



Eficiência Energética em Equipamentos de Força Motriz

PEDRO BRUNO PORTELA GONÇALVES PINTO

novembro de 2019

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EQUIPAMENTOS DE FORÇA MOTRIZ

Pedro Bruno Portela Gonçalves Pinto



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

2019

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

Candidato: Pedro Bruno Portela Gonçalves Pinto, Nº 1091078, 1091078@isep.ipp.pt

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



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019

Aos meus pais e à minha namorada.

Agradecimentos

Dedico este trabalho a todos aqueles que estiveram presentes nos meus momentos difíceis, que contribuíram para o meu crescimento moral e intelectual, e desejam de coração ver-me alcançar boas resoluções na minha vida pessoal e profissional.

Ao Prezado Eng.º Francisco Oliveira pela disponibilidade em fornecer dados para analisar um dos motores instalados na fábrica de transformadores da Efacec.

Ao Eng.º Fernando Moreira, Eng.º Carlos Valente e Eng.º Ricardo Moutinho da WEG pela disponibilização das informações sobre os equipamentos WEG em estudo na minha dissertação.

Ao ISEP e respetivos docentes com os quais me cruzei, contributos imprescindíveis para uma educação sólida, bem como, ao Doutor José Beleza Carvalho pela oportunidade de realizar o tema da presente dissertação e pela disponibilidade em orientar o avanço do trabalho.

“Our greatest glory is not in never falling, but in rising every time we fall.”

Confucius

Resumo

A eficiência energética é um tema de grande importância e na última década tornou-se uma das questões de maior relevo em setores energeticamente intensos, como é o caso da indústria. Com padrões de conforto progressivamente mais elevados, a sociedade atual exige uma maior fiabilidade e qualidade no uso da energia elétrica, sendo prioritário a redução da fatura energética.

A utilização racional de energia nas instalações elétricas em geral, pretende a utilização de energia de forma fiável e eficiente, conduzindo a menores perdas, menores consumos de energia e menor emissão de poluentes. Neste contexto, é urgente adotar medidas direcionadas ao aumento do rendimento de equipamentos elétricos nas instalações. Alguns deles, como os motores elétricos, são equipamentos largamente utilizados na indústria, onde absorvem cerca de 60% da energia elétrica produzida em termos mundiais e, apenas aproximadamente metade dessa energia, é efetivamente utilizada para realizar trabalho.

Através de comparações entre características de motores convencionais e motores denominados de elevado rendimento, assim como a utilização de equipamentos eletrónicos como os variadores eletrónicos de velocidade, tem sido possível estudar e desenvolver novas soluções com o objetivo de colocar no mercado aplicações mais eficientes, que permitam incrementar a economia de energia nos sistemas de força motriz nas instalações gerais e, particularmente, nas instalações industriais. Atualmente, estes equipamentos são classificados em várias categorias baseadas no rendimento e representativas do nível de eficiência energética que apresentam.

Para comprovar os princípios que são expostos neste trabalho, no âmbito de motores de eficiência elevada, apresenta-se a comparação de dois motores com classes de eficiência distintas, efetuando-se uma análise ao funcionamento de um motor instalado na fábrica de transformadores da Efacec, cujos dados são obtidos através de um sistema de monitorização que permite obter as grandezas necessárias ao estudo das condições de carga e rendimento em que o motor se encontra a funcionar. É também efetuada uma análise da viabilidade

económica associada à utilização dos novos motores de elevada eficiência, a fim de se analisar quais os principais benefícios associados à sua aquisição.

Pretende-se neste trabalho constatar a viabilidade técnica e económica na utilização de motores com elevada eficiência, através da análise do desempenho dos motores nos casos reais referidos, tendo em consideração o custo inicial que geralmente é superior em comparação com motores com classe de eficiência inferior.

Palavras-Chave

Eficiência energética, instalações elétricas, equipamentos de força motriz, perdas, rendimento e eficiência, motores de elevada eficiência, variadores eletrónicos de velocidade.

Abstract

Energy efficiency is a major issue and in the last decade it has become one of the most important issues in energy intensive sectors such as industry. With progressively higher standards of comfort, today's society demands greater reliability and quality in the use of electricity, with priority being given to reducing the energy bill.

The rational use of energy in electrical installations aims to use energy reliably and efficiently, leading to lower losses, lower energy consumption and lower pollutant emissions. In this context, it is urgent to adopt measures aimed at increasing the efficiency of electrical equipment in the facilities. Some of them, such as electric motors, are widely used equipment in industry, where they absorb 60% of the electricity produced worldwide and only half of that energy is used to do work.

Through comparisons between the characteristics of conventional motors and the so-called high-performance motors, as well as the use of electronic equipment such as electronic-speed drives, it has been possible to study and develop new solutions in order to place more efficient applications on the market, allowing increase energy savings in the powertrain systems in general installations and particularly in industrial installations. Currently, these devices are classified into various categories based on performance that represent the level of energy efficiency they feature.

To prove the principles that are exposed in this work, in the field of high efficiency motors, we present the comparison of two motors with different efficiency classes, by performing an analysis of the operation of a motor installed in Efacec transformer factory, whose data are obtained through a monitoring system that gives the necessary quantities to study the load and performance conditions in which the engine is running. An economic feasibility analysis associated with the use of the new high efficiency engines is also carried out in order to analyse the main benefits associated with their purchase.

The aim of this paper is to verify the technical-economic feasibility of using high efficiency engines, by analysing the performance of the engines in the referred real cases, considering the initial cost which is generally higher compared to engines with lower efficiency class.

Keywords

Energy efficiency, electrical installations, motion power equipment, losses, efficiency, high efficiency motors, variable-speed drive.

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ACRÓNIMOS	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1.ENQUADRAMENTO.....	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	5
2.1.INTRODUÇÃO	5
2.2.SETOR INDUSTRIAL E FORÇA MOTRIZ	13
2.3.EFICIÊNCIA NOS SISTEMAS DE FORÇA MOTRIZ	19
2.4.CONCLUSÃO	28
3. FORÇA MOTRIZ DE ELEVADA EFICIÊNCIA	29
3.1.INTRODUÇÃO	29
3.2.OBJETIVOS E IMPLICAÇÕES DE MOTORES MAIS EFICIENTES	31
3.3.MOTORES ELÉTRICOS DE ELEVADA EFICIÊNCIA	45
3.4.VARIADORES DE VELOCIDADE	52
3.5.MOTORES DE IMANES PERMANENTES PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA	59
3.6.APLICAÇÕES REAIS DE MOTORES EFICIENTES.....	64
3.7.CONCLUSÃO	72
4. ANÁLISE DE CASOS PRÁTICOS	73
4.1.CASO 1: NOVO MOTOR IE3 VS NOVO MOTOR IE4	73
4.2.CASO 2: ALTERNADOR ACIONADO POR MOTOR EFACEC	83
4.3.ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÓMICA	96
5. CONCLUSÕES	110
5.1.USO DE MOTORES DE ELEVADA EFICIÊNCIA	110
5.2.COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA	111
5.3.PERSPETIVAS DE FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E DOCUMENTAIS	112

ANEXOS 118

Índice de Figuras

Figura 1 – Evolução do consumo total de energia primária em Portugal (Mtep) [8].	8
Figura 2 – Consumo de Energia Final por Setor – 2017 [9].	9
Figura 3 – Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental [11].	11
Figura 4 – Dependência energética nacional [9].	12
Figura 5 – Gráfico da evolução do balanço energético [7].	13
Figura 6 - Evolução do consumo energético [3].	14
Figura 7 – Consumo de energia primária (Ktep) [9].	14
Figura 8 – Gráfico dos consumos dos setores analisados em 2007 [17].	19
Figura 9 – Sistema completo com motor elétrico [18].	20
Figura 10 – Componentes de motor em gaiola de esquilo (adaptado de [19]).	21
Figura 11 – Fração típica de perdas em 50Hz, motor de indução em gaiola de esquilo de 4 polos [18].	22
Figura 12 – Classes eficiência – motores de 4 polos [25].	26
Figura 13 – Exemplo de chapa de características de um motor da ABB [24].	27
Figura 14 – Máquinas acionadas por correias em nave fabril durante a Revolução Industrial [29].	30
Figura 15 – Tipos de motores elétricos existentes [34].	34
Figura 16 – Motor de corrente contínua, à esquerda. À direita, o respetivo rotor (adaptado de [35]).	35

Figura 17–Representação de uma máquina de corrente contínua convencional (adaptado de [15]).	36
Figura 18 – Motor de indução trifásico [40].	39
Figura 19 – Ranhuras e fios do estator de um motor de indução [41].	40
Figura 20 – Rotor de um motor de indução [42].	41
Figura 21 – Circuito equivalente completo por fase do motor de indução [39].	43
Figura 22 – Dados aplicadas para implementação de classes de eficiência [46].	46
Figura 23 – Esquema genérico de um conversor [39].	53
Figura 24 – Princípio de funcionamento de um VEV, autoria da WEG [40].	55
Figura 25 – Exemplos de VEVs do mercado. À esquerda VEV da gama ATV 71 e à direita ATV 320, da Schneider Electric [48][49].	56
Figura 26 – Topologia e circuito equivalente de um motor Brushless DC [51].	60
Figura 27 – À esquerda um motor BLDC da Panasonic. À direita, um exemplo típico de aplicação de motores <i>Brushless DC</i> [55].	62
Figura 28 – Corte transversal de um motor BLDC [57].	63
Figura 29 – Exemplo de um <i>luggage conveyor belt</i> [58].	65
Figura 30 – Especificações técnicas do motor BMH1402P06A1A [59].	66
Figura 31 – Resultados experimentais sem aplicação de carga [60].	67
Figura 32 - Resultados experimentais com aplicação de carga [60].	67
Figura 33 – À esquerda a imagem da instalação antes da substituição. À direita, após a substituição [62].	69
Figura 34 – Motores WEG aplicados na fábrica Portucel, em Portugal [62].	71

Figura 35 – Motores ABB gama M3BP [63].	74
Figura 36 – Motor WEG W22 IE4 [66].	78
Figura 37 – Curva de desempenho em carga do motor WEG W22 IE4 75kW (Anexo C).	79
Figura 38 – Motor WEG W22 30kW IE3.	87
Figura 39 - Curva de desempenho em carga do motor WEG W22 IE330kW (Anexo D).	88
Figura 40 - Curva de desempenho em carga do motor WEG W22 IE4 75kW (Anexo E).	93
Figura 41 – Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real sem considerar energia reativa.	99
Figura 42 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real considerando energia reativa.	102
Figura 43 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança real sem considerar energia reativa.	104
Figura 44 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real considerando energia reativa.	106
Figura 45 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real sem considerar energia reativa.	109

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Níveis de rendimento mínimos de acordo com a IEC 60034-30-1:2014 [24].	25
Tabela 2 – Resultados comparativos da aplicação de dois motores [60].	68
Tabela 3 – Características do motor de classe IE3 [64].	74
Tabela 4 – Resultados de teste ao motor ABB (Anexo B).	75
Tabela 5 – Energia consumida nos diferentes regimes de carga – motor ABB.	76
Tabela 6 – Custos de energia mensal e anual – motor ABB.	77
Tabela 7 - Tarifa transitória de venda a clientes finais em BTE - Tarifário em vigor desde janeiro 2019, Diretiva ERSE 13/2018 [65].	77
Tabela 8 – Características do motor de classe IE4 (Anexo C).	78
Tabela 9 - Energia consumida nos diferentes regimes de carga – motor WEG W22 IE4.	80
Tabela 10 - Custos de energia mensal e anual – motor WEG W22 IE4.	80
Tabela 11 – Poupança no consumo e custo mensal entre o motor ABB e WEG IE4.	81
Tabela 12 - Poupança no consumo e custo anual entre o motor ABB e WEG IE4.	81
Tabela 13 - Fatores multiplicativos a aplicar ao preço de referência da energia reativa indutiva, Despachos 7253/2010 de 26 Abril e 10/2010 de 29 Julho, da ERSE [65].	82
Tabela 14 – Valores obtidos de potência reativa e consumos do motor ABB e WEG.	82
Tabela 15 – Resultados do custo da Energia Reativa consumida num ano.	83
Tabela 16 – Características do motor Efacec	84
Tabela 17 – Dados obtidos pelo sistema de monitorização no dia 1 de Junho de 2019.	84
Tabela 18 – Valores mais elevados encontrados de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.	85

Tabela 19 – Valores médios obtidos de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.	86
Tabela 20 – Resultados obtidos do consumo e custo de Junho a Setembro, do motor Efacec.	86
Tabela 21 – Características do motor WEG W22 IE3 escolhido.	87
Tabela 22 – Dados obtidos pela curva de desempenho do motor WEG em função do fator de carga.	88
Tabela 23 - Valores médios calculados com o motor WEG de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.	88
Tabela 24 - Resultados obtidos do consumo e custo de Junho a Setembro, do motor WEG.	89
Tabela 25 – Resultados obtidos dos consumos e custos anuais de cada motor.	90
Tabela 26 - Diferenças de consumo e custo do motor Efacec e Opção 1 – Motor WEG IE3.	90
Tabela 27 – Valores obtidos de potência reativa e consumos do motor Efacec e WEG.	90
Tabela 28 – Resultados do custo da Energia Reativa consumida num ano – Opção 1.	91
Tabela 29 – Características do motor WEG W22 IE4 escolhido (Anexo E).	92
Tabela 30 – Dados obtidos pela curva de desempenho do motor WEG IE4 em função do fator de carga.	92
Tabela 31 - Valores médios calculados com o motor opcional WEG IE4 de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.	93
Tabela 32 - Resultados obtidos do consumo e custo de Junho a Setembro, do motor WEG.	94
Tabela 33 - Diferenças de consumo e custo do motor Efacec e Opção2 – Motor WEG IE4.	94

Tabela 34 – Resultados obtidos dos consumos e custos anuais de cada motor.	94
Tabela 35 – Valores obtidos de potência reativa e consumos do motor Efacec e WEG.	95
Tabela 36 - Comparação motores ABB e IE4 WEG para carga 80% sem considerar energia reativa.	97
Tabela 37 – Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno sem considerar energia reativa.	98
Tabela 38 – Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – sem energia reativa.	100
Tabela 39 - Comparação motores ABB e IE4 WEG para carga 80% considerando energia reativa.	101
Tabela 40 - Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno considerando energia reativa.	101
Tabela 41 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – com energia reativa.	102
Tabela 42 - Comparação motores Efacec e IE3 WEG 30kW sem considerar a energia reativa.	103
Tabela 43 - Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno sem considerar energia reativa.	103
Tabela 44 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – sem energia reativa.	104
Tabela 45 - Comparação motores Efacec e IE3 WEG 30kW considerando a energia reativa.	105
Tabela 46 - Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno considerando energia reativa.	106

Tabela 47 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – com energia reativa.	107
Tabela 48 - Resultados dos cálculos da poupança e do retorno considerando energia reativa para a Opção 2.	108
Tabela 49 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR.	109

Acrónimos

BLAC	–	<i>Brushless Alternating Current</i>
BLDC	–	<i>Brushless DC Motor</i>
BT	–	Baixa Tensão
BTE	–	Baixa Tensão Especial
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Continua
CE	–	Comissão Europeia
CEMEP	–	<i>European Committee of Manufacturers of Electrical and Electronics</i>
HO	–	<i>High Output</i>
IC	–	<i>Integrated Circuit</i>
IEC	–	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	–	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
FC	–	Fator de Carga
FOC	–	<i>Field Oriented Control</i>
GTO	–	<i>Gate Turn Off</i>
MEPS	–	<i>European Minimum Energy Performance Standard</i>
MT	–	Média Tensão
MOSFET	–	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>

- NEMA – *National Electrical Manufacturers Association*
- PLC – *Programmable Logic Controller*
- PM – *Permanent Magnet*
- PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Machine*
- PVP – Preço de Venda ao Público
- PWM – *Pulse-Width Modulation*
- UE – União Europeia
- UTA – Unidade de Tratamento de Ar
- VEV – Variador Eletrónico de Velocidade

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A energia de uma forma geral é essencial para a sociedade, nos modos em que ela existe atualmente. É, por assim dizer, a pedra angular da vida humana tal e qual a conhecemos nos dias de hoje e que nos possibilita comunicar uns com os outros, de nos movermos a curtas e longas distâncias, de termos iluminação e temperatura confortável em edifícios, meios de locomoção, entre outros.

A crescente evolução da economia a nível mundial está associada ao crescimento dos consumos, e de necessidades cada vez mais exigentes de altos padrões de disponibilização energética. A habilidade humana de desenvolver fontes de energia para realizar trabalho útil tem desempenhado um papel fundamental na melhoria contínua da qualidade de vida das pessoas, em diversas atividades.

Os equipamentos de força motriz, denominados neste âmbito de motores elétricos, são máquinas que convertem a energia elétrica em energia mecânica, e cujo rendimento é classificado através da razão entre potência mecânica disponibilizada no veio, habitualmente designada por potência útil, e a potência elétrica ativa que absorve. Quanto maior for o valor desta razão, menores são as perdas no processo de transformação, e consequentemente, melhor o rendimento do motor.

A eficiência energética desempenha um papel fundamental na economia a nível mundial, em grande parte no setor industrial, onde o interesse de otimização de investimentos e de

recursos humanos é motivo para constante preocupação. A produção de energia não aumenta de forma proporcional com o crescimento económico e atividade produtiva a que se encontra vinculada, pelo que se torna imprescindível a redução de gastos onde se pode realizar trabalho com mais eficiência, sem perder a eficácia.

Assim, a evolução industrial conduziu-nos até este tempo: o da necessidade de produzir mais e consumir menos, onde é determinante a redução do custo da produção por unidade. Economizar uma pequena percentagem pode significar uma poupança de dezenas de milhares de euros por mês nas empresas, e qualquer investimento que conduz à redução de perdas pode ter um retorno de investimento muito rápido [1].

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação é realizar uma análise comparativa do desempenho energético de motores elétricos, e evidenciar o potencial de economia de energia na utilização de motores com melhores níveis de rendimento. Além disto, é também pretendido realçar a importância do correto dimensionamento e alguns aspetos construtivos dos motores elétricos.

Pretende-se também abordar o enquadramento legislativo e normativo relacionado com as decisões de investimento em eficiência energética, e os novos níveis Classe de Eficiência previstos na Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC).

Com recurso a exemplos concretos, é pretendido realçar aplicações reais de motores elétricos de elevada eficiência em ambiente industrial, onde a sua capacidade energética se faz sentir na fatura de eletricidade na solicitação de potência à rede. Pretende-se fazer menção às empresas que implementaram estes motores e a sua aplicação em concreto, bem como os resultados obtidos em termos de poupança energética e o tempo de retorno do investimento.

Como forma de sustentar a aquisição dos pontos desenvolvidos ao longo do documento, estuda-se um caso prático com vista à comprovação da viabilidade económica de um motor com elevada eficiência. Utiliza-se para tal dois motores de diferentes fabricantes, e com níveis de eficiência distintos, onde se analisa as suas características de forma comparativa e se procura demonstrar com recurso a indicadores económicos, qual das soluções é mais viável em termos de custos associados à sua aquisição e uso. Pode-se assim comprovar de

forma prática que efetivamente um motor com rendimento mais elevado apresenta melhorias significativas que justifiquem o seu investimento.

Utiliza-se também um exemplo de um motor instalado na fábrica de transformadores da Efacec, com o qual se pretende realizar uma análise comparativa com um motor de elevada eficiência da WEG, para verificar a viabilidade económica associada à sua eventual substituição.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos com o seguinte conteúdo:

Neste primeiro capítulo de Introdução, apresenta-se uma análise sistematizada focada nos principais objetivos técnicos e práticos desta dissertação, com uma descrição ponderada do tema e das suas implicações.

Capítulo 2 – Eficiência Energética: Neste capítulo é realizado um aprofundamento do potencial de economia de energia nos sistemas de força motriz, considerando-se para tal o enquadramento legislativo e normativo aplicável à eficiência energética. O enquadramento sugere um estudo do desenvolvimento dos motores no que respeita ao seu nível de rendimento.

Capítulo 3 – Força motriz de elevada eficiência: Descreve-se neste capítulo os métodos de funcionamento e respetivo fabrico de motores considerados de elevada eficiência. Pretende-se analisar e efetuar comparações com motores de eficiência elevada, e com base nos novos níveis de rendimento IEC prever o potencial de substituição de motores de classes de eficiência inferiores por motores de corrente alternada de elevada eficiência, com o devido enquadramento da possibilidade de serem controlados por variador eletrónico de velocidade.

Capítulo 4 – Casos práticos de viabilidade económica: Neste capítulo da presente dissertação pretende-se realizar uma abordagem prática sobre os temas desenvolvidos ao longo do documento, onde se procura comprovar através de alguns os benefícios da instalação de motores de elevada eficiência, numa abordagem com vista a evidenciar a sua viabilidade em termos económicos através de cálculos financeiros e indicadores económicos.

Capítulo 5 - Conclusão: Este capítulo encerra este documento de dissertação, apresentando as principais conclusões que se obtiveram ao longo de todo o trabalho realizado, estabelecendo um ponto de encontro entre a componente teórica desenvolvida e os resultados obtidos apresentados no Capítulo 4.

2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente, a relação entre o setor energético e o ambiente é de particular interesse numa abordagem generalizada, visto que a produção e o consumo de energia possuem uma cota de responsabilidade, direta ou indireta, sobre os impactos nefastos no ambiente. São notáveis os esforços na exploração das energias renováveis, e das melhorias que delas decorrem. No entanto, existe ainda forte dependência do exterior na produção de eletricidade. Em Portugal, sendo este um país de poucos recursos energéticos de origem fóssil, o peso da importação desses materiais é ainda bastante considerável [2].

Sem dúvida que a área dos transportes e da indústria tem um peso considerável no consumo final de energia, tal como o setor electroprodutor, tendo grande contribuição em fenómenos de alterações climáticas. Decorrente destas formas de poluição, as medidas e políticas assinaladas para aumento da eficiência energética visam obter o mesmo nível de conforto e desempenho com base num menor consumo de energia. Estas medidas tendem a ser aplicadas nas fases de produção, transformação, distribuição e utilização de energia, que deverão ser colocadas em prática mediante a alteração de comportamentos por parte dos consumidores em geral e das tecnologias e processos conducentes a essa melhoria [3].

A energia é um recurso essencial à vida no planeta tal e qual o conhecemos. É a base da comunicação à distância, do movimento, da iluminação e do conforto em edifícios, entre outras aplicações. É essencial, portanto, ter acesso a este recurso pois a moderna sociedade necessita dos materiais que são produzidos pela indústria transformadora. No entanto, uma grande parte da energia utilizada é proveniente de combustíveis fósseis, tal e qual o carvão, petróleo ou gás. A sua utilização em larga escala veio a proporcionar o aumento de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, cuja consequência tem sido o aumento do efeito de estufa. A implementação de novas soluções possibilita a utilização racional da energia, de forma eficiente, a fim de diminuir as consequências fatídicas do uso desenfreado de combustíveis poluentes, para garantia de um melhor estilo de vida no futuro da população mundial.

Os recursos energéticos são provenientes dos diversos materiais que contém energia em quantidades razoáveis. Estão presentes em qualquer uma das formas de energia que são passíveis de serem transformadas em outras formas de energia, incluindo elétrica, mecânica, química e nuclear. A energia química inclui combustíveis como o carvão, o óleo e o gás natural. Os recursos energéticos são habitualmente classificados em duas categorias: recursos renováveis e recursos não renováveis. A água, vento e sol são recursos renováveis que são continuamente disponibilizados pela natureza, apesar do seu uso para produzir energia através de várias técnicas disponíveis. As não renováveis, como o carvão e gás natural, são aquelas que se gastam através do uso, pelo que, não se renovam continuamente.

A energia no seu estado primário, como por exemplo o vento, não se desgasta durante a sua utilização no processo de conversão, uma vez que a mesma é dependente de fenómenos que precedem a maquinaria humana, sendo, portanto, unicamente dependente das condições naturais que lhe são características. Por exemplo, podemos utilizar continuamente uma turbina eólica sem que por essa razão haja desgaste de vento, cuja responsabilidade seja do processo de conversão de um parque eólico. Por outro lado, estes mecanismos estão dependentes de existência de vento naquela região, sujeitos aos picos que são naturais da massa de ar variável que ali aporta. Desgaste seria de considerar aquele que diz respeito à estrutura mecânica e elétrica das turbinas.

Na sequência do desenvolvimento da sociedade, nos seus aspetos sociais e tecnológicos, foram sendo criados engenhos para se poder controlar a energia do sol, da água e do vento, em benefício do bem-estar social. A Revolução Industrial iniciada em Inglaterra por volta

do século XVIII, que se expandiu pelo mundo no século XIX, assinalou um marco de grandes modificações no desenvolvimento e nos processos industriais. As vantagens do carvão, sendo ele o principal e mais forte combustível fóssil, tornaram-se uma mais valia para o progresso. A este recurso, juntou-se o petróleo e de seguida o gás natural. Foram usadas fontes de energia altamente concentradas, abundantes e baratas, para satisfazer os crescentes consumos energéticos ao nível da necessidade de calor, energia elétrica e de combustíveis para o setor dos transportes. Porém, particularmente a partir de 1970, onde ocorreu o período correspondente ao auge das crises petrolíferas que conduziram ao extraordinário aumento dos preços, a energia de origem fóssil deixou, assim, de ser barata, aumentando-se as preocupações sobre os efeitos ambientais da combustão e uma maior consciência do caráter finito dos combustíveis fósseis [4].

Na existência de processos de transformação de energia, a quantidade total de energia permanece inalterada, segundo o princípio base da 1ª Lei da Termodinâmica, que aplica o princípio da conservação da energia. A título de exemplo deste pressuposto, tem-se que numa central elétrica a quantidade de energia útil à saída é sempre menor do que a quantidade de energia primária à entrada, o que significa que alguma energia primária foi convertida em outra forma de energia não útil. O mesmo se aplica em equipamentos de força motriz que convertem energia elétrica em energia mecânica. Um gerador converte parte da energia cinética em energia mecânica numa primeira fase, e em energia elétrica posteriormente. Por sua vez, esta energia é usada, por exemplo, no aquecimento do filamento de uma lâmpada, que provoca a radiação de energia luminosa e a dissipação em calor da energia não convertida.

No processo de conversão, a energia na saída é sempre menor que a energia à entrada, e a razão entre essa energia útil à saída e a energia primária à entrada é expressa em termos da sua grandeza, que é designada por rendimento do processo e habitualmente medida em percentagem. Este rendimento pode rondar os 90% no caso de turbinas hídricas e motores elétricos, ou na ordem dos 40% no caso de centrais a carvão e até mesmo menor que 15% em painéis fotovoltaicos. Nenhuma máquina tem a capacidade de conversão total da energia associada noutra forma de energia, como mecânica e elétrica, conforme o enunciado da 2ª Lei da Termodinâmica estabelece pela existência de um limite ao rendimento de qualquer máquina térmica, no caso das que utilizam o calor para conversão [5].

A eficiência energética tem como intuito proporcionar o mesmo grau de produção de bens, serviços e de conforto por meio de tecnologias que diminuem os consumos face a soluções convencionais [6]. Do ponto de vista ambiental, as medidas e políticas que objetivam o incremento da eficiência energética são de grande importância. Perante os resultados económicos e as evidências negativas do impacto no ambiente, deve-se considerar a eficiência como uma solução de combate às alterações climáticas caminhando para o desenvolvimento sustentável, de criar “o suficiente para todos e para sempre”. Isto, entendendo a limitação de recursos, encarando o consumo com responsabilidade e igualdade a longo prazo.

Em Portugal, a tendência de melhoria da produtividade energética é conjuntural, como consequência da crise económica e financeira que o país tem vivido desde 2006. Nos últimos anos, o país tem tido momentos de recessão com impacto nos consumos em geral e, em particular, nos que estão relacionados com energia, com a queda do consumo de produtos petrolíferos, como os combustíveis para a indústria, o gasóleo e gasolina. A queda verificou-se também substancialmente no gás natural [7].

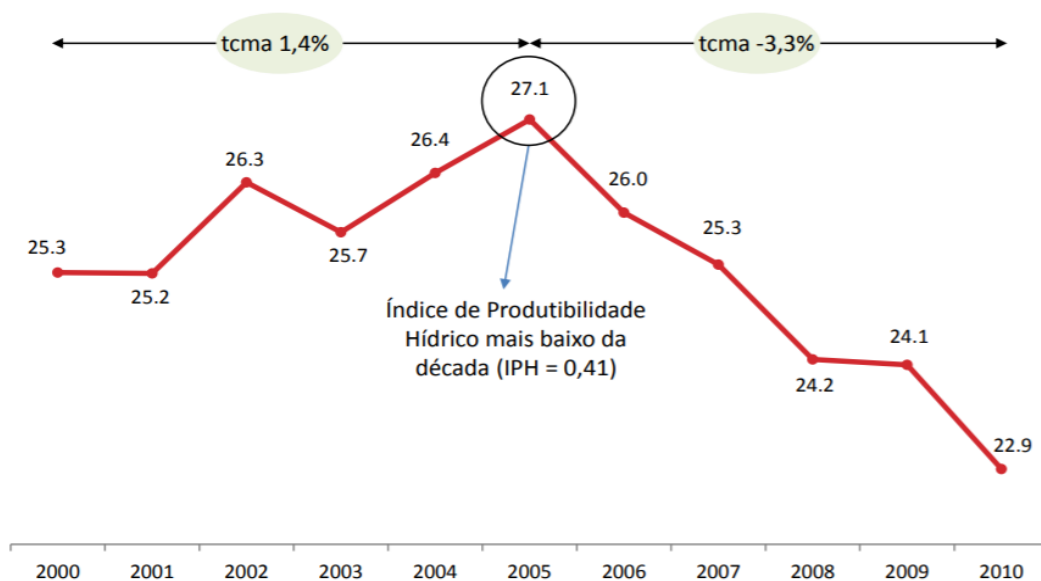


Figura 1 – Evolução do consumo total de energia primária em Portugal (Mtep) [8].

A figura 1 mostra o gráfico do consumo de energia primária, que regista uma Taxa Média de Crescimento Anual (TCMA) de -1% no período de 2000 a 2010, justificada pela redução

do consumo a partir de 2005. Esta situação ocorre principalmente pelo abrandamento do crescimento económico e consequente redução do consumo interno.

Juntamente com o setor electroprodutor, os transportes e a indústria são os setores de atividade com maior peso no consumo final de energia. Desta forma, a redução da fatura energética é fundamental, tanto no setor residencial, de serviços e transportes, como também no setor industrial. Veja-se a figura 2. A indústria utiliza uma variedade considerável de máquinas que são alimentadas por vários tipos de energia, porém, devido à flexibilidade, alto rendimento e facilidade de uso, a eletricidade é sem sombra de dúvida a forma de energia mais disponível e mais utilizada.

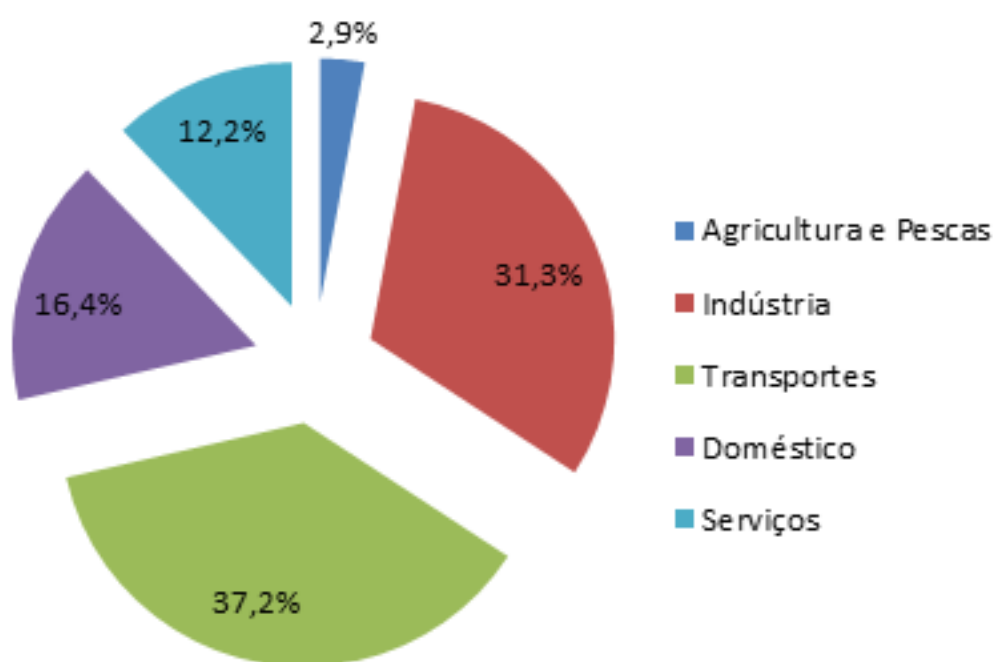


Figura 2 – Consumo de Energia Final por Setor – 2017 [9].

Em março de 2007, os líderes europeus apoiaram uma abordagem integrada que foi proposta pela Comissão Europeia, objetivando a contribuição para a luta global contra alterações climáticas, enquanto melhora a situação em termos de segurança energética e competitividade. Para iniciar, os líderes europeus delinearam vários objetivos para serem atingidos até 2020.

Este projeto, adotado em dezembro de 2008 pela UE, estabeleceu para 2020 a redução de 20% do consumo de energia primária, em comparação com os níveis de 1990. No âmbito do

quadro de ação da UE referente à política climática para 2030, em 2014 estabeleceu-se uma meta não vinculativa de redução do consumo de energia de no mínimo 27%, com base nos critérios atuais. Para 2016, é estimada uma diminuição do consumo de energia de cerca de 8,2%, pelo Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE), no período 2013-2016, em comparação com o que se verificou entre 2001 e 2005. De forma genérica, o PNAEE estipula um valor fixo de 25% de redução de consumo de energia primária e um específico que se relaciona com a administração pública, com redução de 30%, também em comparação com os valores verificados entre 2001 e 2005 [9].

Num contexto de grave crise energética, Portugal, em 1982, regulamenta a Gestão da Energia como meio de atenuar as dificuldades resultantes da crise dos anos 70, e passa por tomar como essencial a estratégia nas empresas: sem o abastecimento energético e sem controlo apertado sobre a utilização da energia, não é espetável serem competitivas. A gestão de energia visa formar, orientar, implementar e controlar a forma como uma empresa faz uso ou projeta utilizar energia.

Em 2010, num contexto económico recessivo e de agravamento das condições sociais, a Comissão Europeia (CE) propõe a estratégia Europa 2020, para promover a saída da crise, o aumento do emprego, a produtividade e a coesão social no espaço de uma década. Instituída a 3 de março, surge com a intenção de criar crescimento de forma inteligente, mediante investimento sustentável na educação, investigação e inovação, priorizando a passagem para uma economia com menor teor de carbono, dando atenção à criação de emprego e diminuição da pobreza. Estabelece, em relação ao ano de 1990, o objetivo de redução dos gases com efeito de estufa em cerca de 20%, 20% da energia proveniente de fontes renováveis e aumentar em 20% a eficiência energética [10].

Dos combustíveis fósseis utilizados, o petróleo possui um papel essencial no abastecimento, e que representa 42,8% do consumo total de energia primária. O gás natural contribuiu para diminuição deste consumo, diversificando a estrutura da oferta de energia, reduzindo a dependência do exterior, tendo representado, em 2016, 19,8% do total do consumo de origem fóssil. Relativamente ao carvão, este representou cerca de 13% do total de consumo.

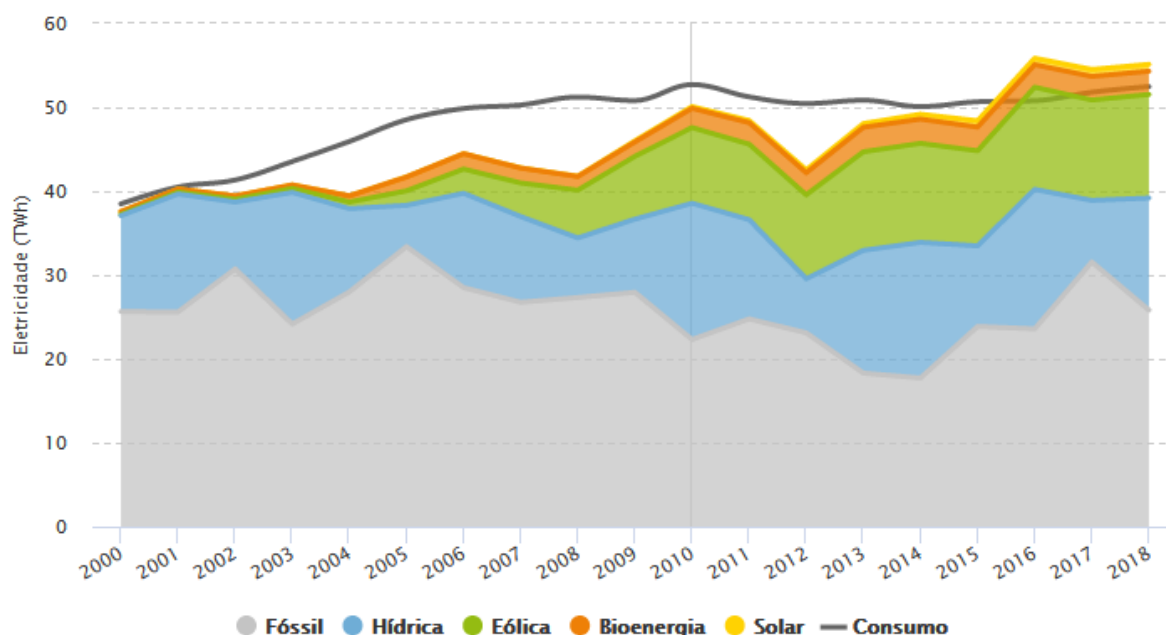


Figura 3 – Evolução da Produção Elétrica em Portugal Continental [11].

Na sequência do plano “Europa 2020”, Portugal opta pela adoção do plano europeu referente à eficiência energética, e revisão do PNAEE. De acordo com o enquadramento do PNAEE, a estrita ligação entre os objetivos clima e energia expressa no pacote ‘energia-clima’ de 2020 foi reafirmada e reforçada com os novos objetivos e energia com aprovação pelos chefes de estado e de governo da União Europeia (UE) para 2030. Às metas referidas, acrescentou-se uma quarta meta respeitante a interligações. A definição de uma nova estratégia visa tornar a eficiência energética uma prioridade política, cujos incrementos promovem a proteção ambiental e a segurança energética com uma relação custo benefício exequível [12].

De acordo com a DGEG, Portugal é um país com escassez de recursos energéticos fósseis endógenos, o que conduziu a uma grande dependência do exterior. Em 2016, essa dependência atingiu o valor de 75%, devido em grande parte às importações de fontes primárias de origem fóssil, principalmente após a subida em 2015 devido ao aumento de importações de carvão e gás natural, como consequência do elevado consumo do setor electroprodutor.

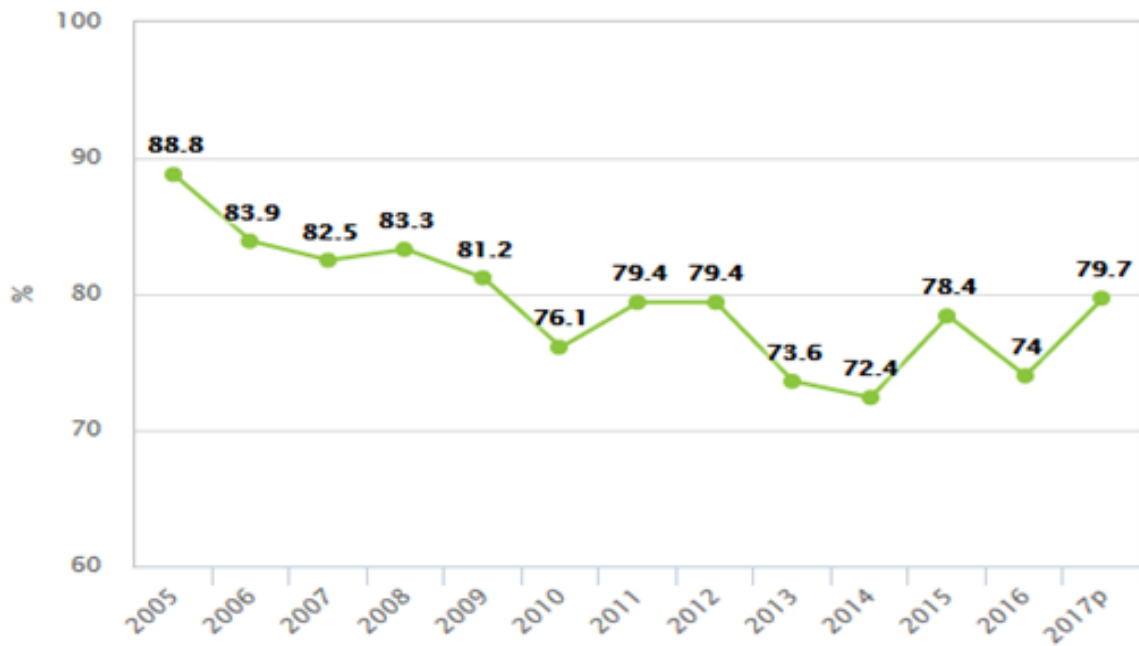


Figura 4 – Dependência energética nacional [9].

No ano 2017, a análise do balanço energético nacional continua a evidenciar o peso das importações de energia, na ordem dos 27,71 Mtep, com um aumento de 8,1% relativamente a 2016. A produção doméstica apresenta uma redução de 12,7% em comparação com o ano anterior, no valor de 5,19 Mtep. Ainda antes, em 2014, após ter sido alcançado o valor mais baixo dos últimos 20 anos com 72,4%, a dependência energética nacional voltou a subir em 2015 face aos outros países. Conforme se pode verificar graficamente na figura 4, seguiu-se a descida em 2016 e nova subida em 2017, atingindo o valor 79,7%, cujo aumento foi devido, em grande parte, à diminuição da produção doméstica e à elevação da importação de energia, situação verificada em 2017 [7].

Sendo o setor da indústria transformadora determinante para este balanço energético (ver figura 5), apesar de não justificar por si só a acentuada redução verificada nos últimos anos, pode-se afirmar que a competitividade das empresas depende dos custos e da disponibilidade de fatores de produção, dos custos de licenciamentos, fiscalidade, ambiente, entre outros. O consumo energético será aqui considerado como um fator de produção a ser gerido com rigor, considerando aspetos como menor preço e menor uso, permitindo maior produção com menores quantidades. Estes pontos são fundamentais para o acréscimo da competitividade, qualquer que seja o seu setor de atividade e mercado, pelo que, faz-se imperativo a

implementação de métodos de eficiência energética para a sobrevivência do setor produtivo nacional.

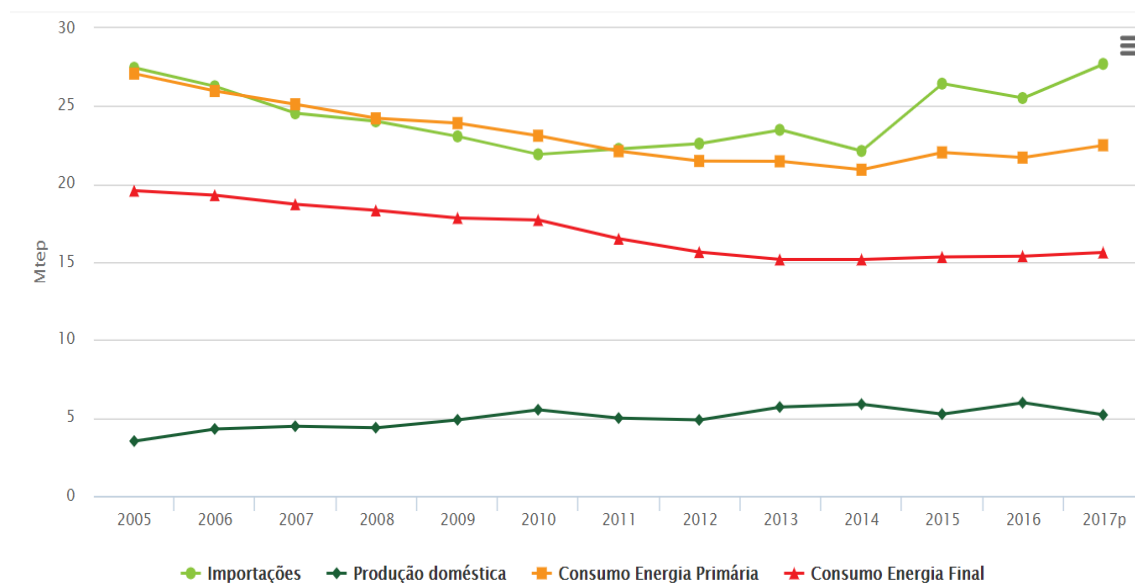


Figura 5 – Gráfico da evolução do balanço energético [7].

2.2. SETOR INDUSTRIAL E FORÇA MOTRIZ

A indústria é caracterizada pelo desenvolvimento de atividades de transformação através de processos distintos, de matérias primas provenientes de outros setores económicos para a obtenção de novos produtos. Estas atividades implicam o uso de vários tipos de energia conforme as suas necessidades e preocupações, para otimização dos seus processos de produção.

Segundo dados da DGEG, o balanço energético total da indústria transformadora atingiu em 2012 o valor de 4 552 358 tep, e foi responsável por um consumo total de energia de 28,9%. A figura 6 ilustra mais detalhadamente os consumos ao longo dos anos, desde 2000 até 2013, que permite perceber a representação que a indústria transformadora possui comparativamente aos outros setores de atividade ligados à energia.

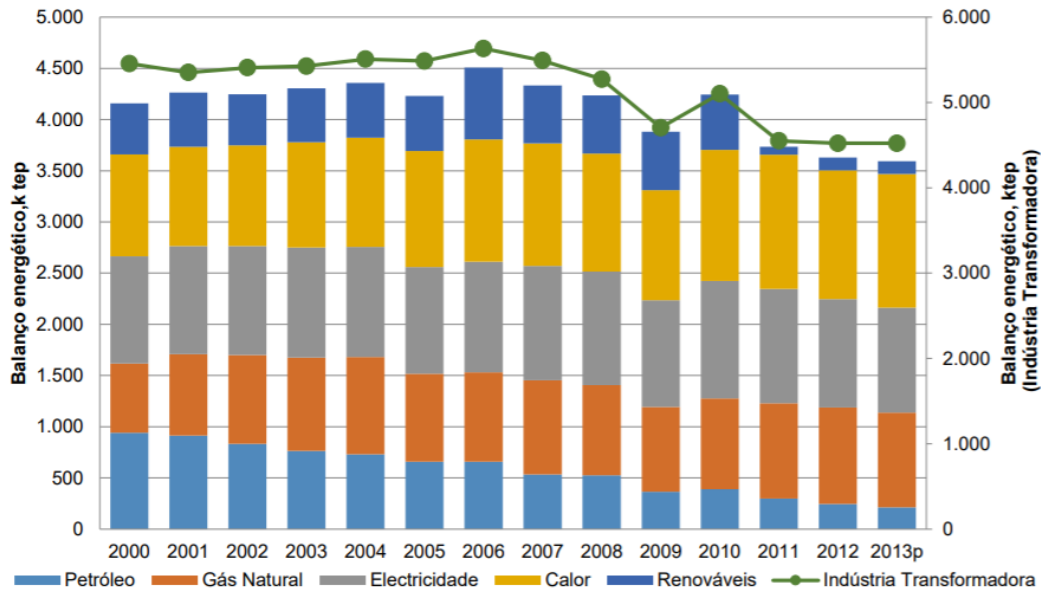


Figura 6 - Evolução do consumo energético [3].

A figura 7, evidencia o consumo de energia primária em tep e a sua evolução de 2012 a 2017, onde se verifica o aumento progressivo do consumo, com valores mais baixos em 2014 e 2016 comparativamente com os anos precedentes e posteriores.

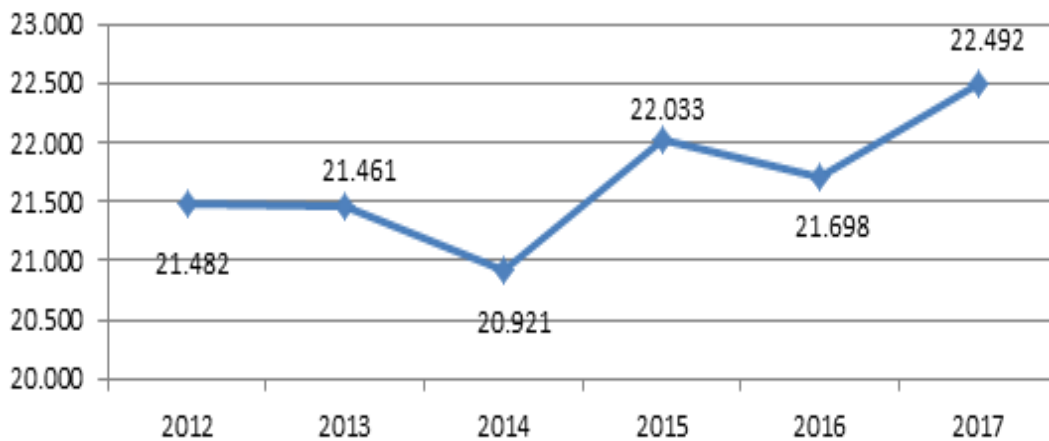


Figura 7 – Consumo de energia primária (Ktep) [9].

É notável, portanto, a preocupação generalizada por parte das empresas com o custo da energia e com o potencial de melhoria que a eficiência energética pode proporcionar. A flexibilidade de adoção de novos procedimentos deve atender a boas práticas de gestão.

Algumas tecnologias que poderão ser de implementação simples, devido ao seu baixo custo de investimento, devem ser alvo de atenção por parte das empresas. De uma forma geral, essas medidas são identificadas como sendo [13]:

- Isolar termicamente superfícies quentes;
- Otimizar as condições de funcionamento dos equipamentos;
- Eliminar fugas de fluídos quentes;
- Dimensionar corretamente as instalações energéticas;
- Eliminar más utilizações de ar comprimido;
- Eliminar fugas de ar comprimido;
- Recuperar a energia térmica em compressores de ar;
- Substituir motores convencionais por motores de alto rendimento;
- Instalar Variadores Eletrónicos de Velocidade (VEV);
- Deslastre de cargas;
- Compensar o fator de potência;
- Otimizar e controlar a iluminação;
- Melhorar o aproveitamento das condições de iluminação natural;
- Implementar sistemas de gestão energética;
- Instalar sistemas de cogeração.

Certamente, o nível de desenvolvimento tecnológico alcançado na atual sociedade industrial, tanto quanto nas instalações de serviços ou residenciais, não seria possível sem a presença maciça de uma máquina, que com a sua simplicidade e robustez, foi capaz de solucionar o problema de produzir movimento e energia mecânica onde existe essa necessidade [14].

No entanto, o consumo de energia elétrica numa instalação industrial é principalmente de energia usada como força motriz de indução trifásica. Assim, é fácil verificar que a força motriz possui elevada representatividade no consumo elétrico da instalação. A redução do consumo de energia associado à força motriz é um fator de grande importância para a melhoria da eficiência energética de uma instalação.

A designação de força motriz é atribuída a sistemas que utilizam energia para produzir movimento. Os sistemas em questão consistem em atuadores, que são motores de diversos tipos, aplicados aos sistemas onde se requer movimento, tendo normalmente outros

dispositivos associados que controlam o seu funcionamento e o adaptam às exigências dos sistemas a serem movidos. Têm funções imprescindíveis em várias indústrias e serviços, destacando-se a indústria extrativa e transformadora, bem como a indústria dos transportes. Nestas indústrias habitualmente se utilizam equipamentos com potências elevadas - dezenas de megawatt. Porém, também existem várias situações onde se aplicam motores de potências baixas, mas com bastante impacto na vida humana, como por exemplo, relógios, leitores de vídeo, equipamentos informáticos, equipamentos de electromedicina, entre outros exemplos. A melhoria da produtividade e da qualidade dos produtos que acompanham o desenvolvimento tecnológico deve-se, em boa parte, ao progresso registado nos sistemas de força motriz.

Neste âmbito, destacam-se aqueles que são realizados com máquinas elétricas e que podem também ser denominados de acionamentos elétricos ou eletromecânicos. Além das propriedades inerentes ao uso da eletricidade que é de fácil transporte e capacidade de disponibilização instantânea até potências muito elevadas, destaca-se o potencial de utilização das máquinas elétricas. Com características como o bom rendimento, a fiabilidade, vida útil geralmente longa, manutenção simples, vasta gama de potências e velocidades, a possibilidade de adaptação a ambientes severos ou com riscos especiais e a facilidade e precisão de manobra.

Em alternativa aos atuadores eletromecânicos, existem outros tipos de motores, como por exemplo, os motores a combustível que são bastante utilizados nos automóveis, turbinas hidráulicas, ou outros, mas que efetivamente possuem um rendimento global inferior e maior necessidade de manutenção comparativamente aos elétricos. As máquinas elétricas são também bastante prestáveis à utilização de sistemas controlados com velocidade variável, onde ela for necessária [15].

Sabendo que a maior parte da força motriz produzida na indústria provém do uso de motores elétricos, aplicados em dispositivos mecânicos, estas cargas assumem um papel crucial do ponto de vista do consumo energético. Da mesma forma, e por consequência, representam as cargas com maior possibilidade de poupança, sendo a mais importante numa ampla variedade de aplicações, como bombas, ventiladores, elevadores, tapetes rolantes e outros.

O setor industrial constitui, portanto, um dos setores com maiores consumos energéticos. Sendo que, o consumo neste setor representa cerca de 30% do consumo final de energia em Portugal. Na indústria transformadora, o aumento da eficiência energética, tal e qual em outros países, exige uma postura de proatividade para melhor adequação dos equipamentos e processos às novas tecnologias, por parte dos industriais, bem como estratégias disponíveis atualmente. Por intermédio de auditorias energéticas, nos diferentes setores da indústria, é possível um exaustivo e detalhado estudo dos processos produtivos. Mais especificamente, identificam os principais equipamentos consumidores de energia e a determinação dos investimentos necessários para a execução das medidas identificadas, e a sua rentabilidade e viabilidade.

De acordo com o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE), sendo a gestão operacional executada pela Agência Nacional de Energia (ADENE), existem previsões de que as instalações Consumidoras Intensivas de Energia (CIE), com consumo anual superior a 500 toneladas equivalente de petróleo (tep), periodicamente efetuem auditorias energéticas que incidam sobre as condições de uso de energia e promovam o aumento da eficiência energética, com inclusão do uso de fontes de energia renovável [16].

Estas medidas refletem a crescente preocupação e importância para com o uso racional e eficiente de energia no setor da indústria. Atualmente, a eficiência energética industrial é essencialmente analisada pela aplicação de indicadores energéticos e por *benchmarking* energético. Este, tem utilidade na perceção dos padrões de uso de energia, identificação de ineficiências na utilização de energia, estimação do potencial de conservação e poupança de energia, e na conceção de políticas para melhorar a economia da energia. Pode ser definido como o processo de medição da *performance* energética de uma instalação fabril, ou até mesmo de um setor industrial face a uma métrica representativa do desempenho otimizado de uma instalação ou indústria de referência. De uma forma geral, o *benchmarking* é frequentemente visto como “a procura das melhores práticas industriais conducentes a um desempenho superior”.

As medidas que tendem a garantir um elevado nível de eficiência energética devem estar implementadas nas fases de produção, transformação, distribuição e de utilização de energia. A utilização racional da energia pressupõe alterações nos comportamentos dos consumidores, complementada pelas tecnologias e processos que resultem na redução dos

consumos. Em todos os setores de atividade, nos mercados cada vez mais competitivos e de alcance global, há necessidade que todos os fatores de produção sejam alvo de otimizações através de boas práticas energéticas, gerando vantagens competitivas para diminuir o risco de perda de competição das empresas [4].

Os motores elétricos, em particular o motor assíncrono de indução, são o tipo de máquina de força motriz mais utilizada na indústria em virtude da sua grande versatilidade, gama de potências, robustez, duração, reduzida manutenção, baixa poluição, facilidade de produção e custos de aquisição relativamente baixos. Responsáveis pela conversão de energia elétrica em mecânica, os motores elétricos apresentam perdas, cujo rendimento se define como a razão entre a potência na saída do acionamento e a potência elétrica absorvida à entrada [6]. Em aplicações industriais, estima-se que os motores elétricos são responsáveis pelo consumo de cerca de 30% a 40% de energia elétrica produzida em todo o mundo.

Os motores elétricos têm vindo a sofrer alterações, existindo modelos que se tornaram obsoletos dando lugar a outros de maior rendimento. Este procedimento de melhoria contínua visa conseguir, com menor custo, melhorar a eficiência dos motores diminuindo perdas na conversão de energia elétrica para energia mecânica. Um motor com um rendimento alto é uma máquina com capacidade de aproveitar o máximo de energia elétrica para convertê-la em movimento. Isto implica a utilização de materiais adequados e quimicamente tratados, para a construção do motor, conforme se explica de forma mais detalhada no ponto 3.3 da presente dissertação.

De acordo com a DGEG, é de salientar que o setor industrial representa 127.648 consumidores, cerca de 2% do número de consumidores em Portugal. Sendo o setor industrial o setor com mais consumos e maior uso de força motriz, a figura 8 representa os subsectores especificados que representam cerca de 74% do consumo global da indústria em Portugal [17].

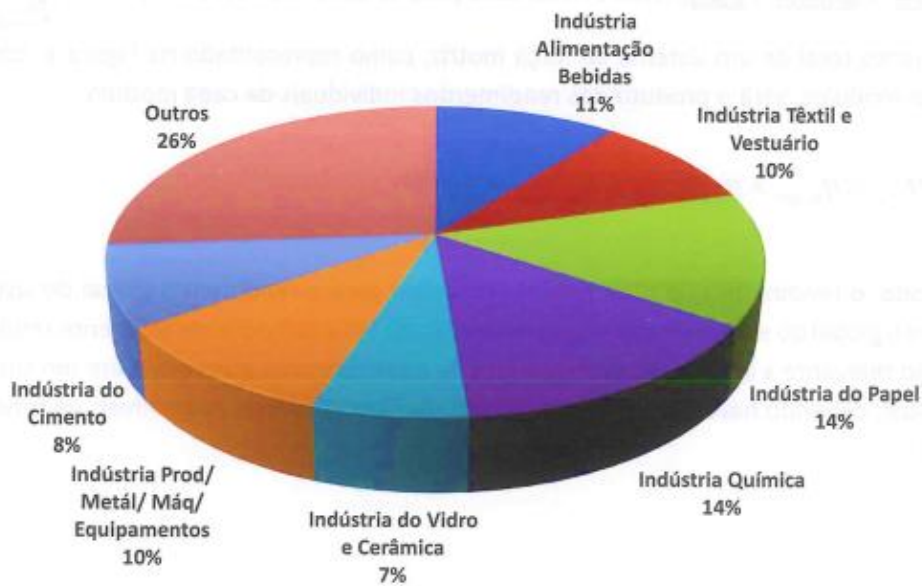


Figura 8 – Gráfico dos consumos dos setores analisados em 2007 [17].

Os motores elétricos, como já foi abordado, são os mais utilizados nas várias indústrias pois combinam benefícios de uso da energia elétrica, entre os quais se resume:

- Variedade de potências disponíveis;
- Limpeza e simplicidade de manobra;
- Construção simples e robusta;
- Adaptabilidade às diversas cargas.

2.3. EFICIÊNCIA NOS SISTEMAS DE FORÇA MOTRIZ

O processo de converter energia elétrica em energia mecânica entregue no veio do motor, inclui perdas que deve ultrapassar a resistência ao fluxo de corrente nas bobinas do estator e do rotor, configurar os campos magnéticos do estator e do rotor onde ocorrem as fugas, compensar as perdas elétricas causadas pelos campos magnéticos, superar o atrito nos rolamentos, superar a resistência do ar ao rotor e ao ventilador, e promover a compensação por perdas de cargas adicionais. Esta quantidade de energia elétrica de entrada que não é convertida em energia de saída útil é perdida em forma de calor.

2.3.1. RENDIMENTO DE SISTEMAS DE FORÇA MOTRIZ

Conforme já foi referido, a eficiência energética pode ser definida como a razão entre a energia útil e a energia total fornecida a um sistema, e quanto maior for esta razão, maior

será o nível de eficiência de um equipamento. Esta relação é expressa como rendimento, através da equação 1.

$$\eta = \frac{P_u}{P_f} = \frac{P_s}{P_e} \quad (1)$$

Onde:

η - Rendimento (%)

P_u – Potência útil (W)

P_f – Potência fornecida ou potência absorvida P_{abs} (W)

P_s – Potência no veio de saída (W)

P_e – Potência no veio de entrada (W)

Os sistemas de força motriz não são apenas constituídos por motores elétricos. Podem integrar 4 módulos distintos, conforme figura 9, que são o controlo de velocidade, motor eléctrico, transmissão mecânica e uso final. O controlo eletrónico de velocidade regula a velocidade do motor, que converte a potência eléctrica (P_e) em potência mecânica (P_m), que é transmitida ao dispositivo de uso final através de transmissão mecânica. A otimização da eficiência global deve atuar ao nível de cada módulo, do qual se destaca o uso, sempre que viável e possível, dos variadores eletrónicos de velocidade [17].

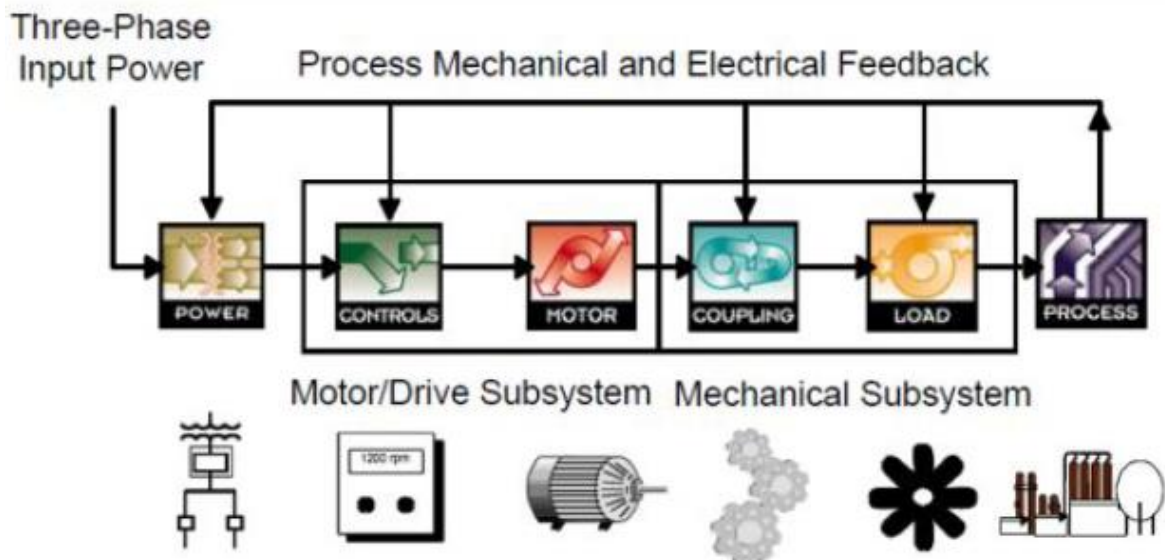


Figura 9 – Sistema completo com motor eléctrico [18].

O rendimento quantifica o que se aproveita de energia que não se dissipa. A perda de energia é a fração de energia fornecida a um componente que não é utilizada. Portanto, considerando que as perdas de um sistema são a diferença entre potência absorvida e potência útil (potência de saída),

$$P_{perdas} = P_{entrada} - P_{saída} \quad (2)$$

Então, o rendimento pode também ser expresso através da equação 3.

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_{perdas}}{P_{entrada}} \right) \quad (3)$$

2.3.2. IMPLICAÇÕES DO RENDIMENTO NOS MOTORES

Sendo os motores grandes consumidores de energia elétrica, podem, por isso mesmo, oferecer poupanças significativas. Porém, habitualmente a escolha de novos equipamentos é baseada no preço do motor, e não na viabilidade econômica a longo prazo.

Uma grande parte dos motores utilizados na indústria são motores de indução em gaiola de esquilo devido ao seu baixo custo, fiabilidade e eficiência. Não existem conexões elétricas ao rotor e a velocidade de um motor de indução é essencialmente determinada pela frequência da alimentação e pelo número de polos do motor. A figura 10 ilustra um motor em gaiola de esquilo.

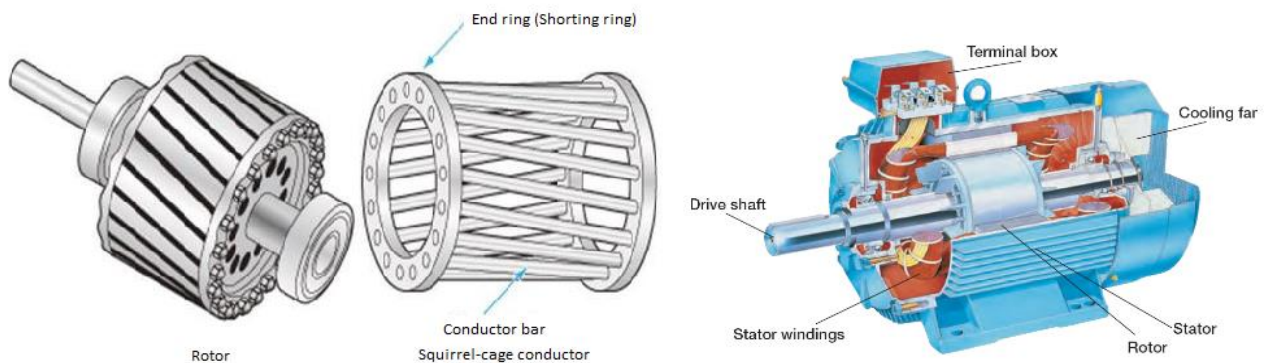


Figura 10 – Componentes de motor em gaiola de esquilo (adaptado de [19]).

Os motores síncronos, que funcionam a velocidade constante – velocidade síncrona, possuem rotor que recebe a corrente de excitação do sistema de excitação. Este tipo de motor é habitualmente mais caro e apresenta mais problemas de manutenção do que um motor de indução. São utilizados em aplicações que requerem velocidade constante, tal como a indústria do papel e de fibra têxtil, que reflete fábricas de produção com alta eficiência

operacional e com necessidade de controlo do fator de potência. São também utilizados em grandes centrais para conduzir o compressor de ar [20].

A eficiência de um processo com motor elétrico depende de vários fatores, dos quais se destacam os seguintes:

- Eficiência do motor;
- Controlo de velocidade do motor;
- Qualidade energética da alimentação;
- Dimensionamento do sistema;
- Rede de distribuição;
- Transmissão mecânica;
- Práticas de manutenção;
- Gestão da carga;
- Eficiência do dispositivo de uso final (por exemplo, ventilador ou bomba).

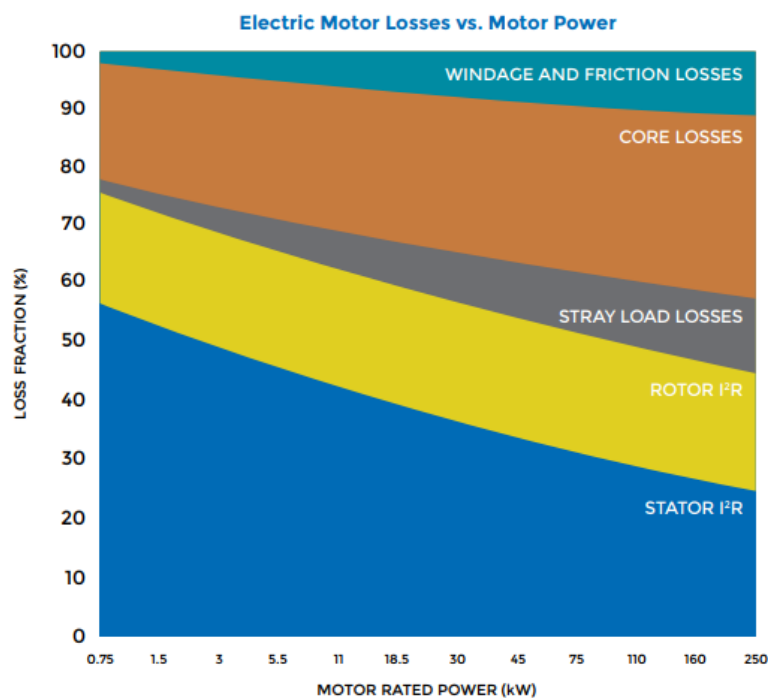


Figura 11 – Fração típica de perdas em 50Hz, motor de indução em gaiola de esquilo de 4 polos [18].

A automação de processos na indústria pode aumentar a produtividade e produzir economias significativas de eletricidade por unidade de produção. A figura 11 elucida as perdas típicas de motores a 50Hz, no caso de motores com rotor em gaiola de esquilo de 4 polos.

Existem vários tipos de perdas que ocorrem num motor elétrico, que são as perdas elétricas, as magnéticas e mecânicas. Estas perdas podem ser reduzidas através da utilização de materiais de qualidade e otimização do próprio design do equipamento. As perdas elétricas aumentam significativamente com o uso da carga, e estas perdas Joule podem ser diminuídas mediante o aumento da seção transversal do estator e do rotor. As perdas magnéticas acontecem nas laminações metálicas do estator e do rotor e são devidas à histerese e correntes parasitas, sendo que variam com a densidade de fluxo e frequência. Estas, podem ser reduzidas pelo aumento da secção transversal do ferro no estator e no rotor, utilizando laminações mais finas e melhores materiais magnéticos. No caso das perdas de origem mecânica, pode-se dizer que estas devem-se à fricção nos rolamentos e à ventilação, situações que podem ser diminuídas utilizando rolamentos de baixa fricção e ventiladores de melhor qualidade [18].

Por volta dos anos 70, os preços da eletricidade começaram a aumentar rapidamente. Muitos fabricantes de motores começaram a oferecer uma linha de máquinas mais eficiente e a estabelecer níveis de rendimento para os motores. A eficiência dos motores elétricos tem exigido características de design otimizado, melhores circuitos elétricos e magnéticos e grande qualidade dos materiais, conforme já referido, e ainda, técnicas otimizadas de design computadorizado.

2.3.3. LEGISLAÇÃO DE NÍVEIS DE EFICIÊNCIA EM MOTORES ELÉTRICOS

Os motores de alto rendimento possuem tipicamente entre 30 e 50% menos perdas que os motores convencionais. Devido à menor resistência no rotor, normalmente têm baixo binário de partida em relação aos motores convencionais equivalentes. As perdas diminuem devido, também, aos harmónicos causados pela aplicação de VEVs [18].

No contexto do *Energy Policy Act*, no ano de 1992 foi definido pelo congresso americano pela primeira vez níveis mínimos de eficiência energética em motores elétricos. Seguidamente, em 1999, a Associação Europeia de Fabricantes de Motores Elétricos (CEMEP) estabeleceu um acordo com a Comissão Europeia (CE) para categorizar os níveis

de eficiência dos motores de 2 e 4 polos, na gama de potências 1,1 a 90kW, que foi revisto em 2004 [6]. Este acordo foi um passo inicial para estabelecer níveis de rendimento. Os motores foram, portanto, classificados de acordo com o seu rendimento:

- EFF1 – Alto Rendimento;
- EFF2 – Rendimento Melhorado;
- EFF3 – Baixo Rendimento.

O Jornal Oficial da UE de 23 de Julho de 2009, comunicou o regulamento CE 640/2009, de 22 de Julho de 2009, emitido pela UE, que dá execução à Diretiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que diz respeito aos requisitos de conceção ecológica para motores elétricos, tendo em vista a redução do consumo de energia dos mesmos, auxiliando a redução das emissões de dióxido de carbono. A partir desta data, foram emitidas atualizações na regulamentação (EU) 4/2014 [21], cujo objetivo foi clarificar e alterar o regulamento original a fim de mitigar impactos imprevistos no mercado e no desempenho dos motores abrangidos. Dentro do mercado Europeu, a legislação conhecida como *European Minimum Energy Performance Standard* (EU MEPS), estabelece níveis mínimos de rendimento para motores Elétricos de Baixa Tensão. A diretiva abrange os motores elétricos com as seguintes características [22]:

- Motores Elétricos trifásicos de indução, de uma velocidade;
- 50 ou 50/60Hz;
- Em Gaiola de Esquilo;
- 2, 4 ou 6 polos;
- Potências entre 0,75kW e 375kW;
- Funcionamento contínuo (S1);
- Tensão nominal (U_n) inferior ou igual a 1 kV.

A norma IEC/EN 60034-30 foi publicada pela *International Electrotechnical Commission* (IEC) em outubro de 2008 (ver Tabela 1). A norma define classes de eficiência para motores e harmoniza os diferentes requisitos para os níveis de eficiência de motores elétricos de indução, amenizando a dificuldade dos fabricantes de motores elétricos no cumprimento técnico no mercado global [23].

Tabela 1 – Níveis de rendimento mínimos de acordo com a IEC 60034-30-1:2014 [24].

Output kW	IE1				IE2				IE3				IE4			
	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole	2 pole	4 pole	6 pole	8 pole
0.12	45.0	50.0	38.3	31.0	53.6	59.1	50.6	39.8	60.8	64.8	57.7	50.7	66.5	69.8	64.9	62.3
0.18	52.8	57.0	45.5	38.0	60.4	64.7	56.6	45.9	65.9	69.9	63.9	58.7	70.8	74.7	70.1	67.2
0.20	54.6	58.5	47.6	39.7	61.9	65.9	58.2	47.4	67.2	71.1	65.4	60.6	71.9	75.8	71.4	68.4
0.25	58.2	61.5	52.1	43.4	64.8	68.5	61.6	50.6	69.7	73.5	68.6	64.1	74.3	77.9	74.1	70.8
0.37	63.9	66.0	59.7	49.7	69.5	72.7	67.6	56.1	73.8	77.3	73.5	69.3	78.1	81.1	78.0	74.3
0.40	64.9	66.8	61.1	50.9	70.4	73.5	68.8	57.2	74.6	78.0	74.4	70.1	78.9	81.7	78.7	74.9
0.55	69.0	70.0	65.8	56.1	74.1	77.1	73.1	61.7	77.8	80.8	77.2	73.0	81.5	83.9	80.9	77.0
0.75	72.1	72.1	70.0	61.2	77.4	79.6	75.9	66.2	80.7	82.5	78.9	75.0	83.5	85.7	82.7	78.4
1.1	75.0	75.0	72.9	66.5	79.6	81.4	78.1	70.8	82.7	84.1	81.0	77.7	85.2	87.2	84.5	80.8
1.5	77.2	77.2	75.2	70.2	81.3	82.8	79.8	74.1	84.2	85.3	82.5	79.7	86.5	88.2	85.9	82.6
2.2	79.7	79.7	77.7	74.2	83.2	84.3	81.8	77.6	85.9	86.7	84.3	81.9	88.0	89.5	87.4	84.5
3	81.5	81.5	79.7	77.0	84.6	85.5	83.3	80.0	87.1	87.7	85.6	83.5	89.1	90.4	88.6	85.9
4	83.1	83.1	81.4	79.2	85.8	86.6	84.6	81.9	88.1	88.6	86.8	84.8	90.0	91.1	89.5	87.1
5.5	84.7	84.7	83.1	81.4	87.0	87.7	86.0	83.8	89.2	89.6	88.0	86.2	90.9	91.9	90.5	88.3
7.5	86.0	86.0	84.7	83.1	88.1	88.7	87.2	85.3	90.1	90.4	89.1	87.3	91.7	92.6	91.3	89.3
11	87.6	87.6	86.4	85.0	89.4	89.8	88.7	86.9	91.2	91.4	90.3	88.6	92.6	93.3	92.3	90.4
15	88.7	88.7	87.7	86.2	90.3	90.6	89.7	88.0	91.9	92.1	91.2	89.6	93.3	93.9	92.9	91.2
18.5	89.3	89.3	88.6	86.9	90.9	91.2	90.4	88.6	92.4	92.6	91.7	90.1	93.7	94.2	93.4	91.7
22	89.9	89.9	89.2	87.4	91.3	91.6	90.9	89.1	92.7	93.0	92.2	90.6	94.0	94.5	93.7	92.1
30	90.7	90.7	90.2	88.3	92.0	92.3	91.7	89.8	93.3	93.6	92.9	91.3	94.5	94.9	94.2	92.7
37	91.2	91.2	90.8	88.8	92.5	92.7	92.2	90.3	93.7	93.9	93.3	91.8	94.8	95.2	94.5	93.1
45	91.7	91.7	91.4	89.2	92.9	93.1	92.7	90.7	94.0	94.2	93.7	92.2	95.0	95.4	94.8	93.4
55	92.1	92.1	91.9	89.7	93.2	93.5	93.1	91.0	94.3	94.6	94.1	92.5	95.3	95.7	95.1	93.7
75	92.7	92.7	92.6	90.3	93.8	94.0	93.7	91.6	94.7	95.0	94.6	93.1	95.6	96.0	95.4	94.2
90	93.0	93.0	92.9	90.7	94.1	94.2	94.0	91.9	95.0	95.2	94.9	93.4	95.8	96.1	95.6	94.4
110	93.3	93.3	93.3	91.1	94.3	94.5	94.3	92.3	95.2	95.4	95.1	93.7	96.0	96.3	95.8	94.7
132	93.5	93.5	93.5	91.5	94.6	94.7	94.6	92.6	95.4	95.6	95.4	94.0	96.2	96.4	96.0	94.9
160	93.8	93.8	93.8	91.9	94.8	94.9	94.8	93.0	95.6	95.8	95.6	94.3	96.3	96.6	96.2	95.1
200	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.3	95.4
250	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.5	95.4
315	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
355	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
400	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
450	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4
500-																
1000	94.0	94.0	94.0	92.5	95.0	95.1	95.0	93.5	95.8	96.0	95.8	94.6	96.5	96.7	96.6	95.4

A norma define quatro classes *International Efficiency* (IE) que definem níveis de eficiência para motores de velocidade simples, trifásicos e de rotor em gaiola de esquilo. A IE refere-se à classe de eficiência para motores de 4 polos a 50Hz. As classes são as seguintes (ver figura 12):

- IE4 – Rendimento *Super Premium*;
- IE3 – Rendimento *Premium*;
- IE2 – Alto Rendimento;
- IE1 – Rendimento *Standard*.

O âmbito da IEC/EN 60034-30 [22] é mais amplo do que o acordo anteriormente em vigor na Europa, pois abrange praticamente todos os motores:

- Velocidade simples, trifásico, 50 e 60Hz;
- 2,4 ou 6 polos;
- Saída nominal de 0.75 a 375 kW;
- Tensão nominal até 1 kV;
- Motores tipo o *Duty S1* (funcionamento contínuo) ou *S3* (funcionamento intermitente ou contínuo) com um fator de duração cíclica nominal de 80% ou superior.

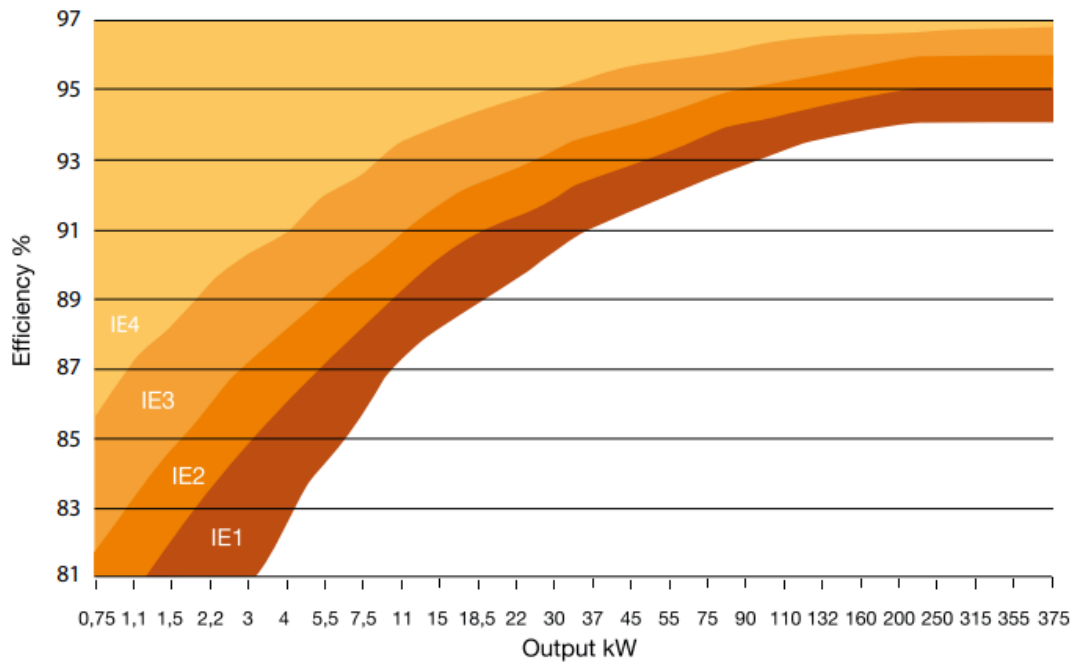


Figura 12 – Classes eficiência – motores de 4 polos [25].

Os motores excluídos da IEC 60034-30-1 são os seguintes [26]:

- Motores de uma velocidade com dez ou mais polos ou motores de múltiplas velocidades;
- Motores completamente integrados numa máquina, como por exemplo, ventiladores e compressores que não podem ser testados separadamente da máquina onde estão aplicados;
- Motores com travão, desde que o travão não possa ser desmontado.

A chapa de característica dos motores deve conter a informação da sua eficiência, e a mesma deve estar explícita para 100%, 75% e 50% da potência nominal, para grandes e pequenos motores. Além disso, deve também conter outras informações como por exemplo, o número de fases, a tensão nominal, o grau de proteção, a classe de isolamento, a frequência nominal, o fator de potência, entre outras características. A figura 13 exemplifica uma chapa de características com as informações mencionadas.

ABB							
CE		IE3		IEC60034-1			
3~ Motor		M3BP 100MLA 2 IMB3/IM1001				2015	
1059383-10							
No. 3G1F1526272013				Ins. cl. F IP 55			
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty	
690 Y	50	3	2895	3.2	0.92	S1	
400 D	50	3	2895	5.4	0.92	S1	
415 D	50	3	2901	5.2	0.92	S1	
440 D	60	3	3492	5	0.92	S1	
460 D	60	3	3500	4.8	0.91	S1	
IE3-50Hz-87.1%(100%)-87.9%(75%)-87.3%(50%) / IE1-60Hz-84.5%(100%)							
Product code		3GBP101410-ADL					
6206-2Z/C3				6205-2Z/C3		42 kg	

Figura 13 – Exemplo de chapa de características de um motor da ABB [24].

Na chapa de características de um motor encontra-se também elementos fundamentais para o seu dimensionamento, como sendo a potência nominal (P_n), a altura do eixo, o tipo de regime em que este funciona, do qual se pode também retirar a potência elétrica absorvida no regime nominal, através do cálculo da potência nominal sobre o valor do rendimento do motor. Além disso, informa o tipo de construção normalizada com que o motor foi fabricado, o índice de proteção mecânica, a temperatura admissível e o tipo de proteção contra explosão, se aplicável.

A temperatura ambiente e a altitude da instalação carecem de análise, a fim de especificar a viabilidade do uso de um motor numa determinada aplicação. No caso de máquinas elétricas que respeitam a norma IEC 60034-30, as condições de funcionamento são, de forma genérica, com temperaturas ambiente máximas de 40°C e mínimas de -15°C, para uma altitude de até 1000 metros. No caso de motores que funcionam em temperaturas de ambiente de forma constante superiores a 40°C, os enrolamentos do motor podem atingir temperaturas prejudiciais ao seu isolamento [6]. Deverá ser considerado como matéria de prevenção materiais isolantes apropriados ou sobredimensionamento do motor. O fator de correção da

potência nominal em função da temperatura ambiente e da altitude, deverá ser tomado em consideração.

O funcionamento eficiente de motores de indução trifásicos depende da qualidade da rede elétrica que os alimenta. Numa rede de elétrica podem ocorrer distorções, e na rede trifásica destaca-se a variação da tensão e da frequência, o desequilíbrio da rede trifásica, onde as tensões possuem amplitudes e defasamentos diferentes e harmónicos. É necessário ter em conta os aspetos construtivos do motor, considerando o local onde será instalado, recorrendo inclusive a manutenções preventivas e inspeções periódicas como também do sistema elétrico de alimentação. Com isto pretende-se, evidentemente, o aumento da vida útil dos motores [27].

2.4. CONCLUSÃO

Ao longo deste capítulo é possível verificar que o consumo de energia na sua forma elétrica é transversal a praticamente todas as áreas da vida humana, num mundo tecnológico como o que vivemos atualmente. E por isso mesmo, as medidas para melhoria dos efeitos negativos associados à produção de energia elétrica, tem movimentado esforços no sentido de aumentar a eficiência no consumo nos vários setores.

Naturalmente, os motores elétricos são equipamentos aplicados em grande parte dos processos que incluem a utilização de energia elétrica, podendo ser de potências muito elevadas, tendo grande expressão económica na fatura energética das empresas.

O desenvolvimento de métodos para aumento da eficiência energética foca-se bastante no setor industrial, onde a melhoria do rendimento das máquinas instaladas pode ter um impacto considerável na poupança energética global.

3. FORÇA MOTRIZ DE ELEVADA EFICIÊNCIA

3.1. INTRODUÇÃO

As histórias do movimento e dos acionamentos cruzam-se várias vezes ao longo do tempo, e muitas vezes, coincidem. Até ao início da era industrial, destacaram-se algumas datas importantes, como sendo:

1764– Invenção do motor a vapor por *James Watt*;

1850– Construção do primeiro torno-revólver por *Pittler*;

1867– *Wernher von Siemens* realiza a construção do primeiro elevador elétrico;

1887– Invenção do motor de CA por *Nikola Tesla*;

1889– Surge a invenção do tear automático, obra de *J. H. Northop*.

A era industrial teve assim início, tendo-se assistido a um alto nível de mecanização e automatização de processos repetitivos, resultantes da produção em série. Esses processos, até então, eram naturalmente executados por humanos, não raras vezes através de vários esforços físicos e em alguns casos com alguma perigosidade para a saúde integral dos trabalhadores. Estes trabalhos foram alvos de uma grande revolução, pois começaram a ser executados por máquinas [28].

A mecanização aplicada aos processos industriais era principalmente com recurso a correias de transmissão, onde a energia era transferida por correias de couro a partir de um motor principal, utilizando polias reversivas e eixos intermédios. A figura 14 é uma fotografia que ilustra uma fábrica onde se utilizavam máquinas movidas através de correias. Dessa forma, era disponibilizada energia onde efetivamente era necessária, ou seja, na máquina correspondente. O motor era normalmente um motor a gás ou uma roda de tamanho considerável movida a água. Após alguns anos, estes tipos de motores foram substituídos por motores elétricos.

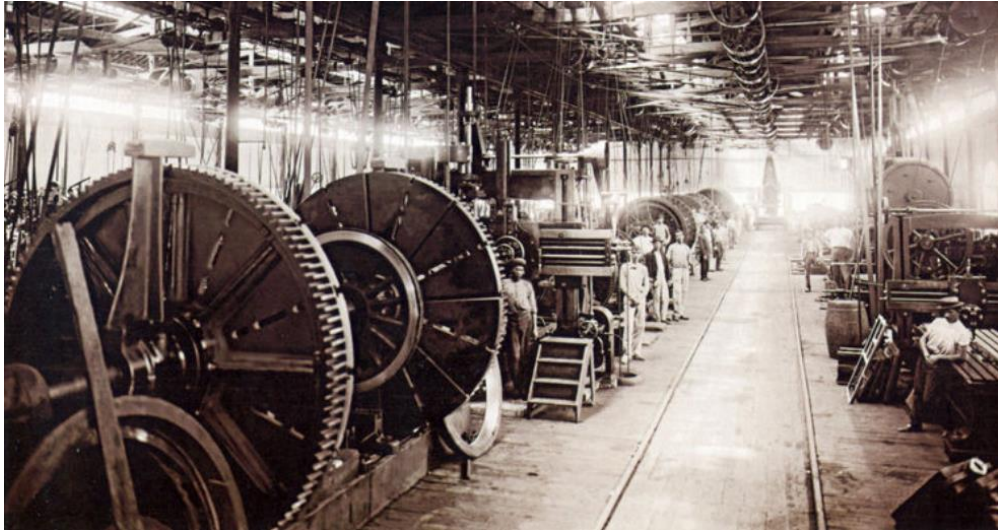


Figura 14 – Máquinas acionadas por correias em nave fabril durante a Revolução Industrial [29].

O binário e a rotação eram aperfeiçoados a cada aplicação da máquina e recorriam a redutores, tendo como base as correias ou engrenagens. O motor principal trabalhava, ainda quando só era necessário ter uma máquina em funcionamento, o que obviamente, do ponto de vista energético, tornava o sistema ineficiente. Além disso, os sistemas eram também bastante perigosos e barulhentos, uma vez que não possuíam qualquer tipo de proteção.

Estas questões começaram a ser dissolvidas após a invenção do motor elétrico, que desde cedo se tornou um grande substituto. A velocidade e o binário continuavam a necessitar de adaptação, pelo que, utilizaram os redutores a jusante dos motores, conectando os veios através de acoplamentos na mesma plataforma. Isto facilitava que a força motriz fosse aplicada unicamente onde era necessária.

Apesar deste progresso, ainda existiam muitas características destes sistemas a serem melhoradas. Por exemplo, a combinação do motor com acoplamento e redutor era muito volumosa para algumas aplicações, e também o elevado número de componentes dificultavam o diagnóstico.

3.2. OBJETIVOS E IMPLICAÇÕES DE MOTORES MAIS EFICIENTES

De acordo com um artigo publicado a 31 de Dezembro de 2015, por *Shyi-Min Lu*, do *Industrial Technology Research Institute* na Tailândia [30], estimou-se que o mercado global de venda de motores elétricos iria atingir 91,75 mil milhões de dólares em 2015 e deveria crescer entre 2015 e 2020 a uma taxa anual de 6,38%. Isto, devido à grande procura por parte dos consumidores, para aplicações como os veículos elétricos, equipamentos de automação industrial e eletrodomésticos energeticamente eficientes. O aumento gradual dos padrões mínimos de eficiência energética global, condicionou o uso de equipamentos não concordantes com a procura, o que consequentemente fez crescer a busca pela eficiência.

Os motores elétricos são parte fundamental da vida cotidiana, de tal forma que raramente pensamos neles. No entanto, e a título de exemplo, quando utilizamos um berbequim esperamos com confiança que ele trabalhe corretamente até à velocidade necessária, e não questionamos qual a velocidade com que deve funcionar, ou como é que utiliza uma quantidade específica de energia para atingir uma determinada velocidade e realizar trabalho. Quando colocamos o berbequim em funcionamento, o mesmo consome energia e quando terminamos, essa energia extraída da rede reduz-se automaticamente sem intervenção da nossa parte. O motor, que consiste em nada mais que uma disposição de bobinas de cobre e ferro laminado, é um conversor de energia que merece a nossa consideração. Ao obter uma compreensão básica de como este funciona, poderemos perceber melhor o seu potencial e as suas limitações, e concluir como é que o seu rendimento melhora drasticamente mediante a implementação de controlos eletrónicos externos.

Para se compreender os liames da utilização e funcionamento de motores elétricos de elevado rendimento, é necessário primeiro abordar os motores elétricos considerados convencionais, para se compreender melhor as diferenças.

A engenharia relacionada com os sistemas de força motriz tem carácter multidisciplinar, em virtude da natureza consideravelmente distinta entre as diversas partes intervenientes no processo.

Como já foi evidenciado, um sistema que inclui um motor elétrico de velocidade variável, é constituído por várias partes [15]:

- Fonte de energia elétrica;

- VEV;
- Máquina elétrica;
- Carga, que é o sistema mecânico a mover;
- Órgãos eletrônicos de controlo e comando do conversor;
- Outros componentes, como acessórios para medição de grandezas, para proteção térmica da máquina elétrica e componentes para adaptação mecânica da máquina à carga.

Existe no mercado uma variedade sólida de soluções para acionamentos elétricos, para as diversas necessidades, bem como inúmeras formas de controlo. Destacam-se as classes de máquinas elétricas a seguir descritas (ver figura 15):

- Corrente contínua, com vários tipos de circuitos de excitação, com magnetos permanentes;
- Assíncronas, de rotor em gaiola de esquilo, de rotor bobinado;
- Síncronas, convencionais, com magnetos permanentes;
- De relutância;
- Passo-a-passo.

Conforme já foi referido no ponto 2.3, os motores elétricos destinam-se a realizar a conversão eletromecânica de energia para produzir movimento ou apenas força. São largamente utilizados na indústria, onde os sistemas de movimentação de fluidos, tais como os sistemas de bombagem, ventilação e compressão de ar, representam cerca de 61% do consumo elétrico dos motores industriais [32]. A estrutura e o princípio do motor e do gerador são opostos, uma vez que o gerador transforma a energia mecânica em energia elétrica, enquanto que o motor transforma energia elétrica em energia cinética. Ambos se baseiam no mesmo princípio de movimento do eixo e os mesmos métodos para converter formas de energia. São indispensáveis em todas as atividades económicas e cotidianas, além de que a sua aplicação estende-se a quase tudo e em todos os lugares, sendo a sua influência bastante significativa no desenvolvimento industrial e no progresso tecnológico [33].

3.2.1. TIPOLOGIAS DE MOTORES ELÉTRICOS

As aplicações dos motores elétricos são diversas, e a sua utilização é intensa nos seguintes contextos:

- Industrial – Maquinaria industrial, como máquinas de corte, de movimentação de materiais, ventiladores, bombas, entre outros;
- Equipamentos de escritório – Impressoras, computadores;
- Equipamentos médicos – como máquinas de diagnóstico que exigem movimentação controlada electromecanicamente;
- Edifícios – Elevadores, portas automáticas;
- Periféricos de uso informático – CD-ROM, CPU, fontes de alimentação, ventilação, entre outros;
- Aplicações domésticas – máquinas de lavar roupa, máquinas de lavar louça, ar condicionado e equipamentos de refrigeração e outros equipamentos de uso comum;
- Indústria dos veículos – Fecho de portas automático, abertura de janelas automatizada, ventilação de radiador, arranque do motor de combustão, motores de veículos elétricos, entre outras.

Por existir uma grande variedade de máquinas, no que diz respeito ao seu princípio físico de funcionamento e à sua construção, são habitualmente divididos em duas categorias: corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), conforme a figura 15 elucidada.

Sendo bastante importantes na área industrial, em especial em aplicações de linhas de controlo de processos onde é necessário ter um controlo aprimorado do posicionamento e da velocidade, o servomotor é intensamente utilizado. Trata-se de um motor devidamente compensado e constituído com baixa inercia, que lhe possibilita um melhor desempenho. A sua forma construtiva é habitualmente quadrangular, e quando é aplicado no funcionamento em velocidades baixas, incorpora ventiladores independentes. O seu rendimento está na ordem dos 85 a 90% nas altas potências.

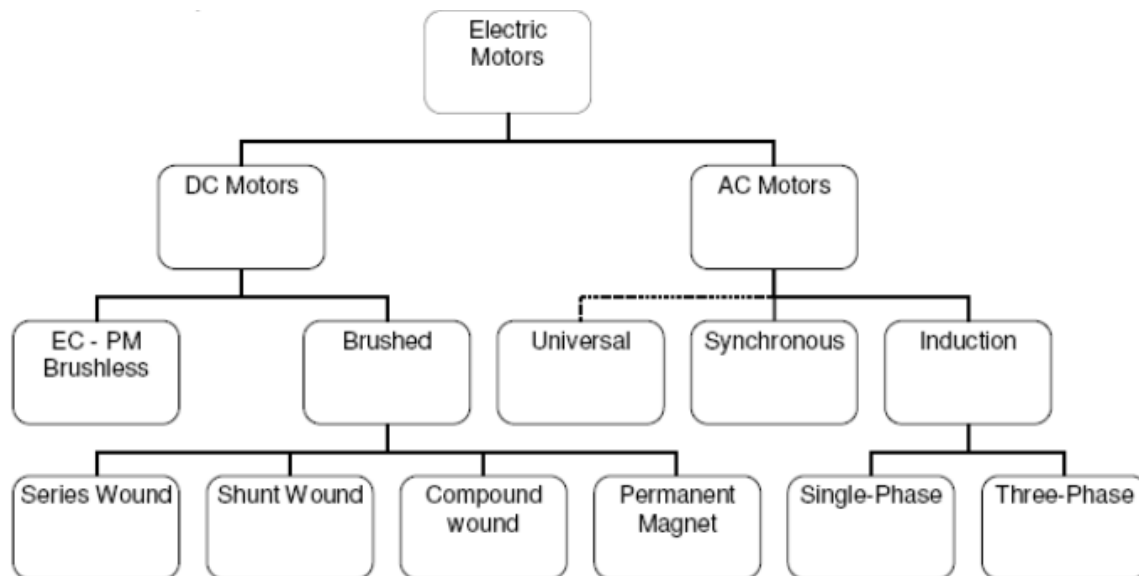


Figura 15 – Tipos de motores elétricos existentes [34].

A tecnologia dos motores elétricos tem superado e conquistado obstáculos no último século. Em 1887, *Nikola Tesla* aplicou o princípio de indução eletromagnética de *Faraday* tendo inventado o primeiro motor de indução. Por volta de 1890, inventou um sistema de energia trifásico CA, conhecido como *Dolivo-Dobrovolsky*, e, desde então, a industrialização e o comércio dos motores ganharam popularidade. Numa fase inicial, devido à sua simplicidade, tinha um custo reduzido e fácil manutenção. Consequentemente, os motores trifásicos foram aplicados em diversos equipamentos da indústria e em equipamentos residenciais e comerciais com rotações fixas [15].

3.2.2. MOTORES DE CORRENTE CONTINUA

Na maioria das aplicações, o motor de indução é utilizado onde se requer velocidade constante. A alteração da velocidade é realizada, por exemplo, por comutadores de polos e regulação da tensão de alimentação do motor de indução. O motor síncrono, é mais robusto, simples e fiável. No seguimento do desenvolvimento tecnológico, estes dois tipos de motores apresentam a mesma facilidade de controlo de velocidade comparativamente com os motores CC.

Estes últimos, os motores CC ditos convencionais, tem vindo a ser substituídos por motores de alimentação em CA com recurso a VEVs, pois para a mesma gama de potências apresentam um custo inicial menor e maior eficiência global.

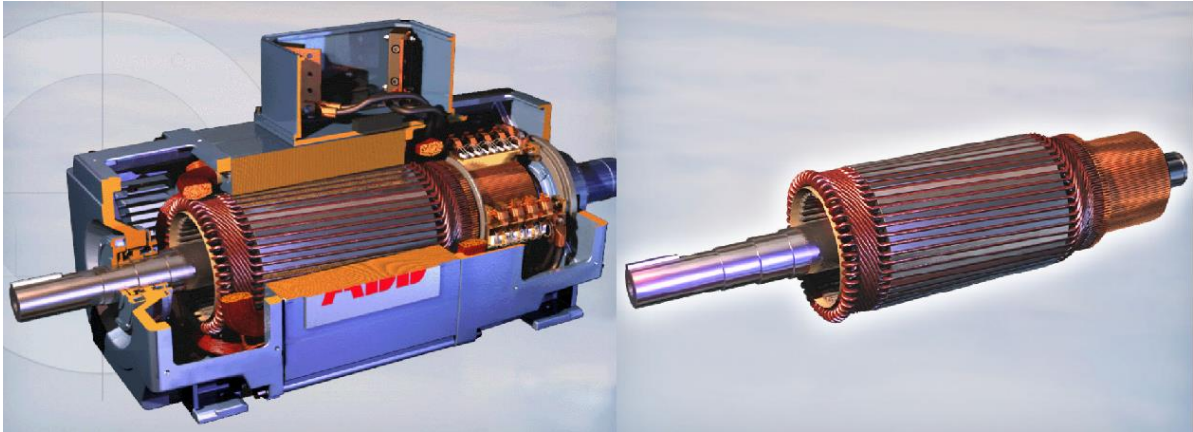


Figura 16 –Motor de corrente contínua, à esquerda. À direita, o respetivo rotor (adaptado de [35]).

O motor de corrente contínua (figura 16) é uma máquina versátil caracterizada por ter um binário superior e uma ampla gama de velocidades, sendo bastante eficiente. Possui custos de aquisição mais elevados comparativamente com motores CA, e custos de manutenção igualmente altos. Devido aos custos elevados, não são muito utilizados na indústria. Apesar de funcionarem a uma velocidade variável com precisão e facilidade de controlo, necessitam de fontes de corrente contínua ou de conversores de corrente alternada em contínua. Verifica-se o seu uso em casos de necessidades estritas onde compensa a sua utilização.

São máquinas reversíveis pois podem funcionar tanto como motores ou como geradores. Dos vários tipos de máquinas CC, podem-se encontrar, no caso das convencionais, as seguintes:

- Excitação independente;
- Autoexcitadas:
 - Autoexcitação série;
 - Autoexcitação paralelo;
 - Autoexcitação composta.

As não convencionais, poderão ser:

- Ímanes permanentes;
- Sem núcleo (*coreless*);
- Sem escovas (*brushless*).

Numa máquina CC, existe a manifestação de dois campos magnéticos que se opõem entre si, dando origem a um campo resultante no seu entreferro. A amplitude, direção e sentido

tem consequências no funcionamento da máquina. Os campos magnéticos aqui expostos, dizem respeito à excitação do circuito indutor e do circuito induzido, que são imprescindíveis para o funcionamento do motor. O campo é apresentado numa direção longitudinal ao entreferro, tendo como denominação campo indutor principal [36].

Sendo assim, o motor CC convencional, é constituído basicamente por um circuito magnético fixo, com enrolamentos de excitação, que é o circuito indutor, formando o estator, e por uma parte móvel a que se chama de rotor. Este, possui um núcleo magnético de secção circular em cuja periferia existem cavas longitudinais que contêm condutores ligados a um coletor, o circuito induzido. O coletor através de escovas fixas no estator, permite a ligação ao exterior e a combinação de sentido das forças eletromotrizes (f.e.m.) nos condutores do induzido, para produção de um valor resultante sempre com o mesmo sentido. Encontra-se representado esquematicamente, na figura 17, a constituição de um motor CC convencional [37].

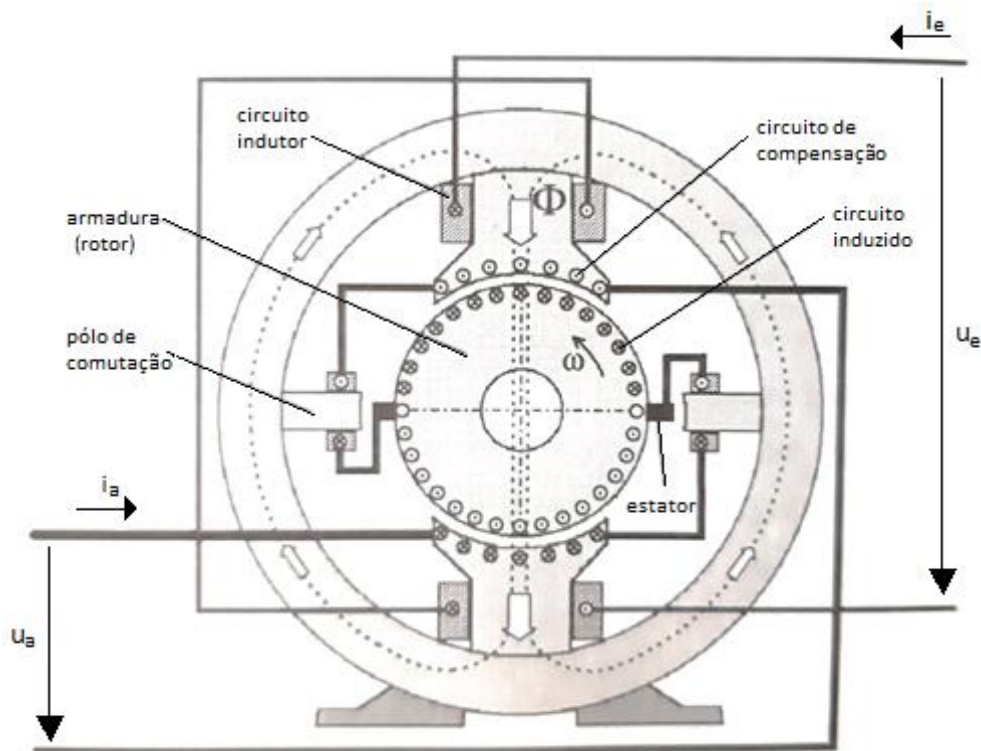


Figura 17–Representação de uma máquina de corrente contínua convencional (adaptado de [15]).

O campo magnético do indutor distribui-se pelo entreferro nas peças polares, atravessando os dentes do induzido perpendicularmente ao entreferro. Cria-se uma componente de campo magnético, pela passagem de corrente nos condutores do induzido e estes tendem a saturar

a região dos polos onde se sobrepõem com o mesmo sentido. Este fenómeno é conhecido como sendo a reação magnética do induzido. Na periferia das peças polares, são implementados enrolamentos de compensação, responsáveis por criar um campo perpendicular ao indutor, de forma a neutralizar aquele que é causado pelo induzido, aumentando a resistência elétrica global deste, o que acarreta maiores perdas [38]. É de salientar que as forças atuam essencialmente entre o ferro do rotor e do estator, e na vizinhança do entreferro, e não entre os condutores. Esta particularidade concede robustez à máquina.

Dos vários tipos de soluções existentes para estabelecer um fluxo de excitação em sistemas de velocidade variável, a mais utilizada é a excitação independente. A excitação série é mais aplicada em sistemas de tração.

Os motores classificados como sendo de imanes permanentes, enquadram-se com características semelhantes aos de excitação independente - a fluxo constante. Geralmente não são fabricados com polos de comutação, pelo que possuem velocidades máximas menores às que se conseguem com máquinas de excitação com polos de comutação. Estes motores, os mais atuais, construídos com materiais como o samário-cobalto ou neodímio-ferro-boro, disponibilizam maior concentração de potência por unidade de volume comparativamente a outros, e o seu sistema de excitação não liberta calor.

A base do dimensionamento de motores de corrente contínua de excitação separada ou magnetos permanentes, dizem respeito às regiões admissíveis de funcionamento que são ditados pelos limites de aquecimento por efeito de Joule e pelo agravamento das condições de comutação. Importa também o limite que traduz a velocidade máxima permitida por fatores mecânicos, e o limite decorrente da perigosidade de saturação ou desmagnetização em máquinas de magnetos permanentes. Em velocidades baixas, torna-se insuficiente a ventilação própria do motor, pelo que se utiliza ventilação externa para auxiliar na remoção do calor de perdas produzidas no interior, à corrente nominal do equipamento [15].

Assim, o dimensionamento do motor deve ter em consideração as cautelosas indicações do fabricante acerca dos pontos assinalados face às exigências a implementar no sistema de força motriz. São necessários cálculos relativos ao aquecimento para o regime de funcionamento expetado, para desde logo ser confrontada a elevação limite de temperatura

de acordo com a classe de isolamento do motor. No caso dos motores de corrente contínua, estes necessitam de manutenção periódica devido ao desgaste inerente às escovas e laminais, e pela acumulação de carbono entre as laminais do coletor, que pode ser incrementada em ambientes com pó ou corrosivos. Apresentam normalmente ranhuras que objetivam permitir a entrada de ar para o interior do motor, correspondente ao índice de proteção IP 23, havendo os que possuem ventilação exterior e o seu grau de proteção pode ultrapassar o IP 50.

3.2.3. MOTORES DE CORRENTE ALTERNADA

O motor de corrente alternada é o mais utilizado. Por ser robusto e ter baixo custo de produção, estima-se que aproximadamente 70% da energia consumida no setor industrial e cerca de 30% da energia elétrica consumida no setor comercial e dos serviços, tem como causa este tipo de cargas [39]. Dentro desta tipologia de motores AC, encontramos os motores síncronos e assíncrono. Os assíncronos ou de indução, são dependentes do número de polos com que são fabricados. Os motores síncronos, funcionam à velocidade de sincronismo, cujo circuito induzido possui um campo magnético constante e pré-definido. Daí serem utilizados quando existem aplicações onde a velocidade deve ser estável, em cargas variáveis, e o binário constante.

Em quase todos os equipamentos, verifica-se a utilidade destes motores aplicados em ventiladores, bombas, compressores, tapetes rolantes, entre outros, pelo que na presente dissertação é pretendido aprofundar o tema de eficiência particularmente neste tipo de motores.

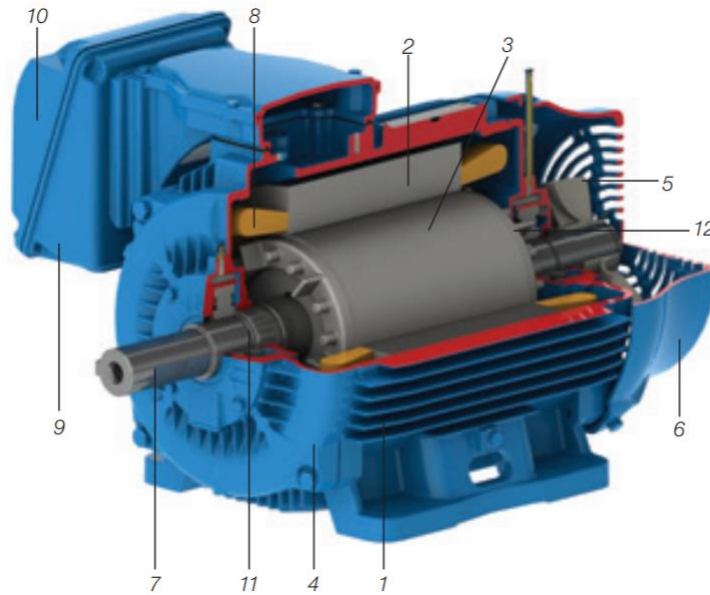


Figura 18 – Motor de indução trifásico [40].

A figura 18 ilustra a constituição de um motor de indução trifásico. A legenda que completa a numeração atribuída ao exemplo é a seguinte [40]:

1. Armação – é a estrutura de suporte da construção, de fabrico em ferro, aço, alumínio, com resistência à corrosão e com refrigeração;
2. Núcleo de laminações – é constituído de chapas de aço magnéticas;
3. Núcleo magnético laminado – com as mesmas características das laminações do estator;
4. Tampa e suporte do rolamento lado do veio;
5. Ventilador – aplicado para refrigeração;
6. Tampa de ventilador;
7. Veio – que transmite a energia mecânica desenvolvida;
8. Enrolamento do estator – possui três conjuntos iguais de bobinas;
9. Caixa de ligações;
10. Terminais;
11. Rolamento;
12. Barras e anéis de curto circuito – peças de fundição em alumínio formadas como uma única peça.

O motor de indução possui o estator, que é a parte fixa da máquina, constituído por chapas ferromagnéticas alinhadas e isoladas entre si para redução das perdas por histerese e correntes de *Foucault*. As chapas utilizadas são em aço magnético obtidas através de

laminagem a quente com tratamento de superfície em um ou ambos os lados. Estão dispostas em planos perpendiculares ao eixo, uma vez que as linhas de fluxo se desenvolvem nesses planos. Nestas ranhuras são colocados os enrolamentos, chamados de enrolamentos do estator, que são alimentados por um sistema trifásico de correntes. Veja-se figura 19.



Figura 19 – Ranhuras e fios do estator de um motor de indução [41].

O enrolamento possui três circuitos elétricos distintos, um por fase, com os seis terminais reunidos na caixa de terminais onde se pode fazer uma ligação em estrela ou triângulo. A fonte de energia é conectada ao enrolamento de campo e as correntes circulam no enrolamento de armadura por indução. A frequência da corrente induzida no condutor relaciona-se com a velocidade do rotor, porém, a relação entre a velocidade do rotor e a frequência da corrente de armadura é tal que a distribuição de corrente resultante para o condutor é estacionária em relação à distribuição do campo, o que resulta na produção de torque a uma velocidade inferior à velocidade síncrona. Daí, serem denominadas de motores assíncronos.

O rotor, cujo exemplo encontra-se na figura 20, é a parte móvel da máquina, e, tal como o estator, é constituído por um circuito magnético laminado, com ranhuras dispostas de forma axial, constituindo-se de pilhas de chapas finas isoladas entre si. Estas ranhuras podem ter várias configurações, do tipo aberto ou semiaberto.

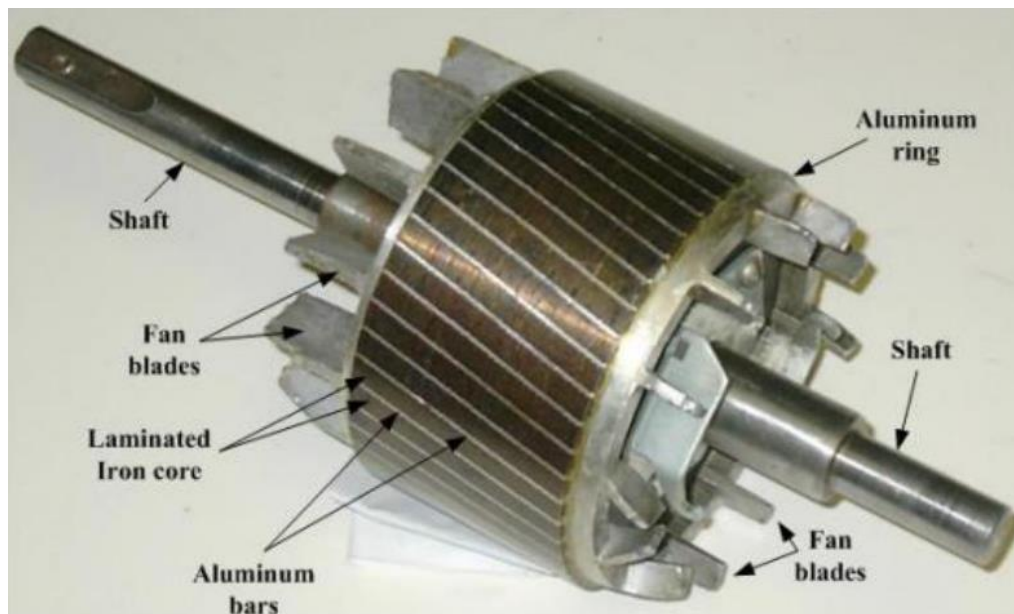


Figura 20 – Rotor de um motor de indução [42].

Ou seja, o rotor é constituído por chapas empilhadas com condutores inseridos em ranhuras, e pode ser de dois tipos:

- Rotor em gaiola de esquilo;
- Rotor bobinado.

Os enrolamentos bobinados do rotor são idênticos aos do estator, e encontram-se inseridos em ranhuras análogas. Os enrolamentos no caso do rotor em gaiola de esquilo, são constituídos por barras de cobre ou de alumínio colocadas em ranhuras no ferro e curto-circuitadas nos topos através de anéis. Estes, são do mesmo material das barras condutoras [37].

Os motores de indução trifásicos de rotor em gaiola de esquilo possuem enrolamentos trifásicos localizados no estator, distribuídos em cavas ao longo do entreferro. As barras do rotor são os circuitos dispostos na periferia do rotor, todas interligadas. O núcleo ferromagnético laminado, é parte constituinte tanto do estator quanto do rotor. A sua simplicidade e robustez fazem destes motores assíncronos a gama mais utilizada.

Entre o estator e o rotor existe abertura, isto é, um espaço de ar que é designado por entreferro que deverá ser tão pequeno quanto possível, a fim de reduzir a relutância magnética total do circuito e dessa forma promover o aumento da indução. Consequentemente, aumenta-se o

fluxo magnético, onde o ar possui permeabilidade bastante inferior às linhas de força do campo magnético, comparativamente com o ferro [38].

As máquinas de corrente alternada, sejam elas máquinas de indução ou síncronas, produzem campo magnético. São criados três campos magnéticos alternados sinusoidais após a alimentação dos enrolamentos em sistema de alimentação trifásico, sendo um campo por cada enrolamento. À semelhança das correntes oriundas do sistema de alimentação, os campos são desfasados entre si de 120°. Os campos, que são sempre dirigidos no mesmo eixo, atingem o seu máximo quando a corrente nos enrolamentos é por sua vez também máxima. O resultado é aquele que já se referiu: surge um campo magnético girante no estator, como resultados dos três campos magnéticos sinusoidais. Este princípio é a chave de funcionamento dos motores de indução.

Ao atravessar o rotor, o campo magnético girante induz uma variação de fluxo nos condutores da gaiola ou do rotor bobinado, criando uma f.e.m. Este princípio vai ao encontro dos estipulados da lei de *Faraday* [43]. Os condutores do rotor estão em circuito fechado pelo que vão ser percorridos por correntes induzidas, e que de acordo com a lei de *Lenz* “têm um sentido tal que, pelas suas ações magnéticas, tendem a opor-se à causa que lhes deu origem”. As correntes são responsáveis pela criação de um campo magnético á volta dos condutores do rotor que resulta num campo que tende a opor-se ao campo magnético girante originado pelo estator.

Ainda de acordo com a lei de *Lenz*, o rotor adquire movimento na direção do sentido de rotação do campo girante, e atinge uma velocidade (n) que é menor que a velocidade de rotação do campo girante (n_s). Se as velocidades fossem iguais, não existiria variação de fluxo, pelo que, não existiria f.e.m, ou seja, o rotor não iria rodar. Esta velocidade do campo girante é chamada de velocidade síncrona, descrita através da expressão 4 e é dependente do número de polos (p) e da frequência da tensão de alimentação (f).

$$n_s = 120 \times \frac{f}{p} \quad (4)$$

A diferença que se verifica entre a velocidade de rotação do rotor (n) e a velocidade síncrona, é designada por deslizamento (s) cuja expressão que a permite calcular é dada pela expressão 5.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (5)$$

Com o intuito de estudar o funcionamento do motor de indução trifásico, é comum utilizar o chamado circuito equivalente. Este método de estudo permite aprimorar a análise e facilitar o cálculo de desempenho do motor. Pressupõe-se que este adquira uma forma idêntica à do circuito equivalente de um transformador, posto que a dedução é realizada de forma semelhante. Pode-se dizer que assume a forma de um transformador generalizado, posto que faz transformação de f.e.m.s e de frequência.

Através do circuito equivalente é possível discriminar as perdas de potência, facilitando um modelo que analisa todos os parâmetros. A figura 21 ilustra o circuito equivalente completo, do estator e do rotor.

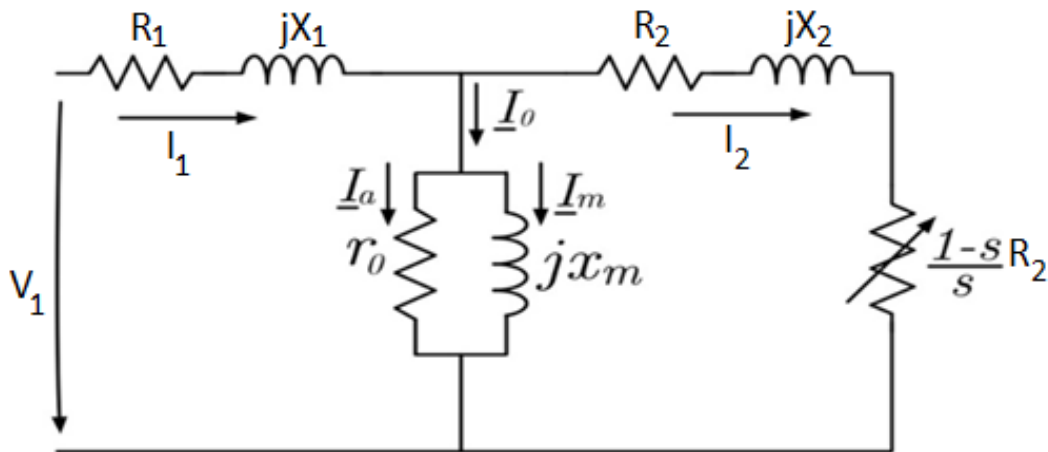


Figura 21 – Circuito equivalente completo por fase do motor de indução [39].

Do circuito equivalente completo, a frequência das correntes no rotor é f_2 , e a corrente elétrica do circuito do rotor é I_2 . Retira-se do esquema que, onde os parâmetros em r dizem respeito ao circuito equivalente do rotor:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + jsX_2} \quad (6)$$

A expressão 6 representa, para qualquer condição de carga especificada com um valor de escorregamento, a corrente do rotor por fase, e provém do circuito real do rotor, por fase.

A potência no circuito do rotor é dada pela expressão 7 e diz respeito à potência de perdas Joule por fase.

$$P_2 = I_2^2 \times R_2 \quad (7)$$

À expressão 6, divide-se o numerador e o denominador pelo escorregamento, obtendo-se a expressão 7. A corrente pode então ser descrita da seguinte forma:

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2 + jX_2}{s}} \quad (8)$$

A potência real associada ao circuito equivalente do rotor, por fase, é dada por:

$$P = I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \quad (9)$$

A equação 10 trata da potência que atravessa o entreferro, incluindo as perdas Joule no rotor e a potência mecânica entregue. A potência total para q fases é [44]:

$$P = q \times I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \quad (10)$$

A potência transferida através do entreferro do estator para o rotor, é obtida através de duas parcelas, obtendo-se:

$$P = I_2^2 \times \left(R_2 + \frac{R_2}{s} \times (1 - s) \right) = I_2^2 \times \frac{R_2}{s} \quad (11)$$

Assim sendo, a potência entregue, a potência mecânica adquire o valor resultante da aplicação da seguinte fórmula:

$$P = I_2^2 \times \left(\frac{R_2}{s} (1 - s) \right) \quad (12)$$

Onde, a parcela que foi retirada da expressão 14, corresponde às perdas de potência Joule no rotor, conforme:

$$P = I_2^2 \times R_2 \quad (13)$$

Dentro desta lógica, tem-se que a soma da expressão 11 e 12 é relativa à potência transmitida ao rotor [37][45].

As três tensões alternadas aplicadas ao estator provocam correntes que produzem um campo magnético girante que induzem tensões nos enrolamentos do rotor, de acordo com a lei de Faraday, que descobriu quando de uma variação de fluxo magnético através de um circuito, surge nele uma força eletromotriz induzida. Então, estas correntes no rotor podem também ser representadas como um campo magnético girante, e resulta que, da interação destes dois

campos magnéticos girantes, oriundos do estator e do rotor, produzem um binário eletromagnético utilizado para mover uma carga mecânica [44].

A fim de aumentar a eficiência dos sistemas de força motriz, têm sido abordadas novas metodologias de construção de motores denominados de elevado rendimento, rendimento *Premium* ou rendimento *Super Premium*. A própria evolução da eletrônica de potência tem contribuído para a implementação dos variadores eletrônicos de velocidade e dos arrancadores suaves, que proporcionam melhorias significativas nas condições de funcionamento dos processos.

3.3. MOTORES ELÉTRICOS DE ELEVADA EFICIÊNCIA

Na década de 1980, devido ao rápido desenvolvimento dos circuitos integrados (IC), da eletrônica de potência e de tecnologias avançadas de controle, surgiram funções de controle de motores mais completas e complexas, com a utilização de microprocessadores e processadores de sinais digitais.

Os motores de alto rendimento apresentaram-se como uma alternativa para a economia de energia em sistemas de força motriz, apesar de não serem solução definitiva para todas as problemáticas de caráter energético relacionadas com máquinas de indução, uma vez que são também suscetíveis dos fatores externos. Nos últimos anos, académicos e industriais tem vindo continuamente a promover a importância de desenvolver motores de elevada eficiência, entrando em estudos teóricos, e os fabricantes tem procurado ir ao encontro das tendências de padrões energéticos dos motores elétricos.

Assim, a procura por motores de rendimento cada vez mais elevado tem aumentado ano após ano e, em 2010, o IE2 foi implementado na UE e na China tornando-se um padrão comum de eficiência energética nesses países. Os países que atualmente definem o IE2 como padrão mínimo de eficiência energética são os EUA, Canadá, Coreia do Sul, Austrália, nova Zelândia, EU e China. Durante 2010 e 2011, foi implementado o padrão IE3 nos Estados Unidos e no Canadá, tendo impulsionado o aumento da procura por motores deste padrão em 25%, segundo *Shyi-Min Lu*.

Existe atualmente várias normas de eficiência de motores assíncronos em vários países. Além das normas e classes de eficiência, existe também uma panóplia de diferentes métodos

de teste para determinação da eficiência. Uma comparação internacional de classes individuais, não apenas é difícil, como também dispendiosa.

O IEC desenvolveu uma nova norma que objetiva a harmonização das classes de eficiência de alcance intercontinental, a norma IEC 60034-30-1:2014 para substituir os diferentes sistemas nacionais. Foi introduzido também um novo procedimento para medição da eficiência que igualmente contribui para a harmonização internacional. Por causa dos requisitos legais, os utilizadores são também obrigados a produzir unidades de acionamento com eficiência ideal, o que aumenta os custos e os desafios logísticos. A figura 22 evidencia as datas em que as classes de eficiência têm a sua aplicação, nos diversos países, de acordo com a empresa *NORD Drive Systems*, e também a disponibilidade de tecnologia da mesma em face das exigências normativas [46].

Country	Efficiency class	Statutory starting date	Availability from NORD
Switzerland	IE2	July 2011	available
Europe	IE2	June 2011	available
Europe	IE3	2015/2017	available
USA	Premium (IE3)	December 2010	available
Canada	Premium (IE3)	December 2010	available
Brazil	Alto Redimento (IE2)	December 2009	available
China	Grade 2 (IE2)	September 2016/17	available
Korea	MEPS (IE2)	January 2010	available
Australia	MEPS (IE2)	2006	available
Mexico	MEPS (IE3)	2011	available

Figura 22 – Datas aplicadas para implementação de classes de eficiência [46].

3.3.1. CONSTITUIÇÃO DE MOTORES DE ELEVADA EFICIÊNCIA

Para que um motor tenha elevada eficiência é necessário ter em consideração diversos fatores, entre os quais, o projeto e construção para elevação do rendimento tendo em conta os materiais adequados. Sendo que, a diminuição das perdas é o objetivo principal. Este

processo de redução tem como consequência o aumento do investimento devido aos custos de fabrico do equipamento, daí serem mais dispendiosos em comparação com os convencionais. Apesar disso, esse custo adicional tem retorno financeiro positivo ao longo do tempo, devido ao seu menor custo operacional, que geralmente são baixos e os seus benefícios do ponto de vista económica evidenciam-se, uma vez que em condições normais de operação o motor pode durar mais de 12 anos. Associada à redução de perdas tem-se a implementação de materiais construtivos de qualidade melhorada e com melhores acabamentos.

Considerando os princípios de funcionamento de um motor como já foi abordado no ponto 3.1, e a ocorrência de perdas na transformação da energia eléctrica em energia mecânica, pode-se dividir os tipos de perdas como sendo:

- Perdas Joule no estator (P_{J1});
- Perdas Joule no rotor (P_{J2});
- Perdas no ferro (magnéticas) (P_{HF});
- Perdas mecânicas por atrito e ventilação (P_{AV}).

A melhoria dos pontos vitais onde se concentra a maior parte das perdas, é a principal característica dos motores de elevado rendimento. As perdas aumentam acentuadamente consoante a carga aplicada no veio do motor. As perdas por efeito de Joule poderão ser diminuídas mediante o aumento da seção dos condutores. Já as perdas magnéticas poderão ser diminuídas através do aumento da seção do ferro no estator e rotor, ou pelo uso de melhores materiais magnéticos, uma vez que este tipo de perdas é devido ao efeito de histerese e correntes de Foucault e a correntes induzidas que variam com a densidade de fluxo e frequência. O atrito nos rolamentos e o impacto aerodinâmico da ventilação originam perdas mecânicas, sendo que as primeiras dependem da lubrificação, do alinhamento e da propria montagem do motor, ao passo que as aberturas de ventilação e formato das barras do rotor influenciam as perdas devidas à ventilação. Podem ser reduzidas mediante a otimização do ventilador, desenho e materiais, e com o tipo de rolamentos implementado, rolamentos com baixo atrito, reproduzindo-se em menos ruídos e vibrações durante o funcionamento do motor.

Existem ainda as perdas adicionais (P_{AD}) ou suplementares, que são oriundas de perdas não classificadas anteriormente ou perdas por dispersão, e são representativas de 5% a 20% das

perdas totais. São definidas como sendo a diferença entre as perdas totais do motor e a soma dos restantes tipos de perdas. Poderão ser devidas à distribuição não uniforme da corrente nos enrolamentos, ao efeito de saturação e imperfeições de densidade do campo magnético, consequências das ranhuras do estator e do rotor. Provocam perdas nas laminas do estator e do rotor, ocasionando perdas denominadas por perdas *óhmicas* nas barras das gaiolas, relacionadas com os harmônicos da corrente. Na cabeça das bobines ocorrem também perdas nas partes metálicas junto ao campo magnético.

O projeto de construção dos enrolamentos do estator é fundamental pois interfere nas perdas, como sendo a razão existente entre a largura do entreferro e a abertura das ranhuras, entre a quantidade de ranhuras do estator e do rotor e das superfícies das chapas magnéticas. Estas perdas variam com o quadrado da corrente, sensivelmente. Através de um projeto cuidado e otimizado, é possível a redução destas perdas. O incremento da geometria e dimensões do motor, propriedades e quantidades de materiais em uso, aliadas a uma melhor qualidade de fabrico, são medidas a ponderar no combate às perdas adicionais ou suplementares.

Utilizam-se chapas magnéticas de perdas mais reduzidas e retifica-se a componente mecânica, especialmente na ventilação para redução da sua potência absorvida e do nível de ruído. Estas medidas aplicadas durante a construção do motor, considerando um motor de idêntica dimensão, resulta num aumento de peso na ordem dos 15% e de aumento de preço na ordem de 20 a 25%. Apesar disso, o valor da melhoria da eficiência compreende-se entre 2 a 4,5% e, portanto, permite uma amortização rápida do preço de investimento do motor [6].

Tipicamente, as melhorias observadas a nível construtivo, são de acordo com o seguinte conteúdo:

- Uso de ferro laminado por camadas – reduz perdas no ferro;
- Melhoria do circuito magnético – permite menos perdas no ferro;
- Tratamento térmico do rotor – reduz o valor de resistência que consequentemente perdas mais baixas;
- Redução das bobines do circuito indutor – menores perdas por efeito de Joule;
- Rolamentos de melhor qualidade – menos perdas mecânicas;
- Melhoria do sistema de ventilação – reduz a temperatura e diminui os ruídos;
- Rotor largo – reduz o valor de reactância de fugas;

- Aumento da quantidade de cobre – diminui perdas e calor gerado;
- Redução do entreferro – menores perdas parasitas.

3.3.2. PRINCÍPIOS DO FUNCIONAMENTO

A potência absorvida da rede subtraída às perdas (ΣP) resulta na potência mecânica (P_{mec}) disponível no eixo do motor. O rendimento η é descrito na equação 14. Pode ser dado também pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + \Sigma P} = \frac{P_{elec} - \Sigma P}{P_{elec}} \quad (14)$$

$$\text{e, } P_{elec} = P_m + \Sigma P \quad (15)$$

Um motor de alto rendimento possui menores perdas, uma vez que produz a mesma potência mecânica de saída com uma potência de entrada menor comparativamente com um motor convencional, pelo que, possui um custo de funcionamento também menor. Além disso, estes motores apresentam um fator de potência mais alto, temperaturas de funcionamento mais baixas, maior rendimento para cargas mais baixas e mitigam o sobredimensionamento em casos onde não é possível proceder à correção da potência do motor [37]. Os fabricantes aumentaram a massa de materiais ativos, cobre e ferro, para reduzir as induções, as densidades de corrente, e conseqüentemente diminuir as perdas no cobre e no ferro.

Uma observação importante é o facto de que uma gestão de energia coerente requer que todo o sistema seja bem dimensionado para diminuir o desperdício de energia, conforme já foi referido no contexto das perdas a serem reduzidas num motor de alto rendimento. Apesar de se poder minimizar essas perdas, com foco nas características do motor, este pode representar uma percentagem que poderá ser colmatada com o correto uso de todo o sistema. Está claro que a aplicação de um motor classificado como sendo de elevada eficiência poderá permitir uma substancial poupança.

Com vários benefícios de ordem económica, o custo destes motores está englobado no seu funcionamento e nas vantagens que ele produz na aplicação real, e a economia associada ao consumo de energia e o tempo de retorno do investimento, estão em função das suas características de eficiência, do seu tempo de funcionamento e da potência solicitada pela carga. Conta-se igualmente com a tarifa de energia aplicada ao contexto onde o motor exerce a sua função, bem como, obviamente, do preço inicial.

De uma forma geral, o desempenho dos motores elétricos está associado a parâmetros de rendimento, velocidade, aceleração, binário de arranque, classe de isolamento, temperatura e tipo de estrutura. A especificação técnica define os requisitos de desempenho descrevendo as condições de funcionamento do motor, conforme a chapa de características. O motor deve ser adequado à carga funcionando entre 70% a 80% da potência nominal (P_n) [36]. Da mesma forma, um motor de alto rendimento obedece a estes princípios de requisitos técnicos. A estrutura, ou carcaça, obedece geralmente a um padrão, não apresentando diferenças significativas nesse aspecto.

Considerando que um motor funciona H horas anualmente, e solicita uma potência ativa à rede P_A expressa em kW, a energia anualmente consumida poderá ser deduzida através da seguinte equação:

$$E = H \times P \quad (16)$$

Com base no preço da energia elétrica no país onde o motor for aplicado, pode-se obter o tempo de retorno do investimento, atendendo igualmente ao número de horas em que trabalha, a potência da carga e as diferenças no rendimento.

No que diz respeito a potência ativa, é fundamental referir também a importância do fator de potência como fator de relação entre a potência que o motor efetivamente necessita para acionar uma determinada carga e a potência total solicitada à rede, denominada por potência aparente.

A potência aparente complexa S é dada como sendo:

$$\dot{S} = \dot{U} \times \dot{I}^* \quad (17)$$

Em que: $\dot{S} = U \times I \angle \varphi \quad (18)$

E, $\dot{S} = U \times I \times \cos(\varphi) + jU \times I \times \sin(\varphi) \quad (19)$

Portanto, com base nas equações acima conclui-se que a potência aparente complexa é dada por:

$$S = P + jQ \quad (20)$$

Das equações 19 e 20 divide-se a potência em três componentes:

✓ Potência aparente (S) onde:

$$|\bar{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (21)$$

✓ Potência ativa (P) onde:

$$P = U \times I \times \cos(\varphi) \quad (22)$$

✓ Potência reativa (Q) em que:

$$Q = U \times I \times \sin(\varphi) \quad (23)$$

Sendo que U é a tensão e I a intensidade de corrente e φ o desfasamento entre a tensão e a intensidade de corrente elétrica.

A potência aparente é a parcela de transformação de energia elétrica em energia útil. Está relacionada com trabalho mecânico e perdas. A potência reativa é a energia intermediária para excitação do campo magnético tornando possível a utilização da energia efetiva que realiza trabalho da energia ativa. Ou seja, a potência reativa é solicitada por equipamentos com bobinas alimentadas em corrente alternada que a solicitam, potência esta que não realiza trabalho e, no entanto, gera uma corrente magnetizante ou reativa indispensável à criação do fluxo magnético para o funcionamento dos equipamentos. Os motores de indução, transformadores, balastros ferromagnéticos são exemplos de equipamentos que possuem bobinas e utilizam essa potência denominada reativa. A potência aparente é a soma vetorial da potência ativa e a potência reativa. Esta potência é usada para dimensionamento de motores e transformadores, e até mesmo de condutores, entre outros [45].

O fator de potência ($\cos \varphi$), representa a fração de energia elétrica que efetivamente é transformada em trabalho, que decorre diretamente da relação:

$$P = S \times \cos(\varphi) \quad (24)$$

Um baixo fator de potência, representa motores superdimensionados, tendo pouca carga. É causa de maiores correntes na linha de alimentação, maiores quedas de tensão na linha de alimentação e maiores perdas na linha de alimentação. É por isso mesmo relevante trabalhar com um fator de potência elevado. Existe inclusive, legislação quanto às especificações mínimas para as empresas trabalharem com um dado fator de potência, sob risco de penalizações financeiras. Alterações na legislação em vigor desde 1 de janeiro de 2012, implicam a fixação de um valor de mais exigência para o limiar de faturação de energia

reativa indutiva, consumida num período fora de vazio, com importantes penalizações em clientes que até então não efetuavam pagamento de energia reativa, passando a ser alvo de encargos consideráveis na sua fatura energética. A aplicação de baterias de condensadores poderá satisfazer requisitos de melhoria do fator, pela redução da energia reativa.

Motores de elevado rendimento são, portanto, equipamentos que além das características físicas melhoradas, apresentam inerentemente ao seu funcionamento um fator de potência mais elevado, em comparação com os motores convencionais ou de rendimento inferior.

3.4. VARIADORES DE VELOCIDADE

Uma grande parte das aplicações onde se utiliza motores elétricos, beneficia em termos de consumo de energia elétrica e de desempenho global, se a velocidade do motor se ajustar às necessidades do processo. Os motores elétricos são equipamentos de aplicação generalizada nos vários setores de atividade, desde a indústria aos serviços e na sua maioria encontram-se sobredimensionados. A aplicação de VEVs disponibiliza aos seus utilizadores benefícios no controlo de velocidade e aumento de vida útil do motor. Estas vantagens induzem a reduções de custos energéticos e encargos com manutenção [6].

3.4.1. CONTEXTO HISTÓRICO DOS VARIADORES DE VELOCIDADE

Foi no ano de 1911, que Kramer construiu um sistema capaz de variar a velocidade de um motor de indução trifásico com rotor bobinado. No decorrer dos anos 20 apareceram os primeiros dispositivos eletrónicos de arco, como válvulas de vapor de mercúrio, trazendo perspectivas de realização de retificação controlada. Já no início dos anos 50, surgem os semicondutores de estado sólido, o díodo e o transístor, pioneiros e responsáveis pelo desenvolvimento da eletrónica que conhecemos nos dias de hoje. No final dessa mesma época, já existiam retificadores de potência a díodos [15].

Na época de 1960, surge o tirístor que foi muito importante para o desenvolvimento da eletrónica de potência atual. Intensificou o desenvolvimento de conversores estáticos de comutação natural fiáveis, como os retificadores, os ciclo conversores e os controladores de fase. Estiveram na base de invenções importantes no âmbito da transmissão de energia em corrente contínua e impulsionou o eclodir de variadores eletrónicos de velocidade para acionamentos. Mas, só nos anos 80 é que se concretizou o progresso no contexto dos

semicondutores, associado ao surto de desenvolvimento de microprocessadores com especiais consequências positivas no domínio da automação e controlo. Começaram a surgir intensamente os autómatos programáveis, as redes de comunicação digital e as hierarquias de automação. Surge ainda nessa época, os tirístores comutáveis, *Gate Turn Off* (GTO), alargando a gama de potência dos onduladores a gamas muito altas de potência. Surge o *Metal Oxid Silicon Field Effect Transistor* (MOSFET), transístores de potência por efeito de campo.

A partir de 1990, surge uma geração de dispositivos semicondutores de potência com excelentes características de comutação de energia, os designados transístores de porta isolada, conhecidos como *Isolated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Atualmente, são os mais usados em onduladores para controlo. A figura 23 ilustra a parte de potência de um conversor genérico, sem aquisição de sinais e controlo.

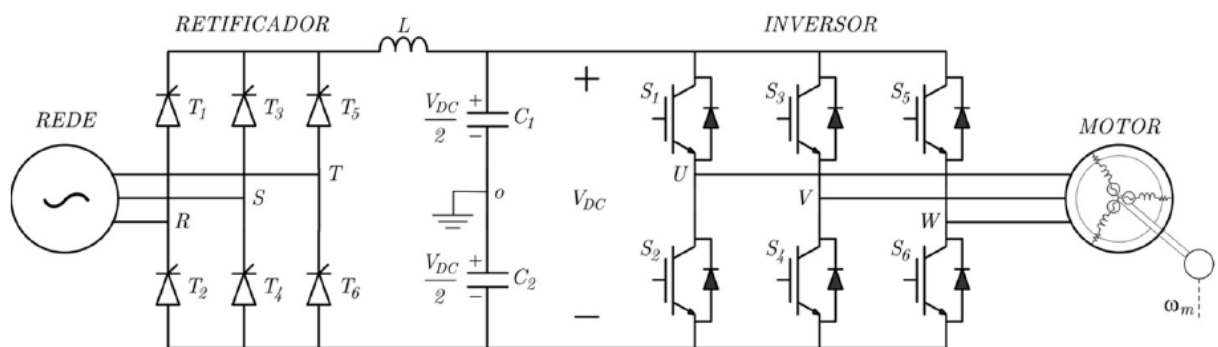


Figura 23 – Esquema genérico de um conversor [39].

A necessidade de flexibilizar os processos motivou fortemente uma procura por novas tecnologias, tendo sido imperativo adaptar as rotações a todas as gamas de forma rápida, simples e eficaz. Atualmente, o controlo de movimento em indústrias deve ser coerente com os requisitos atuais de flexibilidade, produtividade e eficiência.

3.4.2. FUNCIONAMENTO E MÉTODOS DE CONVERSÃO DE UM VARIADOR

Um VEV ou conversor de frequência é, portanto, um dispositivo capaz de controlar a velocidade de um motor elétrico, e pretende-se com ele:

- Melhoria do controlo dos processos;
- Redução do uso de energia e geração de energia eficientemente;

- Diminuição do desgaste mecânico nas aplicações;
- Otimização da operação de várias aplicações dependentes de motores.

Para conversão de energia, podem ser utilizados também recursos naturais e renováveis, tal e qual o sol ou o vento. Em recursos hídricos, os VEV ou conversores de frequência são utilizados a fim de combinar fontes convencionais e armazenamento de energia para criação de soluções de gestão energética [47].

Um VEV poderá permitir que o motor funcione a velocidades diferentes da velocidade fixa, determinada pela frequência da rede AC (50Hz no caso de Portugal) e pelo número de polos do motor. Obtém-se modificando a frequência e a entrada de tensão do motor. Daí que, estes equipamentos são comumente denominados também de conversores de frequência. São constituídos por dispositivos que trabalham à semelhança de interruptores, no sentido em que quando fechados, isto é, a conduzir corrente, os dispositivos apresentam quantidades muito baixas e quando abertos tem corrente de fuga desprezável, originando dissipações mínimas de energia no conversor. Quando os dispositivos de manobra assim o permitem, pode-se comandar os conversores de forma a ter distorção apenas em altas gamas de frequência facilmente filtradas, o que vai ao encontro das técnicas de comando tipicamente conhecidas por *Pulse-Width Modulation* (PWM), cuja tradução em português é: modulação de largura de impulso.

Normalmente, classificam-se quanto ao tipo de conversão que efetuam, sendo três as grandes classes de variadores ou conversores:

- Conversores CC-CC – reguladores de corrente contínua ou “*choppers*”;
- Conversores CA-CC – retificadores e onduladores;
- Conversores CA-CA – reguladores de corrente alternada, conversores diretos de frequência e cicloconversores.

A relação entre a rotação, frequência e número de polos de um motor de indução, bem como o seu escorregamento, obedece à seguinte equação:

$$n = \frac{120f_1 \times (1-s)}{p} \quad (25)$$

Onde n diz respeito à velocidade de rotação mecânica (rpm), f1 à frequência da tensão de alimentação, p ao número de polos e s ao escorregamento. Da expressão 25, compreende-se

que para atuar um motor em termos de velocidade, são necessários 3 parâmetros fundamentais. O uso de VEVs implica a transformação da tensão da rede, cuja amplitude e frequência são constantes, numa tensão de amplitude e frequência variável. Ao variar a frequência da tensão admitida, conseqüentemente varia a velocidade do campo girante e a velocidade mecânica de rotação da máquina. Veja-se a figura 24.

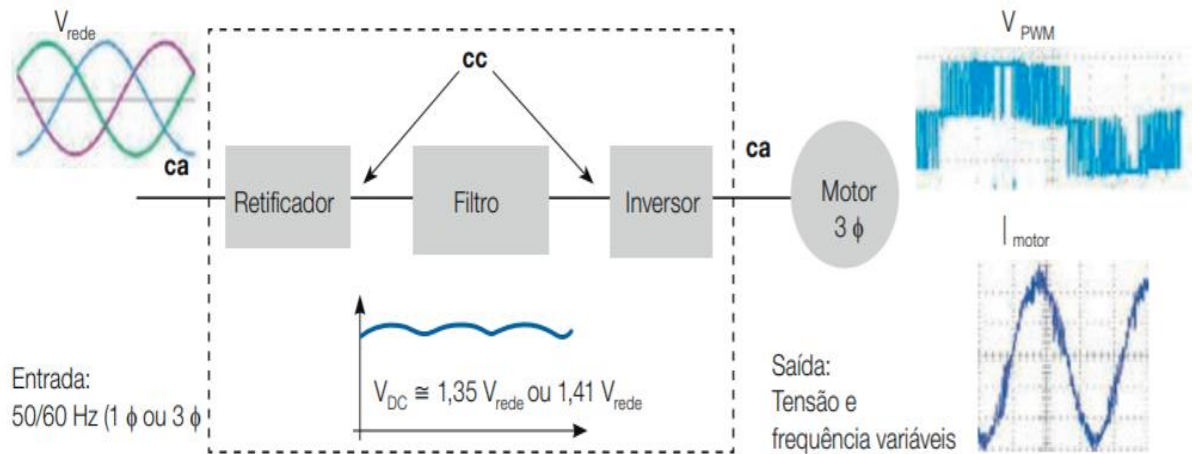


Figura 24 – Princípio de funcionamento de um VEV, autoria da WEG [40].

No caso dos conversores de frequência com tensão imposta por PWM, os mais utilizados atualmente na indústria em motores de baixa tensão, funcionam como intermediários entre a fonte de energia, que é a rede, e o motor de indução. O final deste processo, acarreta a passagem por meio de três estágios. Primeiramente, a chamada ponte de díodos ou retificador, que procede à retificação do sinal alternado cuja tensão e frequência são constantes. Em segundo lugar, a passagem dá-se pelo filtro onde se verifica a regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por intermédio de banco de condensadores. De seguida, segue-se a passagem pelo inversor, constituído por transístores IGBT, onde ocorre a inversão da tensão contínua proveniente do filtro num sinal alternado. Aqui, já a tensão e a frequência são variáveis. A forma de saída pulsada é em função da frequência de saída solicitada. Uma análise de Fourier elucida que a saída pulsada possui o mesmo efeito num motor assíncrono trifásico que uma tensão sinusoidal com a mesma amplitude e da mesma frequência.

3.4.3. MODOS DE CONTROLO DE UM VARIADOR

Os VEVs podem ser controlados fundamentalmente por dois modos distintos, que são classificados como modo não vetorial (escalar) e modo vetorial. Tratando-se do modo de controlo mais simplificado, que é o não vetorial ou escalar, a relação entre a tensão e a frequência é constante de zero até à frequência base do acionamento. Acima desse valor de frequência já não se verifica um aumento de tensão aplicado ao motor, mas sim diminuição de binário disponível. Algumas técnicas permitem ultrapassar esses efeitos, como compensação de escorregamento e como sendo o “offset” de tensão, também conhecido como *boost* de tensão, onde ao invés de uma tensão iniciar em zero, inicia a partir de determinado valor. Aplica-se este tipo de conversor quando não há exigências de respostas rápidas a comandos de binário e velocidade, e é interessante quando existe conexão de múltiplos motores a um único conversor. O controlo realiza-se em malha aberta e a precisão da velocidade é dependente do escorregamento do motor. Veja-se os exemplos de VEVs da *Schneider Electric* na figura 25.



Figura 25 – Exemplos de VEVs do mercado. À esquerda VEV da gama ATV 71 e à direita ATV 320, da Schneider Electric [48][49].

O controlo vetorial implica que dois campos magnéticos sejam orientados um contra o outro, possibilitando um grau elevado de precisão e robustez no controlo do binário e da velocidade do motor onde este é aplicado. É o mesmo utilizado nos servomotores como nos assíncronos, apesar das diferenças inerentes a cada tipo de motor. Este método efetua a decomposição da corrente do motor em dois vetores, em que um produz o fluxo magnetizante e o outro vetor produz binário, com regulação separada do binário e fluxo.

No caso dos servomotores, este controlo vetorial pode ser realizado em malha aberta ou em malha fechada com realimentação. Para a orientação do campo de motores assíncronos, faz-se necessário considerar um número considerável de parâmetros físicos para uma magnetização constante do rotor [39].

Os VEVs não devem ser instalados em quadros elétricos, devendo a sua aplicação ser descentralizada, mas migrar para campos onde podem estar alojados no próprio motor, por exemplo. Desta forma, os cabos entre motor e VEV podem ser encurtados, criando uma solução compacta e otimizada do ponto de vista do projeto, da instalação, operação e manutenção. Esta possibilidade evidentemente acarreta vantagens na diminuição de custos.

Mediante o tipo de carga a ser controlada, é necessário o dimensionamento entre binário e potência, para ser coerente com o tipo de aplicação, e os dados devem ser coerentes com a aplicação real para que o sistema de variação de velocidade possa garantir um controlo adequado, alinhado com a realidade da eficiência energética.

Entretanto, o controlo com este tipo de equipamentos pode também apresentar desvantagens tal como a possibilidade de criar interferências eletromagnéticas, injeção de harmónicos na rede e redução do tempo de vida dos motores aquando do aumento da sua temperatura e também a circulação de correntes nos seus rolamentos.

3.4.4. VARIADORES DE VELOCIDADE COMO MEDIDA DE EFICIÊNCIA

A variação de velocidade com recurso a variadores eletrónicos de velocidade, pode conduzir a poupanças energéticas anuais elevadas. Vêm dar resposta às exigências da indústria, e a sua combinação com motores assíncronos trifásicos efetivamente tem sido notável e sobrepõe-se consideravelmente ao uso de motores de corrente continua.

A instalação dos motores de corrente alternada é acompanhada do uso racional de VEVs, graças ao desenvolvimento da eletrónica de potência, possibilitando a construção de equipamentos bastante eficientes no controlo de binário e velocidade. O consumo da energia do motor pode designar-se pela influência de fatores como a sua própria eficiência e o controlo da velocidade do seu funcionamento nos diferentes estados do processo. Bem como, a qualidade da rede de alimentação, a presença de harmónicos, o dimensionamento dos

sistemas, a rede de distribuição, os sistemas mecânicos de transmissão, as atividades de manutenção e a eficiência permitida pelo dispositivo final ou carga.

Nos sistemas onde a aplicação de VEVs e equipamentos de maior eficiência energética, a elevação do rendimento global pode ir de 31% a 72%, com tempos de recuperação do investimento normalmente inferiores a 3 anos. E, além das características supracitadas, concedem ao motor uma série de proteções, como proteção contra curto-circuitos, sobreintensidades, sobretensões e falta de fase. Assim, não há necessidade dessas proteções serem adquiridas separadamente ao sistema com motor [6].

Habitualmente, para testar a eficiência dos VEVs a eficiência é calculada diretamente dividindo a potência de saída pela de entrada. Um estudo correto acerca da viabilidade económica de investimento num VEV, normalmente implica considerar a determinação do diagrama de carga do equipamento, e com base na potência instalada e no diagrama pode-se determinar para cada regime de carga qual a potência economizada. Mediante a aplicação, difere o método de cálculo desta componente e o potencial de redução de consumo de energia está dependente das características da carga ao reduzir a sua velocidade, onde as cargas de binário variável são as que apresentam maiores economias. São exemplos disso as bombas e os ventiladores.

A *Schneider Electric*, na publicação do “*White Paper on Energy Efficiency for OEM*”, comenta que a substituição de dispositivos de acionamento com contadores por conversores de frequência, conforme as funcionalidades acima descritas, pode constituir até 30% de eficiência energética. Isto, na sequência de que 85% dos transportadores implementados em fábricas ou armazéns arrancam com acionadores de partida diretos, que normalmente são contadores.

O uso de motores elétricos de elevado rendimento aliados a variadores eletrónicos de velocidade, constitui uma melhoria significativa na eficiência dos processos industriais, sendo desejável essa utilização de energia mais eficiente com capacidade para reduzir os consumos de eletricidade, juntamente com uma melhoria nos sistemas de transmissão mecânica. Em projetos convencionais com motores de velocidade fixa, as bombas são sobredimensionadas para poderem suportar a carga máxima esperada e acomodar qualquer aumento futuro na capacidade do sistema.

Geralmente, no caso de bombas, ventiladores e compressores, a relação entre as velocidades e a potência está para uma redução de 10% na velocidade, que resulta numa redução de 30% de potência. Sendo assim, operar bombas, ventiladores e compressores em velocidade inferiores ao habitual e por maior tempo, pode reduzir o consumo total de energia. Sendo esta operação em baixa velocidade contínua, verifica-se também a eliminação das flutuações abruptas de temperatura e outras perdas associadas [50].

3.5. MOTORES DE IMANES PERMANENTES PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA

Como já foi referido nos pontos anteriores, os motores de indução são largamente utilizados na indústria. Os motores de imanes permanentes (PM) surgem como equipamentos competitivos face aos convencionais motores de indução, caracterizando-se, entre outras características, por não necessitarem de ventilação nem de sobredimensionamento para funcionarem com binário constante.

O motor de imanes permanentes tem vindo a tornar-se mais popular na indústria, constituindo uma eficiente alternativa aos típicos motores de indução CA. Associado ao aumento de vendas destes motores, está em parte a diminuição nos custos com o controlo. Em alternativa à utilização de material condutor no rotor, este é integrado nas laminações do rotor não necessitando ser energizado. O campo magnético oriundo dos imanes permanentes realiza interação com o campo que é produzido pelos enrolamentos no estator a fim de criar binário. São naturalmente motores síncronos, o que significa que não possuem deslizamento para o motor funcionar, mas sim a comutação da fase dos enrolamentos do estator para se alinhar com os polos magnéticos no rotor. Para tal, existe uma contagem cronométrica com recurso a *feedback* da posição do rotor. A figura 26 ilustra o esquema desta topologia de motores.

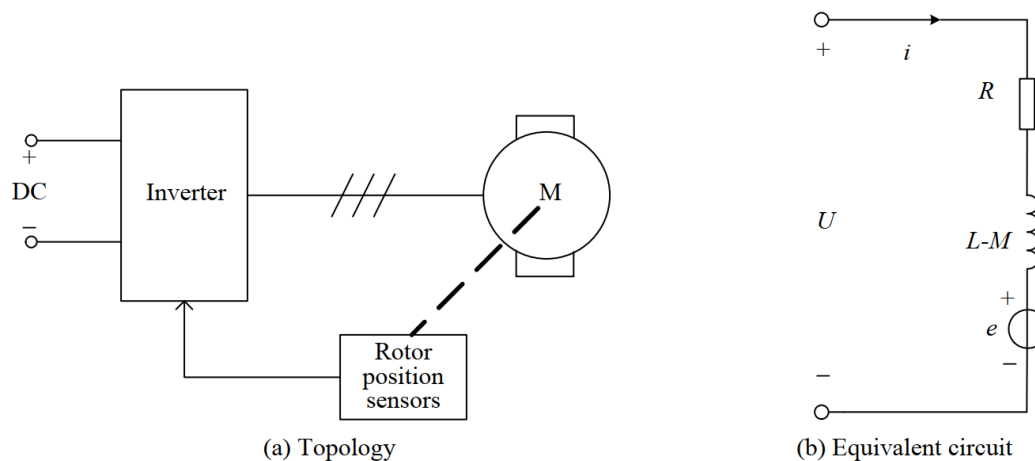


Figura 26 – Topologia e circuito equivalente de um motor Brushless DC [51].

3.5.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE IMANES PERMANENTES

O motor de ímã permanente (*Permanent Magnet DC Motor*) rege-se por princípios semelhantes aos dos motores CC convencional. O rotor tem uma constituição idêntica à do motor CC convencional, e o estator ligeiramente diferente por não possuir qualquer enrolamento. O campo magnético indutor é gerado por ímanes permanentes, daí o seu nome. Este indutor possui dois ou mais ímanes permanentes, onde o induzido é constituído por um núcleo ferromagnético tipicamente com três, cinco ou sete polos e respetivos enrolamentos e a carcaça completa o circuito magnético [38].

O funcionamento destes motores obedece aos mesmos princípios que um motor CC convencional, porém, ao invés de existir uma corrente elétrica a criar o campo magnético do indutor esse campo é criado pelos ímanes permanentes. E como não têm enrolamentos no indutor, simplesmente é feita a ligação à alimentação dos dois condutores que ligam os enrolamentos do induzido. Ao alimentá-lo ele irá ter rotação num sentido, e ao inverter a polaridade da tensão de alimentação ele ter uma rotação no sentido contrário.

Os motores CC sem escovas, tem como principal diferença possuir comutação eletrônica pelo que deixa de necessitar de comutação manual, habitualmente realizada mecanicamente pelo coletor. Daí que são motores que não necessitam de escovas nem coletor. Esta comutação além de melhorar o desempenho do motor, como também aumenta a sua vida útil reduzindo a manutenção das escovas. Por esta razão, são denominados também de motores *Brushless DC* (BLDC). Podem, na verdade, ter características da sua

construção distintas, em que os ímãs poderão ser incluídos na superfície ou no interior do rotor, e este, pode ser externo ou interno. À semelhança dos motores de indução, os enrolamentos podem ser distribuídos ou do tipo bobinado sobre o polo. Os ímãs podem ser de ferrite que são de baixo custo ou ímãs de terras-raras, com alta energia e custo elevado, que concedem melhor relação binário e volume [52]. Em termos de alimentação, existem versões CC e CA, sendo BLDC conforme já referido, ou *Brushless Alternating Current* (BLAC). Habitualmente os BLDC possuem enrolamentos bobinados sobre os polos e os BLAC enrolamentos distribuídos.

3.5.2. TIPOLOGIAS DE MOTORES PM

Um BLDC é um motor cuja estrutura é essencialmente um *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSM) com enrolamentos concentrados. Comumente conhecida como uma PMSM com ímãs permanentes e enrolamentos concentrados. Na maioria das indústrias o termo BLDC está mais estabilizado. A utilização de ímãs permanentes acarreta benefícios tanto em densidade de potência e de binário, como também em termos de rendimento e simplicidade de construção. Reduz também a manutenção, o que é um benefício considerável em termos de custo. Atualmente dispõe-se de diversos materiais magnéticos à base de terras-raras, destacando-se os de samário-cobalto e os de neodímio-ferro-boro, através dos quais o fluxo de excitação pode ser criado com elevada coercividade, com ímãs de pequena espessura e baixa intensidade [53]. O rotor, cujo núcleo pode inclusivamente ser de ferro sólido, possui como já referido um determinado número de pares desses ímãs permanentes ao longo da sua periferia. Estes materiais utilizados como ímãs têm grande resistividade elétrica pelo que não há correntes induzidas no rotor, são equivalentes a eletroímãs que empregam uma força magnética motriz alta, apesar de, os BLDC terem permeabilidade magnética baixa o que implica que as reactâncias de magnetização são também baixas, do ponto de vista do estator.

Dado não terem enrolamentos no rotor e os ímãs não serem condutores, as perdas de efeito Joule associadas a estes motores são verificadas essencialmente no estator. Não possuem ventilador incorporado pois o calor dissipa-se através da própria carcaça por convecção. Isso torna-os mais leves e compactos. No entanto, têm mais dificuldades em exceder a velocidade nominal. A comutação eletrónica poderá ser feita com configurações que englobem codificadores rotativos, sensores ou sem sensores. Uma forma comum de

determinação da posição do rotor em motores *Brushless DC*, é utilizar três sensores de efeito Hall, sensores de posição, embebidos no estator. Quando um sensor deteta um polo do rotor, a resposta aumenta ou diminui mediante a tensão de saída do sensor, e a resposta dos três sensores utilizada para fazer o cálculo da posição em relação ao rotor. Utilizam para tal, por exemplo, um *encoder*.

3.5.3. BENEFÍCIOS DE APLICAÇÃO

As principais aplicações destas máquinas são sistemas de grande exigência dinâmica como por exemplo os robôs. A figura 27 mostra um motor *Brushless DC* da Panasonic, modelo KV, e uma aplicação típica deste tipo de motores numa cinta transportadora tipicamente conhecida como *conveyor belt*. Devido ao seu tamanho compacto, este motor substitui a utilização de motores de indução trifásicos convencionais que possuem maiores dimensões e não raras vezes tem de recorrer a redutoras montadas a 90°. O tamanho compacto de um destes motores KV são um exemplo de como um BLDC pode economizar espaço, ser mais económico energeticamente devido às suas características de funcionamento, e contribuir para menos ruído num ambiente industrial. Devido a estarem numa carcaça reduzida, apresentam menores níveis de ruído do que os motores de indução da mesma potência. Além disso, têm benefícios também com menor vibração, menor peso e volume. Dado que funcionam mais frio por não terem perdas Joule no rotor, a temperatura nos rolamentos é menor aumentando a sua vida útil. Além das cintas transportadoras, são também bastante utilizados em bombas, sistemas de ventilação, compressores e extrusoras [54].



Figura 27 – À esquerda um motor BLDC da Panasonic. À direita, um exemplo típico de aplicação de motores *Brushless DC* [55].

Para controlo de binário de um BLDC é requerido o conhecimento a cada instante da localização angular do vetor de fluxo, injetando a corrente em quadratura precisa para criar o binário necessário. O vetor de fluxo é fixo com o rotor e por isso mesmo a localização não oferece dificuldade. Além de conhecido como vetor de controlo, o *Field Oriented Control* (FOC) providencia uma melhor eficiência a velocidades altas que os de controlo sinusoidal. Concede também melhoria de desempenho em cargas dinâmicas comparativamente com outras técnicas.

A constituição do rotor conforme já foi abordado é através de imanes permanentes com pares de polos embutidos na superfície ou interior do núcleo de ferro. Tanto nos BLDC quanto nos motores com escovas são utilizados aços magnéticos permanentes a fim de constituir um campo magnético no espaço de ar, em que a simples diferença num BLDC é que estes possuem os aços instalados na parte do rotor, conforme também já foi dito [56].

Nos motores CC tradicionais as escovas são utilizadas para efeitos de comutação, e quando o motor está em funcionamento, elas provocam a perpendicularidade entre si das direções do campo magnético da armadura. A figura 23 apresenta uma secção transversal de um motor BLDC de quatro polos. Para uma comutação sem contato mecânico os BLDC não incorporaram as escovas. Desempenha um papel fundamental na extensão da vida útil e economia de energia.

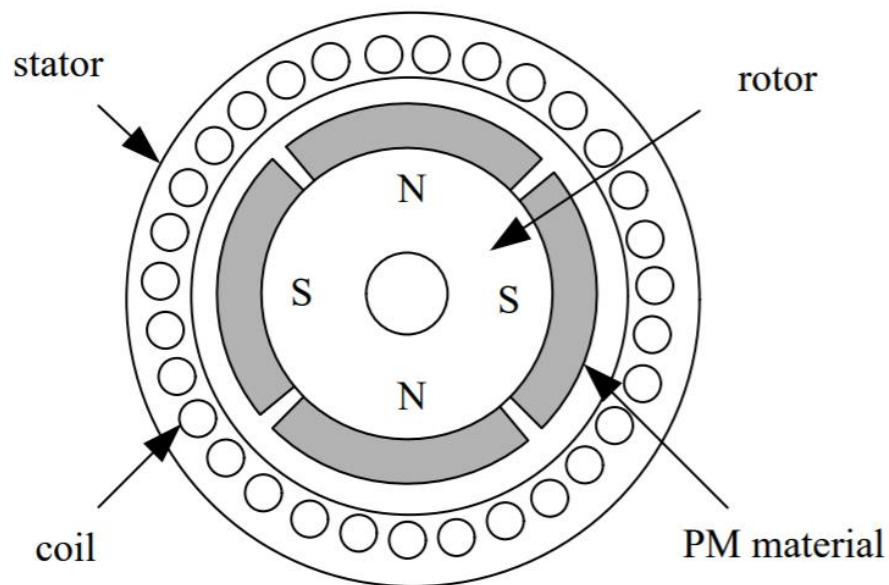


Figura 28 – Corte transversal de um motor BLDC [57].

Fisicamente, a estrutura do BLDC é equiparada à de um motor síncrono. Note-se que no motor CC com escovas tradicionais a armadura de enrolamentos é colocada no rotor, ao passo que no BLDC a armadura de enrolamentos é instalada no lado do estator. Esta particularidade provoca menos aquecimento do motor em funcionamento. Os enrolamentos simétricos estão embutidos no núcleo de ferro e podem ser conectados em "Y" ou "D" sendo o primeiro o mais usado onde os enrolamentos trifásicos são conectados simetricamente sem um ponto neutro.

3.6. APLICAÇÕES REAIS DE MOTORES EFICIENTES

Com o intuito de verificar a aplicabilidade dos equipamentos explanados no ponto 3.5 a contextos reais, analisa-se a aplicação de motores de elevado rendimento onde se pode evidenciar a sua aplicação em cenários da vida real que várias empresas tem vindo a implementar.

São bastante conhecidas no meio industrial as aplicações de motores em cintas transportadoras, para os diversos sistemas onde existe necessidade de transportar determinado produto ao longo dos vários processos pelos quais deverão passar. Em particular, são também conhecidas as transportadoras de bagagens implementadas nos aeroportos, que se destinam a realizar o transporte das bagagens para que estas se movimentem em direção ao local específico onde são levantadas pelos seus responsáveis. Este processo automatizado abandona a necessidade de mão de obra humana para transportar as ditas malas.

3.6.1. EXEMPLO DE CINTA TRANSPORTADORA

No contexto da larga utilização de *conveyor belts* na dinamização de processos relacionados com o transporte de materiais em ambientes automatizados, a figura 29 evidencia um exemplo de um desses sistemas de transporte com cinta da *Beumer Group*.



Figura 29 – Exemplo de um *luggage conveyor belt* [58].

Estes sistemas exigem precisão na paragem e o seu funcionamento é contínuo durante determinado período em que é necessário. As paragens são também repetitivas.

Para uma aplicação deste tipo, desafiadora, no sentido em que a cinta está constantemente a parar e a arrancar tendo sobre ela pessoas que também variam bastante e de forma até radical, tem-se um caso do fabricante *Crisplant* que utiliza um motor CA com um VEV, controlado por um *Programmable Logic Controller* (PLC) que realiza a gestão das posições e envia instruções de velocidade ao variador.

A empresa teve como meta efetuar uma comparação que permitisse verificar o consumo de energia bem como a precisão da paragem com e sem carga. Para tal, realizaram uma comparação entre motores síncronos e CA que foram fornecidos pelo fabricante internacionalmente reconhecido de motores e drives *Schneider Electric*. Para isso recorreu-se a um motor síncrono da série BMH e um VEV já existente nas instalações do cliente, do mesmo fabricante, um ATV32. O motor, de acordo com a respetiva ficha de características, tem as especificações conforme indicado na tabela da figura 30.

Device short name	BMH
Maximum mechanical speed	4000 rpm
Continuous stall torque	18.5 N.m for LXM32.D72N4 24 A at 400 V three phase 18.5 N.m for LXM32.D72N4 24 A at 480 V three phase
Peak stall torque	50.3 N.m for LXM32.D72N4 24 A at 400 V three phase 50.3 N.m for LXM32.D72N4 24 A at 480 V three phase
Nominal output power	3500 W for LXM32.D72N4 24 A at 400 V three phase 3500 W for LXM32.D72N4 24 A at 480 V three phase
Nominal torque	12.2 N.m for LXM32.D72N4 24 A at 480 V three phase 12.2 N.m for LXM32.D72N4 24 A at 400 V three phase
Nominal speed	3000 rpm for LXM32.D72N4 24 A at 400 V three phase 3000 rpm for LXM32.D72N4 24 A at 480 V three phase
Product compatibility	LXM32.D72N4 at 400...480 V three phase
Shaft end	Smooth shaft
IP degree of protection	IP54 (standard)
Speed feedback resolution	32768 points/turn
Holding brake	Without
Mounting support	International standard flange
Electrical connection	Straight connectors

Figura 30 – Especificações técnicas do motor BMH1402P06A1A [59].

Numa fase laboratorial, os testes foram elaborados tal e qual uma reprodução correta do contexto real em que a carga da cinta transportadora foi ajustada para 50 kg. Com o intuito de realizar o teste nas duas direções de deslocamento, para a frente e para trás, com carga e sem carga, procedeu-se à aceleração da mesma até às 3.500 rpm, a 67Hz, tendo então sido realizada a paragem. Dentro deste processo, e depois da introdução dos parâmetros de configuração relativos ao motor, realizou-se o ajuste automático do VEV, conhecido tipicamente por *auto-tuning*. O *auto tuning* é uma funcionalidade de alguns VEVs que os adapta ao motor ao qual este conectado de forma a obter-se um controlo e funcionamento ótimo. É feito em controlo vetorial com acoplamento direto do *encoder* ao eixo do motor, e trabalha-se o mesmo em vazio [60].

Como resultado, obteve-se o gráfico da figura 31, representativo da velocidade do motor em função do tempo, onde o teste foi feito sem carga aplicada ao transportador. São visíveis as ligeiras oscilações na velocidade, porém, o seu efeito não se fez sentir no movimento do transportador. Foi indicado que a precisão de paragem esteve num valor dentro de +- 1 mm.

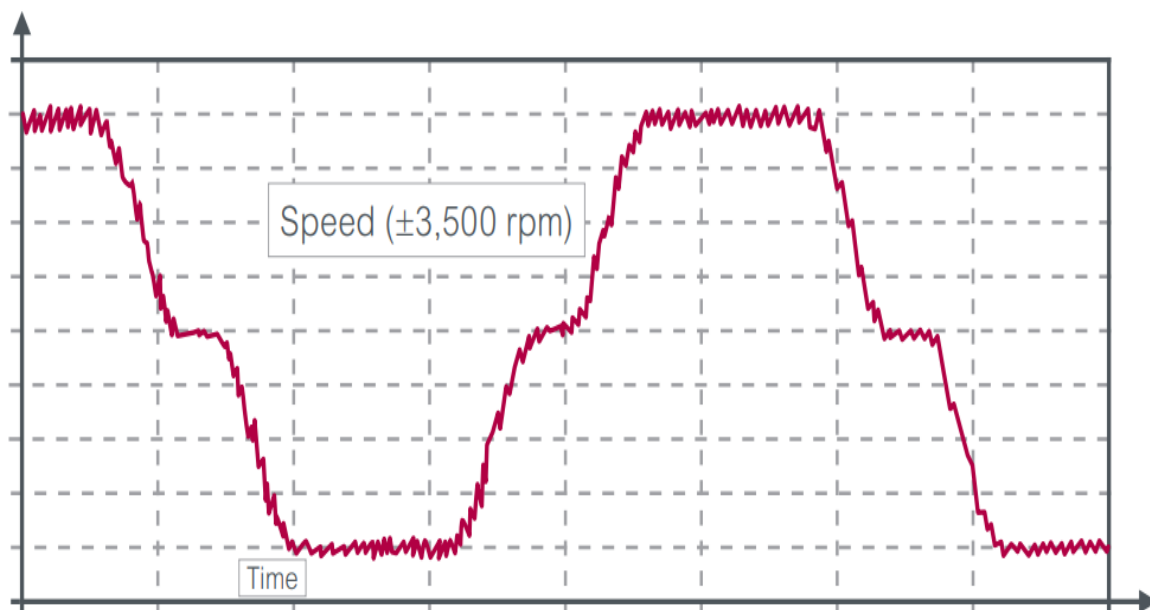


Figura 31 – Resultados experimentais sem aplicação de carga [60].

Seguidamente, procede-se aos testes com carga e os resultados conduzem à visualização do gráfico da figura 32. Este indica que a oscilação teve bom amortecimento e os declives idênticos sem carga e com carga, conforme se pode comparar nos dois gráficos, figura 27 e 28. A precisão da paragem obteve uma diferença pouco significativa sendo que a precisão de paragem esteve dentro dos 2 mm.

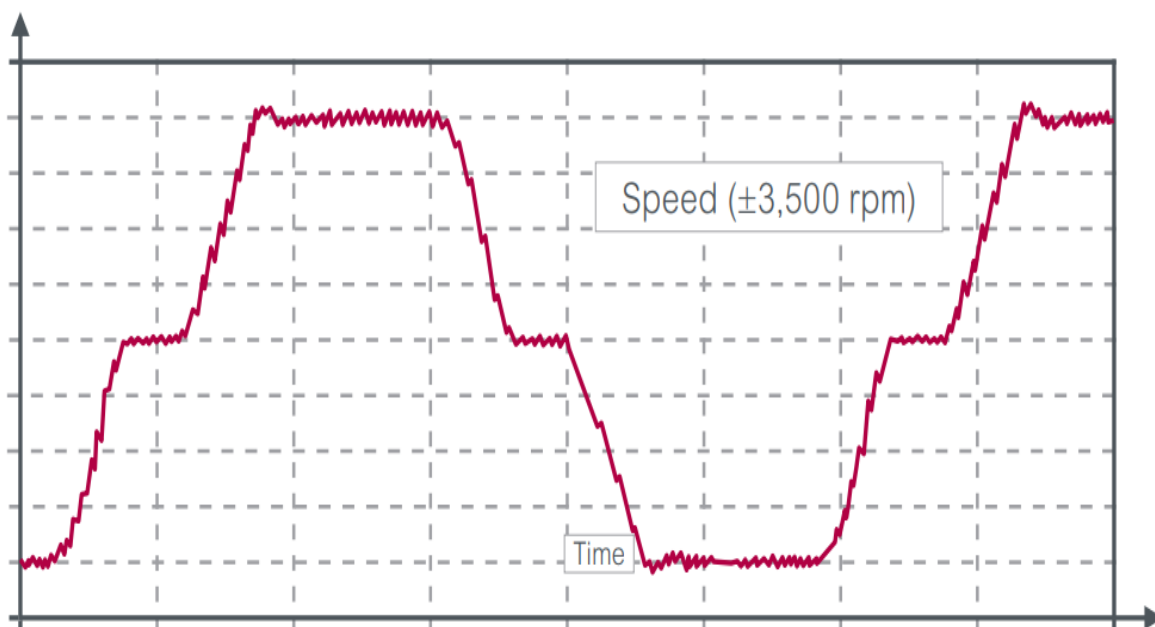


Figura 32 - Resultados experimentais com aplicação de carga [60].

Concluiu-se que efetivamente o uso deste motor síncrono associado ao ATV 32 cumpriu com os requisitos do motor, uma vez que os objetivos para a aplicação do transportador de aeroporto foram atendidos. Porém, conforme a figura 26 exhibe, nas características técnicas do servo BMH em estudo, o drive aconselhado seria o servo drive da gama *Lexium 32* a 400/480 V trifásico.

Os testes feitos pelo fabricante no seu contexto real, foram realizados com recurso ao motor acima indicado e também com recurso a um motor CA, ambos de potência de 1.5 kW. Os resultados estão expressos na tabela 2, onde se verifica que os valores obtidos relativos à poupança são significativos, rondando a ordem dos 30%, simplesmente com a mudança de um motor CA convencional para um motor síncrono tipicamente mais eficientes energeticamente.

Tabela 2 – Resultados comparativos da aplicação de dois motores [60].

Condições de Operação	Motor Síncrono	Motor CA	Poupança energética
Funcionamento contínuo numa direção	320 W	450 W	29%
Sem carga	240 W	340 W	29%
10 kg	280 W	340 W	28%
30 kg	370 W	390 W	28%
50 kg	460 W	640 W	28%

De acordo com um estudo da ABB, baseado numa aplicação real, o uso de VEVs toma vantagem com motores de elevado rendimento. As perdas mais baixas possibilitam ao motor ser construído com a classe IE4 combinado com chassis de motor convencionais e um motor *High Output* (HO), que possui menor tamanho considerando a mesma potência. Ambos, obviamente, tem uma performance distinta de modelos convencionais de gaiola de esquilo, sendo mais leves e silenciosos.

3.6.2. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

De acordo com a publicação da ABB, empresa líder no fabrico de tecnologia para redes elétricas, para eletrificação, automação industrial, robótica e movimento, o “*ABB’s Energy efficiency & productivity improvement plan*” de 2015, se os motores CA de 1980 e VEVs forem substituídos por motores de elevada eficiência e VEVs de ultima geração, o consumo será suficientemente inferior para que o tempo de retorno desse investimento possa ser inferior a 12 meses, num limite de 36 meses. Estes valores temporais estão, claro, dependentes da operação anual em horas e do preço da energia.

Além disso, afirma que atualmente os motores são aproximadamente 3% mais eficientes que os seus antecessores e que os sistemas de controlo possuem alta qualidade permitindo ondas de saídas que são evidências da redução de 10% a 15% da redução de perdas. Com as novas tecnologias de *drives* é possível utilizar recursos mais atuais como é o caso da otimização de fluxo que auxilia na poupança energética em bombas e ventiladores, utilizando-se também comunicação industrial através de *Modbus* e *Profibus*.



Figura 33 – À esquerda a imagem da instalação antes da substituição. À direita, após a substituição [62].

Na figura 33 é possível visualizar uma substituição de equipamentos, onde a imagem à esquerda diz respeito à instalação antiga e a imagem à direita à instalação depois da instalação

dos novos equipamentos. Trata-se de um projeto que teve efeito na estação de bombeamento de esgoto *Ladywood de Ironbrige*, em *Shropshire* na Inglaterra, onde a empresa responsável *Severn Trent Water* tem vindo a economizar milhares de euros pela substituição de duas unidades antigas já da década de 1980, por unidades mais atuais da ABB de velocidade variável devidamente dimensionadas para o local, proporcionando melhor economia e mais fiabilidade. Na imagem é possível perceber o espaço libertado na nova tecnologia, tendo sido uma economia de espaço também considerável.

Outro exemplo interessante que a ABB oferece no seu acervo de exemplos práticos, é o do projeto cujo desafio passou por reduzir a fatura energética de 1.4 milhões de euros anuais da empresa Ricoh. Com extensas áreas de produção, o especialista de energia da Ricoh, Andy Smith, empenhou-se em diminuir o consumo de eletricidade tendo inicialmente procedido ao teste de dois VEVs numa bomba e outro numa Unidade de Tratamento de Ar (UTA) obtendo-se resultados bastante agradáveis que provocou o incentivo à Ricoh de avaliar todas as possibilidades de melhoria existentes nos sistemas motorizados, segundo as próprias palavras de Smith. Acrescenta ainda que a prioridade do projeto avalia critérios de economia de dióxido de carbono (CO₂), de complexidade técnica, risco e retorno de investimento. Identificou-se que o tempo de retorno do investimento é de cerca de 6 meses por cada instalação, sendo que cerca de 90% das aplicações originais estão agora com *drives* da ABB. Os resultados, são que a Ricoh se encontra a poupar 100,000 libras por ano (112,50 euros), tanto quanto igualmente melhorou o seu controlo dos processos [61].

Conforme já foi abordado, além da melhora de consumos os equipamentos da ABB permitem também a melhoria dos processos, tendo um melhor controlo sobre os mesmos. A fim de se obter boas condições de teste, os valores de temperatura e humidade no interior do espaço devem ser constantes, sendo assim, o uso de um inversor da ABB para controlo de fluxo de ar no laboratório permitiu o controlo da temperatura dentro de 0.5 C° do ponto de ajuste. O controlo de um humidificador permitiu que a humidade não tivesse variação de 1,5%. Sem redução de velocidade, a 50Hz, foi obtido uma diminuição de uso de energia de 5,5kW para 3kW. A 35Hz, o consumo passou para apenas 1,6 kW e o retorno de investimento neste caso em particular foi de apenas 3 meses.

Devido a este caso de sucesso, diz Smith que a Ricoh se empenha na aplicação de mais equipamentos eficientes em mais aplicações, tendo exemplificado a utilização de três

acionamentos para sincronização de dois transportadores com um granulador de plástico com uma potência de 22kW, responsável por triturar peças de plástico para efeitos de reciclagem. Com o auxílio de um PLC, o tempo de operação foi reduzido para 95% aumentando a vida útil dos equipamentos da instalação e reduzindo o consumo.

Na indústria do papel e celulose, onde a atividade de equipamentos de força motriz é largamente utilizada (veja-se figura 34), encontra-se o caso aplicado no Grupo Portucel-Soporcel, em Portugal, uma das maiores empresas do mundo dedicada ao fabrico e comercialização de papel, sendo mundialmente conhecido pelo seu produto *Navigator* para impressoras. Conta com uma presença forte no mercado global da celulose com cerca de 92% das vendas exportadas para mais de 50 países. No ano de 2010, a empresa optou por dar seguimento a um investimento numa nova fábrica e novas máquinas o que teria aumentado o seu impacto mundial para além dos 1,2 bilhões de euros.

A WEG foi uma parceria no fornecimento de 650 motores W21 de baixa tensão e 16 motores de 6 kV com potências entre os 0,37 kW e 2.800 kW, com o intuito de melhoria dos processos de fabrico da empresa.



Figura 34 – Motores WEG aplicados na fábrica Portucel, em Portugal [62].

Os motores WEG oferecem até 30% de economia de energia na operação da maior e mais sofisticada máquina produtora de papel do mundo, sendo parte de um investimento de 550 milhões de euros, os resultados foram positivos. De acordo com o diretor da WEG, António Duarte, “O resultado não poderia ser mais positivo”, sendo que “a WEG cumpriu o acordo em todos os aspetos relacionados com a execução do projeto, beneficiando o cliente com a redução de custos da operação [...]” [62].

3.7. CONCLUSÃO

Constatou-se neste capítulo que a aplicação de motores de elevada eficiência permite obter melhorias significativas nos consumos de energia elétrica por parte da indústria, sendo alvo de vários estudos em todo o mundo, concluindo a sua viabilidade.

Deve-se considerar o sistema onde se aplica um motor como um todo, para ser possível dimensionar corretamente o motor mais adequado à carga a que será acoplado. Sempre que possível, é também aconselhável a utilização de equipamentos eletrónicos para controlo do motor, que já comprovaram as suas características de melhorar o desempenho dos motores.

Várias pesquisas apontam o motor de ímanes permanentes como uma máquina de muito elevada eficiência, possuindo tamanhos mais reduzidos, menores ruídos e por requererem pouca manutenção devido à ausência de escovas e devido à sua vida útil prolongada.

4. ANÁLISE DE CASOS PRÁTICOS

4.1. CASO 1: NOVO MOTOR IE3 VS NOVO MOTOR IE4

Existem situações propícias à instalação de motores de elevada eficiência, do ponto de vista técnico-económico, decorrentes da necessidade de instalação de um novo motor ou equipamento, quando o motor existente deixou de funcionar ou quando este está sobredimensionamento. Existem fatores, como o rendimento e fator de potência, que são determinantes. O rendimento é calculado em função da potência mecânica útil dos motores, pelo que, a análise será confiável mediante o uso da informação dos valores normalizados. É possível encontrar nos próprios catálogos ou *datasheets* dos fabricantes os valores do rendimento dos motores, para várias condições de carga.

Conforme já foi abordado, os motores de eficiência IE1 de acordo com as normas estipuladas deixaram de ser colocados no mercado europeu desde junho de 2011, e a partir de 2017 a necessidade de utilizar motores com eficiência de nível IE3 ou IE2 desde que equipados com variador eletrónico de velocidade, de potência nominal entre 0,75kW e 375kW. Assim sendo, e considerando o estudo de uma aplicação nova, pretendeu-se analisar a viabilidade da utilização de um novo motor com classe de rendimento *Super Premium* IE4 comparativamente a um motor de rendimento *Premium* IE3. Ambos os motores são assíncronos e com a mesma potência nominal.

O dimensionamento correto dos motores elétricos indica que os mesmos devem funcionar com cargas da ordem dos 70 a 80% [6], pelo que considera-se o regime de carga de 80% como sendo o regime ideal neste caso de estudo.

4.1.1. CARACTERÍSTICAS DO MOTOR IE3

Numa primeira análise, recorre-se ao fabricante ABB para obter as informações de um motor da gama M3BP com classe de eficiência IE3 (ver figura 35).



Figura 35 – Motores ABB gama M3BP [63].

As principais características do motor escolhido encontram-se na tabela 3, e disponibiliza-se no Anexo A o *datasheet* completo do motor que contém todas as suas características.

Para o motor em estudo, obteve-se os valores do ensaio de teste realizado pela ABB Oy, *Motors and Generators*, em Vaasa, na Finlândia. Os resultados disponibilizados são apresentados na tabela 4.

Tabela 3 – Características do motor de classe IE3 [64].

Caraterística	Motor ABB
Modelo	3GBP282220-ADL
Potência Nominal	75 kW
Tensão	400 V
Número de Polos	4
Frequência	50 Hz
Rotação Nominal	1485 rpm
Corrente nominal	133 A
Eficiência	(100%) 95,0 %
	(75%) 95,0 %
	(50%) 94,2 %
Fator de Potência	(100%) 0,86
Regime de Serviço	S1
Grau de Proteção	IP55
Nível de Ruído	71,0 dB(A)

Tabela 4 – Resultados de teste ao motor ABB (Anexo B).

Teste	Binário T (Nm)	Tensão Linha U (V)	Frequência f (Hz)	Corrente Entrada I (A)	Potência Entrada P1 (kW)	Saída P2 (kW)	Velocidade n (r/min)	cos ϕ	η (%)
Sem carga		400,0 D	50	44,1	1,42		1500	0,05	
Rotor Bloqueado		71,2 D	50	133,0	5,37		0	0,33	
Teste de temperatura (100% carga)	482,6	400,1 D	50	133,3	79,0	75	1485	0,86	95,0
Carga parcial:									
~75% carga	363,5	400,1 D	50	103,5	59,1	56,3	1489	0,82	95,2
~50% carga	241,8	400,1 D	50	76,6	39,6	37,5	1493	0,75	94,8
~25% carga	122,7	400,1 D	50	55,0	20,4	18,8	1497	0,54	92,1

Estes resultados, apresentam os testes realizados sem carga, com rotor bloqueado, a 100% e com carga parcial de 75%, 50% e 25% de carga, onde se verifica que o valor máximo de corrente de funcionamento obtido foi de 133,3 A na entrada a 100% da carga, com uma potência de 79,0 kW e rendimento de 95,0%.

No que diz respeito aos métodos de cálculo das correntes, sabe-se que:

$$P_1 = P_{abs} = \frac{P_{mec}}{\eta} \quad (26)$$

Onde,

$$P_{mec} = P_2 = FC \times P_n = P_{abs} \times \eta_{FC} \quad (27)$$

A potência útil mecânica P_2 é calculada pelo produto da potência nominal do motor pelo fator de carga FC e a potência absorvida P_{abs} corresponde à potência mecânica a dividir pelo rendimento do motor.

4.1.2. CONSUMO DE POTÊNCIA ATIVA DO MOTOR ABB

Pretende-se saber qual a energia ativa consumida em kWh, pelo que, no motor em análise, e com os dados acima identificados, considera-se um funcionamento mensal de 24h durante 22 dias, totalizando 528 h por mês e regime de serviço contínuo S1.

$$C_e = P_{abs} \times N \quad (28)$$

Onde C_e é o consumo de energia e N é o número de horas de funcionamento mensal.

Para os diferentes regimes de carga acima assinalados, o valor do consumo de energia é apresentado na tabela 5.

Sabendo que se pretende um fator de carga de 80% e que o motor em estudo possui uma potência nominal de 75 kW, então através da expressão 27 obtém-se a potência útil disponibilizada. Consequentemente, facilmente se chega ao valor da potência absorvida a 80%, de acordo com a seguinte equação:

$$P_{abs} = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\varphi) \quad (29)$$

Onde U é a tensão em V, I a corrente absorvida em A e $\cos(\varphi)$ o fator de potência.

E, da qual também se retira que:

$$I = \frac{P_{abs}}{\sqrt{3} \times U \times \cos(\varphi)} \quad (30)$$

Tabela 5 – Energia consumida nos diferentes regimes de carga – motor ABB.

Carga (%)	Corrente (A)	Cos ϕ	P _{abs} (kW)	Nº Mensal (h)	Consumo mensal (kWh)
100%	133,3	0,86	79,4	528	41 946,11
80%	108,4	0,84	63,1	528	33 312,30
75%	103,5	0,82	58,8	528	31 053,98
50%	76,6	0,75	39,8	528	21 020,99

De forma a se obter o custo de funcionamento mensal, considerando os valores de potência indicados pelos ensaios ao motor da ABB acima identificados, é necessário considerar o custo da energia.

Considerando uma instalação de baixa tensão especial (BTE), para potência contratada superior a 41,4 kW, e os motores em estudo aplicados na baixa tensão, é imprescindível saber o tarifário aplicado à energia ativa e reativa em Portugal. O tarifário de energia na baixa tensão está dependente do tempo de utilização, do período do dia e ano, daí a necessidade de estabelecer um valor médio. A média aritmética obtida de acordo com os valores de tarifa da tabela 7 é de 0,1216 €/ kWh.

Efetua-se o produto da energia consumida pelo custo da energia em kWh acima identificado. Assim, obtém-se o valor de custo de funcionamento através da seguinte expressão:

$$C_{mensal} = C_e \times c_{energia} \quad (31)$$

A tabela 6 apresenta os respetivos valores do custo de funcionamento tendo em conta o valor da energia identificado, considerando que o custo anual é calculado pela utilização do motor 528h e 12 meses no ano.

Tabela 6 – Custos de energia mensal e anual – motor ABB.

Carga (%)	Custo mensal (€)	Consumo Anual (kWh)	Custo anual (€)
100%	5 100,65	503 353,33	61 207,77
80%	4 050,78	399 747,63	48 609,31
75%	3 776,16	372 647,79	45 313,97
50%	2 556,15	252 251,86	30 673,83

Tabela 7 - Tarifa transitória de venda a clientes finais em BTE - Tarifário em vigor desde janeiro 2019, Diretiva ERSE 13/2018 [65].

Termo tarifário fixo		EUR/mês	EUR/dia *	
		24,64	0,8101	
Encargos de potência		Termo	EUR/kW.mês	EUR/kW.dia *
Médias utilizações	Horas de ponta		15,644	0,5143
	Contratada		0,699	0,0230
Longas utilizações	Horas de ponta		21,337	0,7015
	Contratada		1,521	0,0500
Preço da energia ativa		Período horário	EUR/kWh	
Médias utilizações	I e IV	Horas de ponta	0,2176	
		Horas de cheias	0,1335	
		Horas de vazio normal	0,0911	
		Horas de super vazio	0,0799	
	II e III	Horas de ponta	0,2172	
		Horas de cheias	0,1328	
		Horas de vazio normal	0,0910	
		Horas de super vazio	0,0802	
Longas utilizações	I e IV	Horas de ponta	0,1619	
		Horas de cheias	0,1290	
		Horas de vazio normal	0,0860	
		Horas de super vazio	0,0755	
	II e III	Horas de ponta	0,1602	
		Horas de cheias	0,1290	
		Horas de vazio normal	0,0855	
		Horas de super vazio	0,0755	
Preço da energia reativa		I e IV	EUR/kvarh	
Fornecida pela Rede (indutiva)			0,0296	
Recebida pela Rede (capacitiva)			0,0226	

4.1.3. CARACTERÍSTICAS DO MOTOR WEG IE4

De seguida analisa-se um motor com classe de eficiência IE4, assíncrono de indução trifásico – rotor em gaiola de esquilo, da gama W22 (ver Figura 36). Trata-se de um motor de rendimento *Super Premium* considerado de muito elevada eficiência, conforme afirmativas da WEG como “a mais ampla gama de motores do mundo com este nível de rendimento. Apresenta perdas elétricas de 20 a 40% menores em comparação com os motores elétricos convencionais”. Tal e qual como o motor da ABB, os W22 são motores que atendem aos níveis especificado pela norma IEC 60034-30-1 e ao âmbito da Regulação Europeia. Na tabela 8 encontram-se as principais características deste motor.



Figura 36 – Motor WEG W22 IE4 [66].

Tabela 8 – Características do motor de classe IE4 (Anexo C).

Caraterística	Motor WEG W22
Modelo	W22 IE4 12774369
Potência Nominal	75 kW
Tensão	400 V / 690 V
Número de Polos	4
Frequência	50 Hz
Rotação Nominal	1490 rpm
Corrente nominal	132 A
Eficiência	(100%) 96,2 %
	(75%) 96,1 %
	(50%) 95,5 %
Fator de Potência	(100%) 0,85
Regime de Serviço	S1
Grau de Proteção	IP55
Nível de Ruído	69,0 dB(A)

Através da curva de desempenho disponibilizada pelo fabricante, é possível saber os dados de funcionamento do motor, como o rendimento, o fator de potência, a corrente e o escorregamento, consoante a potência fornecida em relação à nominal. A figura 37 mostra a curva de desempenho em carga do motor WEG em estudo, fator de potência, escorregamento e corrente, em função dos valores de saída nominais em percentagem.

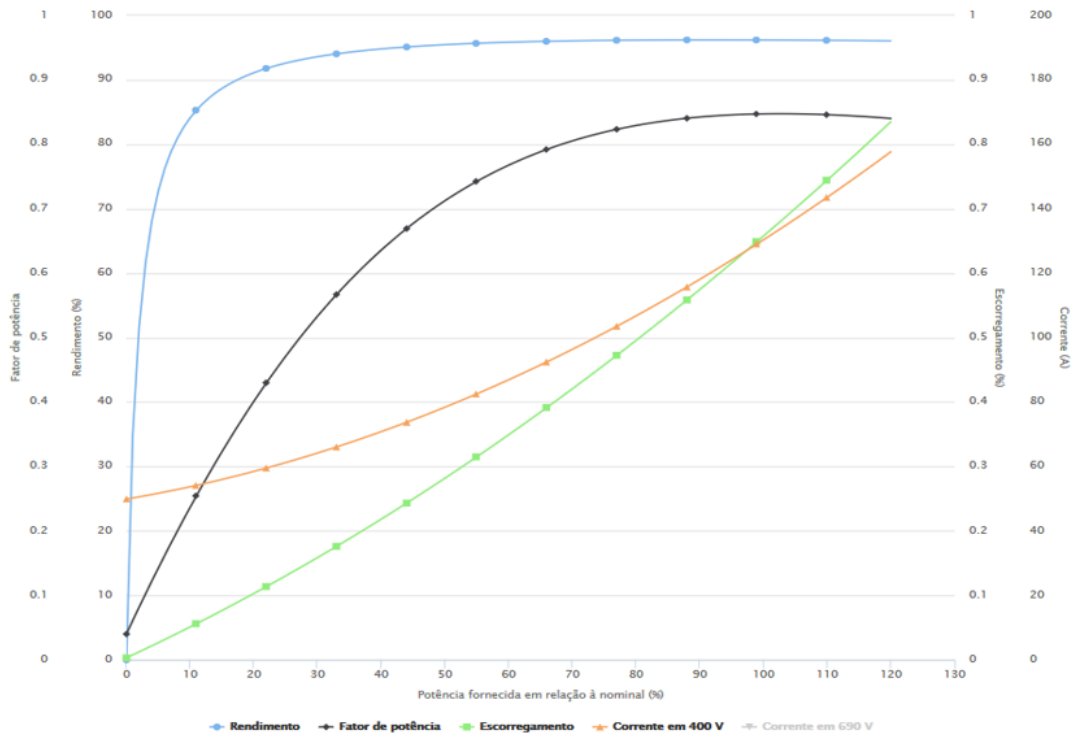


Figura 37 – Curva de desempenho em carga do motor WEG W22 IE4 75kW (Anexo C).

Mediante uma análise da curva característica do motor ilustrada na figura 37, retira-se os valores de corrente e fator de potência para se poder calcular a potência absorvida deste motor a um fator de carga de 80%. Para tal, recorre-se à expressão 28.

4.1.4. CONSUMO DE POTÊNCIA ATIVADO MOTOR WEG IE4

A tabela 9 apresenta os valores retirados do gráfico e a P_{abs} obtida para cada nível de carga. Considerando o pressuposto deste estudo de considerar 528h de funcionamento mensal do motor, e em comparação com o motor da ABB, aplica-se também aqui o cálculo da expressão 22 para calcular o custo de operação deste motor.

Tabela 9 - Energia consumida nos diferentes regimes de carga – motor WEG W22 IE4.

Carga (%)	Corrente (A)	Cos ϕ	P _{abs} (kW)	Nº Mensal (h)	Consumo mensal (kWh)
100%	130,4	0,85	76,8	528	40 530,74
80%	106,8	0,83	61,4	528	32 426,78
75%	101,4	0,82	57,6	528	30 416,30
50%	78,4	0,71	38,6	528	20 362,40

Considerando-se o custo de energia de 0,1216 €/kWh, tal e qual utilizado anteriormente no cálculo para o motor ABB, e 528 horas de funcionamento mensal, considera-se que o motor funciona 12 meses no ano. O custo de funcionamento obtido em termos de energia mensal e anual consumida é novamente calculado mediante a equação 30. Os resultados são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Custos de energia mensal e anual – motor WEG W22 IE4.

Carga (%)	Consumo mensal (kWh)	Custo mensal (€)	Consumo Anual (kWh)	Custo anual (€)
100%	40 530,74	4 928,54	486 368,85	59 142,45
80%	32 426,78	3 943,10	389 121,41	47 317,16
75%	30 416,30	3 698,62	364 995,57	44 383,46
50%	20 362,40	2 476,07	244 348,79	29 712,81

4.1.5. COMPARAÇÃO DOS DOIS MOTORES

Evidencia-se que o custo anual do motor IE4 é efetivamente inferior, conforme era de esperar considerando um motor da mesma potência, mas com rendimento superior o que implica uma menor potência absorvida à rede para garantir a potência útil mecânica necessária no eixo do motor, a entregar à carga.

Da comparação dos resultados das tabelas anteriores, retira-se as conclusões expostas na tabela 11 e 12 e que identifica a relação direta da diferença entre os custos e consumos apresentados, significando a poupança obtida. Afere-se que para o regime de carga de 80% obtém-se uma diferença de energia anual consumida de 10 626,22 kWh, no valor de 1 292,15 €. Estes resultados foram obtidos através da aplicação da expressão 32 e 33.

$$\Delta C_{anual} = C_{abb} - C_{weg} \quad (32)$$

e,

$$\Delta custo_{anual} = custo_{abb} - custo_{weg} \quad (33)$$

Tabela 11 – Poupança no consumo e custo mensal entre o motor ABB e WEG IE4.

Poupança Mensal		
Carga	Consumo (kWh)	Custo (€)
100%	-1 415,37	-172,11
80%	-885,52	-107,68
75%	-637,68	-77,54
50%	-658,59	-80,08

Tabela 12 - Poupança no consumo e custo anual entre o motor ABB e WEG IE4.

Poupança Anual		
Carga	Consumo (kWh)	Custo (€)
100%	-16 984,49	-2 065,31
80%	-10 626,22	-1 292,15
75%	-7 652,22	-930,51
50%	-7 903,07	-961,01

4.1.6. COMPARAÇÃO DE CONSUMOS CONSIDERANDO A POTÊNCIA REATIVA

Considerando a energia reativa consumida pelo motor, obteve-se valores diferentes no custo associado ao consumo.

Para averiguar, procede-se primeiramente ao cálculo da potência aparente, conforme a equação 34. Em seguida,

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (34)$$

E que, a potência reativa pode ser dada pela equação seguinte:

$$Q = \sqrt{(S)^2 - (P)^2} \quad (35)$$

Não são aplicadas sanções se as exigências de energia reativa não superarem 30% da ativa, e de acordo com a tabela 13 verifica-se os escalões dos fatores multiplicativos para determinados valores de $\tan \varphi$, onde este é obtido através da equação 36 [67]. Então, procede-se à verificação destes valores, cujos resultados estão apresentados na tabela 14.

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} \quad (36)$$

Tabela 13 - Fatores multiplicativos a aplicar ao preço de referência da energia reativa indutiva, Despachos 7253/2010 de 26 Abril e 10/2010 de 29 Julho, da ERSE [65].

Escalão	Descrição	Factor multiplicativo
Escalão 1	Correspondente a $tg \varphi$ superior ou igual a 30% e inferior a 40%	0,33
Escalão 2	Correspondente a $tg \varphi$ superior ou igual a 40% e inferior a 50%	1,00
Escalão 3	Correspondente a $tg \varphi$ superior ou igual a 50%	3,00

Tabela 14 – Valores obtidos de potência reativa e consumos do motor ABB e WEG.

Caraterística	Motor ABB	Motor WEG
Potência Aparente (S)	75,11 kVA	73,99 kVA
Potência Reativa (Q)	40,75 kVAr	41,27 kVAr
Consumo Mensal Reativa	21517,62 kVArh	21790,93 kVArh
Consumo Anual Reativa	258211,46 kVArh	261491,18 kVArh
Tg φ	0,65	0,67

O resultado indica que, conforme a tabela 14, este indicador é superior a 50%. De acordo com a tabela 13, o fator multiplicativo ao custo tarifário aplicado à energia reativa é 3,00. O preço da energia reativa de acordo com a tabela 7 relativa à tarifa transitória aplicada em BTE, é de 0,0296 €/kVArh, sendo que aplicando o fator o preço a considerar nesta análise é de 0,0888 €/kVArh.

Verifica-se que o consumo de energia reativa no motor WEG IE4 é superior à do motor ABB IE3, constituindo uma diferença de 3.279,72 kVArh.

O custo da energia reativa é obtido através da equação seguinte [68]:

$$C_{EQ} = (E_Q - 0,3 \times E_p) \times c \quad (37)$$

Onde a componente E_Q corresponde à cota de energia reativa sujeita ao custo, E_p à energia ativa consumida num ano e c o custo unitário da energia em €/kVArh.

Então o custo de energia reativa consumido está de acordo com os valores apresentados na tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do custo da Energia Reativa consumida num ano.

Motor	Custo Anual Energia Reativa	Custo Anual Total
Motor ABB	12 279,90 €	60 889,21 €
Motor WEG	12 854,22 €	60 171,39 €

Conclui-se que o motor WEG IE4 possui um custo de energia reativa superior ao motor ABB, contradizendo a diferença de potência ativa encontrada nestes dois motores, onde o motor WEG possui menor valor de energia necessária para realizar trabalho.

Contudo, e ainda analisando a tabela 15, verifica-se que apesar desta diferença de energia que recai negativamente sobre o motor IE4, na verdade, o custo total do consumo de energia, resultante da soma de energia ativa consumida com a energia reativa consumida, é inferior no motor WEG, totalizando uma poupança de 717,83 € por ano.

4.2. CASO 2: ALTERNADOR ACIONADO POR MOTOR EFACEC

A Efacec é uma empresa nacional de referência com vasta experiência na área de produtos de energia, sistemas elétricos e mobilidade elétrica, com presença internacional em mais de 65 países.

O caso em estudo trata-se de um motor da Efacec em funcionamento e associado a um sistema de monitorização que permite ler as suas grandezas. Pretende-se analisar este motor que aciona um alternador, e que por sua vez alimenta o laboratório de ensaios de transformadores da Efacec. Consoante o tipo de máquina em ensaio, as potências necessárias variam. Consequentemente, varia também a potência solicitada ao motor.

4.2.1. DADOS DA APLICAÇÃO COM MOTOR EFACEC

Na tabela 16 e 17 encontram-se os dados técnicos e as grandezas medidas deste motor.

Tabela 16 – Características do motor Efacec

Caraterística	Motor Efacec
Modelo	BF5 200 L64
Ano	1992
Potência Nominal	30 kW
Tensão	380 V / 400 V
Número de Polos	4
Frequência	50 Hz
Rotação Nominal	1465 rpm
Corrente nominal	60 A
Fator de Potência	(100%) 0,83
Regime de Serviço	S1
Grau de Proteção	IP55
Nível de Ruído	85,0 dB(A)

Os dados analisados do sistema de monitorização são medições de grandezas desde o dia 1 de Junho de 2019 até 16 de Setembro, onde é possível verificar os valores da corrente, frequência, tensão, potência de entrada, fator de potência e velocidade. Estes valores são obtidos a cada 15 minutos.

A tabela 17 diz respeito a um extrato dos valores recolhidos, relativos ao dia 1 de Junho de 2019.

Tabela 17 – Dados obtidos pelo sistema de monitorização no dia 1 de Junho de 2019.

Data /Hora	f(H)	I(A)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	cos ϕ	Pin	Pout	U (V)	Uab (V)	Ubc (V)
01/06/2019 09:15	50	29,8	30	30,5	28,7	0,18	3,8	1,4	401,5	403	400,2
01/06/2019 09:30	50	30	29,9	31	29,2	0,18	3,8	1,4	402,9	404,3	402
01/06/2019 09:45	50	30,5	30,6	31,2	29,7	0,18	3,9	1,4	404,5	405,8	403,4
01/06/2019 10:00	50	30,3	30,3	31,4	29,2	0,18	3,8	1,4	403,9	405,5	402,7
01/06/2019 10:15	50	30,2	30,4	30,8	29,4	0,18	3,9	1,5	403,8	405,1	402,6
01/06/2019 10:30	50	30,2	30,2	30,9	29,4	0,18	3,9	1,4	403,7	404,9	402,6
01/06/2019 10:45	50	30,3	30,6	31,1	29,2	0,18	3,9	1,4	404,2	405,9	402,8
01/06/2019 11:00	50	30,3	30,7	30,7	29,4	0,18	3,9	1,5	403,7	405	402,2

4.2.2. CONSUMO DE POTÊNCIA ATIVA DO MOTOR EFACEC

Efetuarão-se os cálculos para aferir o número de horas de funcionamento do motor de 1 de Junho a 16 de Setembro, tendo-se concluído que o motor nestes três meses e meio funcionou um total de 411 horas.

Através da ferramenta Excel e recorrendo à expressão 26, obtêm-se os valores do fator de carga a que o motor se encontra a trabalhar. Verifica-se que este possui um fator de carga variável estando pois dependente da necessidade dos ensaios a efetuar aos transformadores, observando-se alguns picos de potência útil mesmo ao longo do dia.

A tabela 18 mostra os maiores picos de solicitação de potência encontrados nos dados analisados. O fator de carga e o rendimento foram calculados para serem analisados. De acordo com esta informação, verifica-se que o maior valor de potência absorvida na entrada é 33,5 kW, e a potência útil de saída de 17 kW. O fator de carga máximo encontrado está na ordem dos 57% e o rendimento de 71%.

Tabela 18 – Valores mais elevados encontrados de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.

P_{in} (kW)	P_{out} (kW)	FC (%)	Rendimento (%)
33,5	17	57%	71%
17	6,2	21%	72%
8,7	5,8	19%	71%
8,6	5,2	17%	67%
7,8	5	17%	68%
7,6	4,7	16%	67%
7,5	4,6	15%	65%
7,4	4,4	15%	66%
7,1	4,3	14%	66%
6,7	4,2	14%	62%

É necessário traçar um valor médio de fator de carga a que o motor funciona, considerando a potência útil entregue ao alternador. Obtém-se uma média de funcionamento de 5% de fator de carga a que o motor funcionou nos 3 meses. Este valor é justificado pelo facto de o motor ter uma potência nominal de 30 kW, e a maior parte do tempo analisado encontra-se a funcionar com valores baixos de potência útil necessária para o funcionamento do grupo motor/alternador. A tabela 18 evidencia que o motor poderá, também, ao longo do tempo, ter picos de solicitação de potência que justifiquem a sua potência nominal. Note-se ainda que se está a analisar 3 meses, sendo que o motor está em funcionamento a vários anos.

Tabela 19 – Valores médios obtidos de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.

Nº Horas	Média P_{abs}	Média P_u	FC	R %
Junho				
104	3,9	1,5	5%	39%
Julho				
168	3,7	1,3	4%	36%
Agosto				
62	3,9	1,6	5%	40%
Setembro				
77	4,0	1,5	5%	35%

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 19. Recorrendo às expressões 27 e 30 obteve-se os valores de consumo e custos nos meses de Junho a Setembro, considerando as horas de funcionamento do motor em cada mês. Os resultados são apresentados na tabela 20.

Tabela 20 – Resultados obtidos do consumo e custo de Junho a Setembro, do motor Efacec.

Mês	Consumo (kWh)	Custo (€)
Junho	405,60	49,32 €
Julho	615,93	74,90 €
Agosto	244,22	29,70 €
Setembro	310,37	37,74 €

Os valores obtidos indicam um valor mensal pequeno, no entanto, se estudarmos do ponto de vista anual ver-se-á que o valor monetário em causa poderá ter uma expressão mais significativa.

4.2.3. DADOS DO MOTOR WEG IE3 – OPÇÃO 1

Mediante os dados obtidos no ponto 4.2.2., analisa-se um motor do fabricante WEG com as mesmas características nominais do motor Efacec, mas de rendimento superior, no sentido de dimensionar uma solução de maior eficiência energética.

O motor escolhido é da gama W22 (ver Figura 38), de eficiência IE3, cujos dados nominais são apresentados na tabela 21. No Anexo D é possível encontrar o *datasheet* do motor.

Através da curva de desempenho deste motor é possível encontrar valores determinantes para dimensionar a solução alternativa ao motor Efacec. A curva encontra-se ilustrada na figura 39.



Figura 38 – Motor WEG W22 30 kW IE3.

Tabela 21 – Características do motor WEG W22 IE3 escolhido.

Caraterística	Motor WEG
Modelo	W22 12876270
Potência Nominal	30 kW
Tensão	400 V/415V
Número de Polos	4
Frequência	50 Hz
Rotação Nominal	1480 rpm
Corrente nominal	57,1A
Fator de Potência	(100%) 0,81
Regime de Serviço	S1
Grau de Proteção	IP55
Nível de Ruído	63,0 dB(A)

Mantém-se o valor da potência útil do motor Efacec, uma vez que esta é a potência solicitada pela carga e que deverá ser mantida para garantir que se dispõe da potência necessária para a carga funcionar corretamente. Visto que, o âmbito desta análise é a melhoria da eficiência energética considerando apenas o equipamento de força motriz que é o motor, e o alternador como a carga, pretende-se analisar unicamente do ponto de vista da potência absorvida, considerando a potência útil à saída do motor como um requisito do conjunto motor/alternador.

Os dados obtidos através da curva de desempenho e a potência absorvida calculada, são apresentados na tabela 22.

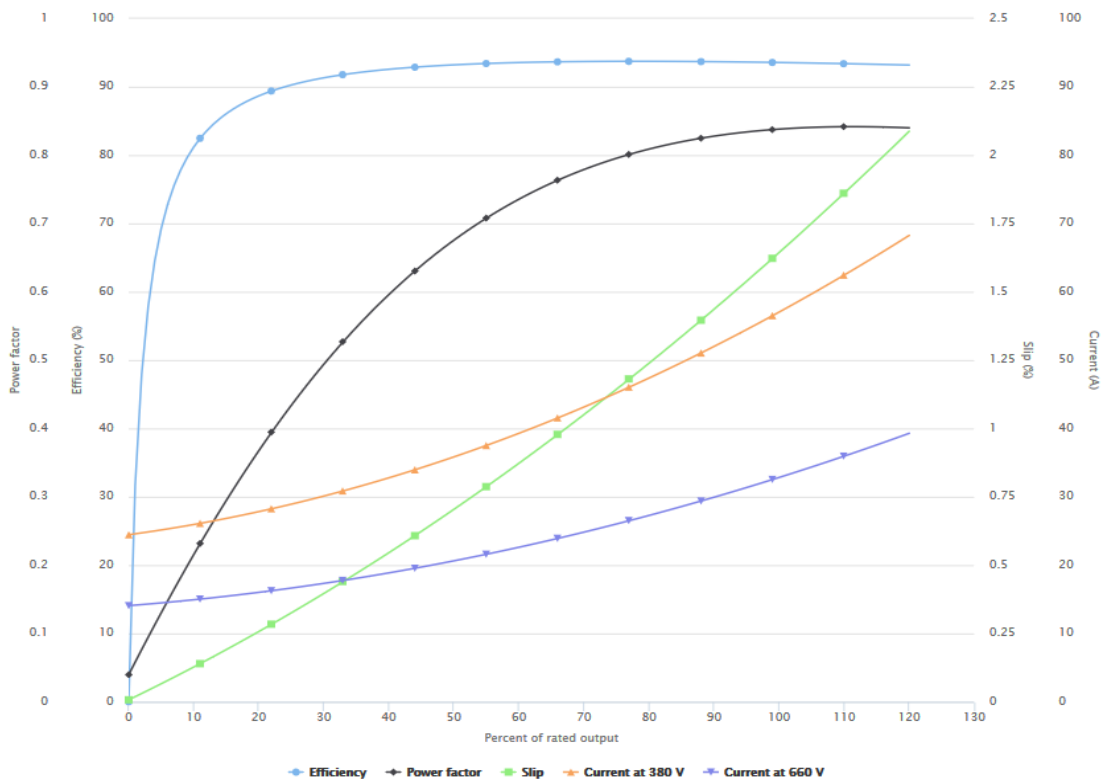


Figura 39 - Curva de desempenho em carga do motor WEG W22 IE3 30 kW (Anexo D).

Tabela 22 – Dados obtidos pela curva de desempenho do motor WEG em função do fator de carga.

FC	Corrente I (A)	Tensão U (V)	Cos φ
Junho			
5%	27,52	400	0,12
Julho			
4%	27,40	400	0,10
Agosto			
5%	27,52	400	0,12
Setembro			
5%	27,52	400	0,12

Tabela 23 - Valores médios calculados com o motor WEG de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.

Nº Horas	P _{abs} (kW)	Média P _u (kW)	FC %	Rendimento %
Junho				
104	2,3	1,5	5%	66,8%
Julho				
168	1,9	1,3	4%	68,0%
Agosto				
62	2,3	1,6	5%	69,3%
Setembro				
77	2,3	1,5	5%	65,6%

As tabelas 23 e 24 evidenciam que a potência absorvida pelo motor WEG IE3 é inferior à do motor Efacec. Consequentemente, o rendimento é também superior. A diferença de rendimento é de aproximadamente 30%.

Tabela 24 - Resultados obtidos do consumo e custo de Junho a Setembro, do motor WEG.

Mês	Consumo (kWh)	Custo (€)
Junho	237,95	28,93 €
Julho	318,92	38,78 €
Agosto	141,85	17,25 €
Setembro	176,17	21,42 €

Os resultados obtidos apontam para uma melhoria do consumo energético e do custo, cuja comparação é a seguidamente demonstrada.

4.2.4. COMPARAÇÃO DOS DOIS MOTORES DE 30 KW

Para se analisar as diferenças nos valores dos dois motores, pretende-se também estabelecer uma estimativa de funcionamento anual do motor Efacec. Entendendo-se que as horas de funcionamento do motor e a potência útil disponibilizada é variável ao longo do ano, estando dependente da necessidade de fornecer potência mecânica ao alternador que alimenta o laboratório. Não é, portanto, possível prever com exatidão qual a necessidade de trabalho ao longo dos meses.

Assim, teve-se como referência neste estudo o número de horas de funcionamento do mês de Junho de 2019, que totaliza 168h, considerando como valor médio no caso de um ano de maior trabalho. Claro que, conforme os dados obtidos pelo sistema de monitorização, o mês de Agosto possui um número de horas de funcionamento muito inferior, uma vez que as fabricas encontram-se com menor carga de trabalho neste mês, ou até completamente encerradas. No entanto, considera-se à semelhança dos dados obtidos, uma média de 60 horas de funcionamento neste mês.

Com base na tabela 25, e também nos resultados obtidos das tabelas 20 e 24, obteve-se as diferenças dos consumos e custos mensais e anuais, representando a poupança adquirida através do motor WEG de classe de rendimento IE3. Estes valores encontram-se na tabela 26.

Tabela 25 – Resultados obtidos dos consumos e custos anuais de cada motor.

Nº horas Anual h	Consumo Anual (kWh)	Custo Anual (€)
Motor Efacec		
1908	7632,0	928,05 €
Motor WEG IE3		
1908	4179,59	508,24 €

Tabela 26 - Diferenças de consumo e custo do motor Efacec e Opção 1 – Motor WEG IE3.

Diferença Consumo Mensal (kWh)	Poupança Mensal (€)	Diferença Consumo Anual (kWh)	Poupança Anual (€)
Junho		-3 452,41	419,81
-167,65	20,39		
Julho			
-297,01	36,12		
Agosto			
-102,37	12,45		
Setembro			
-134,19	16,32		

4.2.5. COMPARAÇÃO DE CONSUMOS COM POTÊNCIA REATIVA

Considerando a energia reativa consumida pelo motor, obteve-se valores diferentes no custo associado ao consumo. Procedeu-se primeiramente ao cálculo da potência aparente, conforme a expressão 33 o permite.

Como dito no ponto 4.1.6, não são aplicadas sanções se as exigências de energia reativa não superarem 30% da ativa, que de acordo com a tabela 13, verifica-se os escalões associados aos correspondentes fatores multiplicativos para determinados valores de $\text{tg } \varphi$.

Procede-se à verificação dos valores de potência aparente e potência reativa, cujos resultados apresentam-se na tabela 27.

Tabela 27 – Valores obtidos de potência reativa e consumos do motor Efacec e WEG.

Caraterística	Motor Efacec	Motor WEG
Potência Aparente (S)	21,05 kVA	19,05 kVA
Potência Reativa (Q)	20,67 kVAr	18,92 kVAr
Consumo Mensal Reativa	3 472,42 kVArh	3 178,89 kVArh
Consumo Anual Reativa	39 436,72 kVArh	36 103,11 kVArh
Tg φ	5,2	8,64

O resultado da aplicação da expressão 35, indica que, conforme a última linha da tabela 27, este indicador encontra-se superior a 50%.

O consumo de energia reativa do motor Efacec é superior à do motor WEG IE3, representando uma diferença de 3.333,61 kVArh.

O custo da energia reativa é obtido recorrendo novamente à expressão 36. Então, o custo de energia reativa consumido é conforme a tabela 28.

Tabela 28 – Resultados do custo da Energia Reativa consumida num ano – Opção 1.

Motor	Custo Energia Reativa por Ano	Custo Total de Consumo de Energia por ano
Motor Efacec	3 298,66 €	4 226,72 €
Motor WEG	3 094,61 €	3 602,85 €

Conclui-se que o motor WEG IE3 possui um custo de energia reativa inferior ao motor Efacec, com uma diferença de 204,05 €.

O valor total de poupança energética, isto é, do custo de energia ativa mais energia reativa, é de 623,87 € por ano.

4.2.6. DADOS DO MOTOR WEG IE4 – OPÇÃO 2

Mediante os dados obtidos no ponto 4.2.2., escolhe-se outro motor do fabricante WEG com as mesmas características nominais do motor Efacec, mas de rendimento *Super Premium* IE4, na tentativa de dimensionar uma solução ainda mais eficiente que a opção 1.

O motor escolhido é da gama W22, com classe de eficiência IE4, cujos dados nominais são apresentados na tabela 29. O Anexo E contém o *Datasheet* deste motor incluindo a curva de desempenho em carga apresentada na figura 40.

Tabela 29 – Características do motor WEG W22 IE4 escolhido (Anexo E).

Caraterística	Motor WEG
Modelo	W22 12876270
Potência Nominal	30 kW
Tensão	400 V/ 415V
Número de Polos	4
Frequência	50 Hz
Rotação Nominal	1485 rpm
Corrente nominal	56,3 A
Rendimento	(100%) 94,9
Fator de Potência	(100%) 0,81
Regime de Serviço	S1
Grau de Proteção	IP55
Nível de Ruído	63,0 dB(A)

Através da curva de desempenho deste motor é possível encontrar valores determinantes para dimensionar a solução alternativa ao motor Efacec. A curva encontra-se expressa pela figura 40 e os dados obtidos estão de acordo com a tabela 30.

A tabela 30 permite perceber logo à partida que o motor WEG 30kW IE4 possui valores maiores de corrente absorvida e menor fator de potência comparativamente com o motor da opção 1.

Tabela 30 – Dados obtidos pela curva de desempenho do motor WEG IE4 em função do fator de carga.

FC	Corrente I (A)	Tensão U (V)	Cos ϕ
Junho			
5%	30,03	400	0,11
Julho			
4%	29,93	400	0,10
Agosto			
5%	30,03	400	0,11
Setembro			
5%	30,03	400	0,11

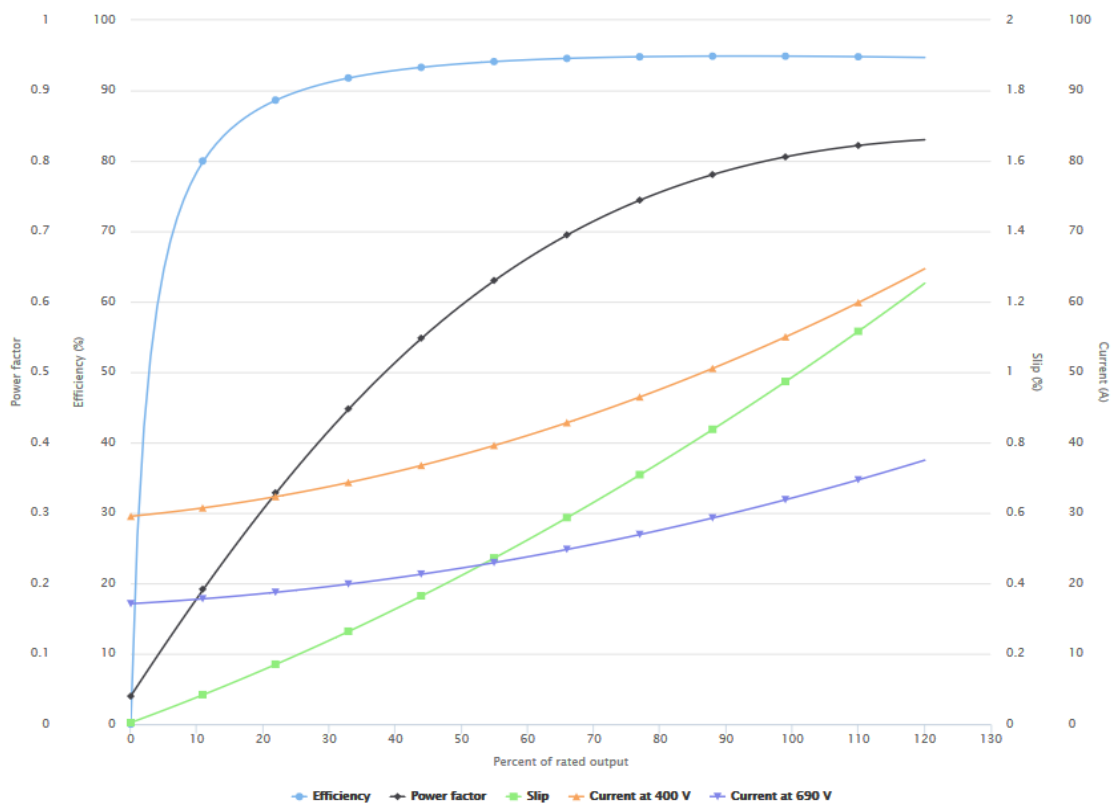


Figura 40 - Curva de desempenho em carga do motor WEG W22 IE4 75kW (Anexo E).

Então, conclui-se que a potência absorvida adquire maior valor neste motor, conforme a tabela 31 pode elucidar. Apesar que, a diferença é mais visível no fator de carga de 4%.

Tabela 31 - Valores médios calculados com o motor opcional WEG IE4 de 1 de Junho a 16 de Setembro de 2019.

Nº Horas	P_{abs} (kW)	Média P_u (kW)	FC %	Rendimento %
Junho				
104	2,3	1,5	5%	66,8%
Julho				
168	2,1	1,3	4%	62,30%
Agosto				
62	2,3	1,6	5%	69,3%
Setembro				
77	2,3	1,5	5%	65,5%

Contudo, a tabela 32 demonstra também que a potência absorvida no motor WEG IE4 é inferior à do motor Efacec de menor rendimento, e conseqüentemente, o rendimento é também superior. A diferença de rendimento é de aproximadamente 30%.

Tabela 32 - Resultados obtidos do consumo e custo de Junho a Setembro, do motor WEG.

Mês	Consumo (kWh)	Custo (€)
Junho	238,01	28,94 €
Julho	348,37	42,36 €
Agosto	141,89	17,25 €
Setembro	176,22	21,43 €

Os resultados obtidos apontam para uma melhoria do consumo energético e do custo, relativamente ao motor da Efacec aplicado, e cuja comparação encontra-se a seguir demonstrada no ponto 4.2.7.

4.2.7. COMPARAÇÃO DOS DOIS MOTORES: OPÇÃO 1 E OPÇÃO 2

Com base na tabela 25, e também com os resultados obtidos das tabelas 20 e 24, obteve-se as diferenças dos consumos e custos mensais e anuais, representando a poupança adquirida através do motor WEG de classe de rendimento IE4 relativamente ao motor Efacec.

Tabela 33 - Diferenças de consumo e custo do motor Efacec e Opção2 – Motor WEG IE4.

Diferença Consumo Mensal (kWh)	Poupança Mensal (€)	Diferença Consumo Anual (kWh)	Poupança Anual (€)
Junho		-3 367,91	409,54
-167,59	20,38		
Julho			
-267,56	35,54		
Agosto			
-102,33	12,44		
Setembro			
-134,15	16,31		

Tabela 34 – Resultados obtidos dos consumos e custos anuais de cada motor.

Nº horas Anual h	Consumo Anual (kWh)	Custo Anual (€)
Motor Efacec		
1908	7632,00	928,05 €
Motor WEG IE3		
1908	4179,59	508,24 €
Motor WEG IE4		
1908	4264,09	518,51 €

Com estes dados foi possível aferir a diferença de consumo e custo anual entre o motor IE3 e o motor IE4, para se perceber qual destes é mais viável. Obteve-se uma diferença de 84,50 kWh de consumo anual e uma poupança de 10,28 € também anual, o que representa baixa expressão económica.

As diferenças encontradas no consumo e no custo do motor IE4 são bastante reduzidas comparativamente ao motor IE3. Mais à frente, na análise económica será possível averiguar se este investimento é viável.

Considerando a energia reativa consumida pelo motor, obteve-se valores diferentes no custo associado ao consumo. Procede-se primeiramente ao cálculo da potência aparente e reativa e à análise destes valores, cujos resultados estão na tabela 35.

Tabela 35 – Valores obtidos de potência reativa e consumos do motor Efacec e WEG.

Caraterística	Motor WEG IE3	Motor WEG IE4
Potência Aparente (S)	21,05 kVA	20,79 kVA
Potência Reativa (Q)	20,67 kVAr	20,67 kVAr
Consumo Mensal Reativa	3 472,42 kVArh	3 472,36 kVArh
Consumo Anual Reativa	39 436,72 kVArh	39 436,09 kVArh
Tg φ	5,2	9,25

Verifica-se que o consumo de energia reativa no motor IE3 é superior à do motor WEG IE4, porém, representando uma diferença pouco significativa de -0,63 kVArh.

4.3. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÓMICA

Tendo em consideração o ciclo de vida de um motor elétrico, os custos de funcionamento tornam-se diferentes dos custos iniciais de aquisição e instalação. Daí que, os motores de elevado rendimento constituem uma alternativa acertada do ponto de vista económico a médio e longo prazo. No entanto, é essencial que se realize uma análise caso a caso, no sentido de perceber se é efetivamente rentável a escolha de um motor de maior rendimento, não só do ponto de vista do investimento, mas também do ponto de vista dos fatores que em causa e que influenciam ao longo da vida útil do motor.

É necessário conhecer as taxas de juros indispensáveis a uma análise económica fiável e a vida útil do motor para se aferir a sua viabilidade. Ao longo do tempo existe a tendência de o valor do investimento inicial diminuir devido à concorrência do mercado e à chegada de novas tecnologias em relação às existentes na altura de compra do equipamento.

É imprescindível, portanto, o uso de critérios de rentabilidade como sendo:

- Valor Atual Líquido (VAL) que diz respeito à diferença entre os valores atualizados de todos os custos e dos proveitos, *cash flow*, ao longo da vida útil do motor;
- Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) que representa a taxa de juro que anula o VAL de uma série de *cash flows*, que exprime a taxa de rentabilidade periódica do capital investido;
- *Payback* (PB) ou Período de Recuperação de Investimento (PRI) e corresponde ao tempo, em anos, para se recuperar todo o capital investido.

4.3.1. CASO 1: POUPANÇA DE ENERGIA ATIVA

Além do valor do investimento, que corresponde ao preço de compra do motor e eventuais encargos com transporte, instalação, colocação em serviço e formação, faz-se necessário considerar a vida útil do motor, que é a variável que vai permitir delimitar um período de análise da rentabilidade do investimento. Entende-se aqui como o período durante o qual o investimento vai proporcionar resultados positivos.

Tabela 36 - Comparação motores ABB e IE4 WEG para carga 80% sem considerar energia reativa.

Fator de carga 80%	Motor IE3	Motor IE4
Consumo Mensal (kWh)	33 312,30	32 426,78
Custo Mensal (€)	4 050,78 €	3 943,10 €
Consumo Anual (kWh)	399 747,63	389 121,41
Custo Anual (€)	48 609,31 €	47 317,16
Poupança Energética Anual (kWh)	10 626,22	
Poupança Anual (Euro)	1 292,15 €	

Na tabela 36 exhibe-se a comparação dos dois motores ABB IE3 e WEG IE4, a poupança anual de energia adquire o valor de 1 292,15 €, porém, este é o valor simples sem considerar taxas de atualização e é útil para acompanhar anualmente a economia do empreendimento. Para este estudo de viabilidade, a fim de ser possível avaliar o interesse financeiro de uso do motor mais caro, utiliza-se uma taxa de atualização que permitirá obter a cada ano o valor atual, ou seja, a poupança real associada ao ano em análise após o investimento. Através deste estudo pode-se perceber, numa análise integrada no tempo estimado de vida útil do motor, se efetivamente o investimento é interessante do ponto de vista económico monetário e energético.

A análise inicia-se, portanto, no investimento inicial, considerado como o ano 0 (zero). Conforme já foi abordado, considera-se neste trabalho um tempo de vida útil dos motores em estudo de 15 anos.

Para o cálculo que visa obter os resultados apresentados na tabela 36, representativos dos resultados da poupança real e do retorno da diferença no investimento, considerando o custo do motor IE4 em relação ao custo de investimento do motor IE3, considerando-se que o estudo em análise equivale a uma nova instalação da qual se opta por um ou outro motor. Utiliza-se a seguinte expressão 41.

$$Poupança\ real = \frac{Poupança\ sem\ taxa}{(1+TA)^n} \quad (38)$$

Em que n é o número de anos e TA é a taxa de atualização em %.

O retorno atual é calculado pela soma do retorno do investimento e da poupança real, a cada ano.

Tabela 37 – Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno sem considerar energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Retorno
0	- €	- 2 891,14 €
1	1 254,51 €	- 1 636,63 €
2	1 217,97 €	- 418,65 €
3	1 182,50 €	763,85 €
4	1 148,06 €	1 911,90 €
5	1 114,62 €	3 026,52 €
6	1 082,15 €	4 108,67 €
7	1 050,63 €	5 159,31 €
8	1 020,03 €	6 179,34 €
9	990,32 €	7 169,67 €
10	961,48 €	8 131,15 €
11	933,48 €	9 064,62 €
12	906,29 €	9 970,91 €
13	879,89 €	10 850,80 €
14	854,26 €	11 705,06 €
15	829,38 €	12 534,44 €

Considera-se uma taxa de atualização de 3% como sendo a habitualmente utilizada em equipamentos elétricos em estudos de viabilidade económica. Os resultados da aplicação desta taxa e da expressão 38 encontram-se na tabela 37.

Para aferir a veracidade do supracitado, procede-se à identificação juntos dos respetivos fabricantes do preço do motor ABB IE3 e do motor WEG IE4. Desconsidera-se aqui os custos com montagens, colocação em serviço, formação, transporte ou qualquer outro tipo de serviço. Verificou-se que a diferença no investimento dos dois motores é de 2 891,14 € sendo o motor IE4 mais caro.

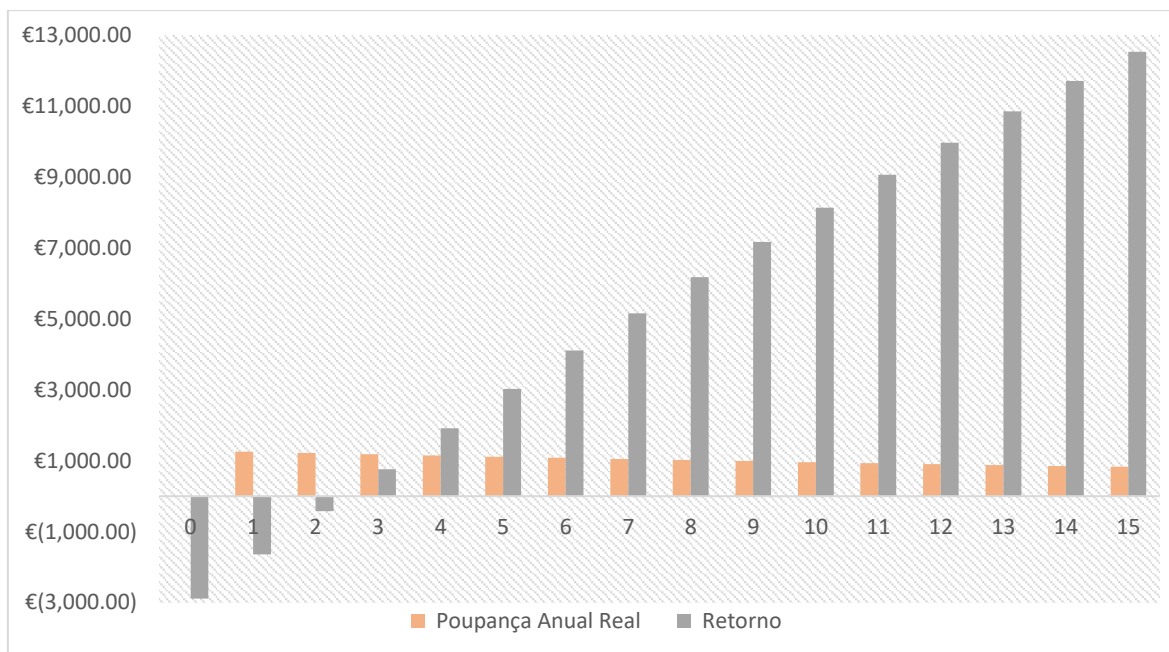


Figura 41 – Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real sem considerar energia reativa.

Verifica-se através da leitura do gráfico da figura 41 que ao longo dos anos a tendência é existir um retorno do investimento, em que no quinto ano já se evidencia um retorno positivo. A implementação do motor WEG permite uma poupança média de 1 028,37 € por ano.

Conclui-se que o tempo de retorno do investimento é de 2 anos e 2 meses, conforme o gráfico 41 reflete, cujo cálculo é obtido através da aplicação da expressão 39.

O estudo de avaliação económica do investimento do motor de elevada eficiência, foi dado pelo cálculo do tempo de recuperação do investimento (*payback*), de acordo com a seguinte expressão:

$$Payback (ano) = \frac{\Delta Investimento (\text{€})}{Poupança\ anual\ (EUR/ano)} \quad (39)$$

Onde $\Delta Investimento$ diz respeito à diferença no investimento expressa em Euros, ou seja, é o cálculo da diferença de custo entre o motor de elevada eficiência e o custo do motor de menor rendimento [37].

Para chegar à viabilidade económica da utilização de um motor de maior rendimento, requer-se perceber em quanto tempo se consegue o retorno da diferença do investimento, partindo da assertiva que efetivamente este último tem um custo de investimento superior ao primeiro,

uma vez que a sua construção é de eficiência superior, o que implica materiais e formas construtivas mais caras.

O VAL é um indicador que considera o investimento no tempo e é dado pela expressão 40. Indica o excedente acumulado dos cash-flows atualizados, determinados para o tempo de vida útil do investimento no motor, subtraídos do montante de capital investido no início, no ano 0.

$$VAL = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+t)^i} \quad (40)$$

Em que CF_i é o *cash flow* no ano i e ‘ t ’ a taxa de desconto.

Dos resultados expostos na tabela 38, observa-se que o VAL é positivo, e adquire o valor de 12 534,44 €, que representa rentabilidade da solução com motor IE4, com TIR de 40% representado a taxa de rentabilidade. Obtém-se assim um cenário favorável para investir.

Tabela 38 – Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – sem energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Receitas Líquidas
0	-€	- 2 891,14 €
1	1 254,51 €	1 254,51 €
2	1 217,97 €	1 217,97 €
3	1 182,50 €	1 182,50 €
4	1 148,06 €	1 148,06 €
5	1 114,62 €	1 114,62 €
6	1 082,15 €	1 082,15 €
7	1 050,63 €	1 050,63 €
8	1 020,03 €	1 020,03 €
9	990,32 €	990,32 €
10	961,48 €	961,48 €
11	933,48 €	933,48 €
12	906,29 €	906,29 €
13	879,89 €	879,89 €
14	854,26 €	854,26 €
15	829,38 €	829,38 €
Indicadores Económicos de Viabilidade		
Período (anos)		15
VAL		12 534,44 €
TIR		40%

Note-se que, obviamente, estes valores não definitivos uma vez que o preço de aquisição do motor por parte do consumidor final, poderá variar mediante a oferta comercial do fabricante

do motor em questão. Esse facto irá variar o custo do investimento que por sua vez, irá permitir obter maiores valores de receitas líquidas resultantes de uma poupança maior.

4.3.2. CASO 1: POUPANÇA DE ENERGIA TOTAL

Pretende-se agora estudar a viabilidade económica da utilização do motor IE4 considerando, além da energia ativa, a energia reativa.

Tabela 39 - Comparação motores ABB e IE4 WEG para carga 80% considerando energia reativa.

Fator de carga 80% - Potência Total	Motor IE3	Motor IE4
Consumo Ativa Anual (kWh)	399 747,63	389 121,41
Consumo Reativa Anual (kVArh)	258 211,46	261 491,18
Custo Anual (€)	60 889,21 €	60 171,39
Poupança Ativa Anual (kWh)	10 626,22	
Poupança Reativa Anual (kVArh)	-3 279,72	
Poupança Anual (Euro)	717,83 €	

Os resultados obtidos quanto aos consumos de energia reativa, e o custo total de energia consumida, estão refletidos na tabela 39, e o consequente estudo de poupança e retorno na tabela 41.

Tabela 40 - Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno considerando energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Retorno
0	-€	- 2 891,14 €
1	696,92 €	- 2 194,22 €
2	676,62 €	- 1 517,60 €
3	656,91 €	- 860,69 €
4	637,78 €	- 222,91 €
5	619,20 €	396,30 €
6	601,17 €	997,47 €
7	583,66 €	1 581,12 €
8	566,66 €	2 147,78 €
9	550,15 €	2 697,94 €
10	534,13 €	3 232,07 €
11	518,57 €	3 750,64 €
12	503,47 €	4 254,11 €
13	488,81 €	4 742,92 €
14	474,57 €	5 217,49 €
15	460,75 €	5 678,23 €

Através da análise da tabela 40 e do gráfico da figura 42, que o retorno considerando a energia reativa no cálculo da solução global, o tempo de retorno é superior sendo de 4 anos

em vez de 2. Ainda assim, evidencia-se a viabilidade do motor WEG IE4, desprezando aqui correção do fator de potência, considerando unicamente a potência reativa sujeita a faturação.

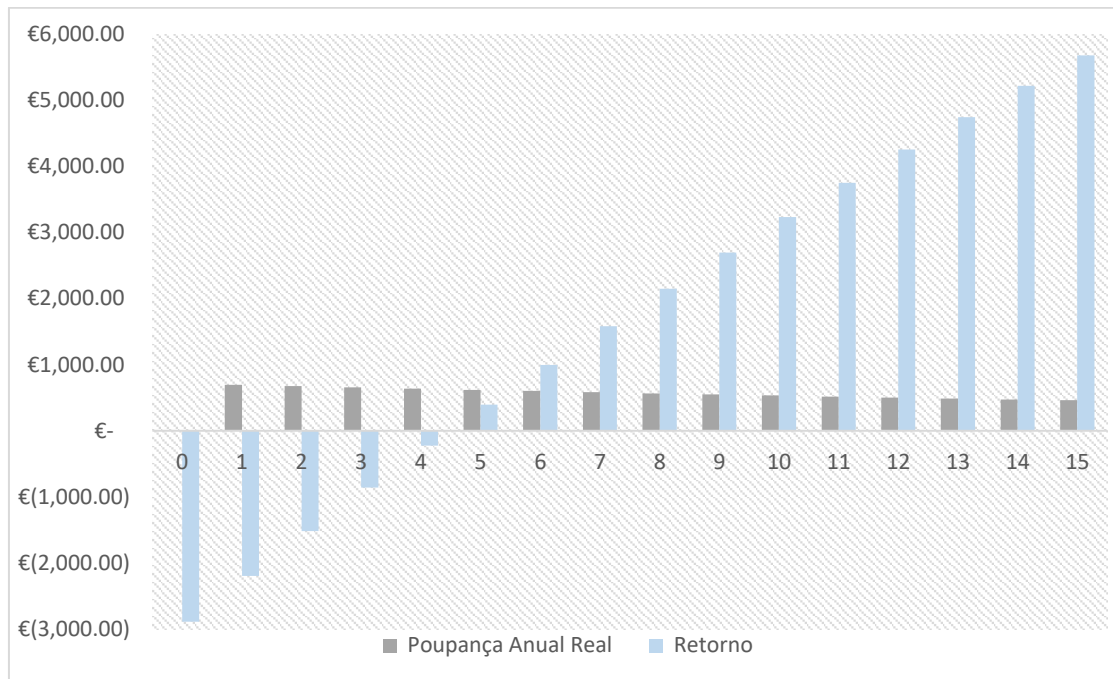


Figura 42 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real considerando energia reativa.

Tabela 41 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – com energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Receitas Líquidas
0	-€	- 2 891,14 €
1	696,92 €	696,92 €
2	676,62 €	676,62 €
3	656,91 €	656,91 €
4	637,78 €	637,78 €
5	619,20 €	619,20 €
6	601,17 €	601,17 €
7	583,66 €	583,66 €
8	566,66 €	566,66 €
9	550,15 €	550,15 €
10	534,13 €	534,13 €
11	518,57 €	518,57 €
12	503,47 €	503,47 €
13	488,81 €	488,81 €
14	474,57 €	474,57 €
15	460,75 €	460,75 €
Indicadores Económicos de Viabilidade		
Período (anos)		15
VAL		5 678,23 €
TIR		20%

Apesar de se obter um VAL menor ao estudo sem considerar energia reativa, conclui-se que o projeto continua a ser rentável com VAL positivo de 5 678,23 € e uma TIR de 20%.

4.3.3. CASO 2: ANÁLISE DOS CONSUMOS DE ENERGIA ATIVA DA OPÇÃO 1

No caso do motor Efacec obteve-se os resultados apresentados na tabela 42, onde se considera o custo do motor WEG, admitindo-se uma substituição direta. Ou seja, admitindo que o motor WEG seria diretamente substituído sem necessidade de custos adicionais, como instalação, formação, entre outros componentes de custo.

Tabela 42 - Comparação motores Efacec e IE3 WEG 30 kW sem considerar a energia reativa.

	Motor Efacec	Motor IE3
Consumo Ativa Anual (kWh)	7 632,00	4 179,59
Custo Anual (€)	928,05 €	508,24
Poupança Energética Anual (kWh)	3452,41	
Poupança Anual (Euro)	419,81 €	

A poupança obtida com o motor WEG é constatada tanto a nível de poupança energética total, como também de poupança anual no valor de 419,81 €.

Tabela 43 - Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno sem considerar energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Retorno
0	- €	- 2 280,00 €
1	407,59 €	- 1 872,41 €
2	395,71 €	- 1 476,70 €
3	384,19 €	- 1 092,51 €
4	373,00 €	- 719,51 €
5	362,13 €	- 357,38 €
6	351,59 €	- 5,79 €
7	341,35 €	335,56 €
8	331,40 €	666,96 €
9	321,75 €	988,71 €
10	312,38 €	1 301,09 €
11	303,28 €	1 604,38 €
12	294,45 €	1 898,82 €
13	285,87 €	2 184,70 €
14	277,55 €	2 462,24 €
15	269,46 €	2 731,71 €

O retorno do investimento é cerca de 5 anos, considerando como investimento inicial a totalidade do valor do motor WEG IE3. Ou seja, considera-se que eventualmente o motor seria substituído estando o motor Efacec em funcionamento pleno, sem realizar uma

diferença de custo entre a reparação do motor Efacec e a compra e instalação do novo motor de classe IE3.

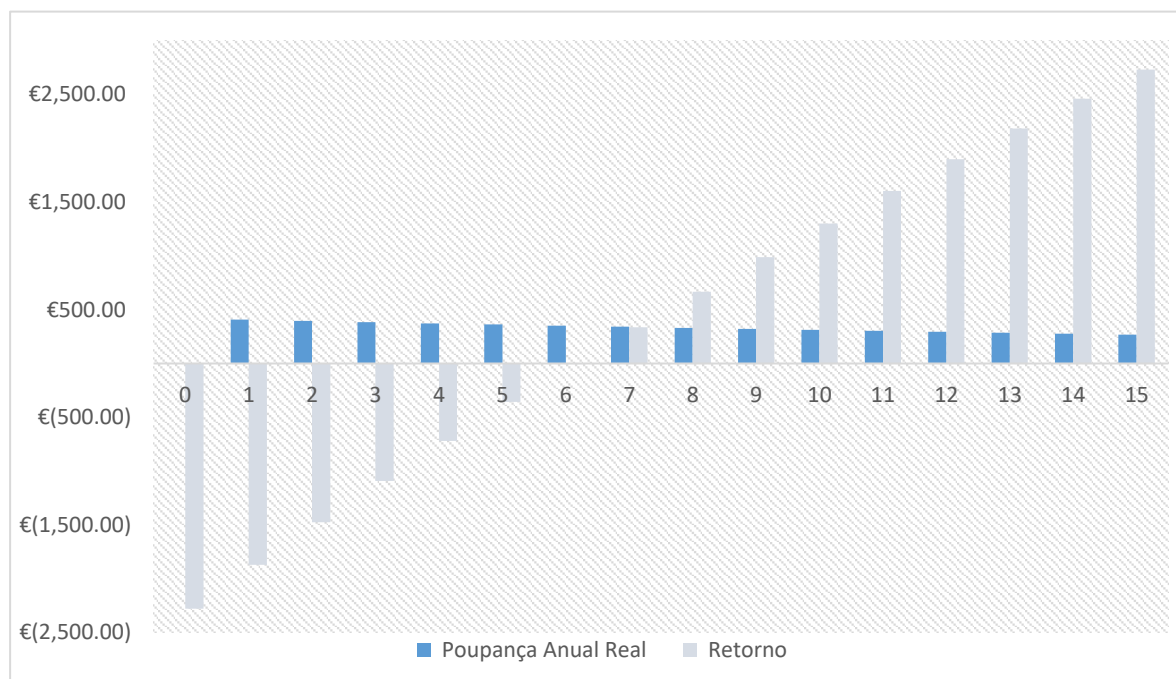


Figura 43 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança real sem considerar energia reativa.

Tabela 44 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – sem energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Receitas Líquidas
0	- €	- 2 280,00 €
1	407,59 €	407,59 €
2	395,71 €	395,71 €
3	384,19 €	384,19 €
4	373,00 €	373,00 €
5	362,13 €	362,13 €
6	351,59 €	351,59 €
7	341,35 €	341,35 €
8	331,40 €	331,40 €
9	321,75 €	321,75 €
10	312,38 €	312,38 €
11	303,28 €	303,28 €
12	294,45 €	294,45 €
13	285,87 €	285,87 €
14	277,55 €	277,55 €
15	269,46 €	269,46 €
Período (anos)		15
VAL		2 731,71 €
TIR		13%

Veja-se tabela 44. Obteve-se um VAL positivo no valor de 2 731,71€ e uma TIR de 13%, confirmando a viabilidade económica da solução, apesar de não ter uma expressão económica muito elevada.

No entanto, se considerarmos que a fabrica possui instalados um número considerável destes motores, obter-se-ia certamente uma expressão económica também considerável, uma vez que seria a multiplicação de poupança pelo número de motores em funcionamento.

Se considerássemos também, que ao invés de substituir o motor de forma direta enquanto este ainda está em funcionamento, e atribuíssemos um valor de reparação, o tempo de retorno seria diferente. Após algumas consultas a empresas especializadas em reparação de motores, com o intuito de perceber uma média de valores e reparações tipicamente realizadas em motores de 30 kW, obteve-se uma média de 500 a 600 €. Ao subtrairmos este valor ao valor do motor novo WEG IE3, chega-se a uma diferença de valor no investimento de aproximadamente 1700 €. De acordo com a expressão 39, o *payback* obtido é de 4 anos, sendo menos 2 anos comparativamente à aquisição do motor novo sem considerar a alternativa de recuperar o motor antigo.

4.3.4. CASO 2: ANÁLISE DOS CONSUMOS DE ENERGIA TOTAL DA OPÇÃO 1

Considerando o consumo da energia reativa obteve-se os resultados apresentados na tabela 45.

Verifica-se que o consumo de energia reativa é menor no motor IE3, comparativamente com o motor Efacec. O custo total é também menor, uma vez que a potência ativa é igualmente consumida em menor proporção, o que viabiliza desde à partida a escolha pelo motor mais eficiente.

Tabela 45 - Comparação motores Efacec e IE3 WEG 30 kW considerando a energia reativa.

	Motor Efacec	Motor IE3
Consumo Ativa Anual (kWh)	7 632,00	4 179,59
Consumo Reativa Anual (kVArh)	39 436,72	36 103,11
Custo Anual (€)	4 226,72 €	3 602,85 €
Poupança Ativa Anual (kWh)	3452,41	
Poupança Reativa Anual (kVArh)	3333,61	
Poupança Anual (€)	623,87 €	

Como forma de provar a análise com valores positivos, apresenta-se a tabela 46 relativa à poupança e ao retorno no investimento, que conta com uma poupança anual, sem taxa aplicada, de 623,87 €.

Tabela 46 - Resultados dos cálculos da poupança real e do retorno considerando energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Retorno
0	- €	- 2 280,00 €
1	605,69 €	-1 674,31 €
2	588,05 €	-1 086,25 €
3	570,93 €	-515,33 €
4	554,30 €	38,97 €
5	538,15 €	577,12 €
6	522,48 €	1 099,60 €
7	507,26 €	1 606,86 €
8	492,49 €	2 099,34 €
9	478,14 €	2 577,48 €
10	464,21 €	3 041,70 €
11	450,69 €	3 492,39 €
12	437,57 €	3 929,96 €
13	424,82 €	4 354,78 €
14	412,45 €	4 767,23 €
15	400,44 €	5 167,66 €

Concluiu-se que o tempo de retorno neste investimento é de aproximadamente 3 anos, o que é bastante aceitável sendo um curto espaço de tempo para retomar o valor investido e lucrar já no quarto ano.

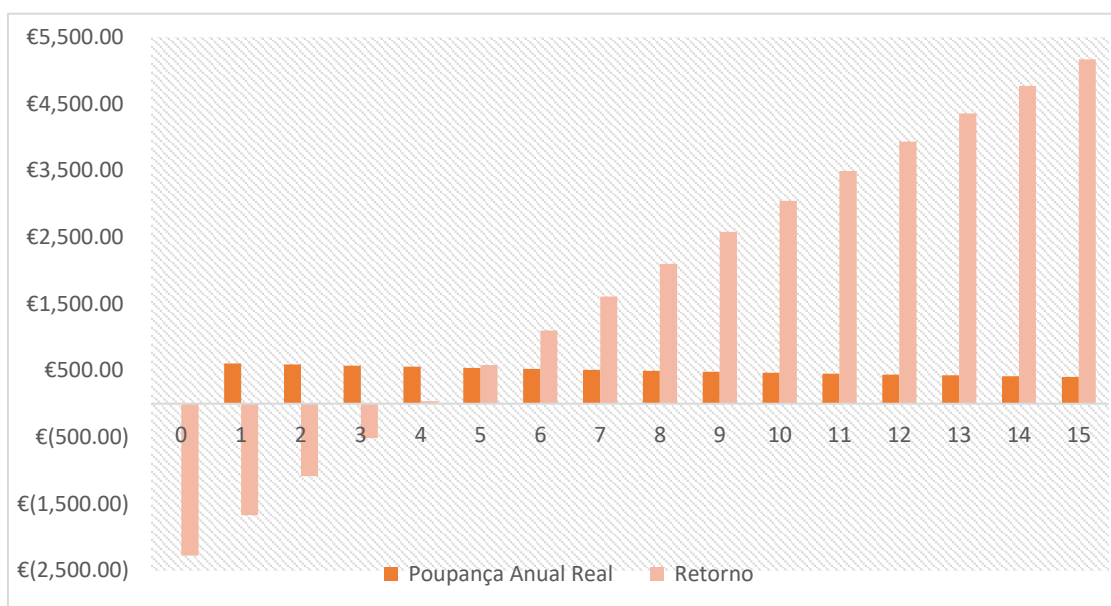


Figura 44 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real considerando energia reativa.

Tabela 47 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR – com energia reativa.

Ano	Poupança Anual Real	Receitas Líquidas
0	- €	- 2 280,00 €
1	605,69 €	605,69 €
2	588,05 €	588,05 €
3	570,93 €	570,93 €
4	554,30 €	554,30 €
5	538,15 €	538,15 €
6	522,48 €	522,48 €
7	507,26 €	507,26 €
8	492,49 €	492,49 €
9	478,14 €	478,14 €
10	464,21 €	464,21 €
11	450,69 €	450,69 €
12	437,57 €	437,57 €
13	424,82 €	424,82 €
14	412,45 €	412,45 €
15	400,44 €	400,44 €
Período (anos)		15
VAL		5 167,66 €
TIR		23%

Os valores obtidos de poupança considerando e não considerando a energia reativa no motor WEG são superiores ao motor Efacec. No caso da análise com energia reativa, observa-se que o motor WEG apresenta maior viabilidade, com um VAL positivo de 5 167,66 €, mais 2 435,95 € que o caso sem considerar a energia reativa. Isto prova que o motor é mais eficiente ao nível de potência ativa absorvida, tanto quanto de um maior equilíbrio no consumo da energia reativa sujeita a faturação.

À semelhança do ponto anterior, supondo a possibilidade de optar pela recuperação do motor Efacec ou pela compra de um motor novo, chega-se a um *payback* de 2 anos e 7 meses para o caso em estudo. Significa isto, que caso o motor antigo avarie, a rentabilidade de substituição por um motor novo WEG IE3 é muito alta, uma vez que em aproximadamente 2 anos se consegue retomar o valor da diferença de aquisição, obtendo benefícios energéticos e económicos após os 2 anos.

4.3.5. CASO 2: ANÁLISE DOS CONSUMOS DE ENERGIA ATIVA DA OPÇÃO 2

Apresenta um *payback* de 7 anos conforme a tabela 48 apresenta e a figura 45 ilustra. Apenas no 8º ano se obtém lucros pela implementação do motor. O investimento tem retorno após

os 7 anos, sendo que efetivamente o tempo de retorno é superior ao analisado com o motor WEG IE3, opção 1.

Verifica-se também que ao fim de 15 anos o motor da opção 2 adquire um retorno do investimento temporalmente superior comparativamente ao motor IE3.

Estes resultados devem-se fundamentalmente ao facto de o motor IE4 possuir um custo de investimento superior, e de apresentar uma corrente absorvida superior em fatores de carga mais baixos e fator de potência mais baixo.

Verifica-se, portanto, que o tempo de retorno do investimento do motor IE4 é superior ao motor IE3, pelo que seria uma escolha menos viável do ponto de vista económico.

Tabela 48 - Resultados dos cálculos da poupança e do retorno considerando energia reativa para a Opção 2.

Ano	Poupança Anual Real	Retorno
0	- €	- 2 700,00 €
1	397,61 €	- 2 302,39 €
2	386,03 €	- 1 916,36 €
3	374,79 €	- 1 541,58 €
4	363,87 €	- 1 177,71 €
5	353,27 €	- 824,44 €
6	342,98 €	- 481,45 €
7	332,99 €	- 148,46 €
8	323,29 €	174,83 €
9	313,88 €	488,71 €
10	304,73 €	793,44 €
11	295,86 €	1 089,30 €
12	287,24 €	1 376,54 €
13	278,88 €	1 655,42 €
14	270,75 €	1 926,17 €
15	262,87 €	2 189,04 €

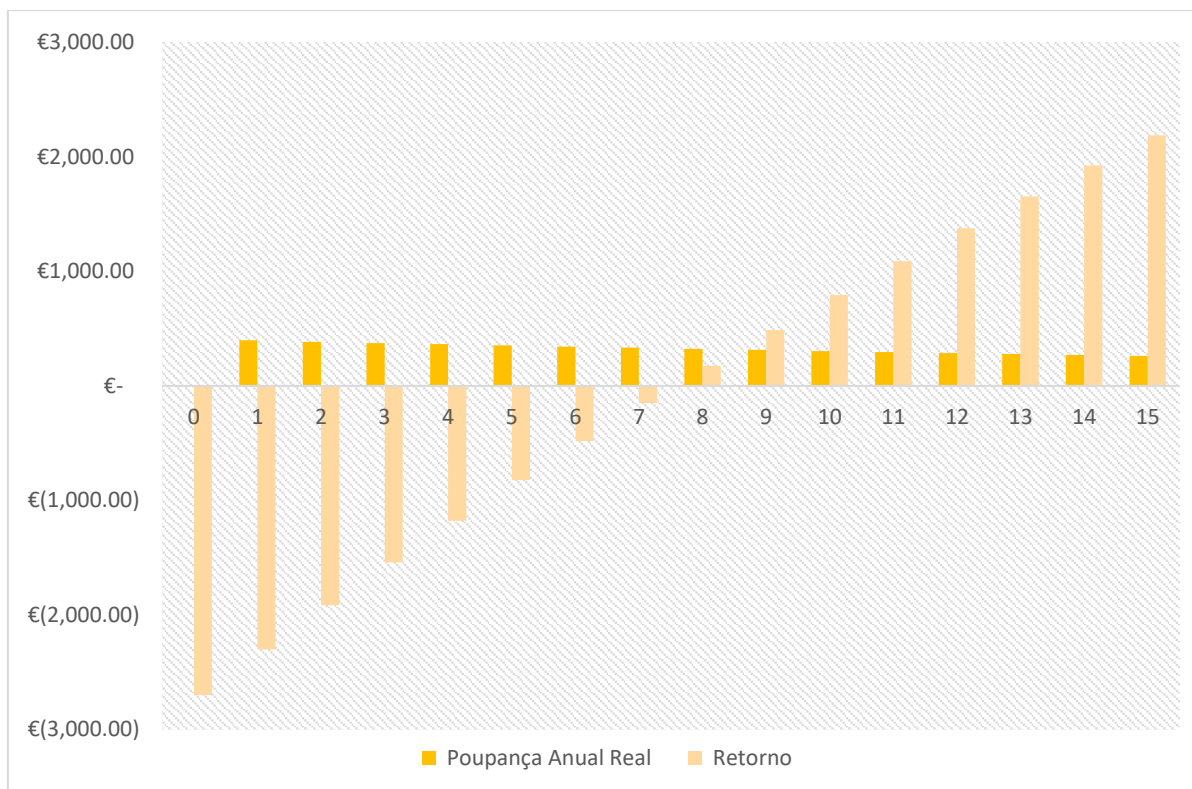


Figura 45 - Gráfico representativo da relação de retorno e poupança anual real sem considerar energia reativa.

Tabela 49 - Valores de receitas líquidas para obtenção do VAL e TIR.

Ano	Poupança Anual Real	Receitas Líquidas
0	- €	- 2 700,00 €
1	397,61 €	397,61 €
2	386,03 €	386,03 €
3	374,79 €	374,79 €
4	363,87 €	363,87 €
5	353,27 €	353,27 €
6	342,98 €	342,98 €
7	332,99 €	332,99 €
8	323,29 €	323,29 €
9	313,88 €	313,88 €
10	304,73 €	304,73 €
11	295,86 €	295,86 €
12	287,24 €	287,24 €
13	278,88 €	278,88 €
14	270,75 €	270,75 €
15	262,87 €	262,87 €
Período (anos)		15
VAL		2 189,04 €
TIR		9%

5. CONCLUSÕES

Na era industrializada que se vive, a produção de energia mecânica com recurso a equipamentos elétricos de força motriz é responsável por consumos na ordem dos 60%. O setor industrial é sem margem de dúvida, o principal responsável por estes valores.

É fundamental a necessidade de atender a todos os componentes de um sistema de acionamento, não considerando apenas o motor elétrico responsável pela força motriz, mas também cada uma das partes integrantes do sistema de acionamento, que contribuem para eficiência total do sistema, uma vez que o rendimento deste é refletido pelo conjunto dos equipamentos que o constituem.

5.1. USO DE MOTORES DE ELEVADA EFICIÊNCIA

Conclui-se, portanto, numa abordagem teórica complementada por resultados obtidos através de análise de motores elétricos e suas características técnicas dadas pelo próprio fabricante, que se deve intervir no dimensionamento completo e correto dos motores elétricos. Não se deve descartar a regularidade da manutenção dos mesmo com o intuito de aumentar o seu tempo de vida útil, pela diminuição da sua temperatura aquando do seu funcionamento, pela limpeza do mesmo. Os motores de elevada eficiência comprovaram já as suas vantagens pelo que devem ser sempre ponderados em aplicações onde a sua aplicação possa ser benéfica, tendo o adicional de terem manutenção reduzida devido à qualidade dos seus materiais que foi melhorada e pode perfeitamente ser comparada com motores mais antigos.

Não resta dúvidas de que o rendimento é um fator essencial quando se pretende escolher um motor elétrico, e não raras vezes, é oportuno selecionar um motor de elevado rendimento apesar do seu alto custo de investimento uma vez que num certo período de tempo, será possível reaver esse dinheiro e após o retorno, o seu consumo continuará a representar poupança energética contribuindo para melhoria da fatura energética e ambiental.

5.2. COMPENSAÇÃO DE ENERGIA REATIVA

Deve-se efetuar uma análise de viabilidade econômica considerando a correção do fator de potência como forma de disponibilizar a potência solicitada de uma forma mais eficiente.

Considerando-se a utilização de equipamentos, como as baterias de condensadores, mediante o seu correto dimensionamento, poderá elevar-se o fator de potência dos motores no seu funcionamento acima de 0,96, de forma a não se pagar pelo consumo de energia reativa, procurando sempre obter-se para a potência reativa um valor inferior a 30% da potência ativa. Desta forma, elimina-se na faturação mensal da energia a componente de consumo de energia reativa, aumentando-se também desta forma a viabilidade econômica da escolha e seleção do motor mais eficiente.

Pertence ao consumidor o cuidado de dispor dos equipamentos acima assinalados para compensação de energia reativa, e a instalação das mesmas em armários apropriados, sendo necessário, obviamente, considerar os custos associados à sua aquisição e instalação.

5.3. PERSPETIVAS DE FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Na evolução deste trabalho de dissertação, seria interessante o desenvolvimento de um software para implementar a metodologia de cálculo utilizado na presente dissertação. Criar uma ferramenta dotada de robustez onde seja possível incluir motores de vários fabricantes com as suas características já estipuladas existentes em base de dados.

Atualmente, já existem ferramentas de alguns fabricantes como a ABB, SEW e WEG que permitem ao utilizador fazer uma análise de determinado motor através de uma aplicação amigável e intuitiva. Seria oportuno dar continuidade a este projeto permitindo ter uma ferramenta semelhante, porém, não focada num âmbito técnico comercial de determinada marca, mas unicamente com um objetivo técnico onde se poderia encontrar de forma imediata vários motores, onde a marca seria à escolha do utilizador, permitindo comparar entre si os motores, inclusive para motores da mesma potência e nível de eficiência mas de marcas diferentes.

Referências Bibliográficas e Documentais

- [1] Endress+Hauser Portugal, “Revista Manutenção,” 124, p. 4, 2015.
- [2] AEP, “Benchmarking de Energia - Efinerg 2 – Eficiência Energética na Indústria,” 2015.
- [3] Associação Empresarial de Portugal, “Estratégia de Eficiência Energética na Indústria,” p. 54, 2015.
- [4] Z. A. Yamayee and J. L. Bala, *Electromechanical energy devices and power systems*. Wiley, p 67, 1994.
- [5] R. Castro, *Uma Introdução às Energias Renováveis*. Instituto Superior Técnico, pp. 3 - 60 , 2011.
- [6] J. A. B. Carvalho, “Eficiência Energética em Equipamentos de Força-Motriz,” *Neutro à Terra*, vol. 18, Porto, p. 17, 2016.
- [7] REA, “Produção e consumo de energia: Relatório de Estado do Ambiente,” 2019. [Online]. Available: <https://rea.apambiente.pt/content/produção-e-consumo-de-energia>. [Accessed: 19-Mar-2019].
- [8] I. N. de Estatística, “Portal do INE,” 30 de agosto, 2019. [Online]. Available: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0007824&contexto=pi&selTab=tab0&xlang=pt. [Accessed: 28-Jun-2019].
- [9] Direção-Geral de Energia e Geologia, “Caraterização Energética Nacional 2017,” 2017. [Online]. Available: <http://www.dgeg.gov.pt/default.aspx?cn=774977507751A> AAAAAAAAAAAAA.
- [10] C. Europeia, “Estratégia Europa 2020,” 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/economic-and-fiscal-policy-coordination/eu-economic-governance-monitoring-prevention-correction/european-semester/framework/europe-2020-strategy_pt#featuresofthetargets.
- [11] APREN - Associação de Energias Renováveis, “Balanço da Produção de Eletricidade

- de Portugal Continental.” [Online]. Available: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>. [Accessed: 15-Mar-2019].
- [12] PNAEE, “Eficiência Energética,” 2017. [Online]. Available: <http://www.pnaee.pt/pnaee#enquadramentopnaee>. [Accessed: 28-Jun-2019].
- [13] C. Gaspar, “Eficiência Energética na Indústria - O Eletricista,” *CMFG - Energia e Ambiente*, 2011.
- [14] “Eficiência energética na indústria,” *O Eletricista*, p. 9, 2018.
- [15] J. C. P. Palma, *Accionamentos electromecânicos de velocidade variável*. Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- [16] “Indústria - ADENE.” [Online]. Available: <https://www.adene.pt/industria/>. [Accessed: 16-Mar-2019].
- [17] EDP, “Optimização da utilização de energia eléctrica em força motriz,” p. 9, 2012.
- [18] U. Environment, “Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Electric Motors and Motor Systems,” p. 104, 2017.
- [19] PnPn transistor, “Squirrel Cage Induction Motor: Working Principle, Construction and Application” 2019. [Online]. Available: <https://pnpntransistor.com/squirrel-cage-induction-motor/>. [Accessed: 13-Apr-2019].
- [20] A. de; P. B. Almeida, *Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives*. p. 90, 2000.
- [21] E. J. M. B. Comissão, “COMMISSION REGULATION (EU) No 4/2014 of,” 2014.
- [22] WEGEURO, “Eficiência Energética: EU MEPS: Requisitos de Eficiência para Motores de Baixa Tensão”, 8 p, Maia, 2016.
- [23] I. F. D. D. Wcdma, R. Link, and C. Rlc, “IEC6000-34 Technical Specification,” 2016.
- [24] ABB, “IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors,” 2018.

- [25] AAB, “Technical note - IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors,” 2014.
- [26] ABB, “Low voltage process performance motors EN 06-2018,” 2018. [Online]. Available:<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [27] ABB, “Low Voltage Industrial Performance Motors,” Catalogo ABB, pp. 20 - 35, 2010.
- [28] O. Instalador, “Eletricidade e Electrónica: Motores Eléctricos,” *SEW Eurodrive*, 2016.
- [29] P. EDUCA+Brasil, “Primeira Revolução Industrial,” 2018. [Online]. Available: <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/historia/primeira-revolucao-industrial>.
- [30] S. M. Lu, “A review of high-efficiency motors: Specification, policy, and technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1–12, 2016.
- [31] N. E. M. Association, “Nema standardization strategy,” pp. 2 - 9, 2015.
- [32] R. A. Costa Carreira Filipe, “Avaliação do Aumento da Eficiência Energética Avaliação do Aumento da Eficiência Energética de uma Central de Frio,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015.
- [33] R. Saidur, “A review on electrical motors energy use and energy savings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 877–898, 2010.
- [34] P. Waide and C. U. Brunner, “Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems,” *Cedex, Fr. Int. Energy Agency*, p. 132, 2011.
- [35] ABB, “DC Motor Basics - ABB Motors,” 2010.
- [36] J. A. B. Carvalho, “Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua. Reação Magnética do Induzido e Comutação.” *Neutro à Terra*, no. ISSN: 1647-5496, Porto, p. 84, 2018.
- [37] A. F. Ribeiro de Sá and A. C. Barbosa, *Máquinas Eléctricas e Alguns Engenhos*. 2016.

- [38] F. António, “Motores Elétricos”, p. 31, 2013.
- [39] A. Silveira, “Controlo escalar de velocidade no motor de indução trifásico,” Porto.
- [40] WEG, “Motors Specification of Electric Motors,” pp. 15 - 68, 2014.
- [41] WEGEURO, “Guia de Especificação: Motores Elétricos.”, Rev.22,2019
- [42] A. M. T. I. Alnaib, “Single-Phase Induction Motors,” no. May, 2019.
- [43] Khan Academy, “O que é a Lei de Faraday?” [Online]. Available: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-flux-faradays-law/a/what-is-faradays-law>. [Accessed: 21-Jul-2019].
- [44] V. Del Toro, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, 04–2003rd ed. 2003.
- [45] J. A. Beleza Carvalho, “Máquinas Assíncronas de Indução,” Neutro à Terra, Ed. Porto, 2017.
- [46] “NORD - International standard IEC 60034-30.” [Online]. Available: https://www.nord.com/cms/pt/product_catalogue/ie2_motors/iec6003430/cp_iec6003430.jsp. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [47] Danfoss, “O que é um conversor de frequência.” [Online]. Available: <https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-an-ac-drive/>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [48] S. Electric, “Variadores de velocidade - Altivar 71,” 2018. [Online]. Available: <https://www.se.com/pt/pt/product-range/1155-altivar-71/>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [49] Schneider Electric, “Variable speed drives - Altivar Machine ATV320.” [Online]. Available: <https://www.se.com/pt/pt/product-range/63440-altivar-machine-atv320/>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [50] W. Goetzler, T. Sutherland, and C. Reis, “Energy Savings Potential and Opportunities for High - Efficiency Electric Motors in Residential and Commercial Equipment,” no. December, p. 103, 2013.

- [51] C. L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*. 2012.
- [52] C. E. G. Martins, “Motores de Ímãs Permanentes para Aplicações de Alta Eficiência,” *Neutro à Terra*, no. 14, 2017.
- [53] Marco Fernandes; FEUP, “Modelação e Controlo de Motores DC Brushless,” 2012. [Online]. Available: <https://paginas.fe.up.pt/~ee06265/introduction.html>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [54] Panasonic Electric Works, “Brushless DC MINAS BL,” 2015.
- [55] Panasonic Electric Works, “Brushless Motors - Industrial Devices Solutions.” [Online]. Available: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/motors-compressors/fa-motors/brushless-motors>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [56] R. A. U. Institute for Power Electronics and Electrical Drives, “Motor Handbook,” vol. 4, p. 135, 2013.
- [57] A. C. Ribeiro de Sá, André Fernando e Barbosa, *Máquinas Elétricas e Alguns Engenhos - Volume I*. 2016.
- [58] Sandy Mclever, “World class baggage network for London Heathrow,” 2016. [Online]. Available: <https://www.royalhaskoningdhv.com/en-gb/projects/world-class-baggage-network-for-london-heathrow/5732>. [Accessed: 24-Jul-2019].
- [59] Schneider Electric, “BMH1402P06A1A - servo motor BMH.” [Online]. Available: <https://www.schneider-electric.us/en/product/BMH1402P06A1A/servo-motor-bmh--18.5-nm---4000-rpm---untapped-shaft---without-brake---ip54/>. [Accessed: 22-Jul-2019].
- [60] A. Perrat, “Energy Efficiency for Machines : the smart choice for the motorization,” no. December, p. 103, 2016.
- [61] ABB, “The ABB energy efficiency & productivity improvement plan,” p. 28, 2015.
- [62] WEG, “Tecnologia WEG na maior máquina de fazer papel do mundo,” 2017. [Online]. Available: <https://www.weg.net/institutional/BR/es/news/productos-y->

soluciones/tecnologia-weg-na-maior-maquina-de-fazer-papel-do-mundo. [Accessed: 22-Jul-2019].

- [63] ABB, “General performance motors - IEC Low voltage motors.” [Online]. Available: <https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/general-performance-motors>. [Accessed: 24-Jul-2019].
- [64] ABB, “Low voltage General performance motor - Data Sheet,” no. June, 2018.
- [65] “Tarifas de Baixa Tensão Especial.” [Online]. Available: <https://www.edpsu.pt/pt/tarifasehorarios/Pages/TarifasBTE.aspx>. [Accessed: 07-Sep-2019].
- [66] WEGEURO, “Motor W22 IE4 7.5 kW 4P.” [Online]. Available: <https://www.weg.net/catalog/weg/RU/pt/Motores-Elétricos/Motores-IEC-de-Baixa-Tensão/Usos-Gerais-ODP-TEFC/Usos-Gerais-TEFC-%28Ferro-Fundido%29/W22---Usos-Gerais-TEFC-%28Ferro-Fundido%29/W22-IE4/W22-IE4-7-5-kW-4P-L132M-L-3F-400-690-460-V-50-Hz-IC411---T>. [Accessed: 01-Oct-2019].
- [67] ERSE, “Informação Sobre Faturação de Energia Reativa - Principios e Boas Práticas”, 30 p, 2010.
- [68] ABB; Voltimum, “Correção do fator de potência,” pp. 4–6, 2014.

ANEXOS

3GBP282220-ADL



M3BP 280SMB 4



General Information

Product ID	3GBP282220-ADL
ABB Type Designation	M3BP 280SMB 4
Catalog Description	M3BP 280SMB 4

Additional Information

ABB Type Designation	M3BP 280SMB 4
Altitude	1000 m
Ambient Temperature	40 °C
Bearing	6316/C3
Bearing NDE	6316/C3
Country of Origin	Poland (PL) Finland (FI) China (CN)
Customs Tariff Number	85015290
Direction of Rotation	Both sides

Electrical Data

Conn	Temp Class	Freq	Voltage	Power	Speed	Current	Power Factor	Efficiency	Torque	IS/IN
Y	--	50 Hz	690 V	75.00 kW	1485 r/min	77.70 A	0.860	95.00 %	483.00 N·m	6.40
D	--	50 Hz	400 V	75.00 kW	1485 r/min	133.00 A	0.860	95.00 %	483.00 N·m	6.40
D	--	50 Hz	415 V	75.00 kW	1486 r/min	129.00 A	0.850	95.00 %	483.00 N·m	6.90
D	--	60 Hz	440 V	75.00 kW	1784 r/min	121.00 A	0.850	94.50 %	401.00 N·m	6.80
D	--	60 Hz	460 V	75.00 kW	1785 r/min	117.00 A	0.840	94.50 %	401.00 N·m	7.40
Gross Weight	665 kg									
IC Class	IC411									
IE Class Data (50 Hz)	IE Class IE3 Full Load (100%) 95.0 % Partial Load (75%) 95.0 % Partial Load (50%) 94.2 %									
IE Class Data (60 Hz)	IE Class IE2 Full Load (100%) 94.5 % Partial Load (75%) 94.2 % Partial Load (50%) 93.0 %									
IM Class	IMB3 IM1001									
IP Class	IP55									
Insulation Class	ICLF									
Invoice Description	M3BP 280SMB 4									
Made To Order	No									

3GBP282220-ADL

2

Minimum Order Quantity	1 piece
Number of Poles (High)	4
Order Multiple	1 piece
Package Level 1 Units	0 pallet (lift)
Product Name	3-Phase squirrel cage motor
Product Net Weight	645 kg
Product Type	5BP3 M3BP CI
Quote Only	No
Selling Unit of Measure	piece
Stocked At (Warehouses)	Central Stock Europe Central Stock Nordic CSCNM
Temperature Class Default	--
Terminator Box Location	Top
Two Speed Motor	No
Type of Duty	S1
Voltage Code	D
WEEE Category	4. Large Equipment (Any External Dimension More Than 50 cm)

Categories

Motors and Generators → IEC Low Voltage AC Motors → Process Performance Motors → IE3 Premium Efficiency Cast Iron Motors



ANEXO B. TYPE TEST REPORT DO MOTOR ABB 3GBP




Test Report				Date of issue: 11.1.2016					
				Serial No.: 3GF13167850					
				Type: M3BP 280SMB 4 IMB3/IM1001 Product Code: 3GBP282220-ADL					
Rating:									
	V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty		
3~Motor	690	Y 50	75	1485	77,7	0,86	S1		
Insul.cl.F	400	D 50	75	1485	133	0,86	S1		
IP55	415	D 50	75	1486	129	0,85	S1		
	440	D 60	75	1784	121	0,85	S1		
	460	D 60	75	1785	117	0,84	S1		
Eff class IE3									
50Hz: IE3-95.0%(100%)-95.2%(75%)-94.8%(50%)									
60Hz: IE2-94.5%(100%)									
Resistance				Insulation resistance at 55 °C		Overload			
Line	Ambient: 23 °C			37000 MΩ 1000 V		Torque 160% 15s			
U ₁ - V ₁	0,03721 Ω								
U ₁ - W ₁	0,03726 Ω								
V ₁ - W ₁	0,03724 Ω								
				High-voltage test winding 2400 V		60 s			
Test	Torque [Nm]	Line U[V]	f[Hz]	Input I[A]	P1 [kW]	Output P2 [kW]	n[r/min]	cos φ	η [%]
No load test		400,0 D	50	44,1	1,42		1500	0,05	
Locked rotor test		71,2 D	50	133,0	5,37		0	0,33	
Thermal test (100% load)	482,6	400,1 D	50	133,3	79,0	75,0	1485	0,86	95,0
Partial load points:									
~75% load	363,5	400,1 D	50	103,5	59,1	56,3	1489	0,82	95,2
~50% load	241,8	400,1 D	50	76,6	39,6	37,5	1493	0,75	94,8
~25% load	122,7	400,1 D	50	55,0	20,4	18,8	1497	0,54	92,1
Temperature rise at rated load.				°C	[K]	Method		Measurement method	
Stator winding :				49	1			1 Resistance	
Frame :				24	2			2 Thermometer	
Bearing D-end :				32	2			3 Thermocouples	
Rotor :				64	3				
Ambient Temperature :				25	2				
								Starting current (I _S / I _N) : 6,36	
								Locked rotor torque (T _L / T _N) : 2,34	
								Breakdown torque (T _B / T _N) : 2,76	
								Pull-up torque (T _U / T _N) : 2,12	
Manufactured and tested in accordance with rules of IEC 60034-1 and IEC 60034-2-1.									
PLL determined from residual loss.									
On behalf of customer									
On behalf of manufacturer				Date of test 25.7.2013					
Tested by ABB Oy, Motors and Generators, Vaasa, Finland								Telephone +358 10 2211 Telefax +358 10 22 47372	

Computer print-out valid without signature.

ABB, Motors and Generators
www.abb.com/motors&generators

ANEXO C. DATASHEET MOTOR WEG 75kW IE4

DATA SHEET						
Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage						
Customer		: Pedro Bruno Pinto				
Customer reference		: ISEP				
Product line		: W22 IE4 Three-Phase		Product code : 12774369		
Frame	: 280S/M	Locked rotor time	: 72s (cold) 40s (hot)	Temperature rise	: 80 K	
Output	: 75 kW	Duty cycle	: S1	Ambient temperature	: -20°C to +40°C	
Poles	: 4	Altitude	: 1000 m.a.s.l.	Protection degree	: IP55	
Frequency	: 50 Hz	Cooling method	: IC411 - TEFC	Mounting	: B3T	
Rated voltage	: 400/690 V	Rotation ¹	: Both (CW and CCW)	Noise level ²	: 69.0 dB(A)	
Rated current	: 132/76.5 A	Starting method	: Direct On Line	Approx. weight ³	: 881 kg	
L. R. Amperes	: 1043/605 A					
LRC	: 7.9					
No load current	: 50.0/29.0 A					
Rated speed	: 1490 rpm					
Slip	: 0.67 %					
Rated torque	: 49.0 kgfm					
Locked rotor torque	: 290 %					
Breakdown torque	: 290 %					
Insulation class	: F					
Service factor	: 1.00					
Moment of inertia (J)	: 2.78 kgm ²					
Design	: N					
Output	50%	75%	100%	Foundation loads		
Efficiency (%)	95.5	96.1	96.2	Max. traction	: 666 kgf	
Power Factor	0.72	0.81	0.85	Max. compression	: 1547 kgf	
Bearing type	:	Drive end	6316 C3	Non drive end	6316 C3	
Sealing	:	WSeal		WSeal		
Lubrication interval	:	13000 h		13000 h		
Lubricant amount	:	34 g		34 g		
Lubricant type	:	Mobil Polyrex EM				
Notes						
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia						
This revision replaces and cancel the previous one, which must be eliminated.			These are average values based on tests with sinusoidal power supply, subject to the tolerances stipulated in IEC 60034-1.			
(1) Looking the motor from the shaft end.						
(2) Measured at 1m and with tolerance of +3dB(A).						
(3) Approximate weight subject to changes after manufacturing process.						
(4) At 100% of full load.						
Rev.	Changes Summary			Performed	Checked	Date
Performed by						
Checked by						
Date	01/10/2019			Page	Revision	
				1 / 3		

This document is exclusive property of WEG S/A. Reprinting is not allowed without written authorization of WEG S/A.
Subject to change without notice

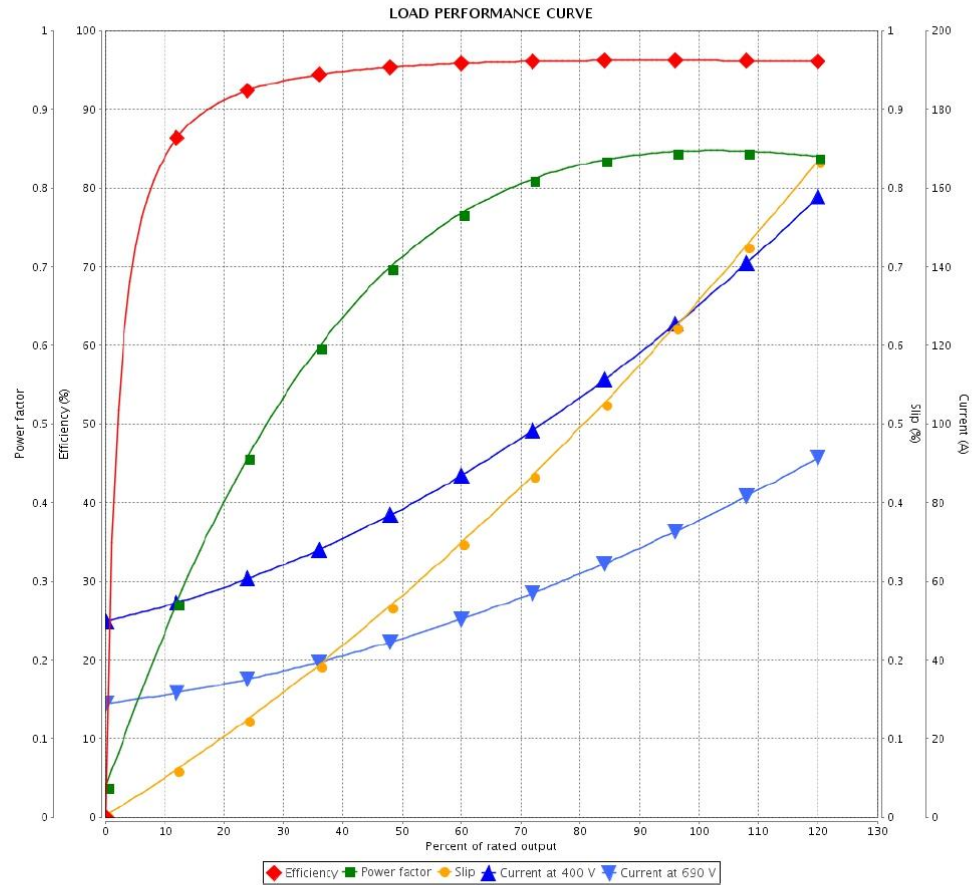
LOAD PERFORMANCE CURVE



Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage

Customer : Pedro Bruno Pinto
 Customer reference : ISEP

Product line : W22 IE4 Three-Phase Product code : 12774369




Performance : 400/690 V 50 Hz 4P

Rated current : 132/76.5 A	Moment of inertia (J) : 2.78 kgm ²
LRC : 7.9	Duty cycle : S1
Rated torque : 49.0 kgfm	Insulation class : F
Locked rotor torque : 290 %	Service factor : 1.00
Breakdown torque : 290 %	Temperature rise : 80 K
Rated speed : 1490 rpm	Design : N

Rev.	Changes Summary	Performed	Checked	Date
Performed by			Page	Revision
Checked by			3 / 3	
Date	01/10/2019			

This document is exclusive property of WEG S/A. Reprinting is not allowed without written authorization of WEG S/A. Subject to change without notice

ANEXO D. DATASHEET MOTOR WEG 30 kW IE3

DATA SHEET			
Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage			
Customer	: Pedro Bruno Pinto		
Customer reference	: ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto		
Product line	: W22 IE3 Three-Phase	Product code :	12876270
Frame	: 200L	Locked rotor time	: 21s (cold) 12s (hot)
Output	: 30 kW	Temperature rise	: 80 K
Poles	: 4	Duty cycle	: S1
Frequency	: 50 Hz	Ambient temperature	: -20°C to +40°C
Rated voltage	: 400/690 V	Altitude	: 1000 m.a.s.l.
Rated current	: 57.1/33.1 A	Protection degree	: IP55
L. R. Amperes	: 428/248 A	Cooling method	: IC411 - TEFC
LRC	: 7.5	Mounting	: B3T
No load current	: 27.0/15.7 A	Rotation ¹	: Both (CW and CCW)
Rated speed	: 1480 rpm	Noise level ²	: 63.0 dB(A)
Slip	: 1.33 %	Starting method	: Direct On Line
Rated torque	: 19.7 kgfm	Approx. weight ³	: 247 kg
Locked rotor torque	: 280 %		
Breakdown torque	: 310 %		
Insulation class	: F		
Service factor	: 1.00		
Moment of inertia (J)	: 0.3202 kgm ²		
Design	: N		
Output	50%	75%	100%
Efficiency (%)	92.9	93.6	93.7
Power Factor	0.63	0.75	0.81
			Foundation loads
			Max. traction : 599 kgf
			Max. compression : 846 kgf
		Drive end	Non drive end
Bearing type	:	6312 ZZ C3	6212 ZZ C3
Sealing	:	V'Ring	V'Ring
Lubrication interval	:	-	-
Lubricant amount	:	-	-
Lubricant type	:	Mobil Polyrex EM	
Notes			
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia			
This revision replaces and cancel the previous one, which must be eliminated.		These are average values based on tests with sinusoidal power supply, subject to the tolerances stipulated in IEC 60034-1.	
(1) Looking the motor from the shaft end.			
(2) Measured at 1m and with tolerance of +3dB(A).			
(3) Approximate weight subject to changes after manufacturing process.			
(4) At 100% of full load.			
Rev.	Changes Summary		Performed
			Checked
			Date
Performed by			Page
Checked by			Revision
Date	01/10/2019		1 / 3

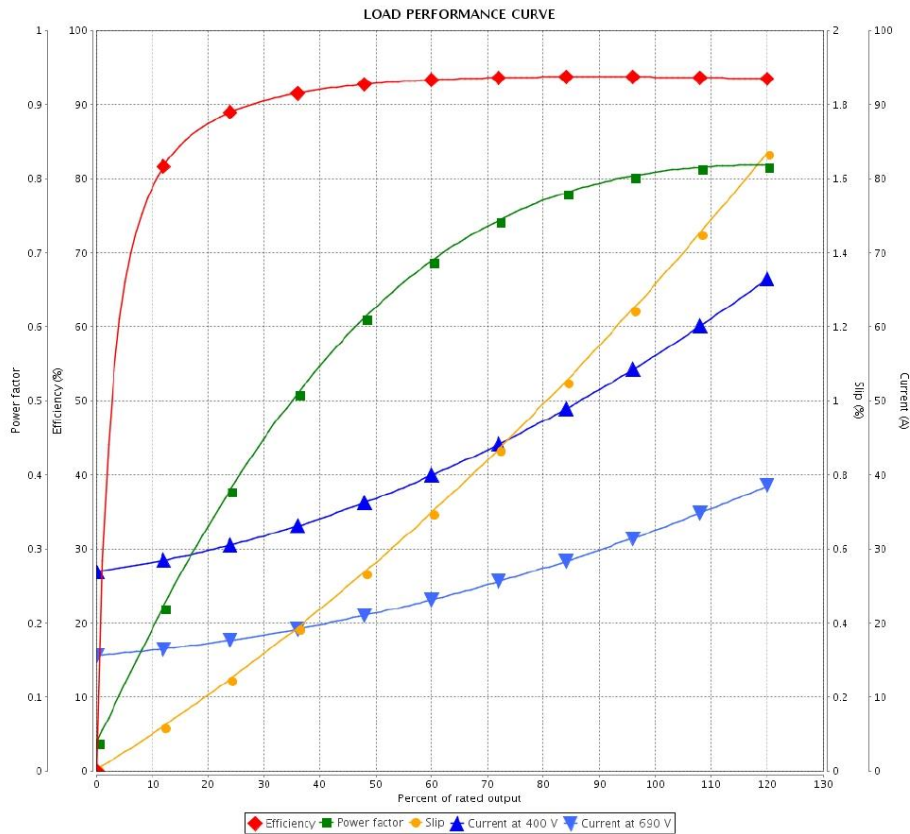
This document is exclusive property of WEG S/A. Reprinting is not allowed without written authorization of WEG S/A. Subject to change without notice

LOAD PERFORMANCE CURVE

Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage



Customer : Pedro Bruno Pinto
 Customer reference : ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto
 Product line : W22 IE3 Three-Phase Product code : 12876270




Performance	: 400/690 V 50 Hz 4P		
Rated current	: 57.1/33.1 A	Moment of inertia (J)	: 0.3202 kgm ²
LRC	: 7.5	Duty cycle	: S1
Rated torque	: 19.7 kgfm	Insulation class	: F
Locked rotor torque	: 280 %	Service factor	: 1.00
Breakdown torque	: 310 %	Temperature rise	: 80 K
Rated speed	: 1480 rpm	Design	: N

Rev.	Changes Summary	Performed	Checked	Date
Performed by			Page	Revision
Checked by			3 / 3	
Date	01/10/2019			

This document is exclusive property of WEG S/A. Reprinting is not allowed without written authorization of WEG S/A. Subject to change without notice

ANEXO E. DATASHEET DO MOTOR WEG 30 kW IE4

DATA SHEET			
Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage			
Customer	: Pedro Bruno Pinto		
Customer reference	: ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto		
Product line	: W22 IE3 Three-Phase	Product code	: 12876270
Frame	: 200L	Locked rotor time	: 21s (cold) 12s (hot)
Output	: 30 kW	Temperature rise	: 80 K
Poles	: 4	Duty cycle	: S1
Frequency	: 50 Hz	Ambient temperature	: -20°C to +40°C
Rated voltage	: 400/690 V	Altitude	: 1000 m.a.s.l.
Rated current	: 57.1/33.1 A	Protection degree	: IP55
L. R. Amperes	: 428/248 A	Cooling method	: IC411 - TEFC
LRC	: 7.5	Mounting	: B3T
No load current	: 27.0/15.7 A	Rotation ¹	: Both (CW and CCW)
Rated speed	: 1480 rpm	Noise level ²	: 63.0 dB(A)
Slip	: 1.33 %	Starting method	: Direct On Line
Rated torque	: 19.7 kgfm	Approx. weight ³	: 247 kg
Locked rotor torque	: 280 %		
Breakdown torque	: 310 %		
Insulation class	: F		
Service factor	: 1.00		
Moment of inertia (J)	: 0.3202 kgm ²		
Design	: N		
Output	50%	75%	100%
Efficiency (%)	92.9	93.6	93.7
Power Factor	0.63	0.75	0.81
		Foundation loads	
		Max. traction	: 599 kgf
		Max. compression	: 846 kgf
Bearing type	:	Drive end 6312 ZZ C3	Non drive end 6212 ZZ C3
Sealing	:	VRing	VRing
Lubrication interval	:	-	-
Lubricant amount	:	-	-
Lubricant type	:	Mobil Polyrex EM	
Notes			
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Eléctricos de Energia			
This revision replaces and cancel the previous one, which must be eliminated.		These are average values based on tests with sinusoidal power supply, subject to the tolerances stipulated in IEC 60034-1.	
(1) Looking the motor from the shaft end.			
(2) Measured at 1m and with tolerance of +3dB(A).			
(3) Approximate weight subject to changes after manufacturing process.			
(4) At 100% of full load.			
Rev.	Changes Summary	Performed	Checked
Performed by			
Checked by			
Date	01/10/2019		
		Page	Revision
		1 / 3	

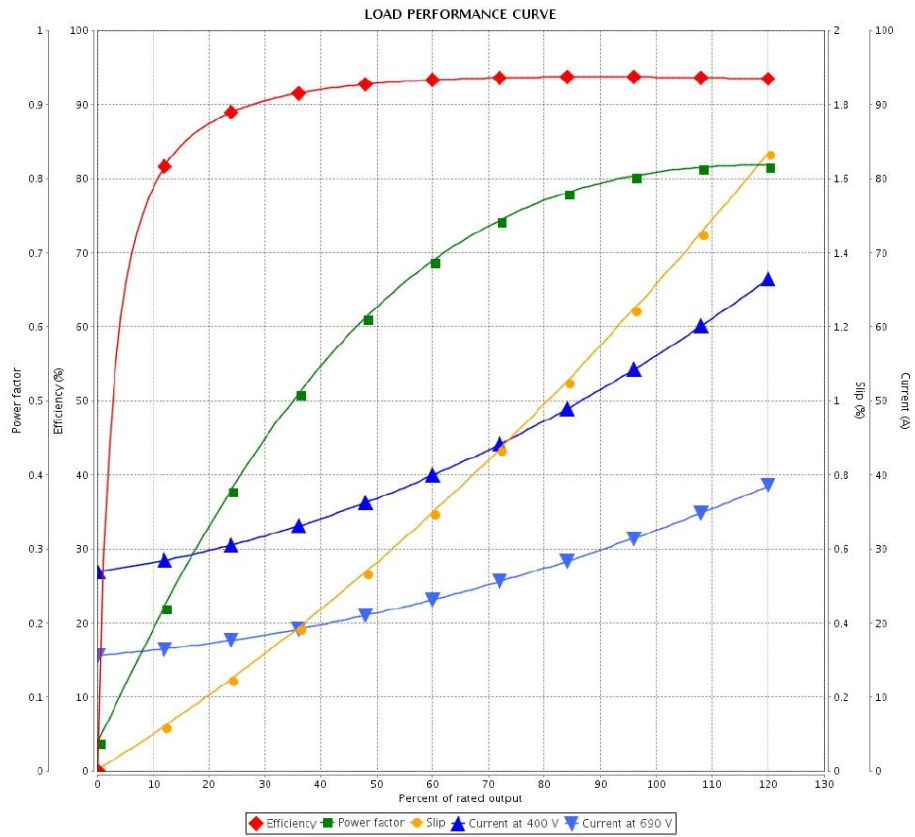
This document is exclusive property of WEG S/A. Reprinting is not allowed without written authorization of WEG S/A. Subject to change without notice

LOAD PERFORMANCE CURVE

Three Phase Induction Motor - Squirrel Cage



Customer : Pedro Bruno Pinto
 Customer reference : ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto
 Product line : W22 IE3 Three-Phase Product code : 12876270



Performance	: 400/690 V 50 Hz 4P		
Rated current	: 57.1/33.1 A	Moment of inertia (J)	: 0.3202 kgm ²
LRC	: 7.5	Duty cycle	: S1
Rated torque	: 19.7 kgfm	Insulation class	: F
Locked rotor torque	: 280 %	Service factor	: 1.00
Breakdown torque	: 310 %	Temperature rise	: 80 K
Rated speed	: 1480 rpm	Design	: N

Rev.	Changes Summary	Performed	Checked	Date
Performed by			Page	Revision
Checked by			3 / 3	
Date	01/10/2019			

This document is exclusive property of WEG S/A. Reprinting is not allowed without written authorization of WEG S/A. Subject to change without notice