,2	94,9	93,4
110	95,2	95,4	95,1	93,7
132	95,4	95,6	95,4	94,0
160	95,6	95,8	95,6	94,3
200 up to 1 000	95,8	96,0	95,8	94,6

Para 60 Hz:

P_N kW	Number of poles / synchronous speed min^{-1}			
	2/3600	4/1800	6/1200	8/900
0,12	62,0	66,0	64,0	59,5
0,18	65,6	69,5	67,5	64,0
0,25	69,5	73,4	71,4	68,0
0,37	73,4	78,2	75,3	72,0
0,55	76,8	81,1	81,7	74,0
0,75	77,0	83,5	82,5	75,5
1,1	84,0	86,5	87,5	78,5
1,5	85,5	86,5	88,5	84,0
2,2	86,5	89,5	89,5	85,5
3,7	88,5	89,5	89,5	86,5
5,5	89,5	91,7	91,0	86,5
7,5	90,2	91,7	91,0	89,5
11	91,0	92,4	91,7	89,5
15	91,0	93,0	91,7	90,2
18,5	91,7	93,6	93,0	90,2
22	91,7	93,6	93,0	91,7
30	92,4	94,1	94,1	91,7
37	93,0	94,5	94,1	92,4
45	93,6	95,0	94,5	92,4
55	93,6	95,4	94,5	93,6
75	94,1	95,4	95,0	93,6
90	95,0	95,4	95,0	94,1
110	95,0	95,8	95,8	94,1
150	95,4	96,2	95,8	94,5
185 up to 1 000	95,8	96,2	95,8	95,0

Anexo D. Limites de eficiência nominal para IE4

Para 50 Hz:

P_N kW	Number of poles/synchronous speed min^{-1}			
	2/3000	4/1500	6/1000	8/750
0,12	66,5	69,8	64,9	62,3
0,18	70,8	74,7	70,1	67,2
0,20	71,9	75,8	71,4	68,4
0,25	74,3	77,9	74,1	70,8
0,37	78,1	81,1	78,0	74,3
0,40	78,9	81,7	78,7	74,9
0,55	81,5	83,9	80,9	77,0
0,75	83,5	85,7	82,7	78,4
1,1	85,2	87,2	84,5	80,8
1,5	86,5	88,2	85,9	82,6
2,2	88,0	89,5	87,4	84,5
3	89,1	90,4	88,6	85,9
4	90,0	91,1	89,5	87,1
5,5	90,9	91,9	90,5	88,3
7,5	91,7	92,6	91,3	89,3
11	92,6	93,3	92,3	90,4
15	93,3	93,9	92,9	91,2
18,5	93,7	94,2	93,4	91,7
22	94,0	94,5	93,7	92,1
30	94,5	94,9	94,2	92,7
37	94,8	95,2	94,5	93,1
45	95,0	95,4	94,8	93,4
55	95,3	95,7	95,1	93,7
75	95,6	96,0	95,4	94,2
90	95,8	96,1	95,6	94,4
110	96,0	96,3	95,8	94,7
132	96,2	96,4	96,0	94,9
160	96,3	96,6	96,2	95,1
200	96,5	96,7	96,3	95,4
250	96,5	96,7	96,5	95,4
315 up to 1 000	96,5	96,7	96,6	95,4

Para 60 Hz:

P_N kW	Number of poles / synchronous speed min ⁻¹			
	2/3600	4/1800	6/1200	8/900
0,12	66,0	70,0	68,0	64,0
0,18	70,0	74,0	72,0	68,0
0,25	74,0	77,0	75,5	72,0
0,37	77,0	81,5	78,5	75,5
0,55	80,0	84,0	82,5	77,0
0,75	82,5	85,5	84,0	78,5
1,1	85,5	87,5	88,5	81,5
1,5	86,5	88,5	89,5	85,5
2,2	88,5	91,0	90,2	87,5
3,7	89,5	91,0	90,2	88,5
5,5	90,2	92,4	91,7	88,5
7,5	91,7	92,4	92,4	91,0
11	92,4	93,6	93,0	91,0
15	92,4	94,1	93,0	91,7
18,5	93,0	94,5	94,1	91,7
22	93,0	94,5	94,1	93,0
30	93,6	95,0	95,0	93,0
37	94,1	95,4	95,0	93,6
45	94,5	95,4	95,4	93,6
55	94,5	95,8	95,4	94,5
75	95,0	96,2	95,8	94,5
90	95,4	96,2	95,8	95,0
110	95,4	96,2	96,2	95,0
150	95,8	96,5	96,2	95,4
185	96,2	96,5	96,2	95,4
220	96,2	96,8	96,5	95,4
250 up to 1 000	96,2	96,8	96,5	95,8

Anexo E. 1º algarismo do código IC

Algarismo Característico	Descrição	Definição
0	Livre circulação	O fluido de arrefecimento é retirado livre e directamente do ambiente circundante, arrefece a máquina e depois regressa livre e directamente ao ambiente circundante (circuito aberto).
1	Circulação por tubo ou canal de entrada	O fluido de arrefecimento é retirado dum ambiente remoto, é guiado à máquina através dum tubo ou canal de entrada, passa pela máquina e regressa directamente ao ambiente circundante (circuito aberto).
2	Circulação por tubo ou canal de saída	O fluido de arrefecimento é retirado livre e directamente do ambiente circundante, passa pela máquina e é depois descarregado através dum tubo ou canal de saída para um ambiente remoto (circuito aberto).
3	Circulação por tubo ou canal de entrada e de saída	O fluido de arrefecimento é retirado dum ambiente remoto, é guiado à máquina através dum tubo ou canal de entrada, passa pela máquina e é depois descarregado através dum tubo ou canal de saída para um ambiente remoto (circuito aberto).
4	Arrefecimento da superfície da carcaça	O fluido de arrefecimento principal é circulado num circuito fechado na máquina e transfere o seu calor através das superfícies externas da máquina (além do calor transferido através do núcleo do estator e de outras partes condutoras de calor) para o fluido de arrefecimento final que é o ambiente circundante. A superfície pode ser simples ou alhetada, com ou sem casca externa para melhorar a transferência.
5	Permutador de calor integral (usando o ambiente circundante)	O fluido de arrefecimento principal é circulado num circuito fechado e transfere o seu calor através dum permutador, que é parte integral da máquina, para o fluido de arrefecimento final que é o ambiente circundante.
6	Permutador de calor montado (usando o ambiente circundante)	O fluido de arrefecimento principal é circulado num circuito fechado e transfere o seu calor através dum permutador, que é montado directamente na máquina, para o fluido de arrefecimento final que é o ambiente circundante.
7	Permutador de calor integral (usando um ambiente remoto)	O fluido de arrefecimento principal é circulado num circuito fechado e transfere o seu calor através dum permutador, que é parte integral da máquina, para o fluido de arrefecimento secundário que é um ambiente remoto.
8	Permutador de calor montado (usando um ambiente remoto)	O fluido de arrefecimento principal é circulado num circuito fechado e transfere o seu calor através dum permutador, que é montado directamente na máquina, para o fluido de arrefecimento secundário que é um ambiente remoto.
9	Permutador de calor separado (usando ou o ambiente circundante ou um remoto)	O fluido de arrefecimento principal é circulado num circuito fechado e transfere o seu calor através dum permutador, que é separado da máquina, para o fluido de arrefecimento secundário que é ou o ambiente circundante ou um ambiente remoto.

Anexo F. 2º e 3º algarismos do código IC

Algarismo Característico	Descrição	Definição
0	Convecção livre	O fluido de arrefecimento é movido por diferenças de temperatura. A acção de ventilação do rotor é negligenciável.
1	Auto-circulação	O fluido de arrefecimento é movido dependendo da velocidade de rotação da máquina principal, tanto apenas pela acção do rotor como através dum componente projectado para o efeito e montado directamente no rotor da máquina principal, ou através dum ventilador ou bomba movidos pelo rotor da máquina principal.
2, 3, 4		Reservado para uso futuro
5	Componente independente integral	O fluido de arrefecimento é movido por um componente integral, a potência do qual é obtida de tal forma que é independente da velocidade de rotação da máquina principal, p.ex., um ventilador interno ou bomba movida pelo seu motor eléctrico.
6	Componente independente montado na máquina	O fluido de arrefecimento é movido por um componente montado na máquina, a potência do qual é obtida de tal forma que é independente da velocidade de rotação da máquina principal, p.ex., um ventilador interno ou bomba movida pelo seu motor eléctrico.
7	Componente independ. e separado na máquina ou pressão do sistema de arrefecimento	O fluido de arrefecimento é movido por um componente eléctrico ou mecânico separado não montado na máquina e independente ou é produzido pela pressão no sistema de circulação do fluido de arrefecimento, p.ex., fornecida pelo sistema de distribuição de água ou por uma tubagem de gás sob pressão.
8	Deslocamento relativo	O movimento do fluido de arrefecimento resulta dum movimento relativo entre a máquina e o fluido de arrefecimento, ou movendo a máquina pelo fluido ou pelo escoamento do fluido de arrefecimento.
9	Todos os outros componentes	O movimento do fluido de arrefecimento resulta dum outro método que os definidos acima e será totalmente descrito.

Anexo G. Custos da ferragem atual vs. Ferragem proposta

Descrição	Ferragem Atual							
	Bloco	RE - Kit	Preço Rotor	EG - Kit	Preço Estator	Peso Enrolamento Kg	Custo Peso Enrolamento	Custo EB + RI
MOTOR 315kW 4P 355M/L WFF2 IE3	530	13107853	905.22 €	12912829	1 488.15 €	102.52	1 046.24 €	3 439.61 €
MOTOR 315kW 4P 355M/L WFF2 IE4	510	16624430	897.36 €	16624347	1 437.42 €	107.03	1 092.23 €	3 427.01 €
MOTOR 355kW 4P 355M/L WFF2 IE3	620	16483924	1 064.22 €	12300576	1 769.18 €	112.36	1 146.59 €	3 979.99 €
MOTOR 260kW 4P 355M/L WFF2 IE3	430	12715569	759.63 €	11133363	1 215.84 €	91.08	929.46 €	2 904.93 €
MOTOR 300kW 4P 355M/L WFF2 IE3	500	10864809	885.90 €	10864785	1 407.71 €	96.85	988.31 €	3 281.92 €
MOTOR 220kW 4P 315L WFF2 IE3	470	16478226	683.41 €	16478239	1 039.22 €	86.13	878.97 €	2 601.60 €
MOTOR 37kW 6P 250S/M WFF2 IE4	360	12591980	318.44 €	12394664	363.17 €	29.00	295.95 €	977.56 €
MOTOR 45kW 6P 280S/M WFF2 IE4	210	15562605	292.60 €	11155458	335.68 €	228.17	2 328.46 €	2 956.74 €
MOTOR 220kW 2P 315L WFF2 IE3	420	12913012	521.83 €	12089441	1 004.15 €	82.64	843.33 €	2 369.31 €
MOTOR 315kW 2P 355M/L WFF2 IE3	560	11134016	841.53 €	11133991	1 783.23 €	54.12	552.25 €	3 177.01 €

Descrição	Ferragem Proposta							
	Bloco	RE - Kit	Preço Rotor	EG - Kit	Preço Estator	Peso Enrolamento Kg	Custo Peso Enrolamento	Custo EB + RI
MOTOR 315kW 4P 355M/L WFF2 IE3	510	16624430	897.36 €	16624347	1 437.42 €	94.96	969.03	3 303.81 €
MOTOR 315kW 4P 355M/L WFF2 IE4	500	10864809	885.90 €	10864785	1 407.71 €	89.95	917.94	3 211.55 €
MOTOR 355kW 4P 355M/L WFF2 IE3	580	15562526	995.14 €	15562522	1 654.61 €	111.44	1137.20	3 786.95 €
MOTOR 260kW 4P 355M/L WFF2 IE3	390	11572916	697.89 €	11572576	1 116.78 €	84.08	858.04	2 672.71 €
MOTOR 300kW 4P 355M/L WFF2 IE3	470	16483894	828.51 €	11353656	1 325.55 €	95.51	974.63	3 128.69 €
MOTOR 220kW 4P 315L WFF2 IE3	420	15562434	610.57 €	11572573	917.72 €	80.13	817.72	2 346.01 €
MOTOR 37kW 6P 250S/M WFF2 IE4	310	10165407	274.09 €	10377308	314.84 €	26.21	267.51	856.44 €
MOTOR 45kW 6P 280S/M WFF2 IE4	200	16399649	275.17 €	10635078	320.52 €	217.30	2217.59	2 813.28 €
MOTOR 220kW 2P 315L WFF2 IE3	410	17170582	523.00 €	17076776	980.62 €	79.66	812.89	2 316.51 €
MOTOR 315kW 2P 355M/L WFF2 IE3	520	11151086	782.31 €	11153812	1 648.30 €	51.65	527.07	2 957.68 €

