

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Motores elétricos de alto rendimento

Alberto Carlos da Costa Cleto

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Artur Costa

Julho de 2012

© Alberto Carlos da Costa Cleto, 2012

Resumo

A redução da fatura energética representa uma prioridade para toda a nossa sociedade, quer para consumidores quer para produtores de energia elétrica, em certos modelos político-económicos.

Vivemos numa sociedade com padrões de conforto cada vez mais elevados, e exige-se uma maior fiabilidade e qualidade de energia elétrica. Um serviço de energia defeituoso e pouco confiável, traduz-se em grandes perdas energéticas que são o maior problema do ponto de vista da eficiência. As exigências são muitas, e garantir energia sem perdas e de qualidade ao menor custo, é uma tarefa cada vez mais complicada.

Tudo isto faz com que seja necessário adotar medidas para aumentar o rendimento dos equipamentos elétricos e eletrónicos.

Neste trabalho pretende-se verificar o ponto da situação no que diz respeito ao rendimento dos motores, nomeadamente nos de alto rendimento. Qual a classificação de categoria em que estes se enquadram, e o que é necessário fazer para aumentar o seu rendimento.

Irá ser feita uma comparação de características entre um motor antigo de indução e um motor novo síncrono de alto rendimento. Para tal, irão ser realizados testes laboratoriais com recurso a equipamento de visualização de ondas, medida de tensão, corrente, potência, binário e velocidade. Ião ser testados motores de igual potência para poder ser mais fácil comparar valores. Utilizaram-se as normas de teste para cálculo do rendimento.

Pretende-se saber que diferenças existem entre tecnologias temporalmente distintas e até que ponto compensa investir num motor de alto rendimento tendo em vista a poupança energética e económica que se pode obter com seu uso.

Abstract

The reduction in energy bills is a priority for our entire society, either for consumers or producers of electricity in certain political-economic models.

We live in a society with standards of comfort ever higher, and is required a greater reliability and power quality. A service of faulty and unreliable energy, translates into large energy losses that are the biggest problem from the standpoint of efficiency. The demands are many, and energy without losses and ensure quality at the lowest cost, is an increasingly complicated task.

All this makes it necessary to adopt measures to increase the efficiency of electrical and electronic equipment.

This work intends to verify the situation with respect to motor efficiency, particularly in high efficiency. What is the rating category in which they fit, and what is needed to increase your efficiency.

It will be done a comparison of characteristics between an old induction motor and a new synchronous motor of high efficiency. For this purpose, will be carried out laboratory tests using the equipment display wave measured voltage, current, power, torque and speed. Will be tested motors of equal power to be easier to compare values. We used the test standards for the calculation of efficiency.

The aim is to know what differences exist between temporally distinct technologies and to what extent pays to invest in a high-performance motor with a view to saving energy and cost that can be obtained with its use.

Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar aos meus pais pelo apoio, força e motivação que me deram. Estiveram sempre presentes em todos os momentos em que mais precisei e ajudaram-me a ultrapassar todas as barreiras.

Quero também agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Artur Manuel de Figueiredo Fernandes e Costa pela ajuda que me deu ao longo de todo o semestre de trabalho.

Aproveito também para agradecer ao Engenheiro Pinheiro Jorge, técnico dos Laboratórios de Máquinas Elétricas da FEUP que me ajudou na realização da parte laboratorial deste trabalho.

Índice

Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xiv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Objetivos	2
1.2 - Metodologia.....	2
1.3 - Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2	4
O objetivo da eficiência em acionamentos elétricos.....	4
2.1 - Eficiência energética e sustentabilidade	4
2.2 - Opções de Política energética.....	10
2.3 - Implicações para as aplicações de força motriz (incluindo motores)	15
2.4 - Síntese	19
Capítulo 3	20
Conceção e exploração de motores elétricos de alto rendimento	20
3.1 - O que é um motor de alto rendimento	21
3.2 - Metodologias de projeto, construção e exploração para elevação do rendimento η	25
3.3 - Exigências de Desempenho Energético das normas CEI nos Motores Elétricos de Corrente Alternada	31
3.4 - Técnicas utilizadas pelos fabricantes para superarem o índice IE4.....	37
3.5 - Síntese	40
Capítulo 4	41
Investigação Experimental	41
4.1 - Projeto experimental e objetivos.....	41
4.2 - Plataforma experimental	44

4.3 - Ensaios preliminares.....	54
4.4 - Condições dos ensaios	55
4.5 - Ensaios em carga com alimentação sinusoidal a 50Hz (A).....	56
4.6 - Ensaios em carga com alimentação com VEV a 50 Hz (B)	64
4.7 - Comparação geral entre os motores / análise critica.....	68
4.8 - Síntese / Conclusões	73
Capítulo 5	74
Conclusão	74
5.1 - Alto Rendimento	74
5.2 - Comparação entre motores	74
5.3 - Perspetivas para investigação futura.....	75
Referências	76

Lista de figuras

Figura 2.1 - Classificação das fontes de energia.	6
Figura 2.2 - Níveis de rendimento exigidos para índice de classificação [13].....	18
Figura 3.1 - Motor de alto rendimento.	26
Figura 3.2 - Variador eletrónico de velocidade disponível no LME da FEUP.	27
Figura 3.3 - Circuito VVVF [42].	28
Figura 3.4 - Motor de elevada potência [12].	29
Figura 3.5 - Circuito Soft-starter.	30
Figura 3.6 - Motor de alto rendimento Weg [10].	38
Figura 4.1 - Chapa de características do Motor 1.	43
Figura 4.2 - Chapa de características do Motor 2.	44
Figura 4.3 - Esquema de montagem.	45
Figura 4.4 - Motor 1.....	45
Figura 4.5 - Motor 2.....	46
Figura 4.6 - Sensor de binário e velocidade.	46
Figura 4.7 - Aparelhagem de aquisição de dados do sensor de binário/velocidade.....	47
Figura 4.8 - Alternador.....	47
Figura 4.9 - Sistema Motor-Gerador.	48
Figura 4.10 - Autotransformador.	49
Figura 4.11 - Ponta diferencial de alta tensão.	49
Figura 4.12 - Fonte de tensão contínua.....	50
Figura 4.13 - Carga de 4kW.	50
Figura 4.14 - Banca de trabalho.....	51

Figura 4.15 - Osciloscópio.	52
Figura 4.16 - Forma de onda do motor 1.	52
Figura 4.17 - Forma de onda do motor 2.	53
Figura 4.18 - Análise de Harmônicos 1.	53
Figura 4.19 - Análise de Harmônicos 2.	54
Figura 4.20 - Montagem de curta derivação para método voltímetro-amperímetro.....	54
Figura 4.21 - Rendimento = f (carga) - Motor 1.	57
Figura 4.22 - Figura 1.1 - $\cos(\varphi) = f(\text{carga})$ - Motor 1.	57
Figura 4.23 - Corrente absorvida = f (carga) - Motor 1.....	58
Figura 4.24 - Potência absorvida = f (carga) - Motor 1.....	58
Figura 4.25 - $T = f(n)$ - Motor 1.	59
Figura 4.26 - Relação entre potência absorvida/mecânica - Motor 1.	59
Figura 4.27 - Rendimento = f (carga) - Motor 2.	61
Figura 4.28 - $\cos(\varphi) = f$ (carga) - Motor 2.	62
Figura 4.29 - Corrente absorvida = f (carga) - Motor 2.....	62
Figura 4.30 - Potência absorvida = f (carga) - Motor 2.....	63
Figura 4.31 - $n = f(T)$ - Motor 2.	63
Figura 4.32 - Relação entre potência absorvida/mecânica - Motor 2.	64
Figura 4.33 - Rendimento = f (carga) Motor 2 VEV.....	65
Figura 4.34 - $f. p. = f$ (carga) - Motor 2 VEV.	66
Figura 4.35 - Corrente absorvida = f (carga) - Motor 2 VEV.	66
Figura 4.36 - Potência absorvida = f (carga) - Motor 2 VEV.	67
Figura 4.37 - $n = f(T)$ - Motor 2 VEV.	67
Figura 4.38 - Relação entre potência absorvida/mecânica - Motor 2 VEV.....	68
Figura 4.39 - Rendimento = f (carga) - Comparação.	69
Figura 4.40 - $\cos(\varphi) = f$ (carga) - Comparação.	70
Figura 4.41 - Corrente absorvida = f (carga) - Comparação.....	70
Figura 4.42 - Potência absorvida = f (carga) - Comparação.....	71
Figura 4.43 - Curva de características do Motor 2 segundo fabricante.	72
Figura 4.44 - Rendimento = f (carga) Comparação A.T./VEV - Motor 2.....	73

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Classificação dos motores segundo o seu rendimento.	17
Tabela 3.1 - Temperatura de Referência.	36
Tabela 4.1 - Motor 1.	42
Tabela 4.2 - Motor 2.	43
Tabela 4.3 - Características do alternador.	48
Tabela 4.4 - Dados registados do Motor 1.	56
Tabela 4.5 - Dados registados do Motor 2.	61
Tabela 4.6 - Dados registados do Motor 2 com VEV.	65
Tabela 4.7 - Valores de rendimento anunciado e determinado.....	69
Tabela 4.8 - Características das grandezas do Motor 2 segundo fabricante.	72

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

VEV	Variador Eletrónico de Velocidade
VSD	Variation Speed Drives
DEEC	Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
LME	Laboratório de Máquinas Eléctricas
EFACEC	Empresa do ramo da energia
WEG	Empresa do ramo da energia (Werner Eggon Geraldo)

Lista de símbolos

T	Binário
ω	Frequência angular
α	Ângulo
P	Potência

Capítulo 1

Introdução

Toda a população do planeta tem necessidades energéticas, ou seja é necessário haver disponibilidade de energia para produzir o trabalho do dia-a-dia. Por exemplo, os atletas de alta competição, à semelhança do que acontece com todos os seres, têm de se alimentar para produzir resultados. O que acontece na realidade é que estes atletas têm rendimentos diferentes nas competições em que participam. Podem ingerir um mesmo número de calorias por dia mas apesar disso, os resultados das provas são diferentes. Cada atleta tem um rendimento diferente do seu rival. Nos motores acontece o mesmo, há diversos tipos de motores mas uns consomem mais energia do que outros e uns têm maior rendimento do que outros. E, nestes, destacam-se os motores elétricos.

Os motores são fabricados com o intuito de consumirem a menor potência possível e produzirem o movimento mecânico necessário à função que se pretende que desempenhem.

O presente documento é dedicado aos: “motores elétricos de alto rendimento” ou seja, a máquinas elétricas que transformam energia elétrica em energia mecânica, especificamente a motores elétricos trifásicos de corrente alternada com rendimento elevado.

O rendimento em potência é a razão entre a potencia mecânica (útil) produzida pelo motor e a potência elétrica ativa por ele absorvida, ou seja quanto mais elevado é o rendimento de um motor menores são as suas perdas de transformação. Temos perdas elétricas, mecânicas, magnéticas e adicionais. Se um motor tiver um rendimento de 85%, por exemplo, significa que se estiver a consumir a potência de 10 kW então a potência mecânica no veio será de 8,5 kW.

Nos últimos anos temos assistido cada vez mais, por parte dos fabricantes, a uma evolução das técnicas que utilizam para fazer elevar o rendimento dos seus motores.

1.1 - Objetivos

Neste trabalho pretende-se fazer um ponto da situação atualizado no que se refere às exigências de desempenho energético dos motores elétricos rotativos de corrente alternada, à luz das normas eletrotécnicas aplicáveis. Também se pretende saber o ponto de situação em matéria de motores elétricos de alto rendimento, e tendências dos fabricantes para superarem o índice IE4. Também se irá desenvolver trabalho laboratorial, com vista à comparação das características de funcionamento de um motor de alto rendimento (IE4 – Normas CEI) com as fornecidas pelo fabricante, e com as de um motor de indução antigo.

Irão ser testados dois motores trifásicos e comparadas as suas características. São ambos de 4 kW sendo que um é um motor antigo de indução da marca Efacec e outro é um motor recente síncrono da marca Weg. O objetivo principal do trabalho consiste em determinar o rendimento dos dois motores para condições nominais e para diferentes níveis de carga desde o vazio à plena carga e até em sobrecarga. Irá também ser analisada a corrente consumida pelos dois motores, a potência absorvida e mecânica, e o fator de potência com vista a uma análise comparativa mais exaustiva entre dois motores destinados a fins idênticos mas construídos em épocas bem distintas, ainda que próximas, com tecnologias diversas.

1.2 - Metodologia

Os métodos utilizados para elaboração deste trabalho, foram a pesquisa de toda a informação relacionada com o tema na internet, e também a consulta de livros físicos, livros eletrónicos e artigos. Também se fizeram testes laboratoriais com a aparelhagem de medida disponível no laboratório de máquinas elétricas da FEUP, para permitir o alcance de resultados com vista à comparação de características dos motores. Para a realização destes mesmos testes, foram seguidas as normas eletrotécnicas aplicáveis, nomeadamente no que diz respeito ao cálculo de rendimento.

1.3 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos que consistem no seguinte:

Capítulo 1 – Introdução: Nesta secção pretende-se enquadrar o leitor com os objetivos do trabalho proposto, descrevendo o que irá ser abordado ao longo do mesmo, nomeadamente o tema em questão e a atividade laboratorial desenvolvida.

Capítulo 2 – O objetivo da eficiência em acionamentos elétricos: Neste capítulo o objetivo é descrever preocupações essenciais com a eficiência energética, as políticas energéticas implementadas e o estado de desenvolvimento dos motores no que se refere à eficiência energética nomeadamente no seu rendimento.

Capítulo 3 – Conceção e exploração de motores elétricos de alto rendimento: Nesta secção são descritos os métodos de projeto e construção utilizados pelos fabricantes para elevação do rendimento. Pretende-se também explicar as exigências de desempenho energético das normas CEI nos Motores Elétricos de Corrente Alternada. Irão também ser abordadas as técnicas utilizadas pelos fabricantes para elevação do índice IE4.

Capítulo 4 – Investigação Experimental: Nesta divisão de conteúdos pretende-se descrever os testes laboratoriais realizados com os motores disponíveis nos ensaios. Mediram-se as variáveis que caracterizam os motores. São analisadas correntes, tensões, binário, velocidade, visualizados gráficos de tensão no osciloscópio e foi calculado potência mecânica, rendimento e fator de potência. Ambos os motores testados tinham uma potência igual de 4 kW, sendo que um foi um motor antigo de indução da marca Efacec e outro, foi um motor novo síncrono de ímanes permanentes da marca Weg.

Capítulo 5 – Conclusão: Neste capítulo final pretende-se enunciar toda a consolidação de conceitos que se conclui com a abordagem deste tema ou seja concluir o que se aprendeu e testou em matéria de motores de alto rendimento. Nele também se incluem algumas perspetivas para investigação futura que são consequência do processo de aprendizagem seguido ao longo de todo este trabalho mas que não puderam ser nele exploradas.

Capítulo 2

O objetivo da eficiência em acionamentos elétricos

Todas as tecnologias passam por três etapas ao longo do tempo (início, apogeu e fim), e os motores elétricos também. No início os motores eram fabricados com a preocupação central e o objetivo único de transformar energia elétrica em energia mecânica, sem olhar a consumos de energia, o que hoje não pode acontecer [1]. É necessário ter o menor consumo de energia nos processos de transformação e, para isso, é preciso evoluir em todos os sentidos. A classe de eficiência energética dos motores é muito importante para permitir uma redução drástica do consumo. Seguidamente irá ser explicado o problema da eficiência energética.

2.1 - Eficiência energética e sustentabilidade

A energia está presente em tudo o que fazemos: quando carregamos o telemóvel ou utilizamos os meios de transporte, quando usamos a máquina de lavar roupa ou quando vemos televisão. Todos estes hábitos são tão comuns, que dificilmente se percebe que é com a energia que podemos fazer estas operações. Ter acesso à energia é fulcral para o desenvolvimento, no entanto a maior parte da energia usada no mundo provém de combustíveis fósseis como o carvão, gás ou petróleo, cujas reservas têm vindo a decrescer. A utilização massiva destes combustíveis fósseis faz aumentar a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global do planeta e para o efeito de estufa. O nosso estilo de vida pode estar em risco, e o futuro comprometido se não encontrarmos novas soluções. Por isso, multiplicam-se cada vez mais os esforços na promoção

da utilização eficiente da energia e na aposta nas fontes de energia renovável como o sol, o vento ou a água. Em 1880, 97% da energia consumida no mundo provinha do carvão, sendo que hoje o petróleo é a principal fonte energética do mundo, satisfazendo 37% do consumo, seguido do carvão, que representa 27%.

A energia existe na natureza em diferentes formas e para ser utilizada precisa de ser transformada. Algumas formas de energia disponíveis são a energia térmica, a energia mecânica sob a forma de movimento, a energia elétrica sob a forma de corrente de eletrões, a energia química que se manifesta de várias maneiras sendo a mais conhecida a dos seres vivos e a energia nuclear, que se manifesta sob a forma de radioatividade [2].

As fontes de energia dividem-se em dois tipos, e são elas as renováveis e as não renováveis.

As fontes renováveis são fontes de energia inesgotáveis ou que podem ser repostas a curto ou médio prazo, espontaneamente ou por intervenção humana. Temos a energia hídrica, que é obtida a partir dos cursos de água e pode ser aproveitada por meio de um desnível ou queda de água; a energia eólica proveniente do vento, que tem sido aproveitada desde a antiguidade para navegar ou para fazer funcionar moinhos e que é uma das grandes apostas atuais para a expansão da produção de energia elétrica; a energia solar, que provém da luz do sol e que depois de captada pode ser transformada em energia elétrica ou térmica; a energia geotérmica, que provém do calor do interior da terra e permite gerar eletricidade e calor. Existe ainda a energia das marés, obtida através do movimento de subida e descida do nível da água do mar, a energia das ondas, que consiste no movimento ondulatório das massas de água por efeito do vento e que pode aproveitar-se para produção de energia elétrica, e a biomassa, que integra a floresta e seus resíduos, bem como resíduos de agro-pecuária da indústria alimentar ou dos resultantes do tratamento de efluentes domésticos e industriais, e a partir da qual se pode produzir biogás e biodiesel, por exemplo.

As fontes não renováveis são fontes de energia que se encontram na Natureza em quantidades limitadas, e que se esgotam com a sua utilização. Temos o carvão que é um combustível fóssil extraído de explorações minerais e foi o primeiro a ser utilizado em grande escala, e é o que se estima ter maiores reservas (cerca de 200 anos) e o que acarreta mais impactos ambientais em termos de poluição e alterações climáticas. O petróleo é constituído por uma mistura de compostos orgânicos, e é sobretudo utilizado nos transportes. É uma das maiores fontes de poluição atmosférica e motivo de disputas económicas e de conflitos armados. Estima-se que as suas reservas se esgotem nos próximos 40 anos. Temos também o Gás Natural que, embora menos poluente que o carvão ou o petróleo, também contribui para as alterações climáticas. É utilizado como combustível, tanto na indústria como em nossas casas, prevendo-se que as suas reservas se esgotem nos próximos 60 anos [36]. Temos também o Urânio, que é um elemento mineral existente na terra, constituindo a base do

combustível nuclear utilizado na indústria de defesa e civil. Tem um poder calorífico muito superior a qualquer fonte de energia fóssil. Em seguida mostra-se uma figura 1.1 com as fontes de energia renováveis e não renováveis:

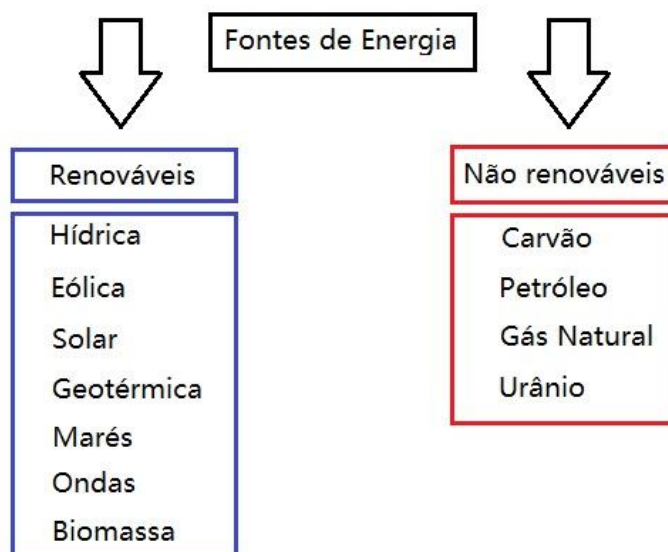


Figura 2.1 - Classificação das fontes de energia

Hoje a procura de energia assenta fundamentalmente nas fontes de energia não renováveis, as quais têm tecnologia difundida mas possuem um elevado impacto ambiental. É importante inverter esta tendência, tornando o seu consumo mais eficiente e substituindo-as gradualmente por energias renováveis limpas. A queima de combustíveis fósseis aumenta a poluição atmosférica, promove as chuvas ácidas, danifica o ambiente e põe em risco a biodiversidade do planeta.

A energia é um bem essencial ao bem-estar social e económico da sociedade. Cada vez mais, é necessário maiores produções de energia pois o consumo vai aumentando, obrigando à utilização crescente dos recursos energéticos, com consequências péssimas para o ambiente. O maior problema é o aumento do efeito de estufa que se origina com o envio de gases poluentes para a atmosfera da terra e que são resultado da combustão de recursos fósseis como o petróleo ou o carvão. Por um lado, o efeito da estufa mantém a superfície da terra aquecida e com uma temperatura amena, por outro, a excessiva concentração de dióxido de carbono e outros gases na atmosfera terrestre, reduz a libertação de calor para o espaço, provocando um aumento médio desta temperatura e um aquecimento do planeta. Uma das consequências deste aquecimento são as variações climáticas globais e regionais verificadas nas últimas décadas. A não ser que os comportamentos mudem, será difícil inverter a situação.

Vários países apostaram em várias medidas possíveis para redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Neste sentido, foi proposto, em 1997, o Protocolo de Quioto, que resultou de uma convenção internacional sobre alterações climáticas, o qual, no quadro da ONU, vincula os participantes a cumprirem metas de redução

de emissões de GEE até 2010. Foi permitido a Portugal aumentar as emissões em 27% em relação a 1990. No entanto, este limite já foi ultrapassado em 9%, segundo os dados de 2003.

OS EUA (Estados Unidos da América) consomem, por ano, um quarto de toda a energia produzida no mundo e o Canadá detém o consumo per capita mais elevado, juntando-se agora às grandes potências económicas emergentes como a China, ou a Índia, que vão aumentando o seu consumo de energia. Por outro lado, a instabilidade do preço do gás e petróleo levou alguns países a apostarem no carvão novamente, que é a mais poluente das tecnologias de aproveitamento energético. Há soluções que podemos adotar já. Uma delas passa precisamente pelo tema deste trabalho, ou seja, aumentar a eficiência na transformação de energia elétrica com o uso de motores de alto rendimento. Outra poderá ser a redefinição das políticas de transporte e da indústria e mudar os padrões de consumo.

Portugal produz por ano apenas 15% da energia elétrica que consome e isso torna o nosso país num dos mais dependentes de energia importada, fundamentalmente de origem fóssil. Passamos 80% do nosso tempo dentro de edifícios. Os serviços e a habitação representam 22% do consumo global de energia, um valor que tem aumentado 4% ao ano. Todas estas situações têm impacto na economia uma vez que o custo dos combustíveis fósseis encarece a produção de bens e serviços em território nacional. A utilização de forma pouco eficiente da energia provoca riscos preocupantes para Portugal seja do ponto de vista social, económico ou ambiental. Por isso, há que encontrar soluções e o aumento da eficiência no consumo de energia e o aproveitamento do potencial de energias renováveis são caminhos a seguir (entre 2004 e 2005, o consumo de eletricidade aumentou 6% em Portugal. Em média na UE25 este aumento foi de 17% no mesmo período).

Pode-se definir a eficiência energética como a optimização que podemos fazer no consumo de energia. A ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, a pressão dos resultados económicos e as preocupações com o ambiente levam-nos a encarar a eficiência energética como uma das soluções para equilibrar o modelo de consumo existente e para combater as alterações climáticas, a caminho de modelos de desenvolvimento sustentáveis.

O Desenvolvimento Sustentável é um tema com um significado pertinente cuja essência do conceito está presente em apenas quatro palavras: “Enough for everyone forever” ou seja “O suficiente para todos e para sempre”. Elas encerram as ideias de recursos limitados, consumo responsável, igualdade e equidade e de longo prazo, todas correspondentes a conceitos importantes. A análise dos quatro principais pilares do desenvolvimento sustentável permite, no entanto, obter uma melhor compreensão do conceito: Respeito e cuidado pela comunidade de vida, justiça social e económica, integridade ecológica e democracia e não à violência e paz. Um dos valores nucleares do desenvolvimento sustentável é o da “Responsabilidade Universal”, ou seja, o sentido de responsabilidade pelo papel que se

desempenha e pelo impacto que se pode ter, não apenas a nível local, mas também a nível global. Este valor está intimamente relacionado com a intercomunicabilidade, uma outra temática também nuclear ao desenvolvimento sustentável. Esta temática tem a ver com a tomada de consciência da multiplicidade de reações em cadeia que uma ação pode suscitar em diferentes áreas. Eis por que, quando se pensa em “desenvolvimento”, se não pode considerar, isoladamente, os aspetos sociais, económicos, ecológicos, culturais, políticos ou espirituais. Segundo uma definição de desenvolvimento sustentável reconhecida internacionalmente “ O desenvolvimento sustentável satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as gerações futuras poderem também satisfazer as suas”.

Para o “Respeito e cuidado pela comunidade de vida” deve-se respeitar a terra e a vida em toda a sua diversidade, cuidar da comunidade de vida com compreensão, compaixão e amor, construir sociedades que sejam justas, participativas, sustentáveis e pacíficas e conservar a generosidade e a beleza da Terra para as gerações presentes e futuras.

Para a “Integridade ecológica” deve-se proteger e recuperar a integridade dos sistemas ecológicos da Terra, com especial cuidado para com a diversidade biológica e os processos naturais que sustentam a vida, encarar a prevenção dos problemas ambientais como o melhor método de proteção do ambiente e, em caso de conhecimento insuficiente, assumir medidas de prevenção; adotar padrões de produção, consumo e reprodução que salvaguardem a capacidade regenerativa da Terra, os direitos humanos e o bem-estar das comunidades; fomentar o estudo da sustentabilidade ecológica e promover a livre troca de conhecimento e sua aplicação.

Para a “Justiça social e económica” é necessário erradicar a pobreza como imperativo ético, social e ambiental; garantir que as instituições económicas de todos os níveis promovam o desenvolvimento humano de forma equitativa e sustentável; afirmar a igualdade e equidade de género como pré-requisitos para o desenvolvimento sustentável e assegurar o acesso universal à educação, aos cuidados de saúde e ao emprego; defender, sem discriminação. O direito de todos a um ambiente natural e social, promotor da dignidade humana, da saúde do corpo e do bem-estar espiritual, com especial atenção aos direitos dos povos indígenas e das minorias.

Para a “Democracia, não à violência e paz” deve-se reforçar as instituições democráticas, a todos os níveis, e conferir transparência e eficácia à governação, garantir a participação inclusiva na tomada de decisão e o acesso à justiça; integrar, na educação formal e na aprendizagem ao longo da vida, os conhecimentos, valores e competências necessárias a um modo de vida sustentável; tratar todos os seres vivos com respeito e consideração e promover uma cultura de tolerância, não à violência e paz.

O consumo cumpre diferentes funções e implica várias referências para a construção social, no entanto, nos padrões atuais, é insustentável, tanto na perspetiva ambiental como na construção de direitos e da cidadania. Para perceber os desafios da construção de ações

políticas capazes de renovar as práticas de consumo seguem-se algumas explicações seguidamente. O consumo sustentável configura-se como uma das possibilidades de tratamento dos impactes do consumismo, pois envolve mudanças de atitude aliadas à necessidade de transformação do sistema das atitudes e dos valores dos cidadãos. Apesar de ainda não se observar a predominância de um novo modelo civil capaz de superar os dilemas da sociedade do consumo, existem alternativas para promover a sustentabilidade. Esse esforço contemplaria a construção de articulações entre diferentes grupos, seja do governo, da sociedade civil ou do mercado, para atender às procuras da população e adoptar boas práticas de produção e consumo sustentáveis, por meio de ação política e do exercício da cidadania.

O ato do consumo pertence à condição da vida humana contemporânea, pois comporta as relações sociais e faz parte da dinâmica da economia. No entanto, para muitos, o padrão consumista da sociedade moderna está conduzindo a um consumo desnecessário e excessivo com decisivos impactos sobre a sociedade ambiental. Entretanto, na sociabilidade dos dias atuais, as identidades dos cidadãos configuram-se pelo consumo. O ato de consumir pode contribuir tanto para a satisfação de necessidades, melhorando a qualidade de vida e favorecendo o desenvolvimento local, como para a exploração dos recursos naturais e o aumento da desigualdade social.

A principal questão é perceber como se consome e o significado dessa prática, os seus impactos na vida social, os limites que premeiam o ato de consumir e as atitudes que os cidadãos precisam de desenvolver, tanto no plano individual como na esfera pública, sobretudo nas interações com os atores da sociedade civil, do Estado e do mercado para tornar o consumo mais sustentável.

Uma das melhores soluções é transformar o modo de consumir, permitindo que os cidadãos tomem as decisões mais acertadas nos seus atos de consumo, adquirindo a consciência do impacto coletivo, ambiental, social em que se traduzem as opções individuais de consumo para a promoção de qualidade de vida e do desenvolvimento local.

As discussões sobre o consumo sustentável caracterizam-se por debates importantes de padrões de desenvolvimento politicamente correto.

A noção de cidadania moderna significa um processo de aprendizagem social e de construção de novas formas de relações sociais, e práticas políticas concretas. Assim, pode-se avançar em direção a um novo quadro de referência para práticas de consumo. As novas formas de cidadania, estão a emergir. Se uma das propostas para alcançar o desenvolvimento sustentável é a modificação dos padrões e formas de consumo, os consumidores – cidadãos – podem edificar maneiras de participação política e fortalecer a cidadania e o interesse pelo espaço público. As diferenças sociais e a destruição ambiental são os motivos da diminuição da qualidade de vida e do exercício da cidadania. A questão ambiental originou, pois, uma

nova agenda de direitos para a sociedade, incluindo o direito a um meio ambiente equilibrado como componente da cidadania, como direito difuso e coletivo [10].

2.2 - Opções de Política energética

A política energética deve assentar em três eixos estratégicos: a segurança no abastecimento nacional, o fomento do desenvolvimento sustentável e a promoção da competitividade nacional.

Os objetivos da Política Energética são os seguintes: liberalização do mercado, redução da intensidade energética no produto, redução da fatura energética, melhoria na qualidade de serviço, segurança no aprovisionamento e no abastecimento, diversificação das fontes e aproveitamento de recursos endógenos, minimização do impacto ambiental e contribuição para o reforço da competitividade e da economia nacional.

Estes objetivos vêm ao encontro das necessidades e exigências dos produtores e consumidores, em especial dos consumidores industriais e dos serviços, que, em muitos casos, ainda não aproveitam algumas alterações designadamente na estrutura tarifária, que permitem gerir mais eficazmente a fatura energética, bem como novas soluções tecnológicas e de modernização de equipamentos produtivos.

Um grande desafio é aumentar a participação das energias renováveis na oferta, bem como, o dos novos mercados dos serviços energéticos, das emissões e dos certificados verdes. O governo pretende que as empresas portuguesas sejam servidas por produtores e fornecedores eficientes no âmbito do mercado ibérico, o que constitui um enorme desafio para as empresas do sector nacional de energia, que terão de assumir objetivos de eficiência ambiciosos e estratégias de desenvolvimento claras e centradas no negócio principal.

É necessário garantir a segurança do abastecimento nacional. Portugal tem uma dependência externa, em termos de energia primária, claramente superior àquilo que é a média da União Europeia e dos países comparáveis. Como já foi dito, Portugal importa cerca de 85 por cento da energia que consome e tem um dos piores níveis de eficiência dos 27 Estados-Membros da UE na utilização da energia, com evidentes reflexos negativos na competitividade da economia. Para minimizar esta dependência, garantir a segurança do abastecimento nacional e diversificar as fontes de energia, o Governo adota, entre outras, as seguintes medidas:

1. Reduzir a dependência externa de energia primária – com aproveitamentos hidroelétricos e incentivando as energias renováveis. Atua-se do lado da procura, promovendo a utilização racional da energia, e do lado da oferta, incentivando os investimentos de que resulte a redução da importação de energia primária.

2. Diversificar as fontes externas, por países e por tipo de fonte - através da melhoria do abastecimento de gás natural com o terminal de receção de gás natural liquefeito em Sines, a armazenagem subterrânea de Gás Natural e o reforço das interligações por gasoduto no interior e com o exterior da Península Ibérica. O reforço das interligações elétricas entre Portugal e Espanha e entre Espanha e França, já em curso, facilitará a integração de Portugal no Mercado Interno de Eletricidade, permitindo o acesso em maior escala de consumidores portugueses à produção elétrica espanhola. A aposta nas energias renováveis adquire, uma vez mais, um cariz decisivo, nomeadamente, através do reforço do parque de centrais hidroelétricas e eólicas. Assume ainda particular relevo a gestão luso-espanhola de recursos hídricos internacionais, garantindo uma equidade de uso desses recursos na produção de eletricidade em território nacional. Há que assegurar o planeamento articulado e a construção de infraestrutura de acesso e de redes de transporte e de distribuição de gás natural, bem como de redes de distribuição de eletricidade, garantindo o fornecimento de energia em condições de quantidade e qualidade adequadas. Num contexto de mercado ibérico e europeu, as interconexões elétricas, objeto de um programa de desenvolvimento coordenado com Espanha, assumem um carácter fundamental.

3. Manter reservas obrigatórias de combustíveis -a autonomização parcial da gestão das reservas obrigatórias de combustíveis derivados do petróleo - que deverá passar a ser uma atividade independente - através da EGREP (Empresa de Gestão de Reservas Estratégicas Portuguesas). Serão ainda estabelecidos, na sequência dos princípios assumidos no quadro da Cimeira Ibérica de Valência, os mecanismos de cooperação a nível ibérico, para que se possa efetuar uma gestão articulada destas reservas de combustíveis de ambos os países, garantindo maior segurança e eventual redução dos custos de gestão das reservas. Na linha do que já é previsto no contrato de concessão da Transgás e de recentes diretivas comunitárias em discussão, dever-se-á reforçar as obrigações nacionais de constituição de reservas em gás natural, adequando-as à importância deste combustível no consumo de energia final.

4. Garantir uma capacidade adequada de produção de energia elétrica - um mercado transparente e sem distorções regulatórias consegue atrair investimento que garanta o cumprimento de padrões de segurança equilibrados e a continuidade do fornecimento e do abastecimento (nomeadamente, a existência de margens de reserva de potência adequadas), otimizando o respetivo custo económico para garantir competitividade das empresas em mercado livre e minimizar impactos desfavoráveis nos consumidores. Para fomentar o desenvolvimento sustentável Portugal apresenta indicadores de utilização racional de energia que não são compatíveis com um nível apropriado de qualidade ambiental e com a competitividade económica, sendo necessário tomar medidas de fundo, que respeitem compromissos internacionais assumidos, nomeadamente os que resultam do Protocolo de Quioto.

12 O objetivo da eficiência em acionamentos elétricos

O Programa do Governo consagra o apoio ao desenvolvimento das energias renováveis; a promoção de aproveitamentos hidroelétricos de fins múltiplos para produção de energia e aproveitamento de água; o incentivo ao consumo de energias ambientalmente mais limpas e a gestão da procura de energia, nomeadamente pela promoção da inovação tecnológica e aumento da eficiência na sua utilização. Para este eixo estratégico, o Governo vai:

1. Adotar mecanismos que concretizem o Protocolo de Quioto – as atuais previsões apontam para que Portugal seja dos países da UE pior colocados para cumprir os compromissos assumidos. Estima-se que Portugal tenha já ultrapassado (até 1999 as emissões já tinham subido 24,5 por cento, quando o limite era de 27 por cento até 2010) as emissões admissíveis.

2. Promover a utilização racional de energia - em Setembro de 2001 foi aprovado o Programa E4 – Eficiência Energética e Energias Endógenas, cuja concretização e monitorização exigem a continuidade de um esforço acentuado. O respeito pelos objetivos da Diretiva europeia relativa à produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, que aponta para que, 39% da eletricidade consumida em Portugal seja de origem renovável, implica que este sector vá mobilizar perto de 5 mil milhões de euros de investimento até esta data. A manutenção pelo Governo do atual sistema de apoio às renováveis e a resolução dos entraves que ainda subsistem, tem como objetivo a concretização destas metas e a viabilização de uma fileira industrial e de conhecimento português.

Quanto à promoção da competitividade nacional a fatura energética é um dos fatores mais determinantes da competitividade do país. Portugal enfrenta hoje o desafio da melhoria da sua competitividade num contexto de globalização e entrada de novos países na União Europeia, por isso vai fazer:

1. Concretização do Mercado Ibérico da Eletricidade - os Governos de Portugal e Espanha prepararam o Mercado Ibérico de Eletricidade (MIBEL) e na recente Cimeira de Valência conseguiu-se um decisivo avanço na definição do modelo e das metas de concretização do Mercado Ibérico de Eletricidade. Entre os avanços e compromissos alcançados na Cimeira há a destacar os seguintes tópicos:

A concretização do MIBEL de forma faseada, com a finalização dos projetos de interligações. No primeiro semestre de 2003, foram materializadas todas as medidas dirigidas à articulação de exploração técnica de ambos os sistemas elétricos. Esta articulação de exploração técnica concretizar-se-á nos seguintes aspetos: Elaboração de normas harmonizadas de operação do sistema; Análise da procura, a partir de uma curva de carga integrada do sistema ibérico; Mecanismos de coordenação para a resolução de incidentes (congestões, sobrecargas, etc.) e para o desenvolvimento das ações de manutenção das redes; Apresentação de um documento conjunto de planificação de infraestruturas de interligação coerente com a planificação energética de ambos os países. Existirá Mercado

Ibérico pois existe capacidade de Transporte. O MIBEL já está em funcionamento e tem as seguintes características:

- Abertura do mercado a todos os consumidores;
- Eliminação de contractos de aquisição de energia e estabelecimento do respetivo mecanismo de compensação; Harmonização da estrutura tarifária;
- Estudo de possíveis formas de aproximação, a médio prazo, dos respetivos operadores das redes de transporte de eletricidade e de gás natural;
- Compromisso de estabelecimento de um acordo que permita a gestão conjunta de parte das reservas obrigatórias de hidrocarbonetos. Existe uma plataforma comum de regulação, para que as empresas de ambos os países sejam aferidas pelos mesmos padrões de exigência regulatória e para que um mecanismo de resolução de disputas célere e eficaz seja implementado.

2. Criar Operador de Mercado Ibérico - Na Cimeira de Valência estabeleceu-se o consenso sobre o conceito e funcionamento futuro do operador de Mercado Ibérico (OMI). O OMI será um operador único, com dois polos que serão especializados, complementares e comunicantes. O polo português terá a seu cargo os mercados a prazo e financeiros e o polo espanhol ficará com o mercado diário e intra-diário, que terá que evoluir face ao atual OMEL. Este operador, cujo polo português resultará do destaque do atual gestor de ofertas da REN.

3. Criar Tarifário Harmonizado - Ficou consagrada na Cimeira a necessidade de caminhar no sentido da harmonização das estruturas tarifárias, com a definição de regras claras e transparentes para o estabelecimento de tarifas. Assim, teremos um quadro regulamentar estável que permitirá transmitir os sinais de mercado adequados aos agentes, nomeadamente para o estabelecimento de nova capacidade produtiva. O MIBEL implica assim o estabelecimento de condições competitivas idênticas para o sector em Portugal e Espanha e para os respetivos consumidores.

4. Fazer extinção dos contractos de Aquisição de Energia (CAE). Este processo torna-se imprescindível para que exista um verdadeiro mercado de eletricidade. É necessário que haja colocação de energia nesse mercado. Desta forma, a Rede Elétrica Nacional deixará o seu "estatuto" de comprador quase único da eletricidade produzida, para que as empresas de produção a possam colocar no mercado. Importa notar que esses contractos (entre os produtores vinculados e a REN) oferecem garantias aos agentes da produção que deverão ser acauteladas no mecanismo de recuperação de Custos de Transição para a Concorrência que vier a ser definido, sem introduzir vícios à livre formação de preços no mercado.

5. Executar Elegibilidade de Clientes - O objetivo é fazer com que todos os consumidores portugueses quer de baixa tensão, média tensão ou alta tensão possam escolher livremente o seu fornecedor de energia num mercado liberalizado.

6. Liberalizar o Gás Natural - o sector do gás tem um desenvolvimento recente em Portugal pelo que beneficia do estatuto de sector emergente, sendo que Portugal dispõe de derrogação da sua liberalização entre 2008 e 2012 consoante o tipo de clientes. No entanto, o preço do gás, para além de afetar de uma forma direta todas as empresas que o utilizam como fonte energética, também se reflete, e será possivelmente determinante num futuro próximo, nos custos da eletricidade. Nesse sentido, será proposta a liberalização antecipada do sector do gás natural. As empresas portuguesas poderão também beneficiar de condições comparáveis com as que têm as empresas que com elas concorrem na vizinha Espanha e no resto da Europa.

7. Separar o Transporte e Comercialização do Gás Natural - será feito o destaque da rede de alta pressão, separando esta atividade de outras de cariz comercial. As redes de distribuição deverão vir a ser objeto de tratamento análogo, separando a função de comercialização, a liberalizar, da propriedade e exploração das redes.

8. Fazer a extensão da regulação ao sector do gás natural - as competências da regulação do mercado do gás foram recentemente atribuídas à ERSE. Uma transferência que se antevê gradual, tendo em conta os contratos de concessão existentes, mas que não deixará de proporcionar uma regulação independente e que deverá atender aos princípios da defesa dos consumidores e da consolidação do jovem sector do gás natural no nosso País e ao alinhamento desejável por aproximação mútua com a política de regulação no quadro do Mercado Ibérico.

9. Liberalizar os Combustíveis - apesar de os preços variarem essencialmente em função dos custos do petróleo e dos limites do imposto (ISP), o regime atual, designadamente em relação a três dos combustíveis (a gasolina sem chumbo 95, o gasóleo rodoviário e o gasóleo agrícola) é um regime de preços máximos de venda. Todavia, ele funciona na prática como um regime de preços administrativos, salvo raras exceções, designadamente por razões pontuais de natureza comercial. De facto, o preço máximo tem funcionado essencialmente como um preço de referência que todos os distribuidores adotam. O Governo entende que a liberalização terá como consequência a introdução de concorrência efetiva, com evidentes benefícios para os consumidores. A liberalização será acompanhada de uma adequada monitorização, que competirá à Autoridade da Concorrência.

10. Estimular as Políticas de Diminuição da Intensidade Energética do Produto - o aumento da concorrência que decorre da liberalização exige um grande esforço de eficiência por parte dos produtores nacionais. E isso terá reflexos claramente positivos nas empresas e consumidores portugueses que poderão ver baixar os seus custos de energia. Por outro lado, representando este tipo de custos uma parte significativa da estrutura das suas despesas, importa que as empresas adotem medidas de eficiência de consumo energético de forma a reduzir ainda mais a sua fatura energética.

11. Fomentar a Qualidade de Serviço – foram recentemente aprovados os novos Regulamentos da Qualidade de Serviço, contemplando o gás natural e a eletricidade. Nesta última procedeu-se a um alargamento das zonas em que os parâmetros são mais exigentes, havendo, simultaneamente, uma exigência acrescida nesses parâmetros, quer de cariz técnico quer comercial. Na eletricidade, importa ainda referir que o novo Regulamento adota uma filosofia de pagamento de compensações automática, em contraposição com o atual regime em que o pagamento é efetuado apenas a pedido do cliente. Foram ainda revistos os montantes das compensações, elevando-os, uniformizando o seu valor, independentemente da zona onde o cliente se encontra.

Concluindo, o Governo acredita que o aumento da abertura e da concorrência nos mercados energéticos é não só importante, mas também uma necessidade. Isso trará benefícios claros para as empresas e para a sua competitividade. As entidades reguladoras desempenham aqui um papel essencial de defesa dos interesses dos consumidores, no quadro dos objetivos de política económica democraticamente legitimada. As orientações estratégicas, alicerçadas também em objetivos ambientais, dirigidas à política energética são as adequadas para assegurar o reforço da competitividade das empresas num quadro de eficiência, valorização da produção endógena de energia e cumprimento das obrigações de carácter ambiental. O Governo cria assim as condições para o desenvolvimento de uma fileira dinâmica, competitiva e moderna de atividades económicas e de I&D, no sector da Energia, com capacidade para se posicionarem no Mercado Ibérico e no Mercado Interno Europeu [14].

2.3 - Implicações para as aplicações de força motriz (incluindo motores)

Vivemos num mundo em permanente mudança. Todos os dias somos confrontados com a existência de novos equipamentos tecnológicos. As grandes empresas de produção de equipamentos a larga escala têm de estar constantemente a inovar os seus produtos se querem ser competitivas e não querem ficar para trás e perder terreno para a concorrência. Têm de estar um passo à frente na procura de novos produtos mais eficientes, mais pequenos, com maior capacidade, mais fiáveis, mais resistentes e, acima de tudo, mais baratos. Conseguir produzir um produto ao menor preço permite obter maior margem de lucro e reduzir despesa. No fabrico de produtos é fundamental olhar-se para o preço final do produto. É também muito importante saber onde instalar as fábricas de produção. Se se pretende focalizar um produto apenas a nível nacional e com interesse para o público geral toma-se medidas que permitam reduzir custos seguindo determinados critérios no entanto se, por exemplo, os produtos fabricados forem de interesse internacional é fundamental colocar a empresa num local que permita fácil exportação do produto. É fulcral colocar a fábrica num ponto de referência que tenha infraestruturas de transporte que satisfaçam as necessidades.

É fundamental que o local escolhido tenha um porto para distribuição marítima, um aeroporto para distribuição aérea e uma estação de comboios para distribuição ferroviária. No nosso país ou seja em Portugal, cidades que seriam boas escolhas seriam por exemplo Lisboa, por ser a capital e o Porto ou Faro. Se o produto for apenas para mercado interno (Portugal) é bom localizar a fábrica em locais com terrenos baratos pois uma fábrica normalmente ocupa um grande espaço físico. Nestes casos o interior do país poderá eventualmente ser uma boa opção.

Em todo o tipo de tecnologia inova-se com o principal objetivo de aumentar a eficiência, ou seja consumir a menor quantidade de energia possível mantendo ou até melhorando as capacidades dos aparelhos. Conseguir rendimentos elevados é o objetivo de todas as áreas. Os motores elétricos nas aplicações industriais consomem cerca de 30 a 40 por cento da energia elétrica gerada em todo o mundo [27]. Quando isto acontece é natural que a produção dos produtos mais antigos do mesmo segmento seja abandonada ou seja deixem de ser fabricados. Um disco rígido de computador de 320 GB é considerado de gama média, ou seja, tem uma capacidade de armazenamento de memória que nem é muito reduzida nem é muito elevada. Um disco desta capacidade é usual encontrar nos portáteis que se encontram à venda. No entanto, como a tecnologia evolui, esta capacidade pode ser considerada relativamente boa ou má. Há 5 anos atrás um disco desta capacidade era considerado praticamente um topo de gama e daqui a 5 anos será considerado de baixa capacidade, como tudo indica. As capacidades dos discos tornam-se obsoletas com o decorrer dos anos porque os ficheiros que pretendemos guardar de música, fotos ou até filmes cada vez mais têm melhor qualidade e isso implica terem maior tamanho.

À semelhança do que aconteceu com os aparelhos que foram atrás mencionados também os motores elétricos estão a sofrer mudanças. Com o decorrer do tempo existem modelos que se deixam de fabricar e começa-se a fabricar modelos com maiores rendimentos. O objetivo das empresas de produção de motores elétricos passa por conseguir com o menor custo melhorar a eficiência dos seus motores, ou seja, obter maiores rendimentos, minimizando as perdas no motor na passagem da energia elétrica para energia mecânica. Um motor de alto rendimento não é mais do que um motor que consegue aproveitar o máximo da sua energia elétrica e transformá-la em movimento, ou seja, energia mecânica, reduzindo as perdas. Embora aparentemente pareça uma tarefa fácil, é muito complicado reduzir perdas. É necessário usar materiais adequados e tratados quimicamente para toda a constituição do motor. Existem motores para as mais diversas aplicações. Para fazerem rodar escadas rolantes, para fazerem mover os mecanismos das guias e dos tratores, para bombear líquidos, para fazer movimentar diversões como carrosséis, para mover elevadores dentro de outras coisas. Aplicações diferentes exigem motores diferentes. Uns têm maiores ou menores correntes de arranques, outros têm binários maiores ou menores, uns têm maior ou menor potência e funcionam a uma ou várias velocidades específicas.

De acordo com a evolução do paradigma de eficiência, existe uma classificação dos motores segundo as normas Eletrotécnicas. Todas as tecnologias têm um início, apogeu e fim e, analogamente, aos motores isto também acontece. Mediante o rendimento dos motores atribui-se a estes uma classificação. Primeiramente adotou-se a classificação de EFF3 para motores com menor rendimento, EFF2 para motores de rendimento médio e EFF1 para os motores com o melhor rendimento. Com a norma começou-se a adotar paralelamente a esta numeração de classificação as siglas IE seguidas por um número em que esse número para o pior rendimento tinha o valor de 1 ou seja IE1. As normas EFF terminaram no dia 16 de Junho de 2011. Uma das razões de se abandonar essas siglas prendia-se com o facto de não poder haver continuação se houvesse evolução no rendimento visto a melhor eficiência ser a número 1. Ficaria um pouco estranho avançar-se para números seguintes, o número 0 não faria muito sentido. As normas que prevalecem atualmente são as da norma IEC 60034-30 ou seja as IEX em que X tem um valor de 1 a 4. Esta norma permite a evolução do rendimento tomando o valor X um valor superior. À norma IE1 dá-se o nome de Eficiência Padrão, à norma IE2 de Alta Eficiência, à IE3 de Eficiência Premium e à IE4 de Eficiência Super Premium [21]. Foram implementados prazos para terminar com as eficiências mais antigas por isso definiu-se algumas datas. A partir de 16 de Junho de 2011 os motores não devem possuir rendimentos inferiores a IE2. A partir de 1 de Janeiro de 2015 os motores com potência nominal entre 7,5 e 375 kW não devem possuir níveis de rendimento inferiores a IE3 ou atender ao nível IE2 e ser equipados com inversor de frequência. A partir de 1 de Janeiro de 2017 todos os motores com potência nominal entre 0,75 e 375 kW não devem possuir níveis de rendimento inferiores a IE3 ou atender a nível IE2 e ser equipados com um inversor de frequência. A diretiva da união europeia 640/2009, baseada na norma 60034-30, é a que estabelece os requisitos “ecodesign” para colocação no mercado dos motores.

A nomenclatura da classificação dos motores segundo o seu rendimento pode ser visualizada na seguinte tabela:

Tabela 2.1 - Classificação dos motores segundo o seu rendimento

Nomenclatura	CEMEP	IEC 60034-30/31
Super Premium Efficiency	-	IE4
Premium Efficiency	-	IE3
High Efficiency	EFF1	IE2
Standard Efficiency	EFF2	IE1
Below Standard Efficiency	EFF3	-

Os níveis de rendimento da união europeia para classificação dos motores são os seguintes:

Output kW	IE1 - Standard Efficiency			IE2 -High Efficiency			IE3 - Premium Efficiency		
	Poles			Poles			Poles		
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,0	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	89,3	89,3	88,6	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	89,9	89,9	89,2	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	90,7	90,7	90,2	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	91,2	91,2	90,8	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	91,7	91,7	91,4	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7
55	92,1	92,1	91,9	93,2	93,5	93,1	94,3	94,6	94,1
75	92,7	92,7	92,6	93,8	94,0	93,7	94,7	95,0	94,6
90	93,0	93,0	92,9	94,1	94,2	94,0	95,0	95,2	94,9
110	93,3	93,3	93,3	94,3	94,5	94,3	95,2	95,4	95,1
132	93,5	93,5	93,5	94,6	94,7	94,6	95,4	95,6	95,4
160	93,8	93,8	93,8	94,8	94,9	94,8	95,6	95,8	95,6
200 up to 375	94,0	94,0	94,0	95,0	95,1	95,0	95,8	96,0	95,8

Figura 2.2 - Níveis de rendimento exigidos para índice de classificação [13]

O método de medida para classificação IE tem agora um diferente critério relativamente ao que era usado no passado. Anteriormente, as perdas suplementares eram tidas em conta com um fator fixo de 0,5%, agora são calculadas com precisão. A Siemens usou alguns exemplos dos seus motores para indicar o que acontece na prática. Um motor a 50 Hz de 5,5 kW com 4 polos, que anteriormente tinha uma eficiência de 89,2%, agora tem uma eficiência de 88,2% pelo novo método de cálculo de eficiências com a norma IEC 60034-2-1:2007. Para 60 Hz a eficiência seria de 89,5%. Isto ajuda a que os construtores de máquinas comparem mais facilmente motores. O preço de compra alto pela tecnologia do estado de arte deve ter um rápido tempo de retorno de custo em operação. Como consequência, a Siemens diz que soluções envolvendo uma mudança para motores IE2 (de IE3 para IE2) normalmente tem um tempo de retorno inferior a dois anos. O custo de um motor elétrico em operação representa 90% do custo total; por isso faz sentido aumentar a eficiência destes produtos. Os especialistas estimam que em todo o mundo 120 TWh de energia podia ser salva anualmente usando drives de controlo variável de velocidade e motores de alta eficiência. Steve Rudell, da ABB Ltd, diz que os novos padrões de eficiência de motores da IEC são um passo na direção certa e sinalizam a intenção de promover a eficiência de energia removendo as classes mais baixas do mercado. Rudell também disse que, em breve, perto de 2015, conseguimos ver a classificação IE3 a acabar e os motores IE4 a tornarem-se o mínimo padrão

aceitável [24]. Isto é lógico mas até que longevidade consegue a tecnologia ser empurrada? O mais pequeno quadro de motores de indução está no seu limite de eficiência com IE2 e não se pode adicionar mais materiais ativos dentro do motor. Isto quer dizer que a melhor maneira de melhorar a eficiência energética dos motores IE2, é uma vez mais, aplicando um sistema de controlo de potência. Outras tecnologias como os motores de relutância comutáveis e motores de imanes permanentes conseguem oferecer mais altas eficiências do que motores de indução e requeridos VSD's (Variation Speed Drives). Todos os motores podem precisar de VSD para alcançar melhores níveis de rendimento. Nas aplicações onde os sistemas de controlo variável de velocidade são benéficas, o tempo de retorno do investimento é agora extremamente curto como um ano. No entanto, é sempre preciso ter em atenção quem paga os custos de energia e quem paga os custos de instalação. Se se tiver uma aplicação que beneficiará do controlo variável de velocidade com um motor IE2, então beneficiará muito mais com um motor IE3 [32]. Porque uma vez que se removam algumas perdas extra que não são mais perdas no motor, vai-se obter uma proporção maior de poupança de energia. Passando de um motor IE2 para um motor IE1, fala-se de benefícios tipicamente por volta de 2% ou 3%. Numa bomba com a adição de controlo variável de velocidade pode-se obter 30%. Vão ser sempre os utilizadores finais que vão ter uma palavra a dizer dos níveis de eficiência de energia. Os limites para a classificação dos motores IE só abrange motores até 375 kW [39].

2.4 - Síntese

A necessidade de se ter um planeta cada vez mais amigo do ambiente com menores emissões de poluentes para a atmosfera e com melhores aproveitamentos de energia introduz mudanças de paradigma na indústria. Torna-se fundamental por isso investir em soluções tecnológicas mais limpas, com melhores rendimentos e menos consumo de energia.

Na indústria dos motores assiste-se a um investimento cada vez mais forte para fazer inovações nos modelos de construção de motores de alto rendimento. Tenta-se descobrir técnicas para melhorar a eficiência destes. O facto de existir uma classificação dos motores mediante o rendimento demonstrado por estes em condições nominais faz com que se batalhe para conseguir metas sempre mais ambiciosas. Apenas um por cento de rendimento a mais num motor pode exigir um modelo de construção totalmente diferente com técnicas de fabrico que podem envolver diferentes materiais, diferentes secções de condutores ou até diferentes tratamentos químicos e térmicos.

Pode-se concluir que a evolução da classificação dos motores segundo o seu rendimento não se fica pela sigla IE4. Muito provavelmente daqui a alguns anos poderemos estar presente com uma designação de IE5 ou IE6. Apenas o tempo o dirá.

Capítulo 3

Conceção e exploração de motores elétricos de alto rendimento

Para obtermos uma elevada eficiência energética nos motores temos de ter em conta muitos fatores. É necessário usar métodos de projeto e construção específicos para elevar o rendimento. O principal objetivo passa por reduzir o mais possível as perdas. Para tal é preciso ter em conta os aspetos construtivos dos motores e usar materiais previamente preparados quimicamente e nas quantidades ideais. Para classificar o rendimento dos motores é necessário fazer testes seguindo as normas eletrotécnicas. Neste capítulo, descrevemos o que são motores elétricos de alto rendimento, o que é necessário fazer para elevar o rendimento e quais os testes que é necessário fazer para saber o rendimento dos motores.

Há mais de dez anos que os fabricantes de motores têm desenvolvido esforços para a redução de perdas destes equipamentos. Assim, para além de fabricarem motores classificados como 'standard' apresentam também uma linha de produtos denominada de Motores de Alto Rendimento ou Super Premium [20].

A redução das perdas tendo como consequência o aumento de eficiência, foi obtida com maior investimento dos custos de fabrico. Assim, motores de alto rendimento são mais caros do que os convencionais. No entanto, o custo adicional de aquisição é compensado com o menor custo operacional. Os tempos de retorno do capital investido geralmente são baixos e os seus benefícios económicos evidenciam-se já que, em condições normais de operação o motor pode durar mais de 12 anos [17].

Os motores de alto rendimento têm alguns benefícios. O uso destes motores é intercambiável com motores de baixo rendimento ou seja num local em que tenhamos um motor de fraco rendimento é possível colocar um de alto rendimento. Os mancais apresentam baixa temperatura ou seja traduz-se em vida útil estendida e redução de horas de manutenção. A temperatura de motores síncronos de alto rendimento com o motor em funcionamento é muito inferior à temperatura de funcionamento de motores de baixo rendimento. É possível a sincronização de velocidade com múltiplos motores acionados pelo

mesmo inversor. Os construtores conseguiram uma maior eficiência sem aumentar a carcaça do motor [16].

Em conclusão, o uso de motores de alto rendimento deve ser considerado analisando-se também os custos de operação e não apenas o custo inicial de investimento.

3.1 - O que é um motor de alto rendimento

Um motor de alto rendimento possui rendimento superior ao motor padrão e, consequentemente, perdas mais reduzidas. Isto é possível devido a mudanças no projeto de construção, materiais e melhores processos de fabrico [11].

O rendimento é a relação entre a potência mecânica desenvolvida no eixo do motor e a potência elétrica ativa que ele consome da rede de alimentação. A expressão que traduz esta relação é a seguinte:

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potência mecânica (kW)}}{\text{Potência consumida (kW)}} \times 100 \quad (3.1)$$

Ao considerarmos que a Potência mecânica = Potência de saída e Potência de entrada = Potência de saída + Perdas, o rendimento também pode ser expresso da seguinte forma:

$$\eta(\%) = \frac{\text{Potência de saída (kW)}}{\text{Potência de saída + Perdas (kW)}} \times 100 \quad (3.2)$$

As perdas menores do motor de alto rendimento significam que este motor produz a mesma potência mecânica de saída com menos potência de entrada que um motor-padrão. Desta maneira o motor de alto rendimento tem custo de operação menor [41].

As principais vantagens dos motores de alto rendimento, quando comparados com motores clássicos padrão, são as seguintes:

- Reduzem o consumo de energia elétrica
- A maioria destes motores apresenta fator de potência mais elevado;
- Apresentam menores temperaturas de operação;
- O rendimento é mais elevado para cargas baixas.
- Minimizam o sobredimensionamento nas situações em que não se possa corrigir a potência do motor.

Os vários tipos de perdas podem ser classificados de diversas formas sendo as mais usuais:

- Perdas Elétricas
- Perdas Magnéticas

- Perdas Mecânicas
- Perdas Adicionais ou Suplementares

As perdas elétricas, ou por efeito Joule, existem no estator e no rotor. No estator representam cerca de 25 a 50 % das perdas totais. Existem devido à circulação de corrente nos condutores do enrolamento do estator. Frequentemente são denominadas perdas I^2R , onde R é a resistência do enrolamento e I a corrente. Nos motores de alto rendimento, a resistência destes enrolamentos é diminuída utilizando-se condutores de cobre de maior secção. Quanto às perdas por efeito Joule no rotor, estas representam cerca de 15 a 25 % das perdas totais. Ocorrem na gaiola do motor e dependem da carga, do material do condutor da gaiola, da área da ranhura e do comprimento das barras. Estas perdas são proporcionais ao deslizamento (s) de operação. Assim como no estator, a diminuição destas perdas é feita pelo aumento da quantidade de material condutor da gaiola [35]. Naturalmente, isto pode contribuir também para o aumento das dimensões da carcaça. No entanto, a resistência do rotor apresenta forte influência no desempenho do motor. Sendo assim, a redução destas perdas fica limitada às imposições dos valores da máxima corrente de arranque.

As perdas magnéticas ou nos núcleos ocorrem nas chapas magnéticas do estator e do rotor e representam cerca de 15 a 30% das perdas totais. Estas perdas devem-se a fenómenos de histerese e correntes induzidas nas chapas magnéticas (correntes Foucault ou correntes de turbilhão) e dependem da frequência e da densidade máxima de fluxo. No caso particular das correntes de turbilhão ou de Foucault, elas dependem também da espessura das lâminas das chapas magnéticas. As perdas por histerese e correntes de Foucault podem ser reduzidas pela diminuição da densidade de fluxo. Isto pode ser conseguido aumentando-se o comprimento das chapas magnéticas ou através de um melhor projeto do circuito magnético [37]. Outro procedimento para reduzir estas perdas é a utilização de material magnético de melhor qualidade [38].

Temos também as perdas mecânicas que representam 2 a 15 % das perdas totais. Ocorrem devido ao atrito nos mancais (de rolamento ou deslizamento) e na ventilação. Em geral, quando o motor está a operar em carga nominal, elas são a menor parcela das perdas totais. Estas perdas podem-se diminuir ao utilizar-se rolamentos de baixas perdas e com melhor lubrificação, como, por exemplo, com o uso de lubrificantes sintéticos. As perdas por ventilação também podem ser reduzidas pela otimização do projeto do ventilador. Como o motor de alto rendimento produz menores perdas nos enrolamentos e no núcleo, torna-se menor a própria necessidade de ventilação. Uma boa consequência indireta disto é a redução do nível de ruído produzido pelo motor.

Para finalizar, temos as perdas adicionais ou suplementares que representam 5 a 20 % das perdas totais. São todas as perdas que não estão incluídas nos outros grupos e são definidas como a diferença entre a perda total do motor e a soma dos outros três tipos de perdas. Elas

têm em conta vários fenómenos, tais como a distribuição não uniforme da corrente nos enrolamentos, o efeito de saturação e as imperfeições na densidade do campo magnético (devido às ranhuras do estator e do rotor). Estas imperfeições provocam perdas nos dentes das lâminas do estator e do rotor e ocasionam perdas óhmicas nas barras das gaiolas, associadas aos harmónicos da corrente. As perdas que ocorrem nas partes metálicas próximas do campo magnético produzidas pelas cabeças das bobinas são também denominadas de perdas suplementares. Os elementos que mais afetam estas perdas são o projeto do enrolamento do estator, a razão entre a largura do entreferro e a abertura das ranhuras, a razão entre o número de ranhuras do estator e do rotor e as superfícies das chapas magnéticas do estator e do rotor. As perdas suplementares variam, aproximadamente, com o quadrado da corrente de carga. São as perdas mais difíceis de se reduzir. No entanto, podem apresentar uma grande contribuição para o aumento da eficiência do motor. Podem ser reduzidas pela adoção de um projeto otimizado e com cuidados de qualidade na fabricação. Estas perdas são um importante componente das perdas totais do motor.

Os vários tipos de perdas dos motores não são independentes. Por exemplo, aumentar o comprimento do pacote de lâminas para redução das chapas magnéticas provoca aumento no comprimento dos condutores o que, por sua vez, aumenta as suas perdas por efeito Joule. O projeto final destes motores deve ser fruto de um balanço dos vários tipos de perdas, de modo a se alcançar um alto rendimento, mas mantendo-se os níveis de corrente de arranque, capacidade de sobrecarga e fator de potência [30].

Um motor de alto rendimento tem bastantes benefícios económicos, pois o custo de um motor não envolve somente o seu preço inicial mas também o seu custo operacional. O preço inicial do motor de alto rendimento é superior ao motor das linhas padrão. O motor de alto rendimento consome menos energia para executar o mesmo trabalho realizado por outro da linha padrão porque possui maior rendimento. Após algum tempo de operação, a economia obtida deverá compensar e até ultrapassar a diferença entre o seu preço e o do motor equivalente da linha padrão.

A economia no consumo de energia e o tempo de retorno do investimento, ao se optar por um motor de alto rendimento ao contrário de outro da linha padrão, são funções dos seus rendimentos, do tempo de operação, da potência solicitada pela carga, da tarifa de energia elétrica e dos seus preços iniciais.

Se um motor operar H horas por ano, solicitando da rede elétrica uma potência ativa P (em kW), a energia elétrica consumida por ano pode ser calculada da seguinte maneira:

$$E = H \times P$$

O tempo de retorno do investimento num motor tem em conta o custo da energia elétrica do país. Assim sendo, observa-se que o tempo de retorno de investimento é tanto menor quanto maior for:

- A tarifa de energia;

24 Conceção e exploração de motores de alto rendimento

- O número de horas de operação;
- A diferença entre os rendimentos;
- A potência da carga.

O desempenho de motores elétricos, de uma forma global, está associado aos seguintes parâmetros:

- Rendimento;
- Fator de potência;
- Velocidade de operação;
- Capacidade de aceleração;
- Classe de isolamento;
- Corrente de arranque;
- Ruído;
- Temperatura de operação;
- Tipo de carcaça.

A especificação técnica deve definir os requisitos de desempenho e descrever as condições nas quais o motor irá operar. Um balanço entre os vários parâmetros de desempenho pode resultar num decréscimo do rendimento do motor se a especificação técnica não estiver cuidadosamente elaborada.

Em condições normais de funcionamento, o motor deve-se adequar à carga, ou seja, deve operar entre 75% e 100% da potência nominal. O motor de alto rendimento, bem dimensionado e bem explorado, proporcionará uma máxima economia de energia permitindo obter elevados rendimentos e fator de potência.

Um motor de alto rendimento é especificado da mesma forma que outro da linha padrão. Geralmente, ambos possuem a mesma carcaça padronizada, pelo que nenhuma modificação especial é necessária para trocar um motor padrão por um de alto rendimento.

O fator de potência é o fator que relaciona a potência que o motor realmente precisa para acionar a carga e para cobrir as suas perdas internas, e a potência total solicitada à rede, chamada de potência aparente. A potência aparente engloba duas componentes distintas de potência:

- Potência ativa (P), relacionada com trabalho mecânico e perdas W;
- Potência reativa (Q), necessária para magnetização, ou seja, para assegurar a existência dos campos magnéticos, var.

É importante que se trabalhe com um fator de potência elevado. A legislação atual exige que as indústrias operem com um determinado fator de potência mínimo especificado para que não existam grandes penalizações financeiras. A correção do fator de potência geralmente pode ser feita com a instalação de baterias de condensadores que apresentam a propriedade de reduzir a energia reativa indutiva da rede de alimentação.

A operação eficiente dos motores de indução trifásicos depende, entre outras coisas, da qualidade da rede elétrica de alimentação. As principais distorções que ocorrem na rede trifásica são:

- Variação da tensão e/ou frequência;
- Desequilíbrio da rede trifásica, com as tensões apresentando diferentes amplitudes e/ou defasamentos;
- Conteúdo de harmónicos.

Existem certas características construtivas que é necessário ter em conta de acordo com o local em que se quer inserir o motor. Por exemplo, se um motor for inserido num local sujeito a jatos de água deve possuir um invólucro capaz de suportar tais jatos, sob determinados valores de pressão.

Um motor é uma máquina robusta que quando utilizada apropriadamente, irá operar por vários anos com o mínimo de manutenção. Uma manutenção preventiva e uma inspeção do motor e do sistema elétrico de alimentação dele poderão aumentar-lhe o tempo de vida útil.

A vida de um motor termina praticamente quando o isolamento dos seus terminais se deteriora, tornando-se ressequido e quebradiço [18].

3.2 - Metodologias de projeto, construção e exploração para elevação do rendimento η

Atualmente, a informação disponível relativamente a motores de alto rendimento com índice de eficiência IE4 ainda é escassa. A maioria da informação disponível é relativa aos motores IE3. Os métodos de projeto e construção para elevar o rendimento variam de fabricante para fabricante, mas no entanto todos assentam em princípios base que se descrevem de seguida:

1-Minimização de perdas através de aspetos construtivos

Para diminuir as perdas associadas a motores de indução trifásicos, os aspetos construtivos respeitantes a este tipo de máquinas podem ser relevantes pois permitem minimizar as diferentes componentes de perdas, tornando os motores mais eficientes.

Em seguida mostra-se um motor de alto rendimento:



Figura 3.1 - Motor de alto rendimento

As perdas por efeito Joule podem ser minimizadas diminuindo a resistência do estator, ou seja, aumentando a secção e/ou o número de condutores por enrolamento do e a secção das barras rotóricas. A otimização dos trajetos dos enrolamentos do estator contribui também para a minimização das perdas por efeito de Joule.

As perdas por histerese também podem ser reduzidas utilizando chapas de ferro com materiais de melhor qualidade, ou seja, que possuam uma permeabilidade magnética mais elevada e ciclos histeréticos com áreas mais reduzidas. A utilização de chapas magnéticas com menores espessuras e melhor isolamento entre chapas, bem como o uso de materiais com elevada resistividade limitam os caminhos de circulação das correntes de Foucault.

As perdas mecânicas podem ser reduzidas com a otimização do ventilador (desenho e materiais) e com o tipo de rolamentos (rolamentos com baixo atrito), originando menos ruídos e vibrações no funcionamento dos motores.

As perdas adicionais podem ser minimizadas através da geometria e dimensões do motor, propriedades e quantidades de materiais usados e, sobretudo, com maior qualidade de fabrico.

2-Utilização de variadores eletrónicos de velocidade

A velocidade dos motores de indução é determinada pela frequência da tensão de alimentação, pelo seu número de pares de polos e pelo seu fator de carga. Sendo que a velocidade diminui ligeiramente à medida que a carga aumenta para motores de indução. O mesmo não acontece com motores síncronos. Nestes a velocidade depende da frequência da

rede de alimentação (f) e do número de par de polos (p) através da seguinte equação (f/p) [15].

Um variador eletrónico de velocidade aplicado a um motor trifásico pode levar a poupanças energéticas anuais elevadas.

A seguinte imagem mostra um variador eletrónico de velocidade:



Figura 3.2 - Variador eletrónico de velocidade disponível no LME da FEUP

Para testar a eficiência destes variadores, normalmente a eficiência é calculada pelo método direto, ou seja, dividindo a potência de saída pela de entrada.

Quando se varia a frequência de alimentação do motor, varia-se também a velocidade, porque esta é dependente da velocidade no espaço do campo estatórico que é dependente da frequência da tensão de alimentação.

A tensão de alimentação é proporcional ao produto da frequência pela indução magnética do entreferro no campo resultante. Assim, para manter uma utilização satisfatória do circuito magnético, quando se varia a frequência deve também variar-se a tensão [4].

Este método de controlo assenta em manter aproximadamente constante a relação V/f para velocidades abaixo da velocidade nominal. Para velocidades superiores à velocidade nominal, a tensão é mantida constante e igual ao seu valor máximo, pelo que o fluxo magnético no entreferro decresce à medida que a frequência aumenta [5].

Ao atuar na frequência para se obter a velocidade que se pretende no motor, é necessário assegurar níveis de fluxo desejados, ou seja, o fluxo utilizado deve ser o mais elevado possível, sendo o seu valor máximo limitado pela saturação do circuito magnético.

Analisando o motor em regime permanente, assumindo tensões e correntes de alimentação sinusoidais, pode concluir-se que o fluxo no entreferro é determinado pela

tensão no enrolamento estatórico, desprezando a queda de tensão na impedância do estator. Esta relação é aproximadamente linear até cerca de 1/3 da velocidade nominal (a partir daí a relação tensão/frequência aumenta) [4].

O objetivo dos Conversores Eletrônicos de Potência é forçar o deslocamento da curva do binário em função da velocidade dos motores, mantendo o binário máximo e o declive da região linear da curva aproximadamente constante.

A topologia básica do sistema de controlo mais comum é do tipo VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) que garante um ajuste simultâneo da tensão e da frequência. Na figura 3.3 mostra-se um circuito de um VVVF.

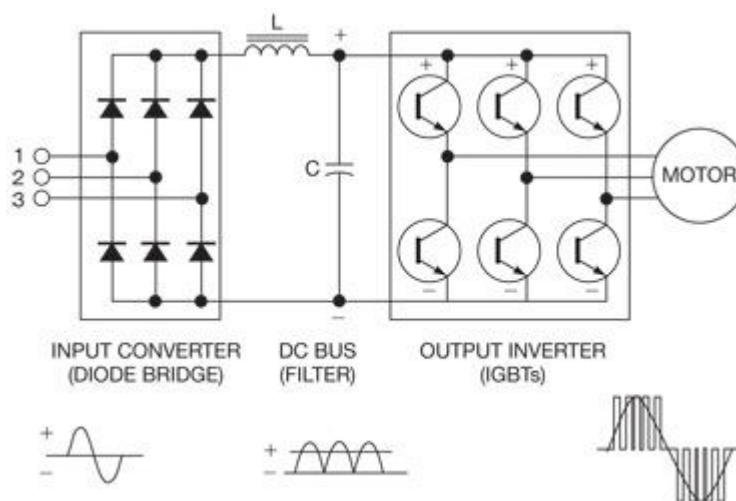


Figura 3.3 - Circuito VVVF [42]

São VEVs com inversor por fonte de tensão e modulação por largura de impulso. O circuito é constituído por três partes. A primeira parte é a ponte retificadora que está ligada à rede, que assegura a conversão de AC para DC. A segunda parte trata-se de um filtro de tensão constituído por duas bobinas e um condensador. Este circuito limita a modulação de tensão que passa para o inversor. O inversor é constituído por seis transístores, ligando a cada uma das fases do motor. O modo de funcionamento do inversor consiste em comutar a tensão contínua, resultando à saída três formas de onda compostas por vários impulsos de diferentes larguras. Assim, atua-se sobre o valor eficaz e a frequência da tensão de alimentação do motor, controlando a sua velocidade angular e o seu binário [7]

A utilização de sistemas com semicondutores de potência a funcionar em regime de comutação é bastante eficiente. Por causa dos elevados valores de eficiência dos variadores eletrónicos de velocidade, pode afirmar-se que a eficiência total do sistema VEV/motor é quase sempre superior a 80% [6]. No entanto um VEV traz custos de investimento e normalmente só se justifica em aplicações que exijam variação de velocidade. Também

existem motores com regimes de carga bastante variáveis onde o ajuste de tensão pode ser bem vantajoso.

As cargas podem ser classificadas em três grupos, consoante o binário aumenta, diminui ou permanece constante com o aumento da velocidade angular. Como a potência mecânica é igual ao produto do binário pela velocidade angular, a variação de velocidade nos três grupos pode conduzir a reduções significativas no consumo de energia. Tapetes rolantes, bombas, compressores ou ventiladores são alguns exemplos de aplicações nos quais a variação de velocidade se torna vantajosa [5].

O controlo de velocidade com VEVs pode conduzir à melhoria dos processos, menor desgaste do equipamento mecânico, menor desgaste do motor devido aos arranques/paragens suaves e poupanças de energia significativas. No entanto, este tipo de controlo possui algumas desvantagens como a possibilidade de produção de interferências electromagnéticas, injeção de harmónicos na rede e redução do tempo de vida dos motores, devido ao aumento da sua temperatura, ocorrência de descargas parciais no seu sistema de isolamento e circulação de correntes nos seus rolamentos [5].

3 - Utilização de soft-starters

Os motores são suficientemente robustos para arrancarem diretamente da rede, apesar disso, durante a fase inicial de arranque, o arranque direto implica um consumo de corrente 5 a 7 vezes superior à corrente nominal do motor. A elevada corrente de arranque pode ter efeitos maus para o motor e a instalação elétrica. O sobreaquecimento que o excesso de corrente poderá provocar pode deteriorar os isolamentos do motor sobretudo se esse arranque se repetir ou se a carga tiver elevada inércia, conduzindo a tempos de arranque longos. A instalação elétrica terá de ser dimensionada para os elevados valores de corrente esperados, caso contrário os dispositivos de proteção poderão disparar. A queda de tensão na linha, no momento de arranque, pode também causar danos a outros equipamentos alimentados pela mesma linha.



Figura 3.4 - Motor de elevada potência [12]

A versatilidade e as potencialidades dos semicondutores de potência atuais, juntamente com a possibilidade de preparar algoritmos de controlo sofisticados, permitem o aparecimento de técnicas de controlo de motores muito poderosas, incluindo o controlo de arranque de motores de pequena, média e grande potência como na figura anterior.

Assim, surgem os soft-starters que, tal como o próprio nome indica, ajudam a suavizar o arranque, tornando-o menos agressivo, quer para o motor quer para a instalação elétrica [23]. Este são dispositivos do tipo VVFF (Variable Voltage Fixed Frequency) ou seja só atuam na tensão.

Um Soft-starter controla a tensão de maneira a que a corrente fornecida durante o arranque não ultrapasse certo valor por fase, como se representa na figura. Isso é alcançado através da utilização de dois tirístores em anti-paralelo.

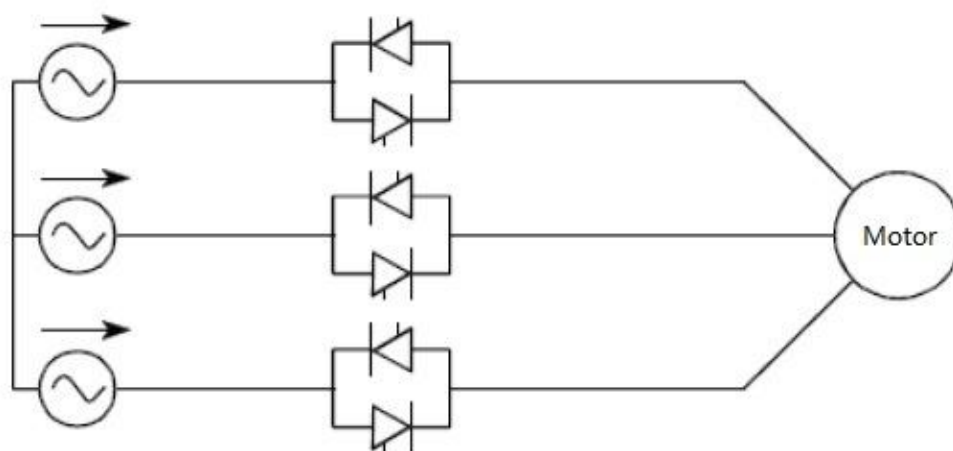


Figura 3.5 - Circuito Soft-starter

Cada fase de alimentação possui um par de tirístores em montagem antiparalela, como dito, sendo a tensão aplicada aos terminais do motor função do ângulo de disparo dos tirístores. Inicialmente, os tirístores são disparados com intervalos de tempo muito curtos, provocando um valor de tensão reduzido. O motor modifica o binário e a corrente em função da tensão aplicada. À medida que o arranque decorre, o sistema de controlo vai diminuindo o ângulo de disparo, mantendo a corrente reduzida [22].

Controlando o ângulo de disparo dum conversor VVFF é possível controlar o valor eficaz da tensão do estator e, conseqüentemente, o rendimento do motor. Todas as estratégias de controlo estudadas até hoje são baseadas em tentativas de selecionar uma variável e mantê-la constante ou minimizá-la. Estudos revelam que o melhor rendimento é obtido quando se maximiza o fator de potência ou a potência de entrada [8].

A grande desvantagem deste sistema é a elevada distorção harmónica de corrente (que pode atingir os 30%) provocada pelo corte de tensão [8].

Foram efetuados estudos de onde se conclui que, para cargas superiores a 90% da potência nominal do motor, o conversor conduz totalmente, o que significa que as perdas de

condução associadas aos tirístores degradam a eficiência do conjunto soft-starter/motor em cerca de 1,5% relativamente a um motor ligado diretamente à rede. Para cargas inferiores a 45%, o soft-starter consegue melhorar a eficiência do motor. Assim sendo, o soft-starter é uma boa opção para suavizações de arranque, mas só melhora a eficiência em casos em que o motor trifásico opere para condições de carga inferiores a 45% da sua potência nominal a maior parte do tempo [9].

No entanto, com os avanços da tecnologia eletrônica, atualmente os soft-starters estão cada vez mais eficientes e existem equipamentos desta natureza com funções de poupança de energia para diversos regimes de carga.

Conclui-se que um soft-starter em conjunto com um motor reduz sempre o rendimento do conjunto no entanto poderá aumentar a eficiência para determinadas condições de carga [40].

3.3 - Exigências de Desempenho Energético das normas CEI nos Motores Elétricos de Corrente Alternada

Existem vários métodos para calcular características de motores elétricos nomeadamente o rendimento dos motores de indução e síncronos [29]. Cada norma ilustra a metodologia necessária a considerar para definição das características. Em seguida descrevem-se algumas dessas metodologias conforme normas a que se teve acesso ao longo deste trabalho.

Os métodos apresentados divergem sobretudo na maneira como propõem a determinação das perdas adicionais em carga e na consideração da influência da temperatura sobre as perdas por efeito de Joule e, em alguns casos são específicos de motores de indução.

As normas analisadas para escolha de metodologia de teste serão apresentadas de seguida:

- Norma IEC 60024-2

Esta é uma norma da Comissão Eletrotécnica Internacional que define várias metodologias.

- Método Direto:

Ensaio em carga nominal: o motor funciona com tensão, corrente e velocidade nominal. São medidas a potência de entrada e a potência de saída.

Ensaio com motor calibrado: O motor de indução a ensaiar funciona como gerador assíncrono. Como máquina primária tem-se um motor elétrico cujas perdas internas são previamente determinadas. Assim, a medição de potência absorvida pela máquina e da potência fornecida pelo motor em teste (que está a funcionar como gerador) permite obter o rendimento do motor de indução, para diferentes regimes de funcionamento.

Ensaio com duas máquinas idênticas:

- A máquina a ensaiar funciona como gerador assíncrono sendo acionada pela segunda (motor assíncrono), funcionando ambas nos regimes nominais. Considera-se que as perdas totais se dividem igualmente pelas duas máquinas.

- As duas máquinas são ligadas elétrica e mecanicamente, uma funcionando como motor e outra como gerador. A velocidade de rotação é igual ao valor nominal das máquinas. As perdas das duas máquinas são alimentadas externamente, havendo várias configurações possíveis.

-Método Indireto:

Este método é o mais utilizado. As perdas internas da máquina são previamente separadas, sendo medida a potência elétrica absorvida (no caso do motor), determinando assim o rendimento. É necessário efetuar ensaios em vazio e ensaios em carga:

Ensaio em vazio:

- Tensão constante: a máquina é colocada a funcionar como motor, em vazio, com tensão e frequência nominais. A soma das perdas consideradas como constantes é calculada subtraindo à potência absorvida o valor das perdas por efeito de Joule do estator.

- Tensão variável: são realizados ensaios em vazio com frequência nominal, com valores decrescentes da tensão aplicada. Ao subtrair aos valores da potência absorvida as respetivas perdas por efeito de Joule no estator, a extrapolação da curva que explicita estes últimos valores em função do quadrado da tensão permite determinar as perdas mecânicas (intersecção com o eixo das ordenadas).

Ensaio em carga:

- Tensão constante: com estes ensaios são determinadas as perdas por efeito de Joule no rotor. A sua estimativa é feita de forma indireta (recorrendo ao modelo equivalente da máquina), uma vez que nas máquinas de gaiola de esquilo os circuitos rotóricos não estão acessíveis. As perdas por efeito de Joule no rotor são calculadas pelo produto do deslizamento e da potência transmitida para o rotor (esta potência é dada pela subtração das perdas por efeito de Joule no estator e das perdas no ferro à potência absorvida).

- Tensão variável: este ensaio é realizado quando a tensão de alimentação disponível é inferior ao valor da tensão nominal da máquina. São medidos os valores correspondentes de potência e corrente absorvida, bem como a velocidade de rotação. Assim, com os valores das correntes obtidos em vazio calcula-se a potência absorvida pelo motor nas mesmas condições de carga. Os cálculos para determinação das perdas são efetuados com o valor da resistência rotórica referida à temperatura da classe de isolamento da máquina. Os parâmetros da máquina são admitidos como sendo constantes.

Perdas adicionais em carga:

Esta norma assume um valor para as perdas adicionais de 0.5% da potência elétrica nominal do motor, independentemente da potência e do regime nominal de carga.

Este é o principal ponto discordante entre as Normas.

O valor percentual destas perdas varia com a potência nominal, diminuindo à medida que a potência aumenta [26].

Assim sendo, os valores de eficiência obtidos com esta norma possuem erros associados cada vez menores para motores com potências cada vez maiores [8].

- Norma IEC 61972

Com o objetivo de alcançar valores mais precisos para as eficiências de motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, foi publicada, em 2002 a norma 61972. Esta norma assenta em dois métodos para determinação das perdas e do rendimento:

Método 1: trata-se de um método direto, em que a potência mecânica é obtida com recurso a um transdutor de binário. As perdas adicionais em carga são calculadas através da medição das restantes perdas.

Método 2: trata-se de um método indireto. Apenas a potência absorvida é medida. É atribuído um valor às perdas adicionais em carga, sendo as restantes perdas do motor obtidas através de medições.

Em ambos os métodos são realizados ensaios de aquecimento, em carga e em vazio. Os valores das resistências são ajustados para as temperaturas nos enrolamentos estatóricos, medidas em cada ensaio.

Esta norma encontrou bastante resistência na aceitação por parte dos fabricantes europeus, tendo sido iniciada novamente a revisão da norma IEC 60034-2 que será publicada em breve. Assim sendo, trata-se de uma Norma que não é muito utilizada [8].

- Norma IEEE 112

A norma IEEE 112 define vários métodos para testar motores elétricos. A determinação da eficiência é apenas uma parte desta norma. Alguns dos métodos de teste de eficiência são:

-Método A: É usado em máquinas de potências de 1 a 190kW. São medidos os valores de potência de entrada e de saída e o rendimento é calculado diretamente, não havendo separação de perdas. Pressupõe a existência de um dinamómetro. O valor da potência mecânica é obtido em função dos valores do binário e da velocidade de rotação.

-Método B: trata-se também de um método direto que recorre à utilização de um dinamómetro.

As perdas internas são discriminadas com exceção das perdas adicionais em carga. As restantes são obtidas de forma semelhante ao método indireto da norma IEC 60034-2. São efetuados três tipos de ensaios: ensaios em vazio, ensaio de aquecimento com carga nominal e ensaios em carga. Os ensaios em vazio são semelhantes aos indicados anteriormente. No ensaio de aquecimento, o motor é colocado a acionar a sua carga nominal até à temperatura

no seu interior estabilizar. No final, é medida a resistência do estator. Os ensaios em carga são efetuados depois de ser atingido o equilíbrio térmico no interior do motor. São realizados no mínimo seis ensaios estando as cargas igualmente espaçadas entre si.

Com os ensaios anteriores, são obtidos separadamente os valores das perdas no ferro e perdas mecânicas (ensaios em vazio) e das perdas por efeito de Joule (ensaios em carga e de aquecimento). As perdas adicionais em carga são obtidas por via indireta, através da diferença entre a potência de entrada e o somatório das potências na saída e das perdas calculadas. A precisão dos instrumentos de medida utilizados tem uma influência muito relevante pelo que as perdas adicionais em carga assim obtidas poderão afastar-se consideravelmente dos valores reais.

Para diminuir a influência dos erros de medição sobre os valores das perdas adicionais em carga, é efetuada uma regressão linear sobre os valores obtidos.

A implementação deste método implica laboratórios de ensaio equipados com um ou mais dinamómetros, função da gama de potências dos motores a ensaiar, transdutores para medição de binários, entre outros equipamentos. Assim sendo, a aplicação deste método exige um elevado investimento em equipamento laboratorial.

-Método C: trata-se também dum método direto. Implica ter disponíveis duas máquinas iguais, funcionando uma como motor com tensão e frequência nominais e outra como gerador, com tensão e frequência variáveis, constituindo a carga mecânica do motor a ensaiar. As perdas adicionais em carga totalizadas são obtidas por via indireta, através do cálculo das perdas totais do sistema.

-Método E: É medido o valor da potência à entrada da máquina. A potência de saída é determinada subtraindo as perdas totais à potência de entrada. As perdas totais igualam a soma das perdas do estator e do rotor devidamente corrigidas.

-Método E1: não se efetua ensaio de inversão do sentido de rotação. As perdas adicionais em carga são fixadas num valor percentual da potência mecânica nominal do motor de acordo com:

$0.750 \text{ kW} \leq P_n \leq 90 \text{ kW} \rightarrow P_{adic} = (1.8\%) P_n$

$91 \text{ kW} \leq P_n \leq 375 \text{ kW} \rightarrow P_{adic} = (1.5\%) P_n$

$376 \text{ kW} \leq P_n \leq 1800 \text{ kW} \rightarrow P_{adic} = (1.2\%) P_n$

$1800 \text{ kW} \leq P_n \rightarrow P_{adic} = (0.9\%) P_n$

-Método F: recorre ao ensaio de inversão do sentido de rotação para determinar as perdas adicionais em carga. Não são efetuados ensaios em carga e, como tal, é utilizado o circuito equivalente da máquina para cálculo das perdas a partir dos parâmetros. Esta é a principal condicionante deste método, visto que os parâmetros da máquina são variáveis.

-Método F1: recorre também, à semelhança do método E1, a valores relativos para calcular as perdas adicionais [28].

- Norma IEC 60034-2-1

Esta norma explica o método standard para determinar as perdas e o rendimento através de testes, exceto para máquinas para veículos de tração. Esta norma aplica-se a todas as máquinas D.C. e A.C, quer síncronas quer de indução, de todos os tamanhos.

Existem os testes para medida direta da eficiência e indireta.

Na direta define-se que a eficiência é o rácio da potência de saída para a potência de entrada expresso nas mesmas unidades, normalmente dado em percentagem.

Utiliza-se o teste de medida de binário em que a potência mecânica de saída de uma máquina funcionando como motor é determinada com as medidas de um medidor de binário com a velocidade de rotação.

Nos testes para determinação do rendimento de forma indireta, a medida é feita medindo a potência de entrada ou de saída e determinando as perdas totais. Estas perdas são adicionadas à potência de saída, e que nos dá a potência de entrada, ou subtraindo à potência de entrada que nos dá a potência de saída.

Os testes podem ser agrupados em três diferentes categorias:

- Medida de valores de Entrada-Saída medida de uma máquina apenas. Isto envolve a medida elétrica ou a potência mecânica de entrada, e a potência mecânica ou elétrica de saída de uma máquina.
- Medida de entrada e saída em duas máquinas mecanicamente idênticas ligadas traseira com traseira. Isto é feito para eliminar as medidas da potência mecânica de entrada ou saída da máquina.
- Medida das perdas atuais numa máquina sobre uma condição particular. Isto não é usualmente o total de perdas mas compreende certas componentes de perdas. O método pode, porém ser usado para calcular as perdas totais ou calcular uma componente de perda.

A determinação das perdas totais pode ser calculada por um dos seguintes métodos:

- Medida das perdas totais;
- Determinação das perdas separadamente.

Quanto à incerteza usada neste método é a incerteza de determinar o rendimento verdadeiro. Reflete variações no procedimento de teste e no equipamento de teste. A incerteza deve ser expressa como um valor numérico, tal como os requisitos necessários para determinar valores representativos e comparativos. Este padrão usa os seguintes termos de incerteza relativa:

- “Baixa” aplicada a determinação de rendimento baseada somente em resultados de teste;
- “Média” aplicada a determinação de rendimento baseada em limites de aproximação;
- “Alta” aplicada a determinação de rendimento baseada em factos assumidos.

Quanto aos melhores métodos para cálculo, é difícil estabelecer regras específicas para a determinação de rendimento. A escolha do teste a fazer depende da informação requerida, a sensibilidade requerida, o tipo e tamanho da máquina envolvida e o equipamento de teste disponível, sobretudo se realizado em campo.

A tensão e frequência de alimentação dos motores devem estar em concordância com a tensão nominal de alimentação do motor e a frequência deve estar com variação de $\pm 0,3\%$ em relação à frequência nominal durante as medidas.

A precisão dos instrumentos deve ter uma escala que deve ser tão pequena quanto prática.

A instrumentação usada para medir o binário deve ter uma precisão de $\pm 0,2\%$ da escala total. A instrumentação usada para medir a velocidade deve ter uma precisão de $\pm 0,1\%$ da escala total. A medida deve ser precisa o suficiente para haver apenas um erro de uma rotação por minuto no máximo para obtermos um erro mínimo. Para medir a temperatura a instrumentação deve ter um desvio de temperatura no máximo de $\pm 1^\circ\text{C}$.

A não ser que seja especificado de outra maneira, os valores das unidades a utilizar devem ser medidos em unidades SI.

Quanto ao teste de resistência do enrolamento, R é o valor óhmico, determinado por métodos apropriados. Para máquinas de corrente alternada trifásicas, R é a resistência entre fases do estator ou armadura do enrolamento. O teste de resistência no fim do teste de temperatura deve ser determinado com processo de extrapolação usando o mais pequeno tempo possível.

O teste de medida da temperatura do enrolamento deve ser determinado por um dos seguintes métodos:

- Temperatura determinada através do teste de resistência de carga por extrapolação.
- Temperatura medida diretamente por termopar.
- Temperatura determinada de acordo com o teste de resistência de carga usando um duplicado da mesma máquina com o mesmo tipo de construção e design elétrico.
- Quando a capacidade de carga não está disponível determina-se a temperatura de operação de acordo com a norma IEC 61896.
- Quando o valor do teste de resistência em carga não pode ser medido diretamente, a temperatura do enrolamento deve ser assumida igual à temperatura de referência constante da seguinte tabela:

Tabela 3.1 - Temperatura de Referência

Classe de Temperatura do sistema de isolamento	Temperatura de referência (°C)
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

Se o valor da temperatura subir ou o valor da temperatura for especificado como menor do que o usado na construção, a temperatura de referência deve ser a menor da classe de temperatura.

Para os métodos de determinação de rendimento, os testes devem ser conduzidos numa máquina constituída com os componentes essenciais no lugar, para obter condições de teste iguais ou muito similares às condições de operação normais.

Os métodos de testes usam a potência mecânica calculada através da medida de binário e de velocidade e a potência elétrica medida através de wattímetros.

Nos testes de motores, a potência de entrada equivale à potência elétrica e a potência de saída à potência mecânica [34].

O método utilizado neste trabalho para medição do rendimento foi o método A da norma IEEE 112 para o motor antigo de indução. Para a medida de rendimento do motor de alto rendimento foi utilizado o método da norma IEC 60034-2-1 graças às condições reunidas pelo laboratório de máquinas elétricas da FEUP. Visto que os motores escolhidos para ensaiar são de 4 kW, estes métodos revelaram-se a melhor opção por se tratar de métodos diretos.

3.4 - Técnicas utilizadas pelos fabricantes para superarem o índice IE4

Motores eléctricos de alto rendimento são projetados para, fornecendo a mesma potência útil (na ponta do eixo) que outro tipo de motores, consumirem menos energia eléctrica da rede (maior rendimento). O princípio aplica-se a todo o tipo de motores sendo que a sua aplicação se especializa em função do tipo de motor.

Assim, os motores eléctricos de indução de alto rendimento possuem as seguintes características [3]:

- Chapas metálicas de melhor qualidade (aço silício);
- Maior volume de cobre, o que reduz as perdas por efeito de Joule e a temperatura de operação;
- Enrolamentos especiais que reduzem as perdas do estator;
- Rotores tratados termicamente, reduzindo perdas rotóricas;
- Altos coeficientes de enchimento das ranhuras, que melhoram a dissipação do calor gerado;
- Anéis de curto-circuito dimensionados para reduzir as perdas Joule;

-Projetos de ranhuras do motor são optimizados para melhorar rendimento.

Em seguida demonstra-se um motor de alto rendimento:



Figura 3.6 - Motor de alto rendimento Weg [10]

Uma solução para reduzir perdas por parte dos fabricantes pode envolver o aspeto que se descreve de seguida. Reduzir as perdas poderá envolver um controlo da parte magnética do motor. A forma magnética em U no rotor consiste em 4 segmentos radiais que são juntos pelo meio de quatro chapas magnéticas adicionais feitas pelo mesmo material com curva de desmagnetização e parâmetros: $B_r = 1.1(T)$ e $\mu_r=1.07$. Existem pontes no rotor, suficientemente finas para reduzir perdas do fluxo magnético e suficientes para manter a estrutura da folha do rotor como uma unidade. As pilhas do estator e do rotor são feitas de folhas magnéticas M470-50A. Uma única camada de três fases dos enrolamentos do estator são ligados em estrela e possuem 45 cabos numa camada [31]. As barras do rotor e os anéis são feitos de cobre. Cada design óptimo permite a inserção de ímanes depois da gaiola estar completa [33].

Num motor de operação síncrona existem duas fontes de campo magnético. O campo resultante no entreferro é muito mais complicado do que no caso de um motor de indução e tem a característica que não é presente neste motor. Para alguns ângulos de carga, o fluxo aparece caracterizado por uma mudança local da polarização do campo.

Uma estimativa credível das perdas no ferro e da eficiência do motor requerem o desenvolvimento de um modelo analítico que providencia um procedimento de otimização com valores precisos da curva de densidade do fluxo nos dentes do estator. O problema é complexo.

Cada vez mais a energia eléctrica é mais cara e torna-se um consumo com maior custo. Assim, a utilização de motores de alto rendimento, mesmo com custo superior aos motores padrão, torna-se bastante justificável, pois reduz os consumos de energia eléctrica, além de proporcionar outros ganhos à sociedade, resultando de uma utilização mais racional dos recursos naturais.

Além da utilização de um motor de alto rendimento, é fundamental uma especificação correta do motor para se obter uma performance no seu consumo de energia eléctrica. A seguir demonstra-se algumas informações sobre como especificar um motor para operar em regime contínuo – S1.

Quando o motor trabalha de maneira constante, acionando uma carga constante durante muito tempo, diz-se que o motor está a trabalhar em regime contínuo, denominado S1. Neste regime de trabalho, o motor aciona uma carga constante durante um tempo suficientemente longo para atingir a sua temperatura de equilíbrio térmico. A partir daí, é comum o seu funcionamento se prolongar por várias horas, dias ou meses, sem interrupções. Exemplos de máquinas que trabalham em regime S1 são ventiladores, exaustores, bombas centrífugas, compressores de ar e bombas de alimentação de caldeiras a vapor, entre outros.

A escolha do motor para acionar qualquer uma destas máquinas é um problema relativamente simples, desde que se conheça, mesmo que aproximadamente, a potência requerida pela máquina. O motor escolhido a partir de catálogos dos fabricantes deverá ter uma potência igual ou superior à potência requerida pela máquina, quando o acoplamento for direto. Se o acoplamento foi efetuado por um redutor ou multiplicador de velocidades, a potência fornecida pelo motor deverá ser acrescida da perda no acoplamento. Mesmo naqueles casos em que a potência padrão do motor no catálogo seja ligeiramente inferior ao da máquina acionada deve-se sempre escolher o motor de potência imediatamente acima da potência requerida pela máquina, a menos que o motor possua factor de serviço maior que 1. Com a escolha do motor feita à luz destes critérios, a possibilidade de sobre-aquecimento fica descartada, pois a elevação de temperatura máxima permitida para a sua classe de isolamento térmico nunca será ultrapassada nas condições normais de operação.

Uma variação deste regime, que ocorre muito na prática, é o regime contínuo com carga variável, não definido pelas normas, o qual, como o próprio nome indica, é um regime de trabalho em que a carga no eixo do motor é continua, porém varia ao longo do tempo. A velocidade do motor é considerada constante para todas as condições de carga. Um exemplo típico deste tipo de carga pode ser encontrado nas bombas que alimentam os reservatórios de água das cidades, cujo consumo varia ao longo do dia. Neste caso, o cálculo da potência requerida torna-se um pouco mais complexo, não se devendo escolher a potência do motor pelo máximo valor da carga do diagrama, pois o motor funcionaria sobredimensionado a maior parte do tempo. Teríamos um motor pouco económico e um motor cuja vida útil seria reduzida ou o risco de um defeito devido à destruição precoce do isolamento. A escolha pela

potência média não seria uma solução correta pois não se estaria a levar em consideração as perdas elétricas que poderiam provocar sobre-aquecimento do motor durante os períodos em que ele funcionaria com carga maior do que a sua potência nominal. A escolha da potência do motor para acionar uma máquina que opera com carga variável, pela média das potências requeridas durante o período de operação, só seria aceitável quando as flutuações da carga fossem comparativamente pequenas. Logo deve-se escolher um motor com uma potência entre a potência média e a potência pelo máximo valor de carga.

3.5 - Síntese

Em suma, a utilização de um motor de alto rendimento é sempre benéfica em relação à utilização de um motor 'standard'. Quanto maior é o rendimento, mais poupança é possível obter. Se houver a possibilidade de adquirir um motor sem olhar a custos de investimento, então um motor com rendimento super premium, ou seja IE4, para além de realizar todas as funções de um motor vulgar ainda permite reduzir a fatura energética.

Para construir um motor de alto rendimento, o objetivo principal passa por reduzir as perdas elétricas, magnéticas, mecânicas e adicionais. O principal problema é que estas perdas são dependentes umas das outras, ou seja, se por um lado se consegue reduzir as perdas magnéticas, por outro pode-se estar a influenciar e a fazer subir as perdas elétricas e vice versa. O melhor a fazer é conseguir um equilíbrio entre estas, que reduza as perdas totais.

Todos os métodos das normas para calcular rendimento dos motores são muito semelhantes. A principal diferença prende-se com a medida das perdas adicionais em carga e a medida da temperatura. Os métodos das normas utilizados na execução prática deste trabalho foram o método da norma IEEE 112 para o motor antigo de indução e o método IEC 60034-2-1 para o motor síncrono de alto rendimento. Utilizou-se o método IEEE 112 pois trata-se de um método ideal para motores de indução de baixa potência. Utilizou-se o método IEC 60034-2-1 pois é o que permite o cálculo do rendimento para motores síncronos.

Concluiu-se que as técnicas utilizadas pelos fabricantes para fazer elevar o rendimento prende-se com inúmeras estratégias. Embora se saiba de uma maneira geral quais os métodos usados, especificamente é difícil encontrar matéria sobre este assunto visto ser um tema de matéria confidencial das empresas produtoras de motores. Poderá dizer-se que o segredo é a alma de negócio e para as empresas estarem sempre na vanguarda da tecnologia e poderem afirmar-se com soluções novas e diferentes dos concorrentes não podem revelar estratégias de construção.

Foram contactadas empresas para fornecer material relacionado com esta temática de motores de alto rendimento e para fornecer as características do motor que irá ser testado. Conseguiu-se a folha de características do motor Weg testado e um catálogo com as vantagens dos motores de alto rendimento da marca com a designação WQuattro [16].

Capítulo 4

Investigação Experimental

Neste capítulo descreve-se a investigação experimental realizada em ambiente laboratorial com vista à comparação de dois motores com tecnologias historicamente distintas, a saber, um motor de alto rendimento com outro, mais antigo. O primeiro é um motor síncrono trifásico, de construção híbrida, de ímanes permanentes e gaiola de arranque. O segundo é um motor de indução trifásico convencional, tal como o anterior, de baixa tensão. O objetivo principal consiste em determinar a característica de rendimento do motor síncrono e compará-la com a do motor de indução bem como analisar a potência de entrada, ou seja, a potência absorvida pelo motor, a potência de saída, ou seja, a potência mecânica desenvolvida no veio do motor, as perdas, a corrente absorvida pelo motor, o binário e a velocidade de rotação para ambos os motores.

Os motores testados possuem a mesma potência e o mesmo número de pólos para permitir uma comparação mais eficaz. Ambos os motores são de 4 kW.

Os motores utilizados foram um motor de indução de marca EFACEC com cerca de 20 anos e um motor síncrono de ímanes permanentes de alto rendimento da marca WEG.

De seguida são mostrados os objetivos do trabalho, os métodos utilizados para medições e cálculos, as imagens da plataforma de testes, os resultados obtidos e uma análise comparativa entre os dois motores.

4.1 - Projeto experimental e objetivos

O principal objetivo consiste em calcular o rendimento de ambos os motores para os poder comparar.

O método para calcular o rendimento do motor de indução é o método A da norma IEEE Std 112-1996. O método para calcular o rendimento do motor síncrono é o método da norma IEC 60034-2-1.

Ambas as normas utilizam o mesmo método de cálculo de rendimento no entanto o método A da norma IEEE Std 112-1996 apenas se aplica a motores de indução enquanto a norma IEC 60034-2-1 se aplica a ambos os motores. Em ambos os métodos se adquire os valores das grandezas da mesma forma.

Para calcular o rendimento é preciso conhecer a potência de entrada e de saída do motor. As expressões para calcular o rendimento mostram-se de seguida:

Rendimento = Potência Saída / Potência Entrada ou

Rendimento = (Potência Entrada - Perdas) / (Potência Entrada)

(Normalmente aplicada em motores) ou

Rendimento = Potência Saída / (Potência Saída + Perdas)

(Normalmente aplicada em geradores)

A não ser que seja especificado, o rendimento deve ser determinado para tensão e frequência estipulada. O rendimento pode ser determinado mais eficazmente a partir do resultado dos testes quando a tensão não se desvia significativamente da tensão estipulada.

Ambos os motores irão ser testados com alimentação sinusoidal a 50 Hz numa primeira fase (A) e em seguida o motor síncrono será alimentado a 50 Hz com variador eletrónico de velocidade (B), neste caso para avaliar a influência de uma alimentação distorcida sobre as respetivas características.

O motor de indução antigo é da marca Efacec e tem as seguintes características:

Tabela 4.1 - Motor 1

Fabricante	EFACEC
Modelo	BF4 112 M44
Número de Fabrico	074905187
Tipo de Serviço	Contínuo
Corrente Nominal	$I_N = 9.2 \text{ A}$
Tensão Nominal	$U_N = 380 \text{ V}$
Frequência Nominal	$f = 50 \text{ Hz}$
Potência Nominal	$P_N = 4 \text{ kW}$
Velocidade Nominal	$n_N = 1420 \text{ rpm}$
Fator de Potência	$\cos(\varphi) = 0.81$
Classe Isolamento	C.I. = E
Rendimento Nominal	81,6%

O motor de alto rendimento de classe de eficiência IE4 é da marca Weg e tem as seguintes características:

Tabela 4.2 - Motor 2

Fabricante	WEG
Modelo	112M-04
Número de Fabrico	1010478127
Tipo de Serviço	Contínuo
Corrente Nominal	$I_N = 7.15 \text{ A}$
Tensão Nominal	$U_N = 400 \text{ V}$
Frequência Nominal	$f = 50 \text{ Hz}$
Potência Nominal	$P_N = 4 \text{ kW}$
Velocidade Nominal	$n_N = 1500 \text{ rpm}$
Fator de Potência	$\cos(\varphi) = 0.88$
Classe Isolamento	C.I. = F (80K)
Rendimento Nominal	91,7%

As chapas de características dos motores mostram-se nas seguintes figuras. Na figura seguinte mostra-se a chapa de características do motor 1:

**Figura 4.1 - Chapa de características do Motor 1**

Na próxima figura mostra-se a chapa de características do motor 2:

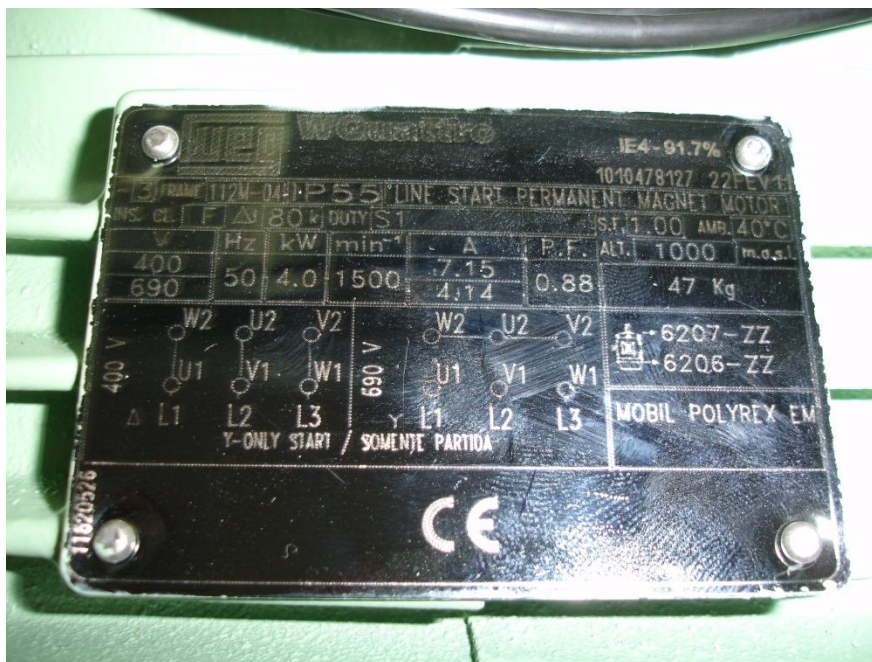


Figura 4.2 - Chapa de características do Motor 2

Destes motores conclui-se que os motores possuem 4 pólos e os seus rendimentos estipulados são, respetivamente de 81,6% e de 91,7%.

Ambos os motores apresentam a mesma potência nominal de 4 kW. O motor 2 apresenta uma corrente nominal inferior como seria de esperar. O motor 1 tem uma tensão nominal de 380 V pois no período em que foi fabricado a tensão da rede tinha esse valor. Ambos trabalham à frequência nominal de 50 Hz da rede. A velocidade nominal do motor 1 é de 1420 rpm pois trata-se de um motor assíncrono por isso a velocidade de rotação é inferior à velocidade de sincronismo, isto é, a velocidade do rotor é inferior à do campo magnético girante criado pelo estator. O fator de potência do motor 1 é $\cos(\varphi) = 0,81$ e o motor 2 é $\cos(\varphi) = 0,88$. A classe de isolamento do motor 1 (E) também é pior do que a do motor 2 (F), ou seja o motor 2 suporta trabalho a mais altas temperaturas sem que traga problemas de detioração para o motor. O motor 2 tem aquecimento compatível com classe (B) (80K).

4.2 - Plataforma experimental

Nesta secção pretende-se descrever a plataforma experimental utilizada nos testes para determinação das medidas. Irá ser apresentado a aparelhagem de medida utilizada, os motores utilizados e o esquema empregue.

A montagem utilizada foi a seguinte:

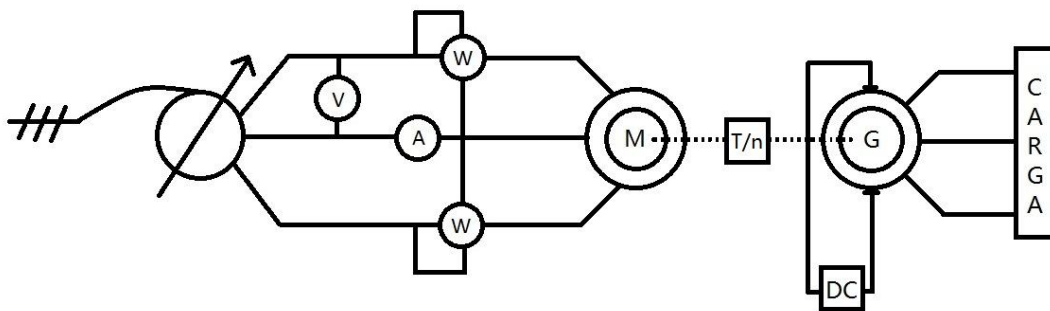


Figura 4.3 - Esquema de montagem

A designação das letras representa o seguinte:

V - Voltímetro

A - Amperímetro

W - Wattímetro

M - Motor

T/n - Medidor de Binário/Velocidade

DC - Fonte de tensão contínua

G - Gerador

A ligação dos contactos ligados ao estator do motor estava em triângulo.

O primeiro motor testado em ambiente laboratorial foi o motor 1 de indução trifásico, de marca EFACEC, que se mostra na seguinte imagem:



Figura 4.4 - Motor 1

O segundo motor testado foi o motor 2, da marca WEG, síncrono de ímanes permanentes, que se mostra na seguinte imagem:



Figura 4.5 - Motor 2

Pretendia-se medir tensão de alimentação do motor, corrente, binário, velocidade e potência consumida. Utilizou-se um sistema motor-gerador com carga resistiva de 4 kW. Para medir binário e velocidade utilizou-se um sensor de binário e velocidade de rotação e respetivo sistema de tratamento e aquisição de dados com saídas analógicas 0-10V . Foram utilizados dois multímetros para se medirem as tensões.

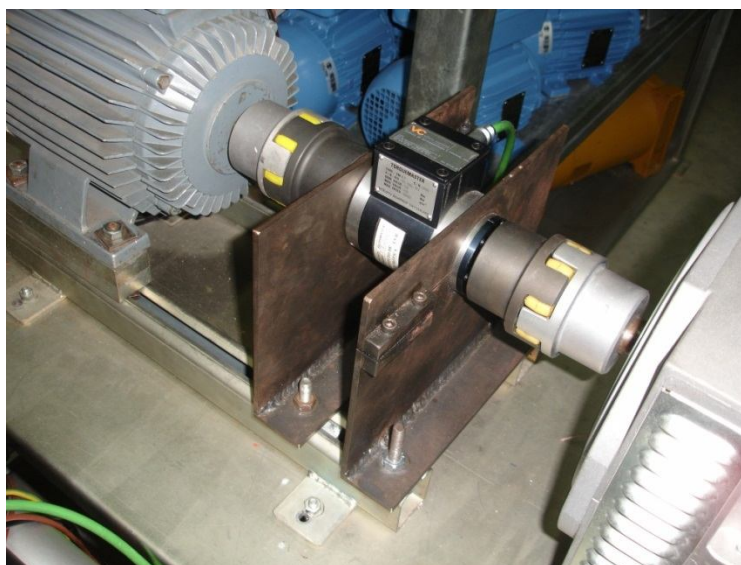


Figura 4.6 - Sensor de binário e velocidade

As leituras eram feitas com dois voltímetros a partir dos três contactos existentes na aparelhagem que se mostra de seguida:

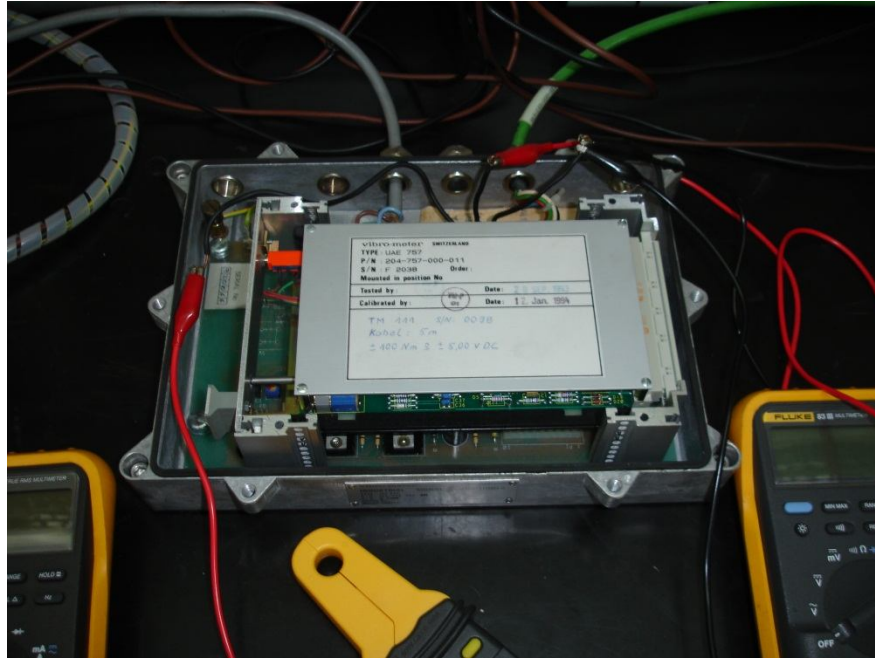


Figura 4.7 - Aparelhagem de aquisição de dados do sensor de binário/velocidade

A tensão medida nos multímetros era contínua. No cálculo da velocidade a leitura variava de 0 V a 1,500 V sendo que havia uma relação direta de 1V por cada 1000 rotações por minuto ou seja 1,5V corresponde a 1500 rotações por minuto. O binário era lido com outro voltímetro que também tinha uma leitura de tensão contínua. Neste caso 100 (N.m) de binário correspondem a 5 V no voltímetro ou seja 1V corresponde a 20 (N.m) .

Como carga do motor, foi acoplado ao motor, um gerador síncrono convencional que, por sua vez, alimentava um banco de resistências variáveis. A excitação do alternador foi realizada com fonte regulável e com possibilidade de se manter a tensão aos terminais do gerador no respectivo valor estipulado, 400V. O alternador está representado na figura seguinte.

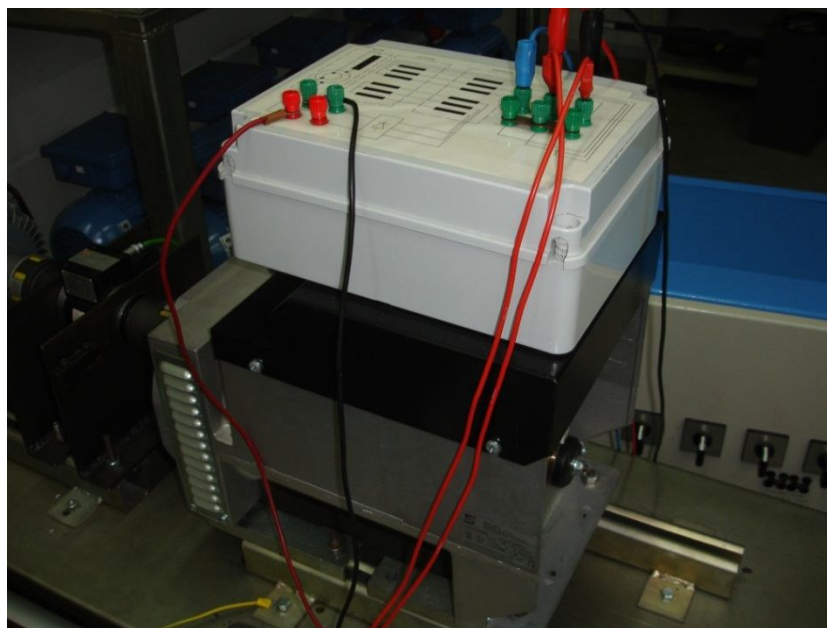


Figura 4.8 - Alternador

As características essenciais deste alternador são:

Tabela 4.3 - Características do alternador

Marca	Sincro
Modelo	FT4MAS
Número de Série	2251937
Tensão Estipulada	400 V (Y)
Potência Estipulada	7 kVA
Corrente Estipulada	10,1 A
Fator de Potência Estipulado	0,8 (i)
Frequência Estipulada	50 Hz
Velocidade Estipulada	1500 rot/min
Número de pólos	4

O banco de cargas óhmicas foi constituído por duas cargas de 4kW, de ligação em estrela ou triângulo, em trifásico.

O gerador apresenta ligações para ligar a excitação de tensão contínua do rotor e terminais para ligar carga trifásica e com neutro.

O sistema motor-gerador é o seguinte:

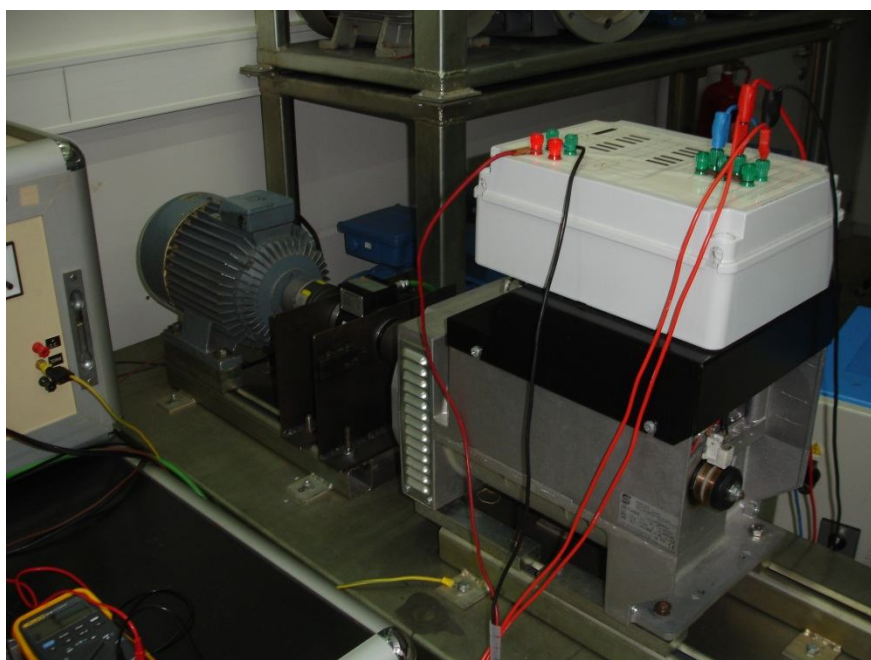


Figura 4.9 - Sistema Motor-Gerador

O autotransformador usado foi o seguinte:



Figura 4.10 - Autotransformador

Para fazer as medições a partir do autotransformador e como estamos a medir tensões entre fases usou-se uma ponta de prova diferencial de alta tensão que se mostra de seguida:



Figura 4.11 - Ponta diferencial de alta tensão

Usou-se a posição de leitura X500 com uma gama de máximo de entrada de 1.1kVrms/±1.7kVDC.

A fonte de tensão contínua utilizada foi a seguinte:



Figura 4.12 - Fonte de tensão contínua

A carga utilizada era de 4kW com possibilidade de regulação de carga mínima de 5% variado de 0 a 100%. Foi usada a seguinte carga:



Figura 4.13 - Carga de 4kW

A carga foi utilizada em modo trifásico com alimentação a 400V. Para definição da alimentação da carga em monofásico ou trifásico a carga possui quatro patilhas que se podem inserir ou remover para fazer o ajuste.

A banca de trabalho ficou com o seguinte aspeto:



Figura 4.14 - Banca de trabalho

Para medir a potência absorvida pelo motor utilizou-se Wattímetros analógicos. Estes possuem limites de tensão de alimentação de 120 V, 240 V e 480 V e limites de corrente de 12.5 A e de 25 A. Possuem 120 divisões de escala.

O voltímetro analógico para medir a tensão de alimentação do motor possui três escalas de medição de tensão sendo elas de 75 V, 300 V e 750 V. Usou-se a de 750V.

Para medição da corrente utilizou-se um amperímetro analógico com três escalas de corrente sendo elas de 5A, 10A e de 20A. Usou-se a de 20A.

Como é normal toda a aparelhagem de medida tem erros. O limite do erro num instrumento analógico é representado pelo índice de classe. O índice de classe é, em percentagem, o quociente entre o valor absoluto máximo do erro, suposto constante em toda a gama de medição, e o valor máximo da escala de medição isto é: $\delta_{\max} = i.c. \times \frac{V_{FE}}{100}$ em que i.c. é o índice de classe e V_{FE} é a tensão de fim de escala. O erro relativo máximo é: $\varepsilon_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{\text{leitura}} = i.c. \times V_{FE} / \text{leitura}$. [19] Para a medição de todas as grandezas neste trabalho experimental utilizou-se aparelhagem de medida analógica com índice de classe de 0,5. O índice de classe do sensor de binário e de velocidade vibro-meter é de 0,1. A precisão da escala de tensão contínua dos multímetros é de $\pm(0,05\%+3)$.

Para confirmar a forma de onda da tensão aplicada ao motor usou-se um osciloscópio que se mostra de seguida:



Figura 4.15 - Osciloscópio

A forma de onda da tensão visualizada para a alimentação do motor 1 era a seguinte:

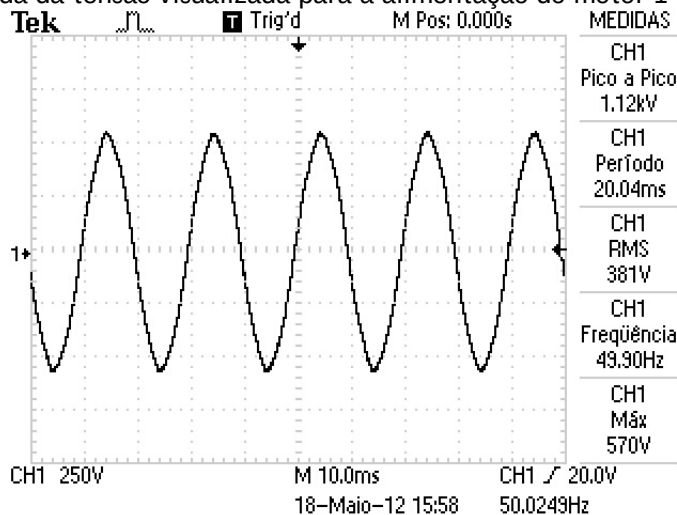


Figura 4.16 - Forma de onda do motor 1

Como se pode comprovar temos uma forma de onda sinusoidal com tensão de 381V composta tal como medido no voltímetro ligado ao autotransformador. A frequência é de 49,90 Hz muito próxima dos 50 Hz e por consequência o período é de 20,04 ms também muito próximo de 20 ms como seria de esperar.

A forma de onda da tensão visualizada para a alimentação do motor 2 era a seguinte:

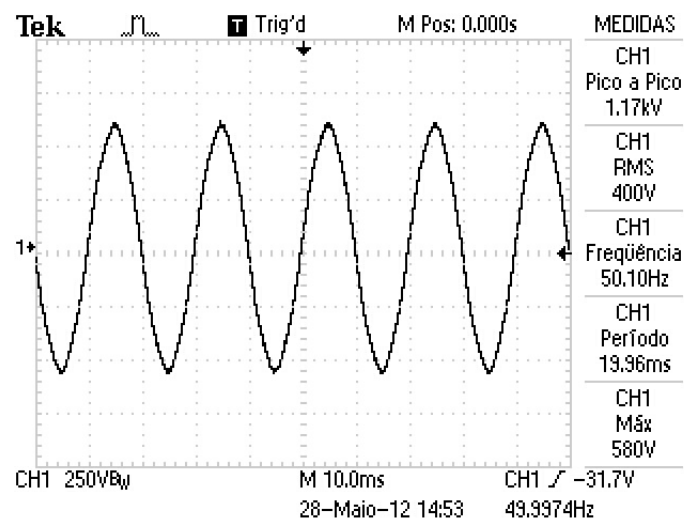


Figura 4.17 - Forma de onda do motor 2

Como se pode comprovar temos uma forma de onda sinusoidal com tensão de 400V composta tal como medido no voltímetro ligado ao autotransformador. A frequência é de 50,10 Hz muito próxima dos 50 Hz e por consequência o período é de 19,96 ms também muito próximo de 20 ms como seria de esperar.

O gráfico da análise dos harmônicos presentes na rede pode ser visualizada na seguinte imagem:

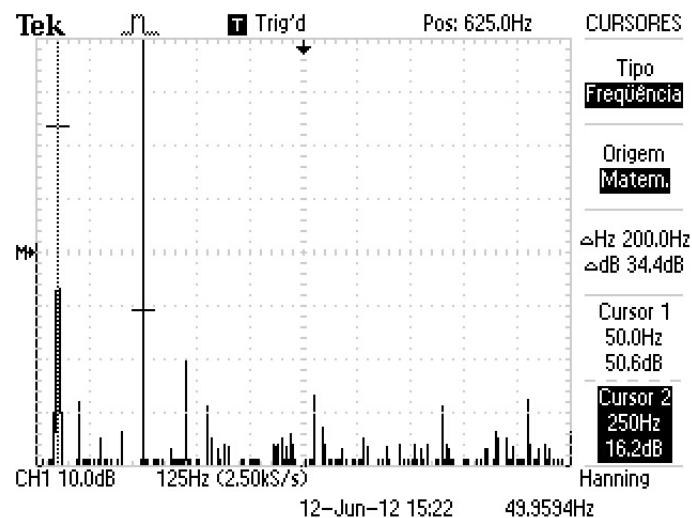


Figura 4.18 - Análise de Harmônicos 1

Ou seja o harmónico fundamental de 50 Hz possui um ganho de 50.6 dB(trazo vertical tracejado) com valor base de tensão de 1,18 e o harmónico de ordem 5 de 250 Hz possui um ganho de 16.2 dB(trazo vertical contínuo).

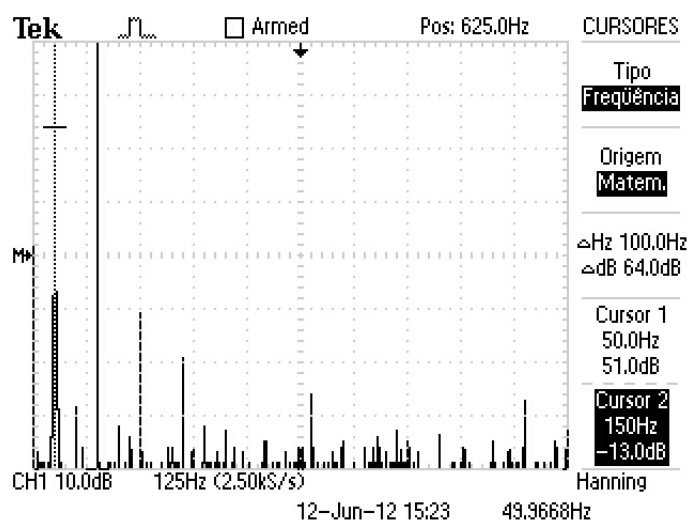


Figura 4.19 - Análise de Harmónicos 2

Quanto ao harmónico de ordem 3 de 150 Hz o ganho é de -13.0 dB.

4.3 - Ensaios preliminares

Começamos por realizar ensaios de aquecimento dos motores, com vista à caracterização do comportamento térmico dos mesmos, para se garantirem as condições de aquecimento necessárias durante os ensaios em carga seguintes.

A avaliação de aquecimento seguiu a norma 60034-2-1, recorrendo-se à medida de resistência entre fases estatóricas por dois processos independentes ohmímetro (multímetro em modo ohmímetro) e método voltímetro-amperímetro, com a montagem na figura seguinte:

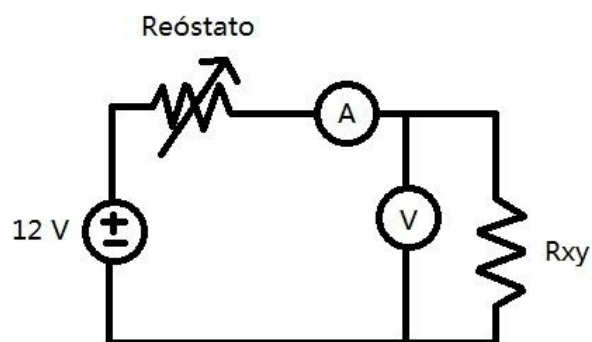


Figura 4.20 - Montagem de curta derivação para método voltímetro-amperímetro

Os ensaios de aquecimento foram conduzidos por tempo prolongado (1,5 horas para motor 1 e 2 horas para motor 2) tendo-se garantido que o equilíbrio térmico havia sido alcançado

através de duas medidas consecutivas, intervaladas de 10 minutos em que não variou a temperatura registrada.

Durante os ensaios, os motores foram mantidos com alimentação e carga nominal.

Destes ensaios, conclui-se:

Motor 1

Resistência entre pares de terminais a frio ($T_{amb} = 21,5\text{ °C}$): $R_{FF(M1)} = 3,2\ \Omega$.

Resistência entre pares de terminais após estabilização de temperatura: $R_{QQ(M1)} = 3,8\ \Omega$.

Motor 2

Resistência entre pares de terminais a frio ($T_{amb} = 23,5\text{ °C}$): $R_{FF(M2)} = 2,2\ \Omega$.

Resistência entre pares de terminais após estabilização de temperatura: $R_{QQ(M2)} = 2,6\ \Omega$.

Analisando estes valores conclui-se:

- (i) O motor 2 (Weg de alto rendimento) possui uma resistência estatórica mais baixa, o que seria de esperar com vista à redução das perdas Joule no estator.
- (ii) Utilizando a expressão normalizada:

$$R^{(T2)} = [(\alpha + T^{(2)}) / (\alpha + T^{(1)})] * R^{(T1)} \quad (4.1)$$

E considerando $\alpha = 235$, pois os enrolamentos do estator são em cobre, calcula-se as temperaturas médias estatóricas de ambos os motores em equilíbrio, à plena carga:

$$T_{f(M1)} = 69,59\text{ °C}$$

$$T_{f(M2)} = 58,73\text{ °C}$$

Repare-se também aqui que o motor 2 possui uma temperatura de funcionamento menor, o que condiz com a classificação térmica assinalada na chapa de características. Como já se disse, o motor é de classe de isolamento F, com aquecimento compatível com classe B (80K).

4.4 - Condições dos ensaios

Todos os ensaios decorreram a quente ou seja depois de o motor ter estado a trabalhar durante tempo suficiente à plena carga para permitir que os resultados dos testes fossem o mais próximo das condições normais de operação dos motores. Os testes foram realizados com cargas decrescentes, partindo-se de um regime de sobrecarga.

4.5 - Ensaio em carga com alimentação sinusoidal a 50Hz (A)

• Motor Efacec

Realizou-se a montagem já antes apresentada na figura 4.3 com o motor ligado em triângulo e ligou-se o autotransformador. Fez-se subir lentamente a tensão para termos uma baixa corrente de arranque e fixou-se a tensão de alimentação do motor nos 380V.

Deixou-se o motor a funcionar durante cerca de hora e meia à plena. O banco de cargas óhmicas foi constituído por duas unidades de 4kW de maneira a termos a possibilidade de colocar o motor em sobrecarga. Mediu-se os valores tensão, da potência e corrente absorvida pelo motor e os valores de velocidade e binário do motor.

Começou-se a fazer as medições com o motor em sobrecarga. Procurou-se começar a apontar valores com uma carga próxima de 125% e depois foi-se descendo a carga.

Os resultados obtidos foram organizados em colunas com as seguintes designações: carga, em percentagem, corresponde à razão entre a potência mecânica desenvolvida e a potência nominal do motor; binário, que corresponde ao valor medido no sensor; velocidade, que corresponde às rotações por minuto do veio do motor; potência de entrada que corresponde à potência absorvida pelo motor, potência de saída que corresponde à potência mecânica desenvolvida pelo motor; rendimento, que corresponde à razão entre a potência de saída do motor e a potência de entrada; corrente, que corresponde à corrente absorvida pelo motor. Os dados registados podem ser visualizados na seguinte tabela:

Tabela 4.4 - Dados registados do Motor 1

Carga (%)	Binário (N.m)	Velocidad e (rpm)	Potência Entrada (W)	Potência Saída (W)	Rendimento	Corrente (I)
133,50	37,8	1349	7350	5339,8907	72,65	13,5
124,63	34,8	1368	6500	4985,3306	76,69	11,9
103,87	28,34	1400	5075	4154,8610	81,86	9,8
91,77	24,72	1418	4475	3670,7374	82,02	8,8
74,54	19,8	1438	3650	2981,6228	81,68	7,6
62,60	16,48	1451	3100	2504,1090	80,77	6,8
51,05	13,32	1464	2550	2042,0855	80,08	6,2
39,52	10,24	1474	2000	1580,6149	79,03	5,6
28,58	7,36	1483	1550	1143,0036	73,74	5,2
17,50	4,48	1492	1050	699,9636	66,66	4,9
6,3	1,6	1499	700	251,1599	35,88	4,8
0	0	1500	500	0	0	4,6

A potência de Saída foi calculada através da seguinte equação $P = T \times w$, em que T é o binário desenvolvido em (N.m) e w a velocidade angular em (rad/s) que é dada pela seguinte equação: $w = 2 \times \pi \times n / 60$, em que n é a velocidade de rotação por minuto do motor.

Através dos dados, obteve-se a seguinte curva de rendimento do motor:

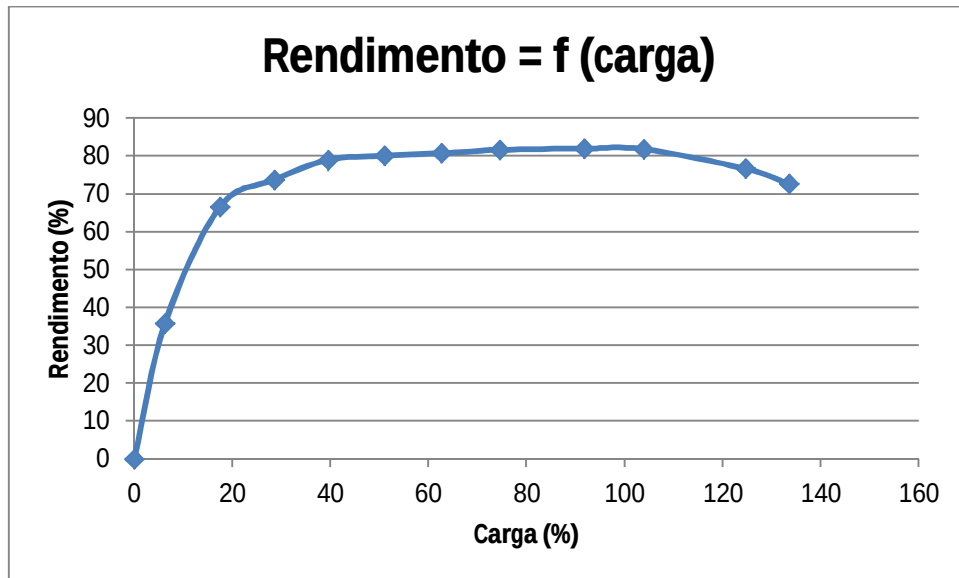


Figura 4.21 - Rendimento = f (carga) - Motor 1

Pode-se concluir pelo gráfico que, tal como o previsto, o rendimento com carga reduzida é baixo e a cerca de 30% o rendimento começa a ser muito próximo do rendimento nominal calculado 81,86%. Para cargas superiores a 100% o rendimento torna a baixar chegando a cerca de 70 % a 125% de carga.

Em seguida mostra-se o gráfico da variação do fator de potência:

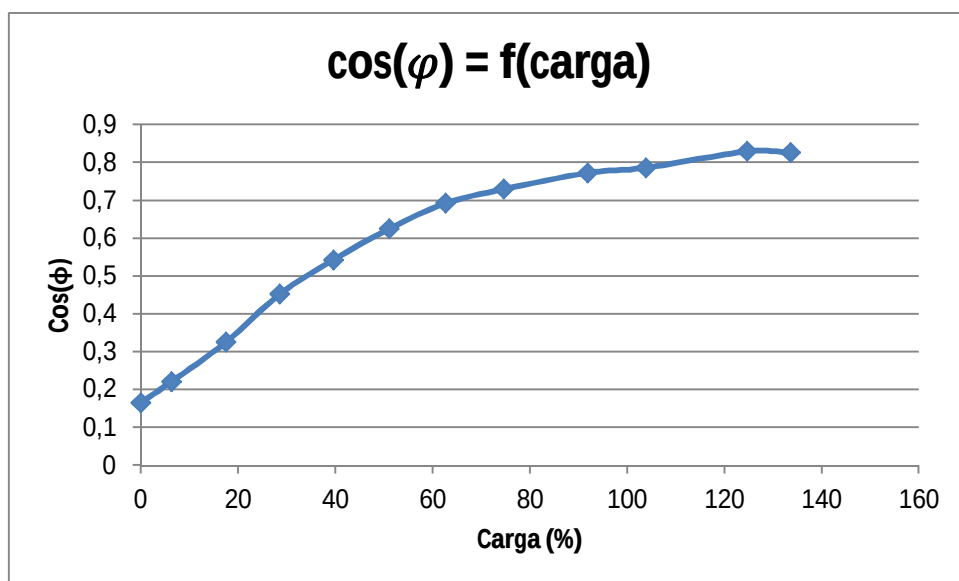


Figura 4.22 - $\cos(\phi) = f(\text{carga})$ - Motor 1

Como seria de esperar, o fator de potência ($\cos(\varphi)$) ou seja a relação entre a potência ativa e a potência aparente toma valores sempre crescentes com a carga. Quer isto dizer que a fração de potência ativa consumida pelo motor em relação à potência aparente é sempre crescente.

A variação da corrente absorvida em função da carga é a seguinte:

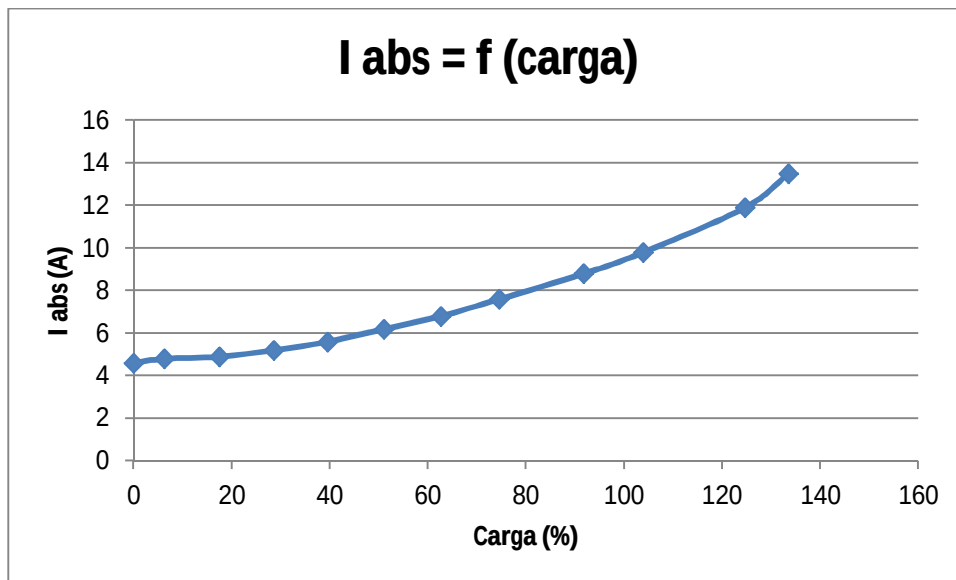


Figura 4.23 - Corrente absorvida = $f(\text{carga})$ - Motor 1

A corrente absorvida é sempre crescente com a carga no entanto para cargas baixas a corrente sobe pouco mantendo-se próxima dos 5 A até cerca de 30%.

A potência de entrada ou seja a potência absorvida pelo motor em função da carga conduz-nos ao seguinte gráfico:

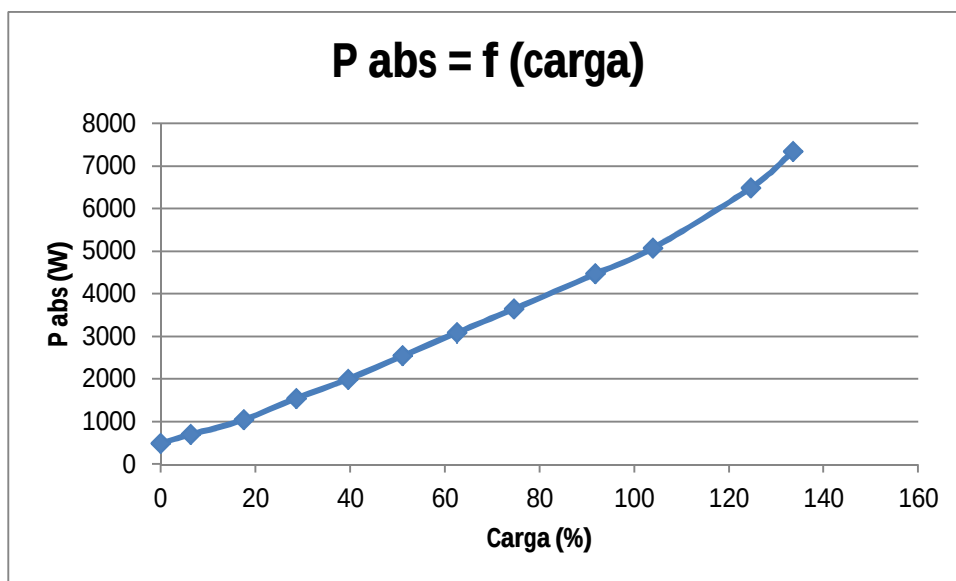


Figura 4.24 - Potência absorvida = $f(\text{carga})$ - Motor 1

A potência absorvida em função da carga também é sempre crescente, necessariamente.

O binário em função da velocidade conduz-nos ao seguinte gráfico:

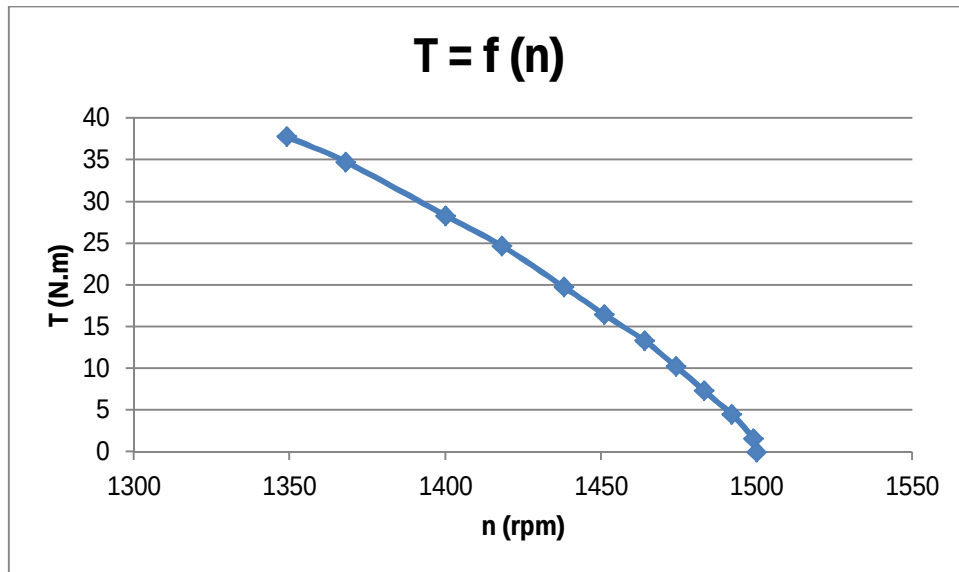


Figura 4.25 - T = f(n) - Motor 1

Como se trata de um motor de indução, a velocidade decresce com a carga ou seja diminui a velocidade e aumenta o binário. Conclui-se que o binário é 0 para uma situação sem carga obtendo-se velocidade de quase 1500 rpm. Quando se aumenta a carga ou seja reduz a velocidade, o binário aumenta de uma forma aproximadamente linear até quase cerca de 40 (N.m).

A relação entre a potência absorvida e potência mecânica pode ser visualizada no seguinte gráfico:

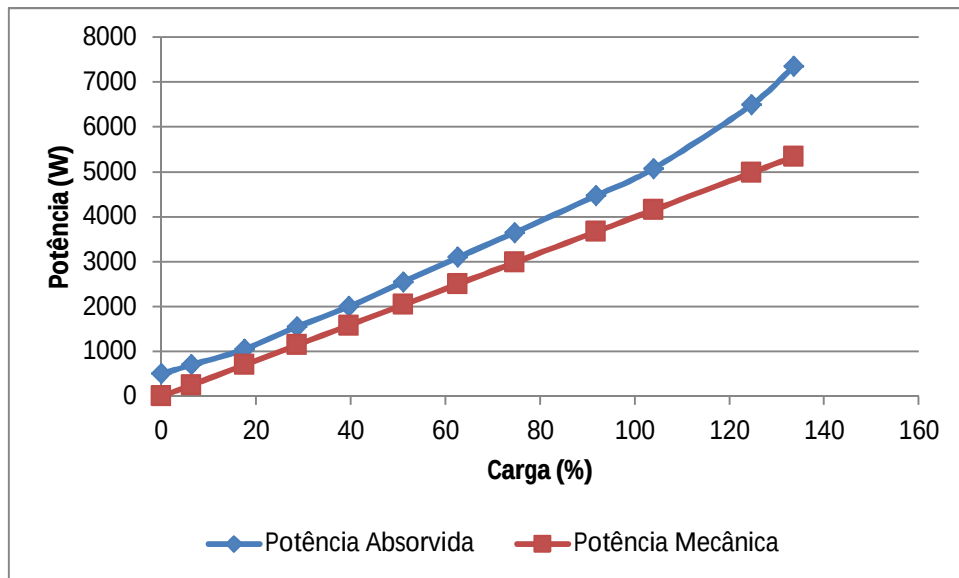


Figura 4.26 - Relação entre potência absorvida/mecânica - Motor 1

Como se pode verificar e como seria de esperar a potência absorvida é sempre superior à potência mecânica e a diferença entre estas duas também é crescente. Quanto maior é a carga maior é a diferença entre estas. A potência mecânica é aproximadamente constante sendo que a potência absorvida tem uma tendência quadrática, devido às perdas.

- **Motor Weg**

Realizou-se de novo a montagem apresentada na figura 4.3, com o motor ligado em triângulo e ligou-se o autotransformador. Fez-se subir lentamente a tensão para termos uma baixa corrente de arranque e fixou-se a tensão de alimentação do motor nos 400V.

Deixou-se o motor a funcionar durante cerca de duas horas à plena carga. Tal como no caso anterior, o banco de cargas óhmicas inclui dois módulos de 4kW de maneira a termos a possibilidade de colocar o motor em sobrecarga. Mediu-se os valores tensão, da potência e corrente absorvida pelo motor e os valores de velocidade e binário do motor.

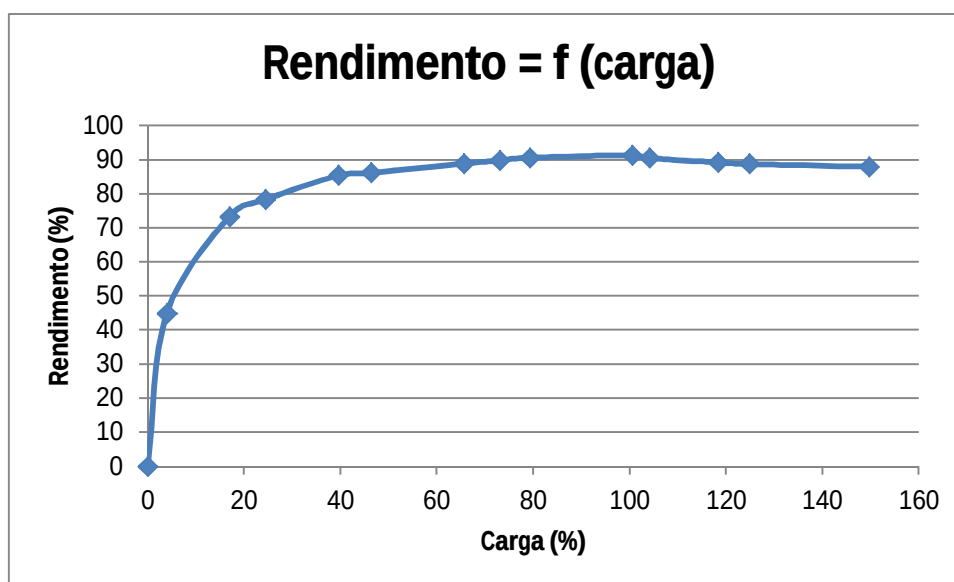
Começou-se a fazer as medições com o motor em sobrecarga. Procurou-se começar a apontar valores com uma carga próxima de 150% e depois foi-se descendo a carga.

Os resultados obtidos foram organizados em colunas com as seguintes designações: carga, em percentagem, corresponde à razão entre a potência mecânica desenvolvida e a potência nominal do motor; binário, que corresponde ao valor medido no sensor; velocidade, que corresponde às rotações por minuto do veio do motor; potência de entrada que corresponde à potência absorvida pelo motor, potência de saída que corresponde à potência mecânica desenvolvida pelo motor; rendimento, que corresponde à razão entre a potência de saída do motor e a potência de entrada; corrente, que corresponde à corrente absorvida pelo motor. Os dados registados podem ser visualizados na seguinte tabela:

Tabela 4.5 - Dados registados do Motor 2

Carga (%)	Binário (N.m)	Velocidade (rpm)	Potência Entrada (W)	Potência Saída (W)	Rendimento	Corrente (I)
149,62	38,1	1500	6800	5984,7340	88,01	11,2
124,88	31,8	1500	5625	4995,1323	88,80	9,2
118,28	30,12	1500	5300	4731,2385	89,27	8,6
104,14	26,52	1500	4600	4165,7519	90,56	7,5
100,53	25,6	1500	4400	4021,2386	91,39	7,15
79,33	20,2	1500	3500	3173,0086	90,66	5,8
73,04	18,6	1500	3250	2921,6812	89,90	5,4
65,58	16,7	1500	2950	2623,2299	88,92	5
46,34	11,8	1500	2150	1853,5397	86,21	4,4
39,51	10,06	1500	1850	1580,2211	85,42	4
24,50	6,24	1500	1250	980,1769	78,41	4
16,96	4,32	1500	925	678,5840	73,36	4
3,93	1	1500	350	157,0796	44,88	4
0	0	1500	250	0	0	4

O gráfico de rendimento do motor pode ser visualizado no seguinte gráfico:

**Figura 4.27 - Rendimento = f (carga) - Motor 2**

Comparando com o rendimento do motor 1 conclui-se que o rendimento para cargas reduzidas é superior neste motor 2. A cerca de 30% de carga temos um rendimento próximo dos 80% e a 100% de carga o rendimento atinge os cerca de 91%. A partir de cerca dos 30% de carga o gráfico toma uma forma praticamente plana com os valores de rendimento a variarem muito pouco. O fator de potência do motor é o que se visualiza no seguinte gráfico:

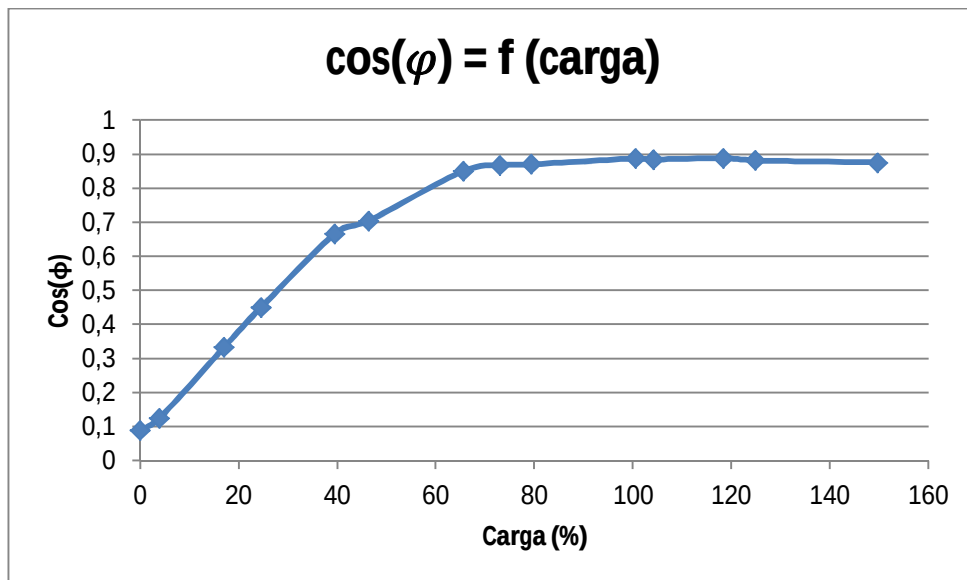


Figura 4.28 - $\cos(\varphi) = f(\text{carga})$ - Motor 2

O fator de potência neste tipo de motores é sempre crescente até cerca dos 100%. Depois estabiliza e, em sobrecarga, decresce um pouco. Nos motores síncronos de alto rendimento este é um aspeto característico. A corrente absorvida pelo motor é a seguinte:

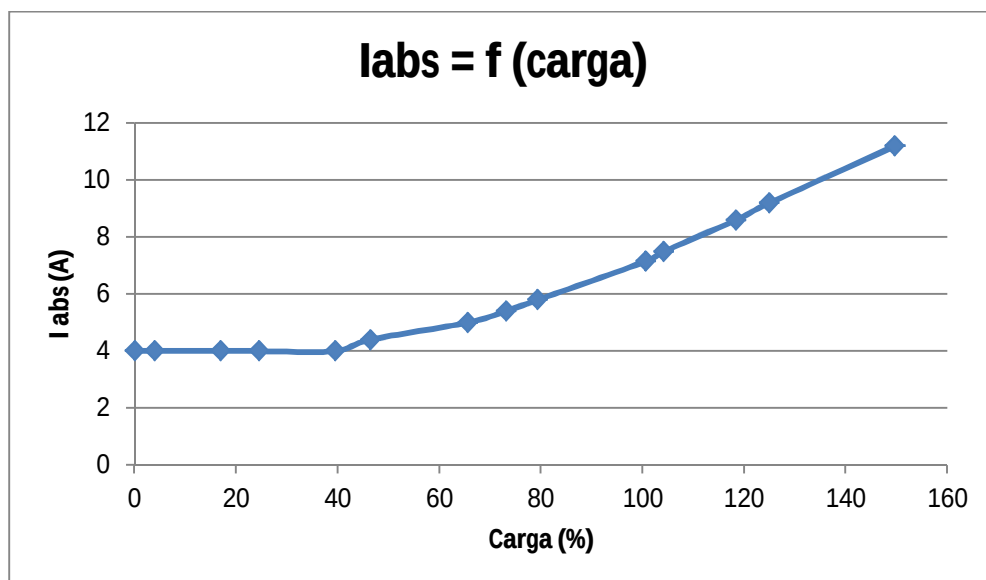


Figura 4.29 - Corrente absorvida = $f(\text{carga})$ - Motor 2

A corrente absorvida é próxima dos 4 A e até cerca dos 50% de carga mantém-se constante, depois desse valor é crescente linearmente até à sobrecarga.

A potência absorvida pelo motor foi a seguinte:

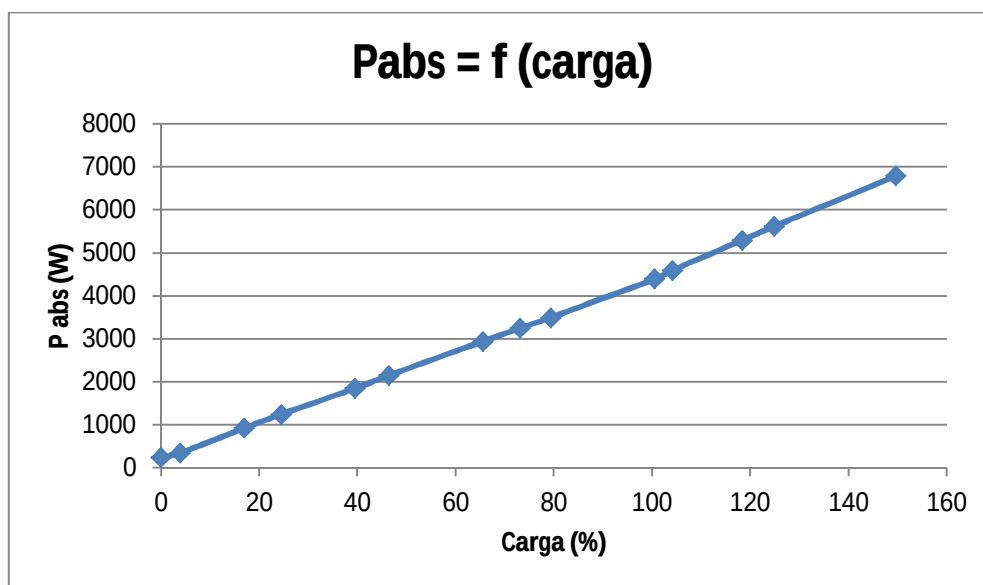


Figura 4.30 - Potência absorvida = f (carga) - Motor 2

A potência absorvida é sempre linearmente crescente.

O binário em função da carga aumenta com a carga mas mantém-se constante em 1500 rpm pois trata-se de um motor síncrono como se pode comprovar pela seguinte figura:

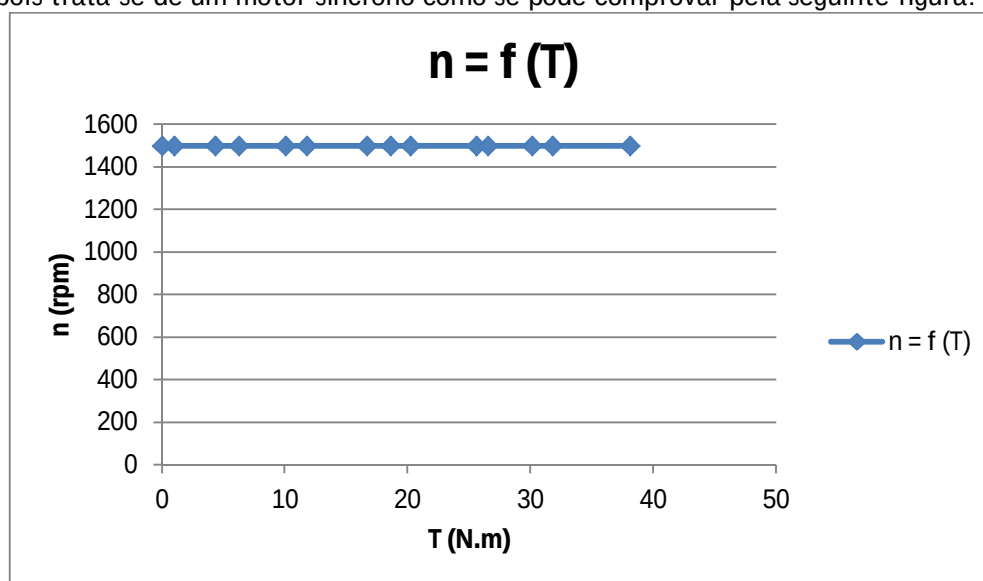


Figura 4.31 - $n = f(T)$ - Motor 2

Ou seja o binário aumenta com a carga mas a velocidade mantém-se constante em 1500 rpm.

A relação entre a potência absorvida e mecânica do motor é a seguinte:

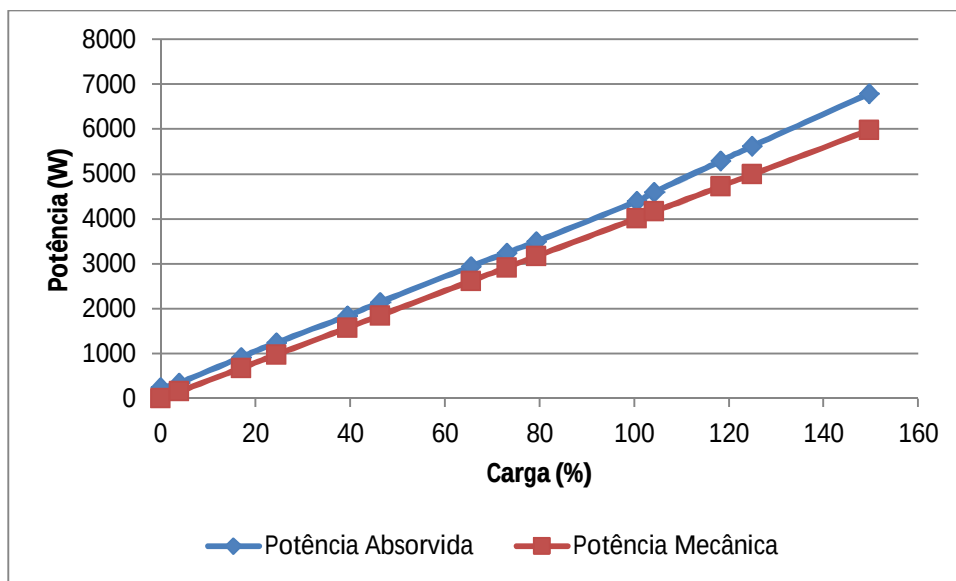


Figura 4.32 - Relação entre potência absorvida/mecânica - Motor 2

Como seria de esperar, a potência absorvida pelo motor é superior à potência mecânica e a diferença entre elas aumenta com a carga. A potência mecânica é crescente e linear enquanto que a potência absorvida tem uma pequena tendência quadrática devido às perdas Joule.

4.6 - Ensaio em carga com alimentação com VEV a 50 Hz (B)

Realizou-se de novo a montagem com o VEV com o motor ligado em triângulo e ligou-se o variador eletrónico de velocidade (VEV). O motor arrancou e a tensão de alimentação medida com o voltímetro foi de 420 V.

Como antes, deixou-se o motor a funcionar durante cerca de duas horas à plena carga. A carga do gerador manteve os dois módulos de 4kW de maneira a termos a possibilidade de colocar o motor em sobrecarga. Mediu-se os valores tensão, da potência e corrente absorvida entre o VEV e o motor e os valores de velocidade e binário do motor.

Começou-se a fazer as medições com o motor em sobrecarga. Procurou-se começar a apontar valores com uma carga próxima de 150% e depois foi-se descendo a carga

Os resultados obtidos foram organizados em colunas com as seguintes designações: carga, em percentagem, corresponde à razão entre a potência mecânica desenvolvida e a potência nominal do motor; binário, que corresponde ao valor medido no sensor; velocidade, que corresponde às rotações por minuto do veio do motor; potência de entrada que corresponde à potência absorvida pelo motor, potência de saída que corresponde à potência mecânica desenvolvida pelo motor; rendimento, que corresponde à razão entre a potência de saída do

motor e a potência de entrada; corrente, que corresponde à corrente absorvida pelo motor. Os dados registados podem ser visualizados na seguinte tabela:

Tabela 4.6 - Dados Registados do Motor 2 com VEV

Carga (%)	Binário (N.m)	Velocidade (rpm)	Potência Entrada (W)	Potência Saída (W)	Rendimento	Corrente (I)
160,22	40,8	1500	7400	6408,8490	86,61	12,3
135,25	34,44	1500	6200	5409,8225	87,26	10,1
118,91	30,28	1500	5400	4756,3713	88,08	8,8
101,16	25,76	1500	4550	4046,3713	88,93	7,3
82,86	21,1	1500	3750	3314,3802	88,38	6,2
59,85	15,24	1500	2750	2393,8936	87,05	4,8
47,99	12,22	1500	2200	1919,5131	87,25	4,4
36,76	9,36	1500	1750	1470,2654	84,01	4,2
26,00	6,62	1500	1350	1039,8672	77,03	4
20,34	5,18	1500	1250	813,6725	65,09	3,8
9,42	2,4	1500	850	376,9911	44,35	4
3,93	1	1500	600	157,0796	26,18	4
0	0	1500	250	0	0	4

Os dados conduzem-nos ao seguinte rendimento:

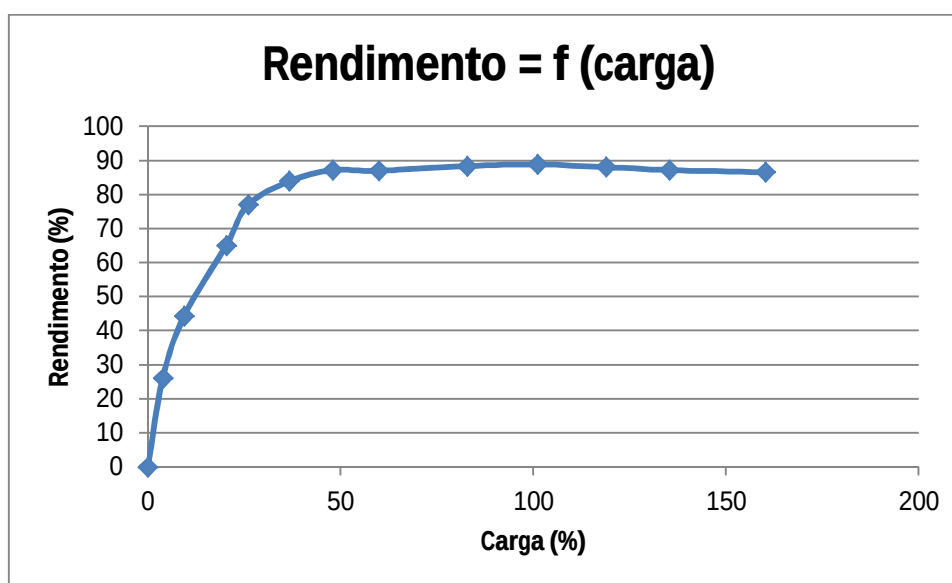


Figura 4.33 - Rendimento = f (carga) Motor 2 VEV

Comparando com o rendimento com alimentação com auto transformador conclui-se que o motor alimentado com o VEV apresenta rendimento inferior. O rendimento aumenta de uma maneira aproximadamente linear até 50 % de carga atingindo cerca de 85% e mantém-se

aproximadamente retilíneo até atingir os 90% de rendimento. A partir do regime de sobrecarga o rendimento desce. Com este método de alimentação não se consegue subir a barreira dos 90% de rendimento.

O fator de potência tem o seguinte gráfico:

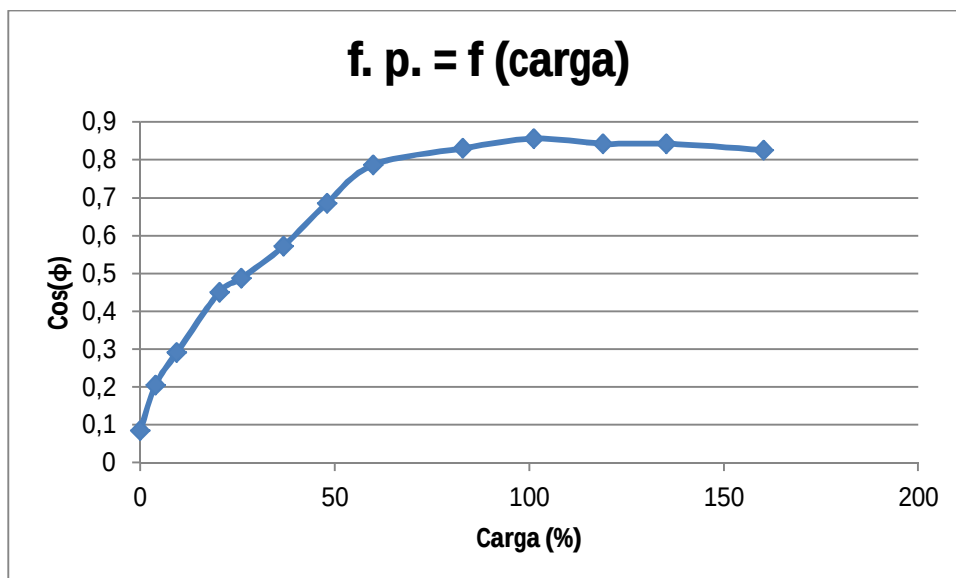


Figura 4.34 - f. p. = f (carga) - Motor 2 VEV

Tal como na alimentação com o auto transformador também com o VEV o fator de potência cresce até cerca dos 75% depois mantém-se constante perto dos 100% em 0,85 e depois no regime de sobrecarga decresce um pouco.

A corrente absorvida foi a seguinte:

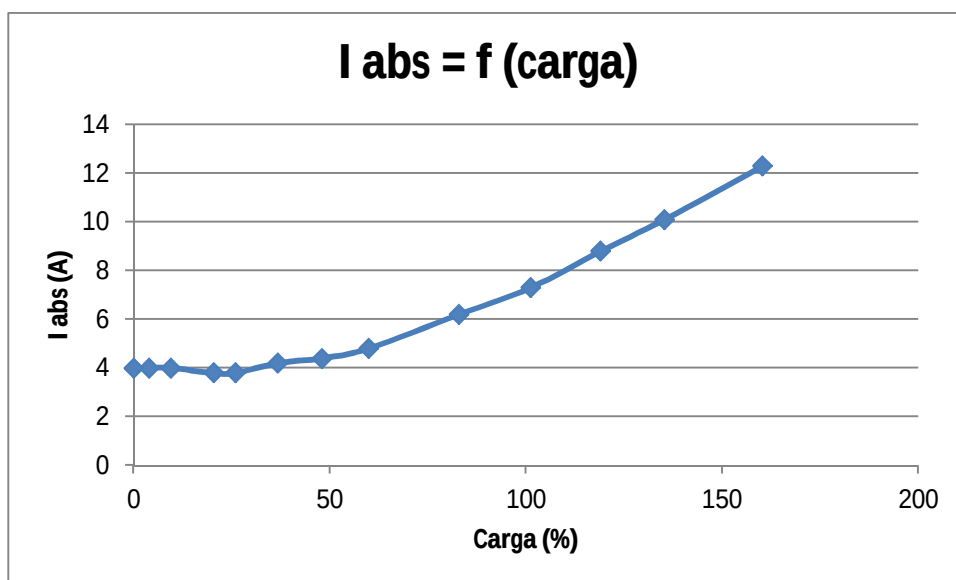


Figura 4.35 - Corrente absorvida = f (carga) - Motor 2 VEV

A corrente absorvida pelo motor inicia-se próxima dos 4 A sem carga, decresce um pouco a 25% de carga e depois volta a subir atingindo cerca de 12 A com sobrecarga de 150%.

A potência absorvida foi a seguinte:

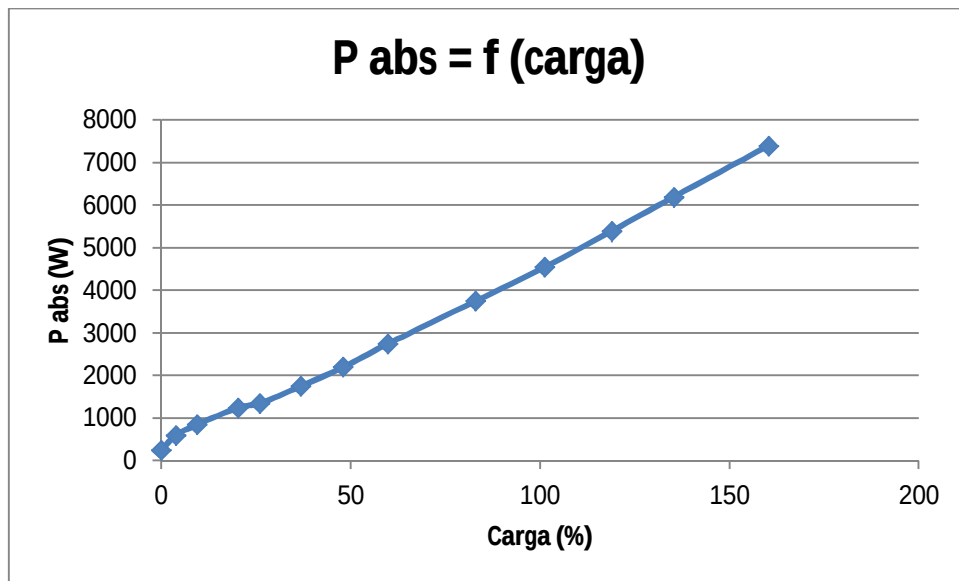


Figura 4.36 - Potência absorvida = f (carga) - Motor 2 VEV

A potência absorvida é crescente de uma forma linear como seria de esperar.

O binário observado em função da velocidade foi o seguinte:

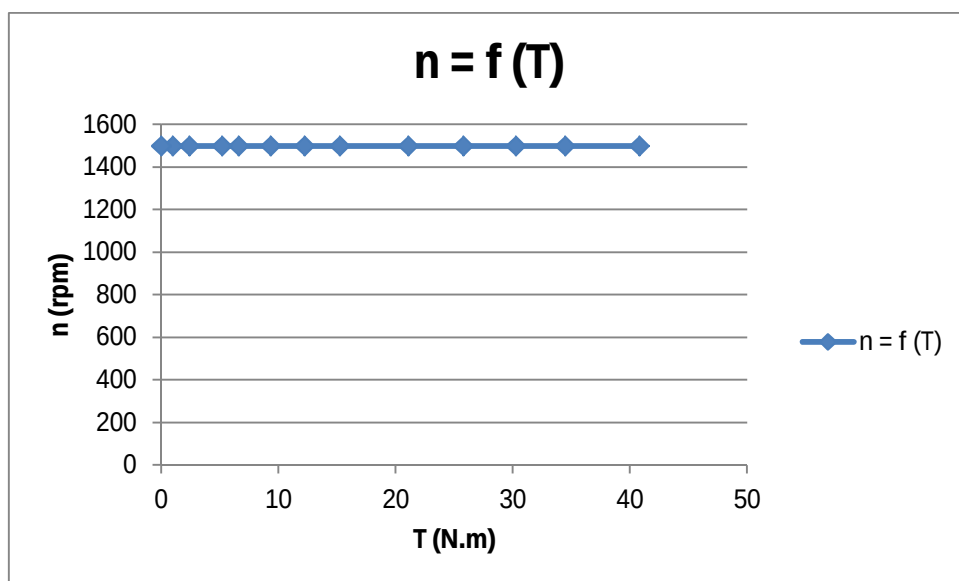


Figura 4.37 - n = f (T) - Motor 2 VEV

Tal como anteriormente o binário aumenta com a carga mas a velocidade mantém-se nas 1500 rpm.

A relação entre a potência absorvida pelo motor e a potência mecânica é a seguinte:

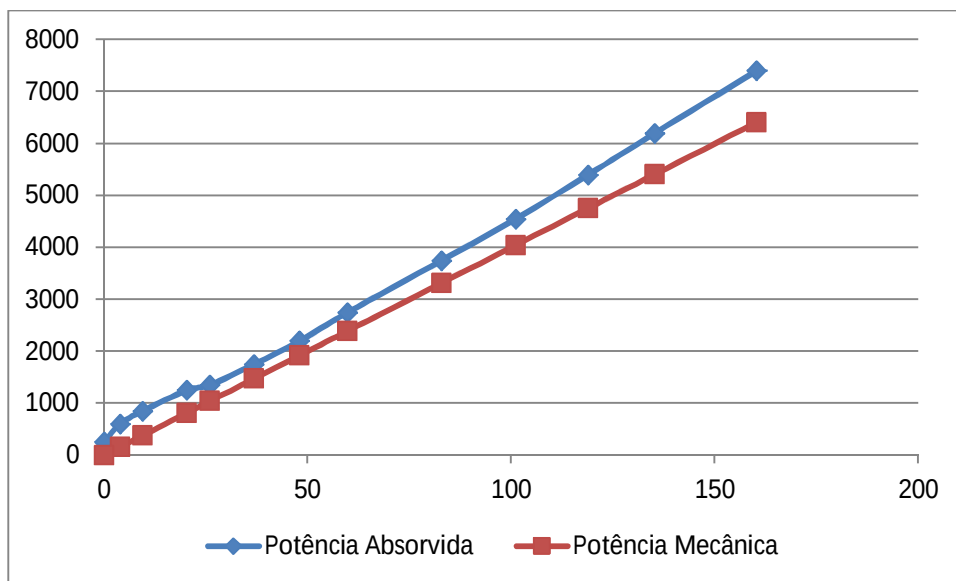


Figura 4.38 - Relação entre potência absorvida/mecânica - Motor 2 VEV

Tal como anteriormente a potência absorvida pelo motor é superior à potência mecânica e a diferença entre elas aumenta com a carga. A potência Mecânica é crescente e linear enquanto a potência absorvida tem uma pequena tendência quadrática.

4.7 - Comparação geral entre os motores / análise crítica

- Comparação de rendimento entre os dois motores

Através das características dos motores pode-se calcular o seu rendimento anunciado nominal. Conclui-se os seguintes valores:

Cálculo do rendimento função das características do motor EFACEC:

$$P = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \times \cos(\varphi) \quad (4.1)$$

$$P_{\text{nominal}} = 4000$$

$$P/P_{\text{nominal}} = 0.816$$

$$\text{Rendimento} = 0.816 = \mathbf{81,6\%}$$

Cálculo do rendimento função das características do motor WEG:

$$P = \sqrt{3} \times U_n \times I_n \times \cos(\varphi) \quad (4.2)$$

$$P_{\text{nominal}} = 4000$$

$$P/P_{\text{nominal}} = 0.917$$

$$\text{Rendimento} = 0.917 = \mathbf{91.7\%}$$

Os valores obtidos através das experiências laboratoriais permitiram-nos chegar aos seguintes resultados de rendimento nominais através de interpolação:

Rendimento para o motor EFACEC: **81.91%**

Rendimento para o motor WEG: **91.37%**

Tabela 4.7 - Valores de rendimento anunciado e determinado

	Rendimento Nominal	Rendimento Calculado	Variação absoluta (Δ)	Variação relativa (%)
Motor 1	81,6	81,91	0,31	0,38 %
Motor 2	91,7	91,37	0,33	0,36 %

Conclui-se que a variação entre o rendimento nominal calculado através das chapas de características e o rendimento calculado em laboratório é muito reduzido como se pode constatar da tabela 4.7 anterior.

No seguinte gráfico podemos analisar o rendimento do motor de indução e do motor síncrono de ímanes permanentes quando alimentados ambos com autotransformador:

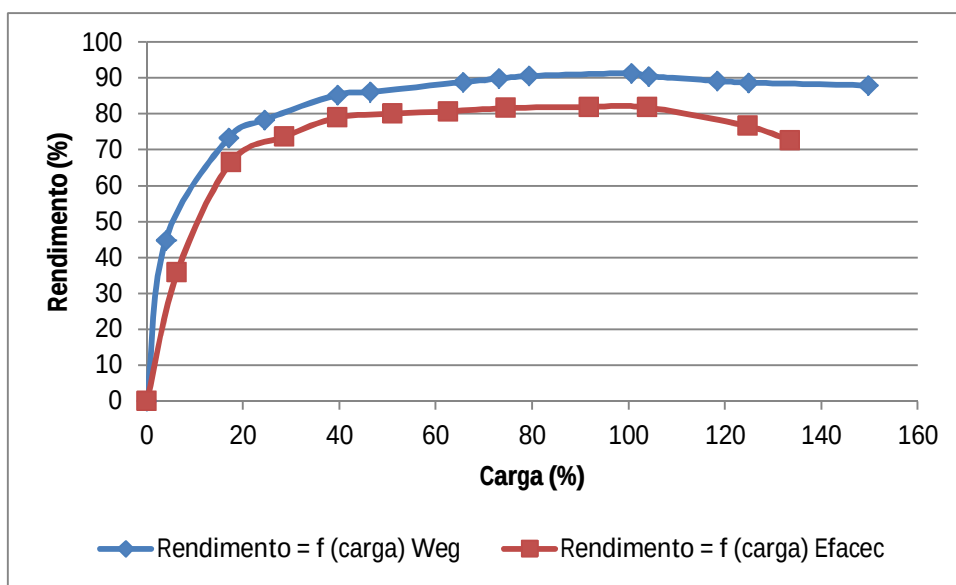


Figura 4.39 - Rendimento = f (carga) - Comparação

Conclui-se que o rendimento do motor Weg é sempre superior qualquer que seja o regime de carga.

- Comparação de $\cos(\varphi)$ entre os dois motores

O gráfico que demonstra a relação entre o $\cos(\varphi)$ dos dois motores é o seguinte:

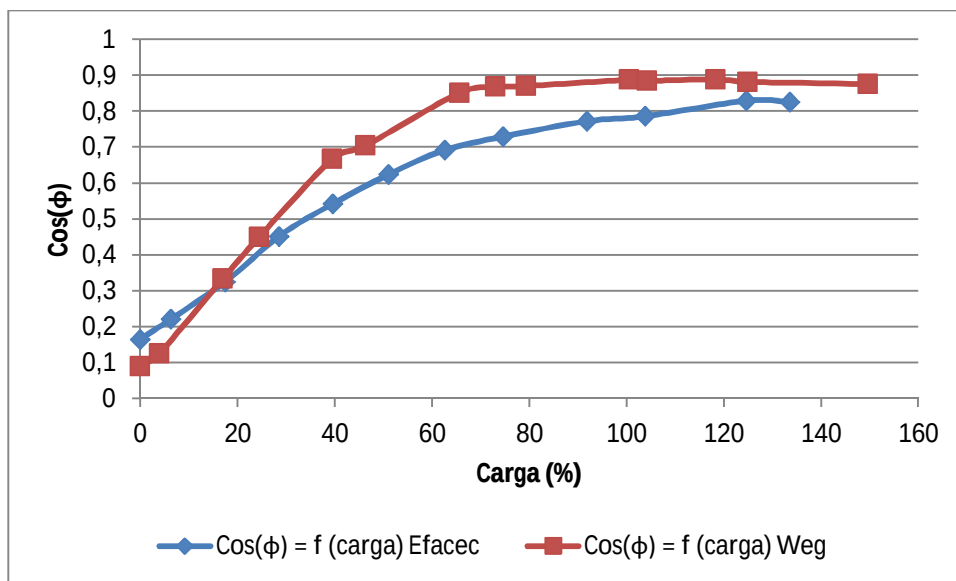


Figura 4.40 - $\cos(\phi) = f(\text{carga})$ - Comparação

Pode-se concluir através da análise do gráfico que o valor do fator de potência até cerca de 25% de carga é superior no motor da Efacec. No entanto depois deste valor o fator de potência do motor da Weg é sempre superior. É crescente até cerca dos 80 % e depois mantém-se constante. No caso do motor da Efacec segue uma tendência sempre crescente.

- Comparação de corrente absorvida entre os dois motores

A corrente absorvida entre os dois motores pode ser visualizada no seguinte gráfico:

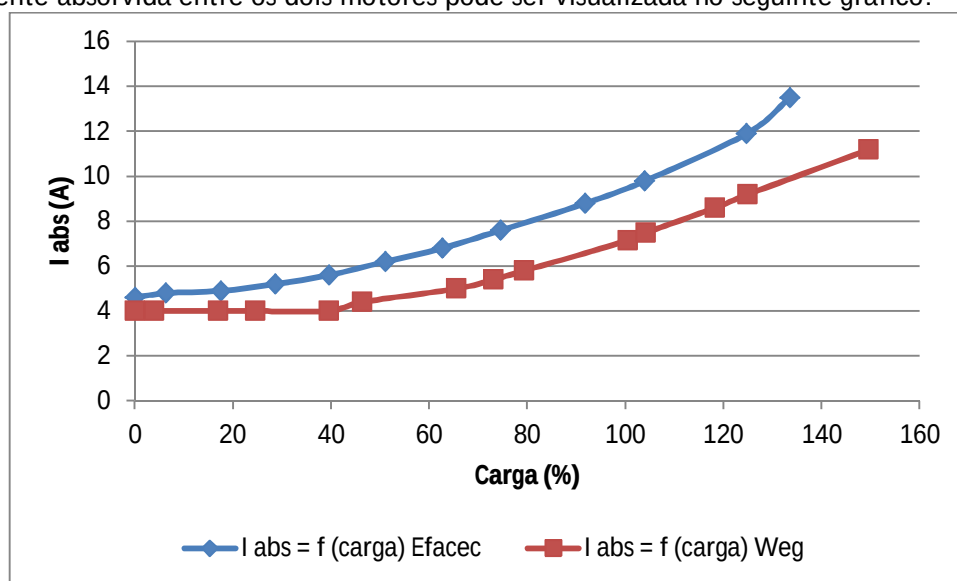


Figura 4.41 - Corrente absorvida = $f(\text{carga})$ - Comparação

Conclui-se que a corrente absorvida no caso do motor da Efacec é sempre superior à corrente absorvida pelo motor da Weg. Para cargas reduzidas o motor da Weg mantém a

corrente absorvida constante e começa a subir em cerca de 50%. No caso do motor da Efacec a corrente segue uma tendência crescente.

- Comparação de potência absorvida entre os dois motores

A potência absorvida pelos dois motores é a que consta no seguinte gráfico:

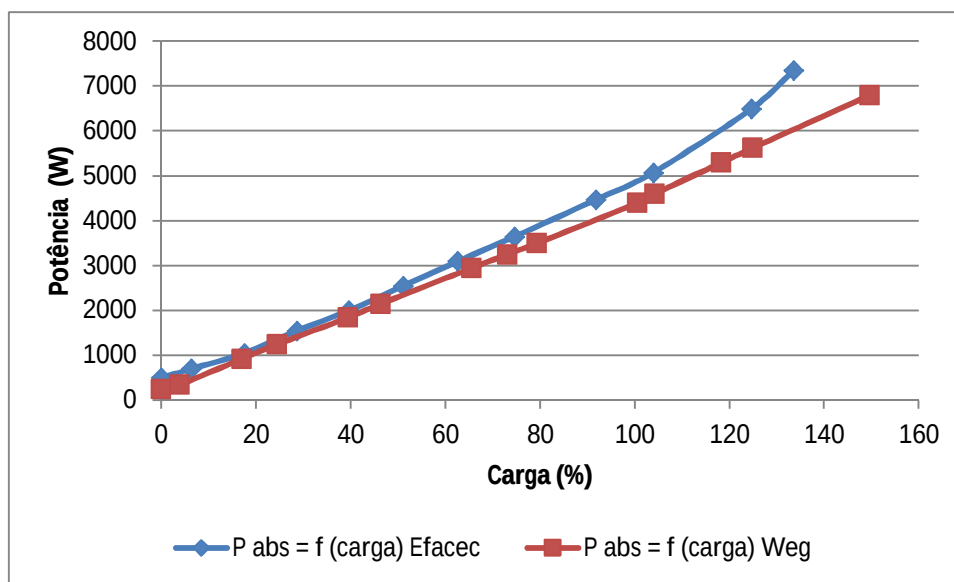


Figura 4.42 - Potência absorvida = f (carga) - Comparação

Pode-se concluir que a potência consumida pelo motor é sempre superior no caso do motor da Efacec. No caso do motor da Weg a potência absorvida é aproximadamente linear enquanto que no caso do motor da Efacec tem uma tendência exponencial.

- Comparação da folha de características do motor Weg com os cálculos experimentais efetuados

Em seguida mostra-se a curva de rendimento do motor Weg segundo a sua folha de características:

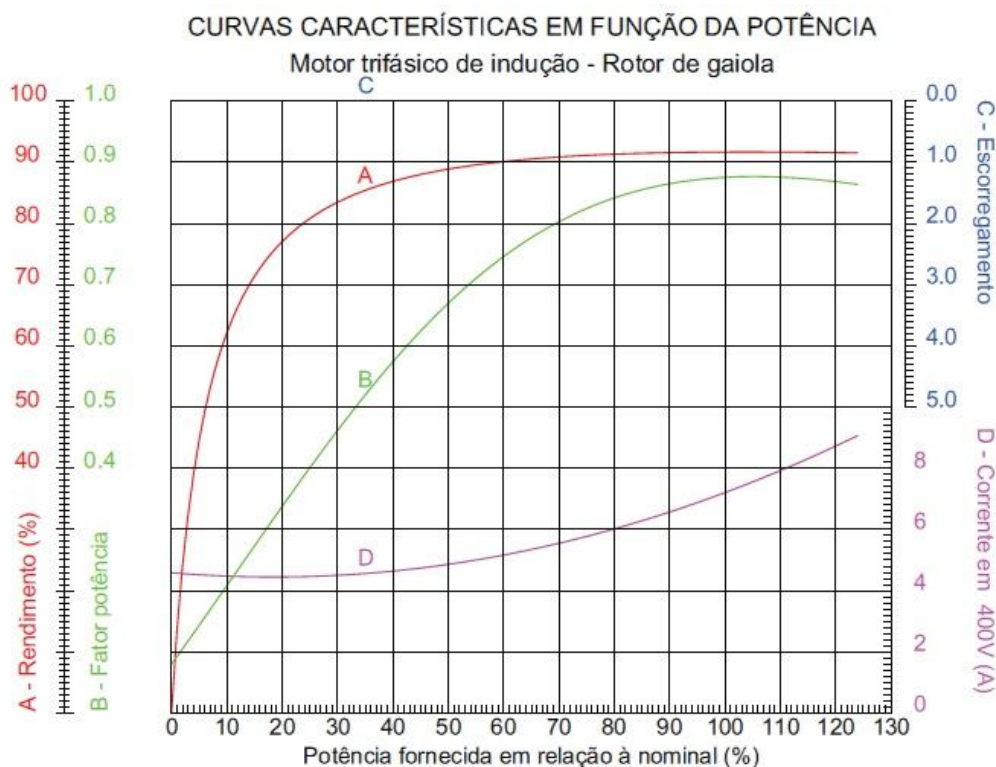


Figura 4.43 - Curva de características do Motor 2 segundo fabricante

Note-se que embora diga motor trifásico de indução trata-se de um motor síncrono de ímãs permanentes.

Os valores das grandezas características do motor segundo o fabricante são as seguintes:

Tabela 4.8 - Características das grandezas do Motor 2 segundo fabricante

Carga (%)	150%	125%	100%	75%	50%	25%	0%
Putil (W)	5989	4991	3984	2986	1983	984	39
Pabs (W)	6734	5539	4389	3298	2239	1211	289
Ia (A)	10,90	8,88	7,11	5,58	4,33	3,71	4,22
RPM	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Rend (%)	88,9%	90,1%	90,8%	90,5%	88,6%	81,2%	13,6%
Cos f	0,89	0,90	0,89	0,85	0,75	0,47	0,10

Concluiu-se então que os valores calculados e os valores da folha de características do motor são muito semelhantes.

- Comparação das características do motor Weg com a sua alimentação usando o auto-transformador e o VEV.

Conclui-se que o rendimento do motor usando um autotransformador é sempre superior comparado com o uso de um VEV. Tanto para a carga nominal como para outro regime de carga o rendimento com VEV é sempre inferior do que quando usado um autotransformador.

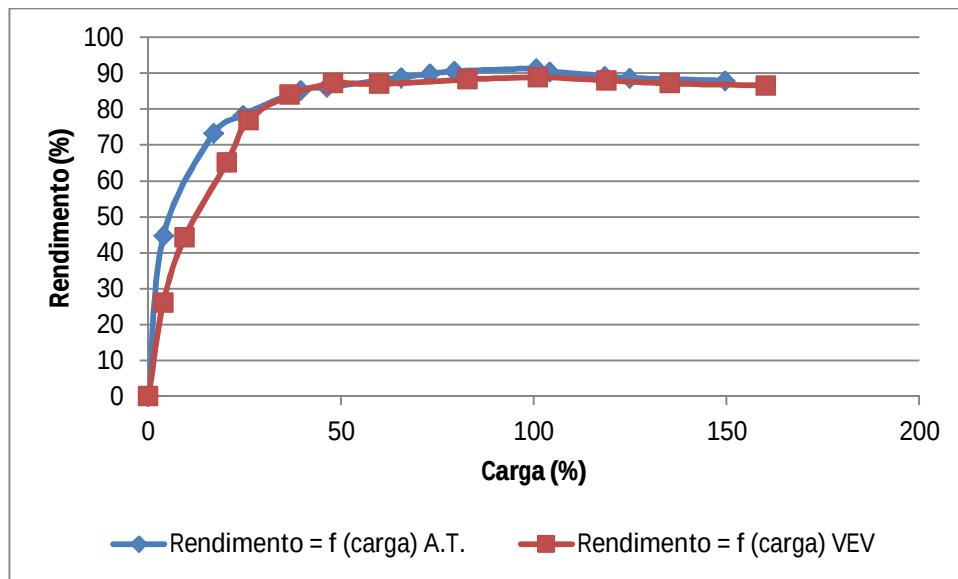


Figura 4.44 - Rendimento = f (carga) Comparação A.T./VEV - Motor 2

Entre os 25% e os 50% o rendimento com os dois tipos de alimentação é muito semelhante no entanto para outros regimes de carga tal como foi dito o rendimento é superior usando o Auto-transformador.

4.8 - Síntese / Conclusões

Com este trabalho experimental pode-se concluir que o rendimento de um motor de índice IE 4 de alto rendimento tem um rendimento acima da média dos motores. Pode-se concluir que a diferença entre o que está estipulado nas características do motor e os cálculos laboratoriais efetuados é muito reduzida quer seja um motor síncrono ou um motor de indução.

Verificou-se que em qualquer regime de carga o rendimento com alimentação sinusoidal a 50 Hz e alimentação usando autotransformador é sempre superior com o motor Weg do que com o motor Efacec. Conclui-se então que usar um motor de alto rendimento traduz uma poupança em energia ao longo do tempo que compensa o custo do motor.

Quanto à diferença de alimentação do motor Weg usando um auto-transformador e um variador eletrónico de velocidade conclui-se que o VEV reduz um pouco o rendimento do motor devido ao facto de a tensão aplicada não ter uma forma puramente sinusoidal e a tensão de alimentação utilizada ser de 420 V ou seja superior aos 400V. O facto de se usar um VEV traz é a vantagem de se poder controlar a velocidade do motor o que não é possível com o uso do auto-transformador.

Capítulo 5

Conclusão

Neste último capítulo serão abordadas as conclusões desta dissertação bem como as perspectivas de trabalho futuro que possam surgir na sua sequência. Para uma melhor estruturação deste capítulo, decidiu-se criar três pontos onde serão analisadas as conclusões do trabalho realizado.

5.1 - Alto Rendimento

O rendimento é o fator chave para determinação da escolha de um motor. É preferível investir dinheiro num motor de alto rendimento mesmo que este seja mais caro pois se a utilização do motor for de uso continuado ao longo do tempo a sua aquisição traz benefícios relativamente ao consumo de energia. Conclui-se que um motor de alto rendimento possui um rendimento muito elevado. No motor que foi testado neste trabalho o rendimento era de cerca de 91%, isso traduz-se em perdas internas muito reduzidas.

5.2 - Comparação entre motores

Foram testados dois motores elétricos, sendo um de indução e outro síncrono de ímanes permanentes, ambos de 4kW. O motor 1 de indução tem corrente nominal mais elevada que o motor 2 síncrono pois o motor 2 tem menor resistência interna e por isso menos perdas. O motor 1 possui tensão de alimentação nominal mais reduzida do que o motor 2 pois na época em que foi fabricado a tensão de alimentação da rede era mais reduzida (380 V) em vez dos (400 V) dos dias de hoje. A velocidade nominal do motor 1 é mais reduzida que a do motor 2 pois em regime nominal como o motor 1 se trata de um motor de indução a velocidade de rotação é inferior à do motor 2 que roda à velocidade de sincronismo. O fator de potência do motor 1 é mais reduzido do que o motor 2; para condições nominais o motor 2

apresenta um fator de potência mais próximo de 1. Em suma, o motor 2 é sempre superior em todos os aspetos como se pôde concluir no capítulo 4.

5.3 - Perspetivas para investigação futura

Como trabalho futuro, o autor sugere o teste de motores de potências diferentes da que foi testada neste trabalho para verificar se as diferenças de características entre motores de alto rendimento e motores de indução são tão significativas como as que foram testadas neste trabalho.

Também se sugere o teste de características de motores nomeadamente o rendimento de motores quando estes são alimentados a tensão com frequência diferente da rede de alimentação portuguesa. Poderá ser testada a variação de rendimento quando os motores são alimentados a 60 Hz, frequência da rede dos Estados Unidos da América. O facto de haver variação na frequência de alimentação poderá eventualmente trazer diferenças no rendimento do motor.

Referências

- [1] Francisco, A., *Motores Eléctricos*. Automação Electrónica, ed. E.-E.T.e. Profissionais. 2009.
- [2] O que é a Eficiência Energética. Disponível em <http://www.eco.edp.pt/pt/particulares/eficiencia-energetica>. Acesso em 15/Março/2012.
- [3] Motores Eléctricos de alto rendimento. Disponível em http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/gestaopublica/pmge/Motores_Eletricos.pdf. Acesso em 17/Março/2012.
- [4] Araújo, Rui M. E., Sistema de Controlo do Motor de Indução Trifásico Baseado no Princípio de Orientação do Campo. Dissertação de Mestrado, FEUP, 1991.
- [5] Almeida, A., Ferreira, F., Both, D., Technical and Economical Considerations to Improve the Penetration of Variable Speed Drives for Electric Motor Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Janeiro/Fevereiro 2005, pp.136-144.
- [6] Abrahamsen, F., Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, Dissertação de Doutoramento, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, 2000
- [7] Guide to Variable Speed Drives, AC Drives Technical Guide Book Nº 4, pp. 147-188, ABB, Helsínquia, Finlândia, 2002. Disponível em <http://www.abb.com/motors&drives>. Acesso em 20/Março/2012.
- [8] Abrahamsen, F., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Thøgersen, P.B., Efficiency-Optimized Control of Medium-Size Induction Motor Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, Nº 6, 12-2001, pp. 1761-1767.
- [9] Tomita, H., An Optimal Efficiency Control for Energy Saving of AC Motor by Thyristor Voltage Controller, IEEE Proceed. Of IECON'88, 1988, pp. 816-819
- [10] Guia da Eficiência Energética. Disponível em: http://www.adene.pt/pt-pt/publicacoes/documents/guia_eficiencia_energetica.pdf. Acesso em 15/Março/2012.

- [11] Synchronous motors High performance in all applications. Disponível em [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/822ae96e598fd891c125796f0032e75d/\\$file/Brochure_Synchronous_motors_9AKK105576_EN_122011_FINAL_LR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/822ae96e598fd891c125796f0032e75d/$file/Brochure_Synchronous_motors_9AKK105576_EN_122011_FINAL_LR.pdf). Acesso em 15/Maio/2012.
- [12] Motor de Alta Potência. Disponível em http://1.bp.blogspot.com/_RYKBMDL7E6Y/Skpji31N4-I/AAAAAAAAAGU/M6HGwNP9854/s1600-h/Motor+linha+M.jpg. Acesso em 15/Maio/2012.
- [13] Programas para Eficiência Energética. Disponível em http://www.weg.net/green/files/Diretivas-Globais-de-Eficiencia-Energetica_-_Apresentacao.pdf. Acesso em 17/Março/2012.
- [14] Política Energética. Disponível em http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes/13/Sintese_Politica_Energetica_2003.pdf. Acesso em 17/Março/2012.
- [15] Induction motors fed by PWM frequency inverters. Disponível em <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-induction-motors-fed-by-pwm-frequency-converters-technical-guide-028-technical-article-english.pdf>. Acesso em 17/Março/2012.
- [16] WQuattro Super Premium Efficiency Motor. Disponível em <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-wquattro-european-market-50025713-brochure-english.pdf>. Acesso em 20/Maio/2012.
- [17] PMblue Highly eficiente IE4 motor technology. Disponível em http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=motor%20ie4&source=web&cd=1&ved=0CF8QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ziehl-abegg.com%2Fwww%2Fdownload-2623.html&ei=RS_ft7OVLePA0QWG24noDA&usq=AFQjCNFZefbd1zKx3Aaf1-WIQtS0pRymLQ&cad=rja. Acesso em 20/Maio/2012.
- [18] Motor de Alto Rendimento. Disponível em http://moodle.stoa.usp.br/file.php/1660/Motor_de_Alto_Rendimento_-_LIV009.pdf. Acesso em 20/Maio/2012.
- [19] C. Aurélio. A Medição e o Erro de Medição. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~campilho/IM/NOTES/cap1.pdf>. Acesso em 10/Junho/2012.
- [20] Motores Síncronos. Disponível em <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-sincronos-artigo-tecnico-portugues-br.PDF>. Acesso em 20/Maio/2012.
- [21] *Understanding the Efficiency of Motors*. Heating/Piping/Air Conditioning Engineering, 2009. **81**(2): p. 44-53.
- [22] Araújo, R.M.E., *Sistema de Controlo do Motor de Indução Trifásico Baseado no Princípio de Orientação do Campo.*, in FEUP1991.
- [23] Bao, Y., *Performance investigation and comparison of line start-up permanent magnet synchronous motor with super premium efficiency*. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011. **ISSU**(PAGE): p. 6 .

- [24] Benhaddadi, M., G. Olivier, and J. Yelle, *Premium efficiency motors effectiveness*. Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on, 2010: p. 1607-1612.
- [25] Boglietti, A., A. Cavagnino, and S. Vaschetto, *Induction motor EU standards for efficiency evaluation: The scenario after IEC 60034-2-1*. IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011: p. 2786-2791.
- [26] Costa, N.d.D.A.d., *Metodologia de análise técnica de melhoria de eficiência energética resultante da utilização de controladores em motores eléctricos*. 2008, Porto: [s. n.]. XVII, 84 p.-XVII, 84 p.
- [27] de Almeida, A.T., *Standards for Super-Premium Efficiency Class for Electric Motors*. 2009 IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2009. **ISSU**(PAGE): p. 8 .
- [28] IEEE, *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, in *IEEE Std 112-1996*1996, American National Standards Institute.
- [29] Kostic, M.M., *International standards for energy efficient motors and energy saving*. Elektroprivreda, 2011. **64**(1): p. 27-36.
- [30] Kwang Yong, J., *Design of premium efficiency level single induction motor by parameter analysis*. 2009 12th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2009), 2009. **ISSU**(PAGE): p. 4 .
- [31] Jazdzynski, W., *Modeling and Bi-criterial Optimization of a Line Start Permanent Magnet Synchronous Machine to Find an IE4 Class High-efficiency Motor*. 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010. **ISSU**(PAGE): p. 6 .
- [32] Christoph, P.P., *Five principles for energy efficiency*. World Pumps, 2011. **2011**(10): p. 22-24.
- [33] Festa, M., *Extremely efficient but compact - A circumferentially cooled induction motor*. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011. **ISSU**(PAGE): p. 6 .
- [34] IEC, *International Standard, in Part 2-1 Standard methods for determining losses and efficiency form tests (excluding machines for traction vehicles)*2007, International Electrotechnical Comission: Geneva, Switzerland.
- [35] *Technological and economical analysis of salient pole and permanent magnet synchronous machines designed for wind turbines*. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2012. **324**(17): p. 2679-2686.
- [36] *Energy policies for passenger motor vehicles*. Transportation Research Part A: Policy & Practice, 2012. **46**(6): p. 874-889.
- [37] *Design and Analysis of a New Fault-Tolerant Linear Permanent-Magnet Motor for Maglev Transportation Applications*. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012. **22**(3): p. 5200204-5200204.
- [38] Mora, Jesús Fraile, *Máquinas Eléctricas*, McGraw Hill. Quinta edición. 2003.
- [39] Gill, Suzanne, *New efficiency labels for electric motors*, Control Engineering, April 2011.

- [40] Hardee, R., *How not to install a high-efficiency motor*. Plant Engineering, 2011. **65**(5): p. 34-5.
- [41] Chapman, Stephen J., *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw Hill International Editions. 3rd ed. 1998.
- [42] Circuito VVVF. Disponível em: <http://edn.com/design/analog/4371295/Teardown-The-nuances-of-variable-frequency-drives>. Acesso em 15/Junho/2012