



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

**Faculdade de Ciências e Tecnologia**

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Luís Miguel Duarte Magalhães Filipe

Desenvolvimento e Ensaios de Motores e  
Variadores Electrónicos de Velocidade  
de Alto Rendimento

I

Coimbra - Portugal

2012





Faculdade de Ciências e Tecnologia

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

## **Desenvolvimento e ensaio de motores e variadores electrónicos de velocidade de alto rendimento**

**Estudo do nível de tensão que maximiza o rendimento em regime permanente de motores trifásicos de indução e de ímanes permanentes controlados por variadores electrónicos de velocidade**

Luís Miguel Duarte Magalhães Filipe

Orientadores:

Doutor Aníbal Traça de Almeida

Doutor Fernando José Estêvão Ferreira

Presidente Júri:

Doutor Pedro Manuel Gens Azevedo de Matos Faia

Vogal:

Doutor André Manuel dos Santos Mendes

Coimbra, Fevereiro de 2012



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos meus orientadores, Professor Doutor Aníbal Traça de Almeida e Professor Doutor Fernando José Estêvão Ferreira pela sua dedicação pessoal e a este trabalho onde foram inextinguíveis com entusiasmo e conhecimento científicos, com especial apreço pelo Professor Doutor Fernando José Estêvão Ferreira, o qual sempre se interessou e me apoiou ao longo do meu percurso pela Universidade.

Um grande Muito Obrigado aos meus pais, que me proporcionaram as condições necessárias para começar e acabar este curso e sem os quais eu não poderia ter estudado com as condições que tive.

Finalmente gostaria de agradecer aos meus colegas Jorge Ricardo Martins Prata Martinho, Luís Manuel Gonçalves Fernandes, Henry José Valente Amaral, João Tiago dos Santos Martins, Bruno Manuel Pereira dos Santos, André Rocha Marques e a todos os outros não mencionados que me ajudaram, não só academicamente mas que também contribuíram para o meu crescimento como Homem na Sociedade da Cultura.

Agradecer também ao meu colega de tese Roberto da Silva Pinto que ao longo da execução da mesma me auxiliou e apoiou quer com conhecimentos quer com alento no sentido de levar a bom termo este trabalho

A todos o meu bem-haja.



## Resumo

Actualmente, na indústria dos países desenvolvidos, um oitavo (12,5%) dos motores são accionados por variadores electrónicos de velocidade. Neste trabalho, foi investigada a tensão/frequência óptima, que maximiza o rendimento para determinados pontos de carga. Esse estudo foi efectuado nos motores de alto rendimento de indução com gaiola de esquilo, e nos motores de ímanes permanentes com gaiola de esquilo auxiliar para arranque directo. Neste contexto, são apresentadas conclusões baseadas nos resultados experimentais obtidos para três motores de diferentes classes de rendimento, dois de indução (classe IE2 e IE3) e um de ímanes permanentes (classe IE4).

Palavras-chave: Controlo escalar, rendimento máximo, tensão óptima, motores de ímanes permanentes de arranque directo, motores de indução.

## Abstract

Nowadays, in developed country's industry, one eighth (12,5%) of all motors are driven by variable speed drives. In this work the optimal voltage, which maximizes the performance for several load levels, was investigated for two high efficiency types of motors, induction with squirrel cage rotor and line start permanent magnet. In this context, conclusions are presented based on experimental results, obtained for three different efficiency classed motors, two induction motors (class IE2 and IE3) and one with permanent magnets (class IE4)

Keywords: Scalar control, maximum efficiency, optimum voltage, line-start permanent magnet motor, induction motor



## Índice

Lista de Figuras.....	iii
Lista de tabelas.....	v
Acrónimos, símbolos e siglas.....	vi
1-Introdução.....	1
2- Conceitos de Potência, Binário, Eficiência e Perdas .....	4
2.1 Introdução .....	4
2.2- Produção de binário.....	4
2.2- Potência .....	7
2.3- Rendimento.....	8
2.4- Perdas.....	9
2.4.1- Perdas eléctricas .....	10
2.4.2- Perdas magnéticas .....	10
2.4.3- Perdas mecânicas.....	10
2.4.4- Modelo Térmico.....	11
3- Motor Assíncrono.....	13
3.1- Componentes principais .....	14
3.1.1- Rotor bobinado .....	15
3.1.2- Rotor em gaiola de esquilo .....	15
3.2- Princípio de funcionamento.....	16
3.3- Número de pólos, velocidade de sincronismo.....	17
4- Motor Síncrono .....	17
4.1- Introdução.....	17
4.2- Constituição do estator.....	18
4.3- Constituição do rotor .....	18
4.4- Arranque de um motor síncrono .....	19
4.5- Motor síncrono com ímanes permanentes .....	19
5- Trabalho experimental.....	20
5.1- Objectivo .....	20
5.2- Motores usados .....	21
5.3- Equipamento de medida e teste.....	22
5.4- Descrição do trabalho realizado .....	24
6.- Resultados Experimentais.....	28

7- Conclusão .....	50
Bibliografia: .....	51

## Lista de Figuras

Figura 1: Consumos na indústria portuguesa. ....	2
Figura 2: Produção da força electromagnética [16].....	4
Figura 3: Circuito Equivalente de Thévenin por fase de um motor eléctrico simplificado [5].....	5
Figura 4: Produção do torque de relutância [16].....	7
Figura 5: Binário [17].....	7
Figura 6: Balanço energético simples de um motor eléctrico.....	9
Figura 7: Fluxo de potência detalhado num motor eléctrico.....	9
Figura 8: Circuito equivalente térmico simples [19]. ....	11
Figura 9: Circuito equivalente térmico de um motor de indução [18]. ....	12
Figura 10: Corte de um motor de indução trifásico .....	14
Figura 11: Representação separada dos condutores de um rotor em gaiola de esquilo. ....	15
Figura 12: Íman permanente movendo-se numa escada condutora [17]. ....	16
Figura 13: Corte em esquema de um motor síncrono com ímanes permanentes. ....	20
Figura 14: Configurações típicas para rotores com ímanes permanentes.....	20
Figura 15: Esquema do sistema de ensaios usado. [24].....	23
Figura 16: Tensão em p.u. em função da carga no motor classe IE4. ....	29
Figura 17: Rendimento em p.u. em função da carga no motor classe IE4.....	29
Figura 18: Perdas totais em p.u. em função da carga no motor classe IE4. ....	30
Figura 19: Temperatura em p.u. em função da carga no motor classe IE4. ....	30
Figura 20: Tensão em p.u. em função da carga no motor classe IE3. ....	31
Figura 21: Rendimento em p.u. em função da carga no motor classe IE3.....	31
Figura 22: Perdas totais em p.u. em função da carga no motor classe IE3. ....	32
Figura 23: Temperatura em p.u. em função da carga no motor classe IE3. ....	32
Figura 24: Tensão em p.u. em função da carga no motor classe IE2. ....	33
Figura 25: Rendimento em p.u. em função da carga no motor classe IE2.....	33
Figura 26: Perdas totais em p.u. em função da carga no motor classe IE2. ....	34
Figura 27: Temperatura em p.u. em função da carga no motor classe IE2. ....	34
Figura 28: Rendimento de um motor classe IE2 com alimentação da rede. ....	37
Figura 29: Comparativo do rendimento otimizado para o rendimento com tensão nominal fixa sinusoidal do motor classe IE2. ....	37
Figura 30: Comparativo do rendimento otimizado para o rendimento com tensão nominal fixa sinusoidal de um motor de classe IE3. ....	38
Figura 31: Comparativo do rendimento otimizado para o rendimento com tensão nominal fixa sinusoidal de um motor de classe IE4. ....	38
Figura 32: Corrente absorvida (p.u.) em função da carga no motor classe IE4. ....	40
Figura 33: Corrente absorvida (p.u.) em função da carga no motor classe IE3. ....	41
Figura 34: Corrente absorvida (p.u.) em função da carga no motor classe IE2. ....	41
Figura 35: Carga máxima à temperatura nominal em p.u. em função da frequência com maximização de rendimento.....	43
Figura 36: Binário máximo à temperatura nominal em p.u. em função da velocidade do veio com maximização de rendimento.....	44
Figura 37: Tensão óptima em função da frequência para uma carga com variação quadrática em função da frequência. ....	45

Figura 38: Tensão óptima em função da frequência para uma carga com variação linear em função da frequência. ....	45
Figura 39: Tensão óptima em função da frequência para uma carga constante com a frequência. ....	46

## Lista de tabelas

Tabela 1: Motor 1 IE4.....	21
Tabela 2: Motor 2 IE3.....	22
Tabela 3: Motor 3 IE2.....	22
Tabela 4: Variação de rendimento (p.u.) da tensão otimizada face ao rendimento típico.....	39

## Acrónimos, símbolos e siglas

$p$ – Número de pólos	$U_c$ – Tensão composta
$n_s$ – Velocidade de sincronismo	$\lambda$ ou $FP$ – Factor de potência
$n$ – Velocidade	$\Phi$ – Fluxo magnético
$E$ – Força electromotriz	$I_n$ – Intensidade de corrente nominal
$B$ – Campo magnético	IEC – <i>International Electrotechnical Commission</i>
$l$ – Comprimento	$P_t$ – Potência total dissipada
$v$ – Velocidade	$P_{var}$ – Potência dissipada variável com variação da carga
$s$ – Deslizamento	$P_{cte}$ – Potência dissipada constante com a variação da carga
$I$ – Intensidade de corrente	$U_{th}$ – Tensão no circuito equivalente de Thévenin
$I_r$ – Intensidade de corrente no rotor	$R_{th}$ – Resistência equivalente do estator no circuito equivalente de Thévenin
$f$ – Frequência	$X_{th}$ – Reactância equivalente no estator no circuito equivalente de Thévenin
$F$ – Força	$R_2$ – Resistência equivalente no rotor no circuito equivalente de Thévenin
p.u. – <i>per unit</i> / por unidade	$X_2$ – Reactância equivalente no rotor no circuito equivalente de Thévenin
R – Resistência do condutor	$P_{entreferro}$ – Potência no entreferro
T – Binário	$\tau_{ind}$ – Binário produzido no veio
$r$ – Raio	$I_2$ – Intensidade de corrente no rotor no circuito equivalente de Thévenin
PI – Proporcional e Integral	
$P_{out}$ – Potência de saída	
$P_{in}$ – Potência de entrada	
$P_{mec}$ – Potência mecânica	
$P_{elec}$ – Potência eléctrica	
$P_j$ – Potência dissipada por efeito de Joule	
$T_D$ – Binário desenvolvido	
$R_R$ – Resistência do rotor	
$\omega$ – Velocidade angular	



## 1-Introdução

A teoria da rotação electromagnética foi descoberta por Faraday, em 1821. Esta teoria é a base do comportamento do motor eléctrico de indução, largamente difundido em ambientes industriais e domésticos. O motor de indução, é uma máquina que converte energia eléctrica em energia mecânica rotativa. Dentro das máquinas eléctricas rotativas, de alimentação sinusoidal, podem-se distinguir duas grandes classes: a das síncronas e a das assíncronas. Estas últimas foram adoptadas em larga escala na indústria, devido às suas qualidades (robustez física, tolerância às condições ambientais industriais e alto nível de conversão de energia eléctrica em energia mecânica) e pelo seu baixo custo comparativamente às máquinas síncronas do mesmo nível de potência. O motor de indução trifásico, é uma máquina assíncrona comum na indústria, representando 90% de todas as máquinas eléctricas rotativas utilizadas para as mais diversas funções, tais como ventilação e bombeamento, transporte de carga em passarelas, centrifugação ou moagem de materiais. A utilização de alimentação trifásica para motores de indução possibilita grandes transferências de potência, o que expandiu a aplicação destas máquinas em processos industriais das mais variadas naturezas, desde indústrias cimenteiras, até às de injeção de plásticos e moldes passando pela indústria farmacêutica. Dado que a sua utilização tem um grande espectro de aplicações, os motores são vendidos com diversas configurações de potência e/ou construção, por forma a se adequarem às circunstâncias presentes na indústria. Devido a estas variações na configuração, também os limites mecânicos e eléctricos das máquinas variam de modelo para modelo. Não é raro acontecer que um motor esteja a funcionar acima ou abaixo das suas capacidades, sendo que, em ambos os casos existem desvantagens, quer em termos de consumos energéticos quer em termos de desgaste da máquina. Assim, é importante o estudo dos limites das máquinas de modo a saber quais os valores óptimos para a sua utilização eficiente, racionalizando os consumos e minorando o desgaste na máquina. Para tal é necessário bancos de ensaio especializados, bem como normas para validar os resultados obtidos. Dispondo destes elementos, os ensaios devem ser conduzidos usando um método científico, facilmente reproduzível para comparação de resultados. Durante a realização desta tese, foram utilizados 3 motores de eficiência diferente classificados pela IEC como IE2, IE3 e IE4 designados normalmente por *High Efficiency*, *Premium* e *Super Premium* [28]. Foca-se



especial atenção na característica do rendimento, durante este trabalho. Os motores têm variações no rendimento conforme a sua alimentação e carga. Assim variando parâmetros na alimentação (neste estudo a tensão e a frequência), para uma dada carga fixa, pode-se determinar o valor de tensão e da frequência que maximiza o rendimento. O desenvolvimento a que tem-se vindo a assistir, desencadeia um crescimento económico levando a um consumo desregrado de recursos naturais.

Os motores eléctricos representam uma grande parte desse consumo, contribuindo em cerca de 70% da energia eléctrica total consumida na indústria e de 30% do consumo global do país.

Na Figura 1 encontra-se decomposto o consumo dos motores eléctricos em utilização final na indústria portuguesa.[29]

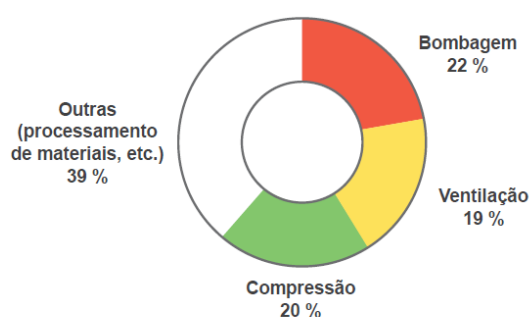


Figura 1: Consumos na indústria portuguesa[29].

Através da Figura 1, pode-se observar que aplicações na movimentação de fluidos representam 61% do consumo total dos motores sendo os restantes 39% para processamento de materiais entre outras aplicações.

Conclui-se que os motores eléctricos têm um papel fulcral na nossa indústria e por conseguinte, o estudo destas máquinas tem vindo a crescer, com o objectivo de melhorar o seu desempenho, aumentando o seu rendimento.

Para aumentar o rendimento destes motores, têm sido desenvolvidas e aplicadas variadas tecnologias que incluem variadores electrónicos de velocidade bem como motores de alto rendimento.

O custo elevado da energia eléctrica e o enorme peso que os motores eléctricos representam no consumo desta, faz com que o uso destas técnicas seja importante para se atingirem poupanças energéticas significativas (quer em termos de consumo, quer em termos de factura).

Esta tese encontra-se dividida em 7 capítulos, esta introdução, seguida de Conceitos de Potência, Binário, Eficiência e Perdas. No terceiro capítulo abordar-se-ão os motores assíncronos, na sua generalidade, e no quarto capítulo os motores síncronos. Após a abordagem teórica encontra-se o quinto capítulo, com a explanação do trabalho experimental, incluindo o banco de ensaios e o método utilizado. No sexto capítulo serão apresentados os dados e a explicitação dos resultados, e no último capítulo obter-se-ão as conclusões retiradas a partir da análise dos dados. Acrescem a estes capítulos, as referências utilizadas na realização deste trabalho bem como anexos referentes a resultados obtidos.

## 2- Conceitos de Potência, Binário, Eficiência e Perdas

### 2.1 Introdução

Sobre estas grandezas muito há a relatar, no entanto o objectivo deste trabalho não passa por explicar detalhadamente estas matérias, daí só se efectuar uma breve análise às mesmas. Serão introduzidas ideias fundamentais que proporcionam ferramentas fulcrais, para a análise dos resultados obtidos.

### 2.2- Produção de binário

A potência entregue por um eixo em rotação é o produto entre o binário e a velocidade angular desse mesmo eixo. O mecanismo para a produção de binário é crucial para o funcionamento de um motor.

Existem dois meios principais para a produção de binário nos motores eléctricos, o binário electromagnético e o binário de relutância. Virtualmente, todos os motores usam binário electromagnético e/ou binário de relutância. Na Figura 2 representa-se um condutor percorrido por uma corrente, atravessado por um campo magnético com uma indução  $B$  e perpendicular a  $I$ .

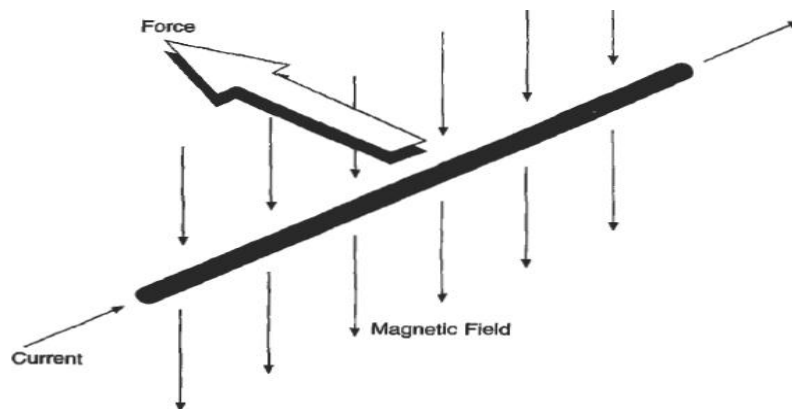


Figura 2: Produção da força electromagnética [16].

Se o condutor tem um comprimento  $l$  e é percorrido por uma corrente  $I$ , o módulo da força exercida pode ser descrita pela seguinte equação:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (1)$$

Esta força tem o nome de força electromagnética, já que se trata de um produto de uma corrente por uma densidade de fluxo magnético. Ao actuar num condutor, inserido num rotor de raio  $r$ , vai produzir um binário com amplitude  $F \cdot r$  em newton por metro.

Os diferentes tipos de motores, usam diferentes métodos de fazer passar a corrente  $I$  através dos condutores rotóricos e para produzir a densidade de fluxo  $B$  (ou indução magnética), diferindo consoante os diferentes tipos de motor.

Para melhor elucidar sobre o fenómeno da produção de binário, apresenta-se a Figura 3, com a imagem do circuito equivalente de Thévenin por fase do motor assíncrono [5].

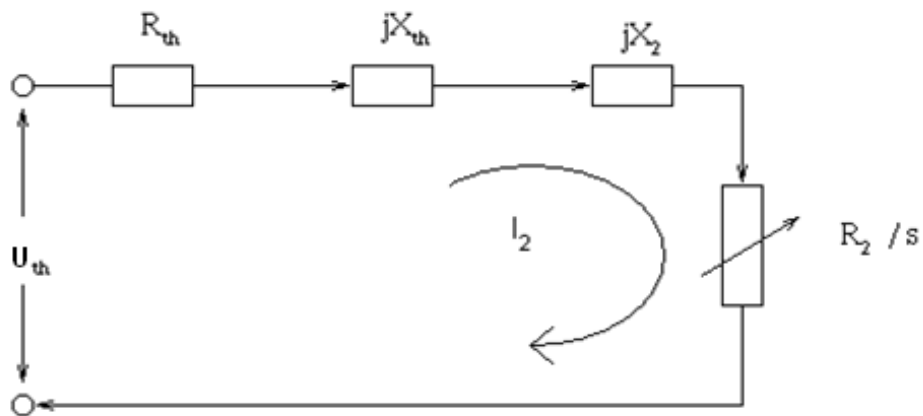


Figura 3: Circuito Equivalente de Thévenin por fase de um motor eléctrico simplificado [5].

Atentando no circuito equivalente do motor eléctrico retira-se:

$$I_2 = \frac{U_{TH}}{R_{TH} + R_2/s + jX_{TH} + jX_2}, \quad (2)$$

onde  $I_2$  é a intensidade de corrente no rotor,  $U_{TH}$  a tensão equivalente de Thévenin,  $R_{th}$  é a resistência equivalente no estator,  $X_{th}$  é a reactância equivalente no estator,  $R_2$  é a resistência equivalente no rotor,  $X_2$  é a reactância equivalente no rotor e  $s$  o deslizamento dado por

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100\% \quad (3)$$

em que  $n_s$  é a velocidade de sincronismo, e  $n$  a velocidade de rotação do rotor.

O módulo da corrente é então descrito por:

$$I_2 = \frac{U_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + R_2/s\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4)$$

E a potência no entreferro é dada por:

$$P_{Entreferro} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2/s = \frac{3U_{TH}^2 \cdot R_2/s}{\left(R_{TH} + R_2/s\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (5)$$

Assim sendo o binário induzido no rotor advém da equação:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{entreferro}}{n_s} = \frac{3U_{TH}^2 \cdot R_2/s}{n_s \cdot \left[\left(R_{TH} + R_2/s\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2\right]}, \quad (6)$$

onde

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (7)$$

em que  $f$  é a frequência de alimentação e  $p$  é o número de pólos. [5]

O segundo método para a produção de binário, faz uso do facto de que qualquer circuito magnético tender a mover-se para uma posição à qual a relutância é menor, ou seja onde a indutância do enrolamento de excitação é máxima. Na Figura 4 representa-se um estator e um rotor, ambos com pólos salientes.

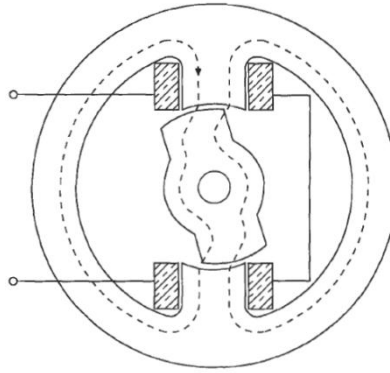


Figura 4: Produção do torque de relutância [16].

Mediante a rotação do rotor, o espaço do entreferro varia, resultando numa alteração na relutância do circuito magnético. O estator ao ser percorrido por uma corrente, cria um fluxo magnético no circuito magnético. Este fluxo produz uma força, que actua de forma a reduzir a relutância do circuito magnético, gerando-se um binário de relutância no rotor, no sentido do seu alinhamento, numa posição de relutância mínima (ou indutância máxima), que corresponde à situação em que as saliências do estator e do rotor estão alinhadas para garantir a minimização do entreferro. Este tipo de produção de binário é usado em motores de passo e em motores de relutância variável.

O binário pode ser quantificado através do produto entre a força aplicada na extremidade de um veio de raio  $r$ , e pode-se traduzir pela seguinte equação:

$$T = F \times r \quad (8)$$

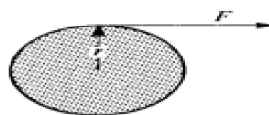


Figura 5: Binário [17].

## 2.2- Potência

A potência é a quantidade de energia produzida ou absorvida por unidade de tempo. Há também que distinguir a natureza da potência. Assim numa máquina eléctrica rotativa teremos a Potência Mecânica e a Potência Eléctrica. Mesmo num motor, a potência eléctrica pode ser absorvida ou fornecida, consoante o quadrante de operação. A Potência Eléctrica Activa é dada pela equação (9):

$$P = \sqrt{3} \cdot U_c \cdot I \cdot \lambda, \quad (9)$$

onde  $U_c$  é a tensão composta (entre fases),  $I$  a intensidade de corrente de linha e  $\lambda$  o factor de potência. Idealmente, toda a potência absorvida seria transformada em potência mecânica cuja equação é:

$$P_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot T, \quad (10)$$

onde  $T$  é o binário do motor (em N.m) e  $n$  é a velocidade síncrona (em rpm).

### 2.3- Rendimento

Em muitos casos o rendimento não é a primeira preocupação para o utilizador, mas é essencial ter em conta que um motor a funcionar permanentemente, à plena carga, vai ter um consumo de energia que pode igualar o seu custo numa questão de meses. O rendimento de uma máquina é a relação entre a potência útil fornecida e a potência absorvida, expressando o grau de aproveitamento de um dado processo e as perdas do mesmo. Pode ser expresso pela equação (11):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

em que o  $\eta$  é o rendimento expresso em percentagem,  $P_{out}$  é a potência fornecida pela máquina e o  $P_{in}$  é a potência absorvida pela máquina.

Existem vários tipos de motores havendo diferenças no rendimento dos mesmos.

O rendimento é especialmente baixo quando a energia térmica é convertida em energia mecânica, sendo na ordem dos 25 a 40 por cento nas máquinas a vapor enquanto nos motores de combustão fica entre os 15 e os 30 por cento. Motores eléctricos transformam energia eléctrica em energia mecânica de uma forma muito eficiente. O seu rendimento varia entre 75 e 98 por cento, dependendo do motor.

## 2.4- Perdas

Quando uma máquina transforma energia de uma forma para outra existe sempre uma perda associada a esse fenómeno como representado na Figura 6.

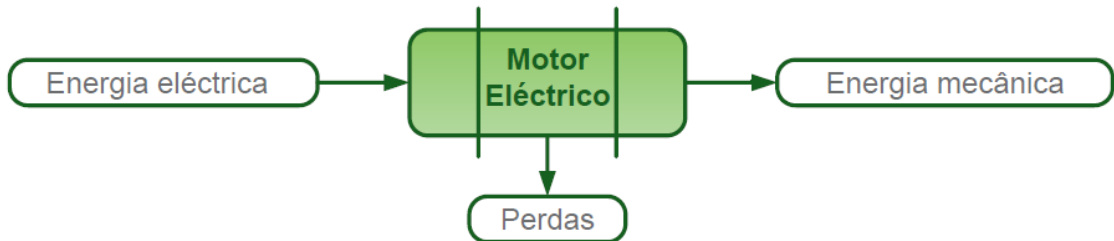


Figura 6: Balanço energético simples de um motor eléctrico [29].

As perdas nos motores eléctricos são um factor fulcral, visto que elas provocam um aumento na temperatura da máquina e afectam o rendimento da mesma, uma vez que capacidade da máquina em dissipar as suas perdas afecta a sua classificação.

O calor gerado pelas perdas tem que ser dissipado de forma eficaz, a fim de garantir que a temperatura de funcionamento da máquina não excede o seu limite nominal, o que a poderia danificar precocemente.

As perdas que ocorrem num motor eléctrico podem-se dividir em:

- Perdas eléctricas
- Perdas magnéticas
- Perdas mecânicas

Na Figura 7 apresenta-se um esquema detalhado dos fluxos de potência num motor eléctrico.

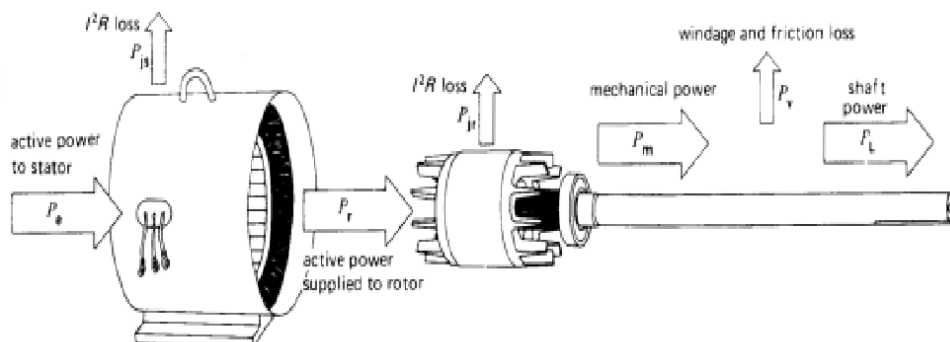


Figura 7: Fluxo de potência detalhado num motor eléctrico [17].



De notar que na Figura 7 estão ausentes as perdas suplementares, ou perdas extraviadas, que se distribuem por toda a máquina e às quais não se pode atribuir uma causa directa. As perdas totais podem ser encaradas como um somatório das perdas anteriormente descritas podendo estas ser ainda agrupadas em perdas constantes com a carga (perdas magnéticas e perdas mecânicas) e perdas variáveis com a carga (perdas eléctricas) dando origem à equação (12):

$$P_t = P_{cte} + P_{var} \quad (12)$$

#### 2.4.1- Perdas eléctricas

As perdas por efeito de Joule correspondem à conversão de energia eléctrica em térmica, num meio electricamente condutor.

Esse tipo de perdas pode ser descrito pela equação:

$$P_j = R \cdot I^2, \quad (13)$$

onde  $R$  é a resistência eléctrica do condutor e  $I$  o valor eficaz da intensidade de corrente que o percorre.

Pode-se então concluir, que a potência dissipada por efeito de Joule está directamente relacionada com a resistência eléctrica do condutor e varia proporcionalmente ao quadrado do valor eficaz da intensidade de corrente. Estas perdas ocorrem tanto no estator como no rotor uma vez que ambos possuem correntes em circulação no interior.

#### 2.4.2- Perdas magnéticas

Este tipo de perdas é composto por perdas por histerese e por perdas por correntes de Foucault. Estas perdas têm origem na variação do campo magnético e verificam-se especialmente nas massas ferromagnéticas quando sujeitas a uma magnetização alternada podendo ser reduzidas através do uso de materiais com melhores características magnéticas e usando núcleos ferromagnéticos laminados com isolamento interlaminar [5].

#### 2.4.3- Perdas mecânicas

As máquinas rotativas são geralmente refrigeradas por um ventilador interno e/ou externo montado no eixo do motor. As perdas mecânicas devem-se ao atrito nos rolamentos e à fricção, ventilação interna ou externa. Estas perdas podem ser reduzidas

através do uso de elementos com baixa fricção e com o melhoramento dos sistemas de ventilação.

#### 2.4.4- Modelo Térmico

Visto que todas estas perdas se convertem em calor, é interessante estudar o motor do ponto de vista térmico. Assim modelam-se os motores utilizados para uma máquina térmica, utilizando um equivalente a um circuito eléctrico, que neste caso é aplicado em representar o comportamento térmico esperado dos motores. Com este equivalente, pode-se estudar não só as perdas constantes, como também as variáveis e expressar todas elas como resistências equivalentes. Sendo a intensidade de corrente, as perdas encontradas no circuito, e as variações de temperatura o equivalente à diferença de potencial.

Uma vez que todas as análises aos motores neste estudo foram efectuadas em regime permanente, ou seja, estando a máquina termicamente estável, podem-se desprezar as capacitâncias equivalentes térmicas, fruto da acumulação de energia térmica nos diversos componentes do motor eléctrico. As variações de temperatura são medidas de um componente para outro (ex. do estator para a carcaça), sendo a temperatura ambiente o valor ao qual o motor pode arrefecer quando permanece desligado, representando assim o equivalente ao condutor neutro no circuito.

Na Figura 8 apresenta-se uma imagem compreensiva de um circuito equivalente térmico:

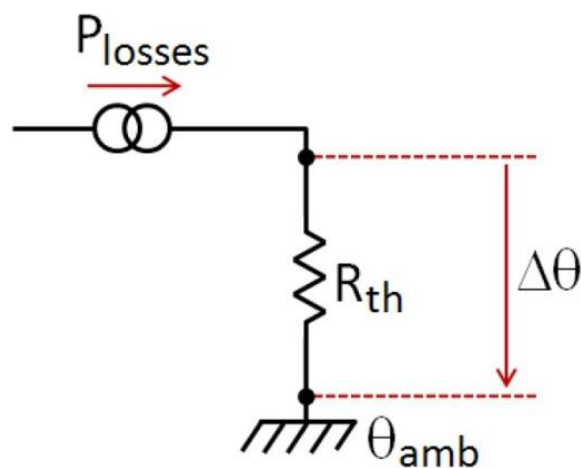


Figura 8: Circuito equivalente térmico simples [19].

O circuito do motor é mais complexo pois envolve mais pontos de temperatura, desagregação de perdas e mais resistências térmicas. A título de exemplo mostra-se a Figura 9, sem entrar em detalhes, que ilustra a complexidade do sistema

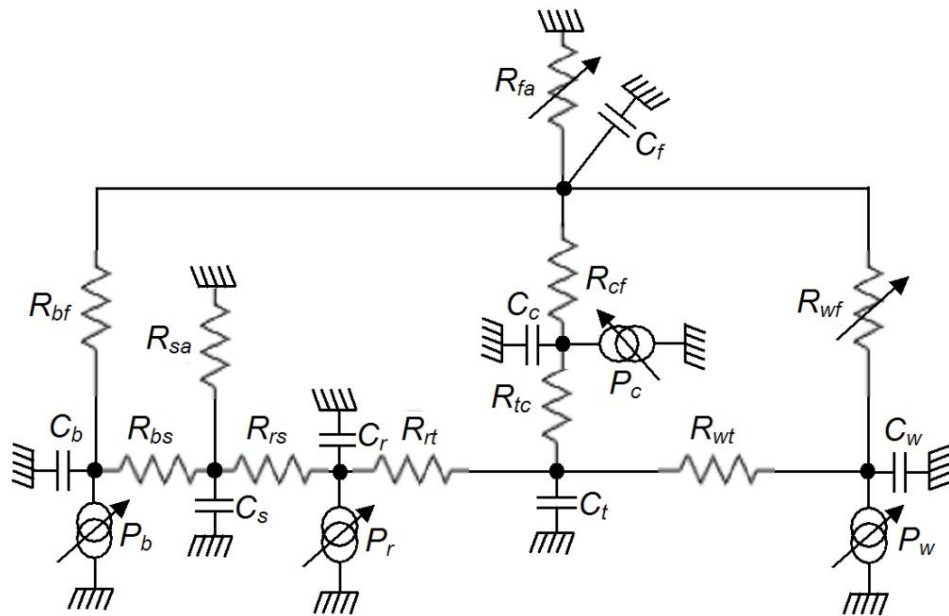


Figura 9: Circuito equivalente térmico de um motor de indução [18].

### 3- Motor Assíncrono

Inventado no ano de 1880, o motor assíncrono de indução é o mais usado na indústria, accionando ventiladores, bombas, compressores e uma vasta gama de outras cargas.

Pode ser encontrada no mercado, uma grande variedade de motores, cujas potências variam de alguns watt até aos mega watt.

Nos motores de indução trifásicos, aparecem logo à partida duas subdivisões principais: o motor de indução com rotor em gaiola de esquilo e motor de indução com rotor bobinado.

O mais simples, comum, robusto e confiável, é o motor de indução com gaiola de esquilo, no qual o rotor é composto de barras de um material condutor embebidas no núcleo ferromagnético do rotor e curto-circuitadas por anéis condutores nas extremidades.

Em máquinas de maior porte, a gaiola é geralmente fabricada a partir de barras de cobre, sendo necessária especial atenção para garantir a integridade de todas as junções na fabricação. Em motores com potência nominal inferior a 500 kW, a gaiola é geralmente formada por fundição de alumínio ou cobre nas ranhuras do rotor e em torno das extremidades, que formam a gaiola.

Relativamente ao rotor bobinado, este é construído na forma de um enrolamento polifásico semelhante ao do estator, tendo o mesmo número de pólos. Actualmente os motores de indução de rotor bobinado são pouco comuns, sendo utilizados apenas num número limitado de aplicações especializadas.

O motor de indução, quando accionado a uma velocidade acima da síncrona, pode gerar potência activa e entregá-la ao sistema ao qual está conectado.

No que diz respeito ao rendimento dos motores de indução, verifica-se que para velocidades elevadas, este é menor do que quando comparado com o do motores de ímanes permanentes ou de relutância variável. Este menor rendimento deve-se às perdas no rotor.

### 3.1- Componentes principais

Um motor de indução trifásico tem duas partes principais, uma parte estática chamada de estator e uma parte móvel chamada de rotor. O rotor é separado do estator por um pequeno espaço de ar que varia de 0,4 mm a 4 mm, dependendo da potência do motor, chamado de entreferro.

O estator é composto por chapas finas de aço metálico tratadas termicamente para reduzir ao mínimo as perdas, estas chapas têm o formato de um anel, com ranhuras internas, de maneira a que possam ser alojados nelas enrolamentos.

O rotor também é composto de chapas finas de aço ferromagnético, tratadas termicamente, também em anel e com os enrolamentos alojados longitudinalmente.

Na Figura 10 mostra-se um motor de indução trifásico, com a respectiva legenda.

- 1-Carcaça
- 2-Núcleo de ferromagnético estatórico
- 3-Núcleo de ferromagnético rotórico e barras da gaiola de esquilo
- 4-Tampa do lado da carga
- 5-Ventilador externo
- 6-Tampa deflectora
- 7-Veio
- 8-Enrolamento estatórico
- 9-Caixa de terminais
- 10-Terminais
- 11-Rolamentos
- 12-Barra de Anéis de curto-circuito da gaiola de esquilo

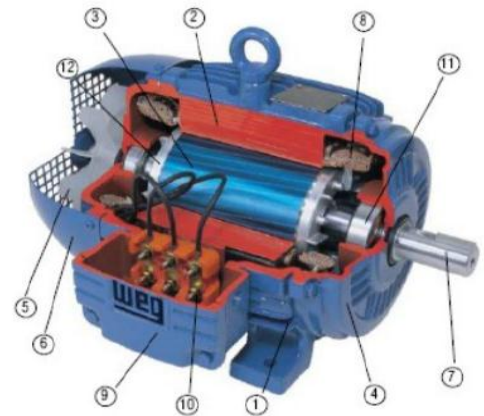


Figura 10: Corte de um motor de indução trifásico

### 3.1.1- Rotor bobinado

Como foi dito anteriormente, o rotor bobinado é constituído por um enrolamento idêntico ao do estator, isto é, três enrolamentos isolados distribuídos e desfasados de 120 graus eléctricos. Os terminais dos enrolamentos rotóricos encontram-se acessíveis, através de um conjunto de três anéis colectores e respectivas escovas. Neste caso, pode ser ligada uma resistência externa trifásica ao enrolamento rotórico, com o objectivo de se poder variar a velocidade do motor de indução. Estas máquinas são utilizadas na indústria normalmente num nível de potência relativamente elevado.

### 3.1.2- Rotor em gaiola de esquilo

As máquinas de rotor em gaiola de esquilo têm um rotor constituído por um núcleo ferromagnético, no qual se encontram condutores ligados na periferia através de dois anéis que os curto-circuitam. Esta construção tem um elevado nível de robustez, um baixo peso, bem como um reduzido momento de inércia, e, no conjunto, é talvez a máquina mais barata. É provavelmente a máquina mais utilizada em accionamentos industriais de velocidade quase constante e, actualmente devido aos desenvolvimentos da electrónica de potência e à redução do custo dos variadores electrónicos de velocidade, é cada vez mais utilizada também em accionamentos de velocidade ajustável.

A vantagem do rotor em gaiola de esquilo em relação ao de rotor bobinado é que resulta numa construção mais rápida, mais prática, mais barata e mais robusta.

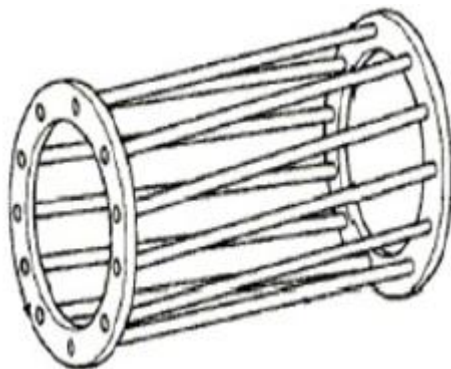


Figura 11: Representação separada dos condutores de um rotor em gaiola de esquilo [17].

### 3.2- Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico é baseado na aplicação da lei de Faraday (campo magnético variável no tempo induz uma tensão numa bobina) e na força de Lorentz (num condutor percorrido por uma corrente, na presença de um campo magnético é exercida uma força) a um condutor. O princípio de funcionamento pode ser facilmente entendido com o seguinte exemplo.

Considere vários condutores de comprimento  $l$ , tendo as suas extremidades curto-circuitadas por duas barras A e B, como se encontra na Figura 12.

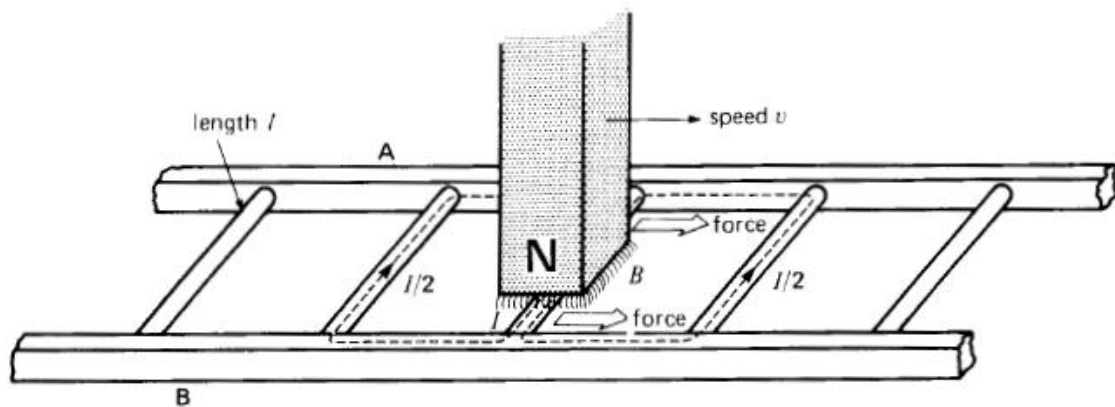


Figura 12: Íman permanente movendo-se numa escada condutora [17].

Um íman permanente posicionado por cima da “escada” condutora, movendo-se rapidamente a uma velocidade  $v$ , para que o campo magnético  $B$  alcance todos os condutores, desencadeia a seguinte sequência:

- 1- É induzida uma tensão  $E = B \cdot l \cdot v$  em cada condutor enquanto é atravessada pelo fluxo (Lei de Faraday).
- 2- A tensão induzida produz imediatamente uma corrente  $I$ .
- 3- Como o condutor encontra-se no dentro do campo magnético é exercida uma força (Força de Lorentz).
- 4- A força actua sempre numa direcção para deslocar o condutor, juntamente com o campo magnético.

Se a “escada” condutora é livre de movimentos, vai acelerar e à medida que esta ganha velocidade, os condutores irão ser menos vezes percorridos pelo íman em movimento. Isto resulta numa diminuição da tensão induzida  $E$  e da corrente  $I$ , conseqüentemente a força exercida nos condutores também irá diminuir. Se a “escada” condutora se mover com a mesma velocidade do campo magnético, a tensão  $E$ , a corrente  $I$  e a força iriam tender para zero.

No motor de indução as extremidades da “escada” encontram-se unidas formando uma gaiola e o íman permanente é substituído por um campo magnético girante.

### **3.3- Número de pólos, velocidade de sincronismo**

Logo após a invenção do motor de indução, foi descoberto que a velocidade do campo girante poderia ser reduzida através do aumento do número de pólos.

As bobinas do estator estão dispostas de tal forma, que o campo magnético criado gira ao longo do estator. A velocidade de rotação do campo é constante e é denominada velocidade de sincronismo. A velocidade pode ser descrita pela equação (7). Da equação (7), pode-se concluir que quanto maior o número de pólos menor será a velocidade de sincronismo. A título de exemplo, a velocidade máxima de rotação para uma tensão de alimentação trifásica de 50 Hz são 3000 rpm, visto o número mínimo de pólos ser 2.

## **4- Motor Síncrono**

### **4.1- Introdução**

Como o nome implica, o motor síncrono gira em sincronismo com o campo girante. Ao contrário da máquina de indução, na máquina síncrona o campo girante no entreferro e o rotor rodam à mesma velocidade, a qual é designada por velocidade síncrona. A velocidade de rotação (7) está directamente relacionada com a frequência de alimentação. Como a frequência é fixa, a velocidade do motor permanece constante independentemente da carga ou tensão que é aplicada.



O motor síncrono é constituído por um estator e um rotor, em que no estator estão inseridos os enrolamentos induzidos nos quais se realiza a conversão electromecânica de energia, e no rotor localiza-se o enrolamento indutor que é percorrido por corrente contínua tendo como função a criação de um campo magnético. O uso do motor síncrono na indústria pode, na maior parte das vezes, resultar em vantagens económicas e operacionais consideráveis ao seu utilizador, devido ao seu baixo custo de manutenção, correcção do factor de potência da rede, velocidade constante sob variações de carga, entre outras.

#### **4.2- Constituição do estator**

O estator de um motor síncrono é composto por uma parte exterior, chamada de “carcaça”, com funções essencialmente mecânicas que suporta um núcleo de material ferromagnético composto por chapas laminadas, sob o qual em ranhuras axiais é alojado o enrolamento do estator. Estes são constituídos por condutores em geral de cobre, isolados electricamente por resinas.

#### **4.3- Constituição do rotor**

Dentro do estator encontra-se o rotor formado por chapas laminadas, contendo um enrolamento indutor, que é alimentado por uma corrente contínua, chamada de corrente de excitação.

Existem dois tipos de soluções para o rotor no motor síncrono sendo elas, o rotor de pólos salientes ou rotor de pólos lisos ou cilíndricos.

No que diz respeito ao rotor de pólos salientes, pode-se dizer que possuem enrolamentos concentrados nos pólos e apresentam um entreferro não uniforme, havendo um núcleo central inserido no veio ao qual se ligam pólos onde são enrolados os enrolamentos do indutor. Este tipo de configuração é utilizado para um elevado número de pólos o que implica uma baixa velocidade de rotação, tendo normalmente um grande diâmetro, mas sendo curto.

O rotor de pólos liso difere do de pólos saliente já que, possui um enrolamento distribuído e um entreferro uniforme, estando os condutores inserido em ranhuras e distribuídos ao longo da periferia. O número de pólos é menor, o que permite uma maior velocidade, tendo normalmente um diâmetro menor.

#### **4.4- Arranque de um motor síncrono**

Um motor síncrono não consegue arrancar sozinho. O método para arranque mais comum é o recurso ao enrolamento de amortecimento existindo também outras opções que nos permitem o arranque de um motor síncrono, sendo elas através da redução da frequência ou através de um motor auxiliar.

No primeiro caso, com a redução da frequência, a velocidade de rotação do campo girante também é reduzida para que o rotor possa acelerar e acoplar-se magneticamente com o campo girante. Seguidamente, aumenta-se a frequência da tensão de alimentação, sendo necessário recorrer aos variadores electrónicos de velocidade.

Para o arranque com o recurso a um motor auxiliar, leva-se o rotor a girar até que seja atingida a velocidade de sincronismo, desacoplando o motor auxiliar depois de se terem conectado os enrolamentos do estator à tensão da rede. Para este fim pode-se utilizar o motor hidráulico/térmico (turbina hidráulica, turbina a gás, turbina a vapor) ou o motor eléctrico (motor de indução, motor com colectores de lâminas).

#### **4.5- Motor síncrono com ímanes permanentes**

O uso de ímanes permanentes no rotor em motores trifásicos tem vindo a aumentar significativamente. Os motores síncronos com ímanes permanentes no rotor são, em grande parte, iguais aos motores síncronos convencionais, havendo uma mudança no campo bobinado do rotor sendo substituído por ímanes permanentes de elevada densidade magnética.

Com a inclusão de ímanes permanentes no rotor evitam-se as perdas no cobre do rotor, já que não existe o campo bobinado, levando a que o resto das perdas sejam no enrolamento do estator, aumento assim o rendimento do motor.

Os motores com ímanes permanentes são normalmente mais pequenos (para a mesma potência) que os motores com o tradicional campo bobinado, pois os ímanes ocupam menos espaço que os enrolamentos, havendo um aumento no seu peso. O custo também é uma vantagem neste tipo de motor, especialmente quando são usados ímanes cerâmicos.

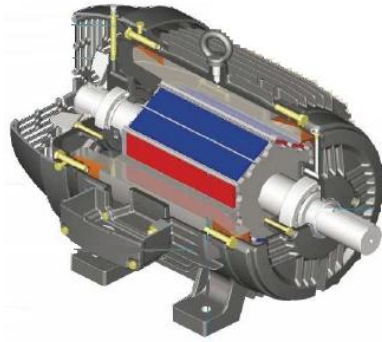


Figura 13: Corte em esquema de um motor síncrono com ímanes permanentes [30].

Na Figura 14 encontram-se as configurações possíveis para a inclusão de ímanes permanentes no rotor.

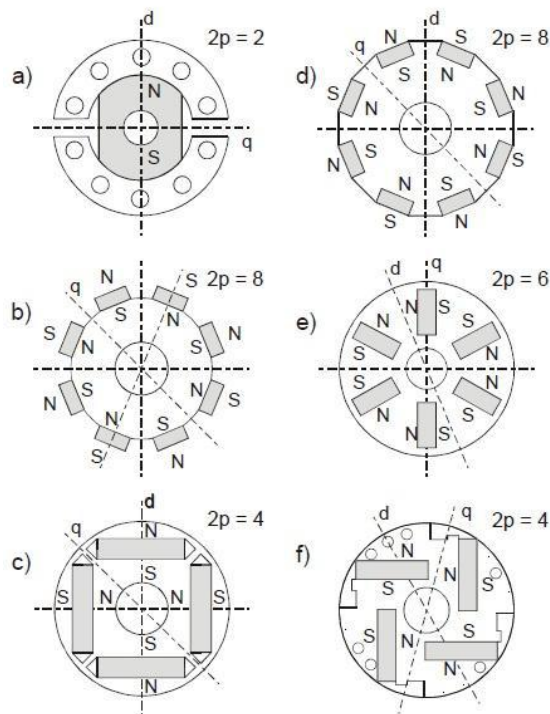


Figura 14: Configurações típicas para rotores com ímanes permanentes [31].

## 5- Trabalho experimental

### 5.1- Objectivo

O objectivo do trabalho descrito nesta dissertação, consistiu em estimar a tensão óptima, com base nas variações de eficiência, para um determinado ponto de carga a

uma frequência fixa, com o intuito de otimizar o rendimento da máquina e reduzir os desperdícios.

## 5.2- Motores usados

Para a realização do trabalho experimental foram usados três motores, dois assíncronos e um síncrono com ímanes permanentes.

O motor síncrono *WQuattro* da WEG tem, segundo as normas da IEC, uma classificação de eficiência *Super Premium* (IE4) e trata-se de um motor híbrido com rotor em gaiola de esquilo produzido em alumínio e ímanes permanentes de elevada densidade magnética no seu interior. A gaiola de esquilo em alumínio permite arranque directo da rede, enquanto os ímanes permanentes garantem operação síncrona com elevado rendimento em regime permanente, e aplicam-se em compressores, elevadores, bombas centrífugas, ventiladores, esteiras transportadoras, veículos eléctricos, máquinas para equipamentos têxteis e outras aplicações que necessitem de alto rendimento e operação síncrona.

Os motores assíncronos são motores da marca WEG da linha W22, tendo classificações de eficiência *Premium efficiency* (IE3) e *High efficiency* (IE2). Têm como principais aplicações bombas, ventiladores, compressores, moinhos, britadores e talhas.

O motor que funciona como carga é um motor da *SEW DRP180L4* de 15 kW com um factor de potência de 0,84 e 27,5 A de corrente nominal.

Doravante neste trabalho referir-se-á o motor *WQuattro* como motor IE4, o motor *Premium efficiency* como motor IE3 e o motor *High efficiency* como motor IE2.

Nas Tabelas 1 a 3 encontram-se as principais características dos motores que se podem encontrar nas chapas características de cada motor analisado.

Tabela 1: Características do motor da classe IE4

$P_n$ (kW)	$p$	$f$ (Hz)	$U_n$ (V)	$n_n$ (rpm)	$I_n$ (A)	FP	$\eta$ (%)	$T_n$ (N.m)
7,5	4	50	400/690	1500	12,5/7,25	0,93	93	47,8

Tabela 2: Características do motor da classe IE3

$P_n$ (kW)	$p$	f(Hz)	$U_n$ (V)	$n_n$ (rpm)	$I_n$ (A)	FP	$\eta$ (%)	$T_n$ (N.m)
7,5	4	50	400/690	1465	13,9/8,06	0,85	91,5	48,9

Tabela 3 Características do motor da classe IE2

$P_n$ (kW)	$p$	f(Hz)	$U_n$ (V)	$n_n$ (rpm)	$I_n$ (A)	FP	$\eta$ (%)	$T_n$ (N.m)
7,5	4	50	400/690	1455	14,1/8,17	0,86	89	49,3

### 5.3- Equipamento de medida e teste

Para a obtenção dos dados relativos aos ensaios, foram usados diversos equipamentos de medição.

A grande parte dos valores obtidos, foram retirados através do analisador de potência aplicado à saída do conversor (*Yokogawa WT1030M*), permitindo obter todos os valores excepto as temperaturas, binário, velocidade de rotação, potência mecânica, frequência fundamental e o valor das resistências dos enrolamentos após o término do ensaio.

Na medição de valores de temperatura ambiente, e temperatura da carcaça dos motores, foi usado um termómetro manual de infravermelhos (*Fluke 63 IR thermometer*), sendo os restantes valores retirados do sistema de controlo. As resistências dos enrolamentos foram recolhidas através de um multímetro digital (*Fluke 45 Digital Multimeter*) sendo incorporadas em cada motor em análise duas sondas (PT-100 a 4 fios) que estão conectadas ao sistema de aquisição de dados permitindo saber a temperatura instantânea na testas dos enrolamentos e no núcleo do motor.

Para a obtenção dos valores de binário, potência mecânica, velocidade de rotação e frequência fundamental, foi usado um sistema de aquisição de dados (*National Instruments cDaq-9172*) complementado com um *software* desenvolvido em LabView [21] já disponível no banco de ensaios. Todos os sistemas utilizados cumprem a norma IEC-60034-2-1 em termos de precisão necessária para avaliação.

Para a realização deste trabalho, o sistema de ensaios [24][21] encontra-se esquematizado na Figura 15, permitindo realizar os testes necessários para alcançar o objectivo.

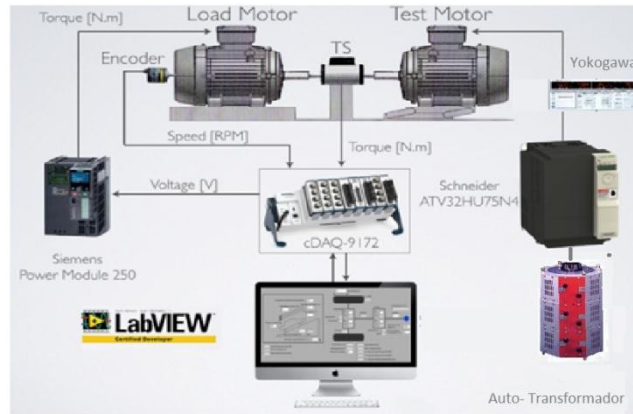


Figura 15: Esquema do sistema de ensaios usado. [24]

O sistema usado para os ensaios é composto pelos seguintes elementos:

1. Autotransformador
2. Conversor do motor em teste (*Schneider ATV32HU75N4*)
3. Analisador de potência (*Yokogawa WT1030M*)
4. Motor de carga (*SEW DRP 180L4/FI160L*)
5. Conversor do motor de carga (*Siemens Power Module 250*)
6. Sistema para aquisição de dados
7. Sistema de controlo

Neste sistema observam-se dois motores, um que se encontra do lado direito (*Test Motor*) sendo o motor em teste e um outro motor do lado esquerdo (*Load Motor*) que funciona como sendo uma carga acoplada.

Ao motor em teste é conectado um conversor da Schneider que é alimentado pela rede através de um auto transformador trifásico sendo sua frequência de comutação de 4 kHz.

O motor de carga *SEW DRP 180L4/FI160L* é accionado pelo conversor de potência da *Siemens* alimentado pela rede, controlando o binário exercido no sistema.

Entre os dois motores existe um veio no qual está inserido um sensor de binário (TS) que permite saber instantaneamente o binário presente no veio, bem como um encoder absoluto que permite saber a velocidade instantânea.

O sistema de aquisição de dados recebe os valores lidos nos sensores, enviando-os para o sistema de controlo. No sistema de controlo, do tipo PI em tempo real, pode-se variar a carga mediante o desejado e observar os valores instantâneos de binário, velocidade, potência mecânica e temperaturas.

#### 5.4- Descrição do trabalho realizado

Como definido no objectivo, é necessário determinar a tensão óptima que maximiza o rendimento para cada nível de carga. Usa-se para tal, um método composto por várias fases e que permite que se possam reproduzir os ensaios nas condições acima referidas. O método consiste em variar a tensão iterativamente, no sentido de obter o melhor rendimento possível. Para obter a tensão inicial a introduzir utilizou-se a correspondência linear da tensão com a frequência. A título de exemplo, para uma frequência de ensaio de 37,5 Hz utilizou-se como ponto inicial os 300 V.

O conversor utilizado no motor em teste não permite a modificação dos valores de tensão em tempo real com o motor em funcionamento. São referidas em parênteses os nomes das variáveis no conversor de controlo para melhor explanação. Assume-se que quem realiza o ensaio tem conhecimento dos ambientes em *software* a utilizar, nomeadamente o *software* de controlo do conversor e o *software* de monitorização e controlo baseado em *LabView* [21][24].

O método tem início com a introdução no programa de controlo do conversor da frequência desejada (HSP) para o ensaio. De realçar que uma vez que foram utilizados vários motores, com características diferentes, se deve programar o conversor do motor em teste para os parâmetros do mesmo, neste caso introduzindo a velocidade em rpm do veio (NSP), a tensão nominal (UNS) e corrente nominal (NCR) bem como a frequência de alimentação (FRS) e o factor de potência (COS) da máquina juntamente com a sua potência (NPR) nas condições nominais. O conversor realiza um teste de afinação cada vez que é reiniciado de modo a calcular outras variáveis importantes, como a relutância da máquina.

Após a introdução de todos estes parâmetros, teve de se verificar no autotransformador a existência do valor de tensão necessário para alimentar o conversor do motor em teste.

Uma vez introduzida a frequência desejada, deve-se ajustar o *software* de monitorização, introduzindo a carga a que se sujeita o motor em teste, sob a forma de percentagem.

Agora, voltando ao *software* de controlo do conversor, deve-se garantir que este está a seguir uma lei de controlo da tensão/frequência de 5 pontos (CTT), pois é a única que nos permite manipular com liberdade as variáveis controladas neste trabalho. Uma vez seleccionada a lei de controlo, atenta-se nos valores da tensão no ponto 5 (U5) e da frequência no ponto 5 (F5). Devem introduzir-se, tanto a frequência a que se deve conduzir o ensaio como a tensão do ensaio. Notar que, a frequência introduzida na frequência de trabalho e neste ponto 5 devem ser coincidentes.

Após verificação destes valores deve-se verificar se o sensor de binário se encontra calibrado, ou seja, se a leitura do binário com as máquinas em repouso é Zero. Caso não o seja, deve-se calibrar o sensor de binário, premindo para tal o botão amarelo na caixa de interface com o computador, até que o *LED* deixe de ser intermitente. Não obtendo o valor de zero após esta acção deve-se introduzir um valor de *offset* no *software* de monitorização que anule o binário presente na leitura, forçando assim o valor de zero antes do arranque das máquinas.

De seguida deve-se ligar o botão “*Startup*” no *software* de monitorização para garantir que o motor de carga arranca em segurança.

Uma vez concluídas estas acções e verificadas as condições gerais de segurança para o arranque das máquinas, utiliza-se o interruptor no conversor do motor de teste para accionar o mesmo. Após o arranque estável do motor em teste deve-se arrancar o motor de carga por meio do interruptor presente no conversor do mesmo. Assim que este estabilize, deve-se desligar o botão de “*Startup*” no *software* de monitorização e aguardar que o motor em teste alcance o binário requerido pelo ponto de carga em ensaio, verificando sempre que as condições de funcionamento do motor em teste não excedem as condições nominais do mesmo. Estas acções são consideradas como gerais para o arranque seguro das máquinas.

Uma vez alcançado, devem-se registar os valores da potência eléctrica absorvida, a potência mecânica requerida, e o valor da tensão introduzido no conversor do motor em teste. Com estes dados é calculado o rendimento, ou seja, o quociente entre a potência



mecânica e a potência eléctrica. Aquando do registo do valor de potência eléctrica foi retirado, para todos os ensaios, apenas o seu valor máximo, verificando-se assim o pior caso, concedendo uma margem de manobra adicional. Isto deve-se ao facto de o valor instantâneo variar com muita frequência, sendo assim difícil de registar um valor fidedigno. Partindo duma tensão inicial, o método impõe variações na tensão de 20 V para a verificação da variação do rendimento. Caso se verifique uma melhoria de rendimento, esta parte do processo é repetida, desta vez para o valor de tensão que melhora o rendimento até que se registre um decréscimo neste. Quando o rendimento no ponto for inferior ao previamente encontrado, teremos então que voltar ao ponto prévio e reduzir a variação da tensão para 10 V. Uma vez ocorrida nova diminuição do rendimento, deve-se voltar ao ponto prévio e reduzir a variação para 5 V.

Tendo verificado que não se consegue obter um melhor rendimento com os valores anteriores, assume-se que a tensão obtida é a tensão óptima para a frequência desejada, no ponto de carga em ensaio. Então, introduz-se no *software* de controlo do conversor do motor em teste a tensão óptima, e após conduzir as acções acima referidas para o arranque seguro das máquinas deixa-se que o motor funcione até atingir a estabilidade térmica, para que se possa recolher dados tanto no *software* de monitorização como no analisador de potência (*Yokogawa* WT-1030M). Esta recolha de dados é feita com as máquinas em funcionamento, excepto a determinação da resistência dos enrolamentos, que por razões de segurança, é feita com os motores em repouso com o auxílio do multímetro. A colocação dos motores em repouso é feita pela ordem inversa ao utilizada no arranque, ou seja, a primeira máquina a ser desligada no interruptor é a máquina de carga seguida da máquina em teste. Algumas excepções ao método terão de ser observadas no decorrer dos ensaios. Para a frequência de 12,5 Hz deve-se estipular como frequência de trabalho os 25 Hz, proceder ao arranque seguro das máquinas e só então reduzir a frequência utilizando o potenciómetro incorporado no conversor do motor em teste para que o arranque da máquina de carga ocorra sem alterações perigosas para os aparelhos, caso contrário, o conversor do motor de carga entrará em condição de erro e desligará a alimentação do motor de carga. Durante todos as fases do ensaio deve-se verificar as condições de funcionamento, nomeadamente a corrente absorvida pelo motor de teste. Uma variação superior de 0,5 A na intensidade de corrente não pode ser tolerada visto pôr em causa a integridade da máquina. Como exemplo, a máquina (IE4) a 25Hz que não consegue acompanhar a carga de 75% sem

exceder a corrente nominal em mais de 0,5 A. Aumentando a tensão, a corrente em vazio aumenta de 3 a 4 A para 11 A e uma vez ligada a carga aumenta para 14 a 15 A (relembrar que a corrente nominal da máquina IE4 é de 12,5 A). Desta forma, obter o valor da tensão que maximiza o rendimento torna-se impossível, sem comprometer a integridade dos enrolamentos da máquina. Muitos dos valores testados não foram registados por esta mesma razão. Além disso, valores acima das tensões que demonstravam o comportamento descrito não foram testados nem registados uma vez que dariam resultados semelhantes (corrente em vazio muito elevada), podendo mesmo colocar em risco a máquina e o conversor electrónico de potência.

## 6.- Resultados Experimentais

A recolha de dados incidiu sobre múltiplas variáveis, tanto mecânicas como eléctricas. Estas grandezas permitem avaliar o desempenho e as condições de funcionamento das máquinas eléctricas em teste. Realizaram-se 50 ensaios, nas diversas variações de carga e frequência, para cada um dos três motores. Foram recolhidas 45 variáveis, nomeadamente, tensões e intensidades compostas de RMS e de harmónicas, a partir do analisador de potência do sistema de monitorização e controlo e do multímetro. Com estes dados foram elaborados gráficos que explicitam o teor deste trabalho numa apreciação do rendimento face à carga imposta com diferentes frequências. Nas Figuras 16 a 27 encontram-se sob a forma de gráfico os dados recolhidos das grandezas de tensão (a azul), perdas totais (a vermelho), rendimento (a verde) e temperatura (a laranja) dos 3 motores testados. Para uma mais rápida análise visual os resultados foram expressos em p.u. e agrupados em frequência e carga. Estas mesmas grandezas foram recolhidas por Roberto Pinto, no seu trabalho [14] paralelo a este, cujo objectivo era determinar a carga para a qual a temperatura era próxima da nominal à plena carga, mantendo a linearização da tensão frequência e cujos resultados serão aqui apresentados a título comparativo. A hipótese neste trabalho é que, variando a tensão, se obtêm melhores rendimentos, devido a redução do fluxo magnético e por consequência redução das perdas por histerese e correntes de Foucault. Partindo do princípio que a potência mecânica se mantém constante (impõe-se esta condição com o funcionamento do motor de carga) e admitindo que o factor de potência não varia, significativamente com as variações a que está sujeito o sistema (variações de carga, temperatura, flutuações da alimentação), pode-se isolar como variáveis a tensão e a corrente. Desta forma, observou-se uma diminuição na tensão, que por sua vez se traduz numa redução efectiva das perdas totais.

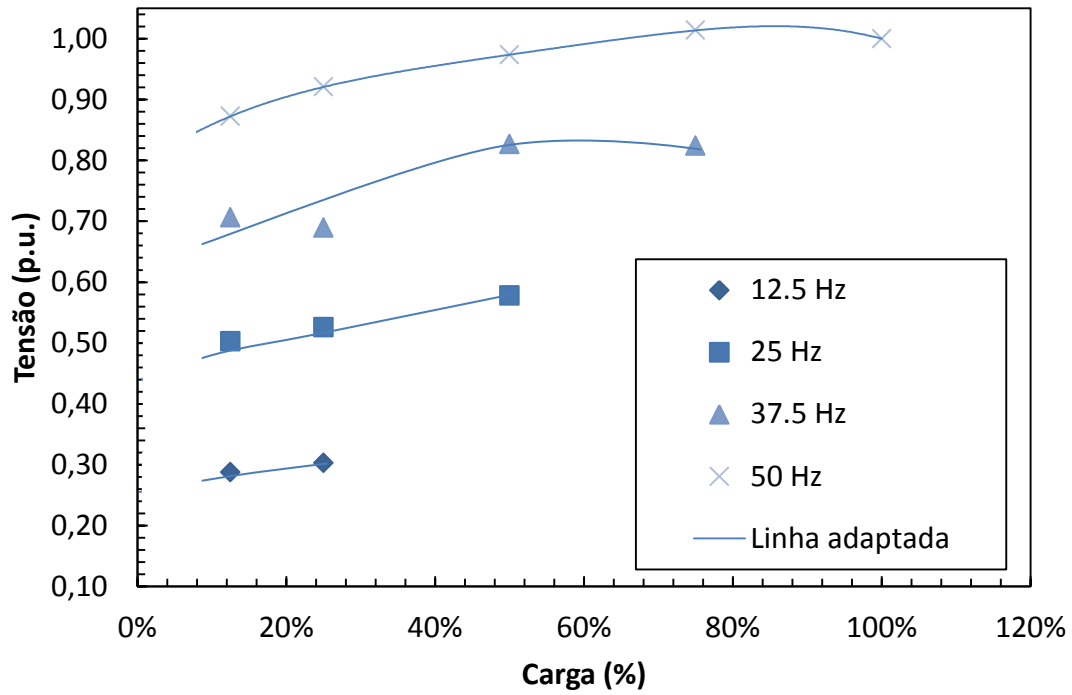


Figura 16: Tensão em p.u. em função da carga no motor classe IE4.

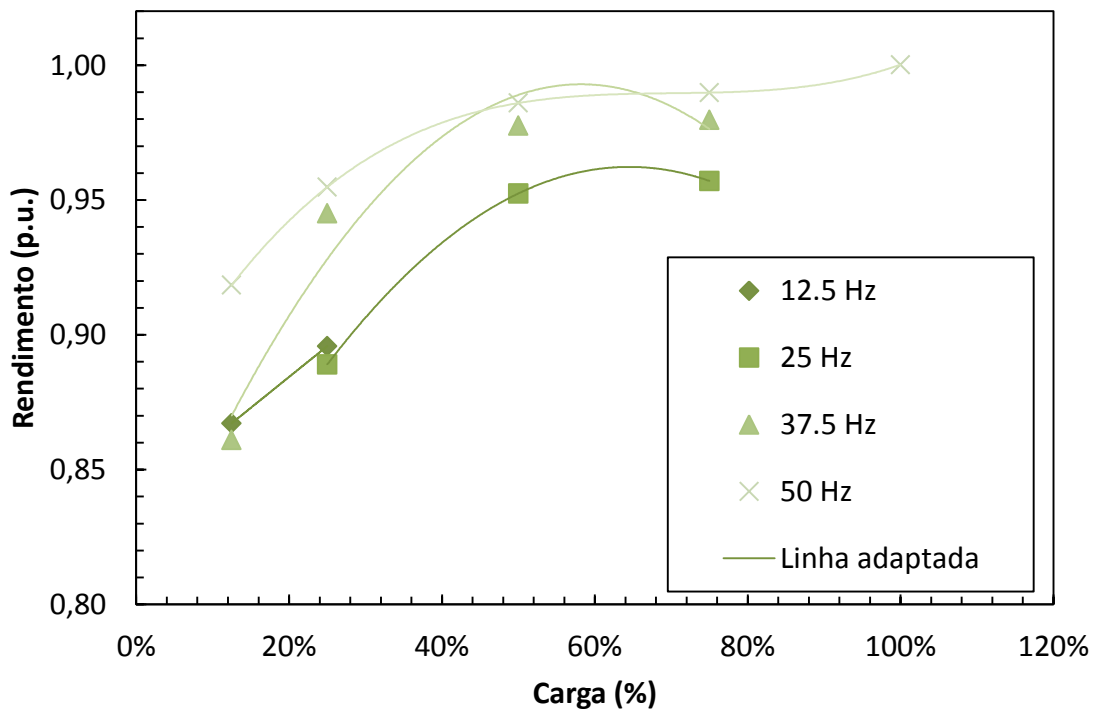


Figura 17: Rendimento em p.u. em função da carga no motor classe IE4.

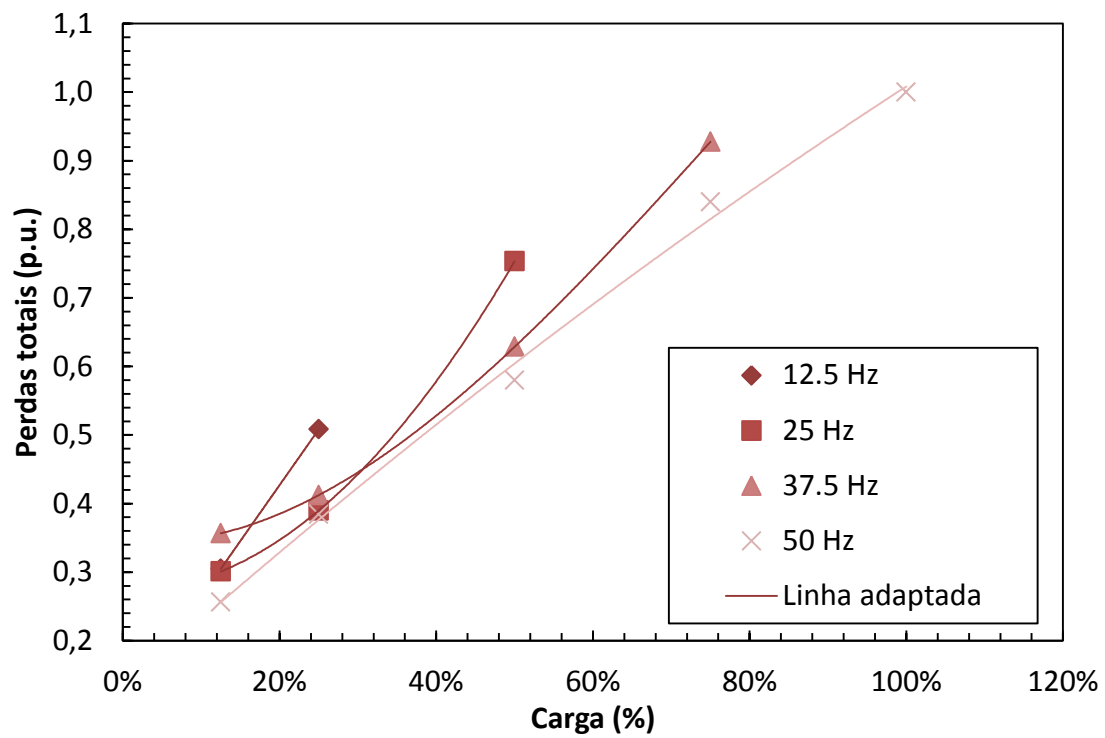


Figura 18: Perdas totais em p.u. em função da carga no motor classe IE4.

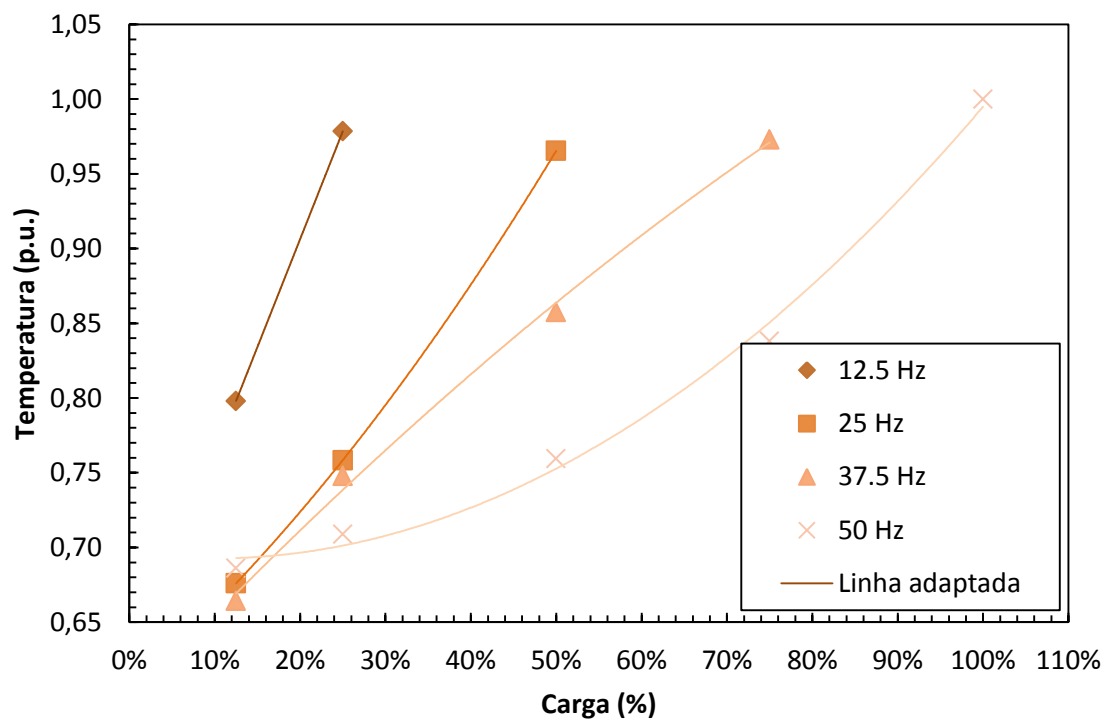


Figura 19: Temperatura em p.u. em função da carga no motor classe IE4.

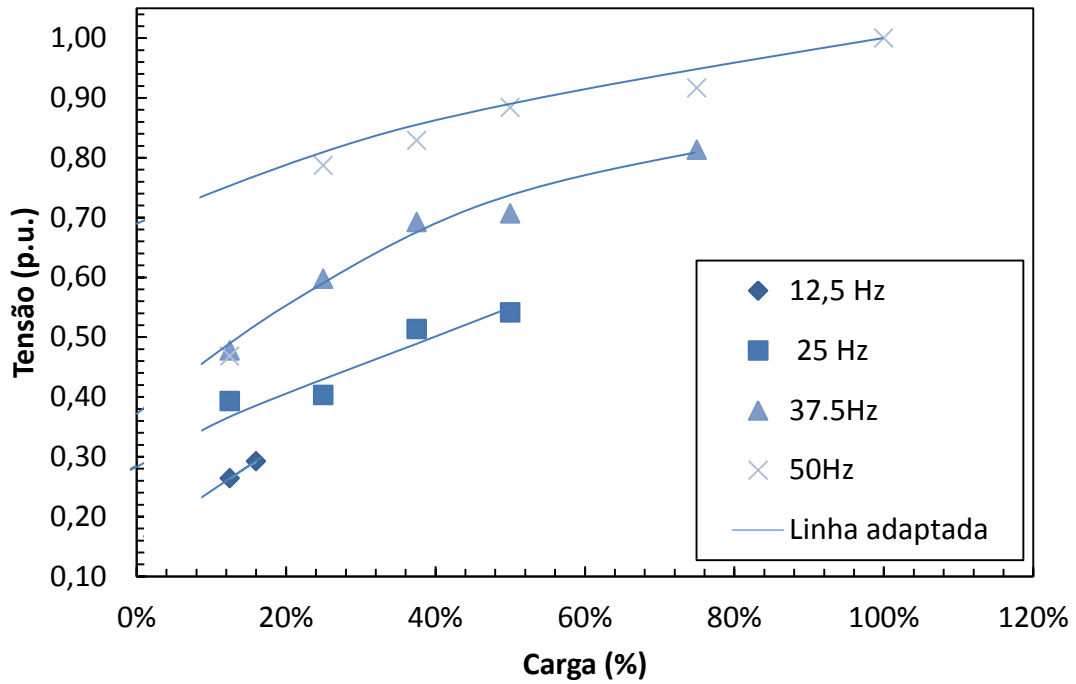


Figura 20: Tensão em p.u. em função da carga no motor classe IE3.

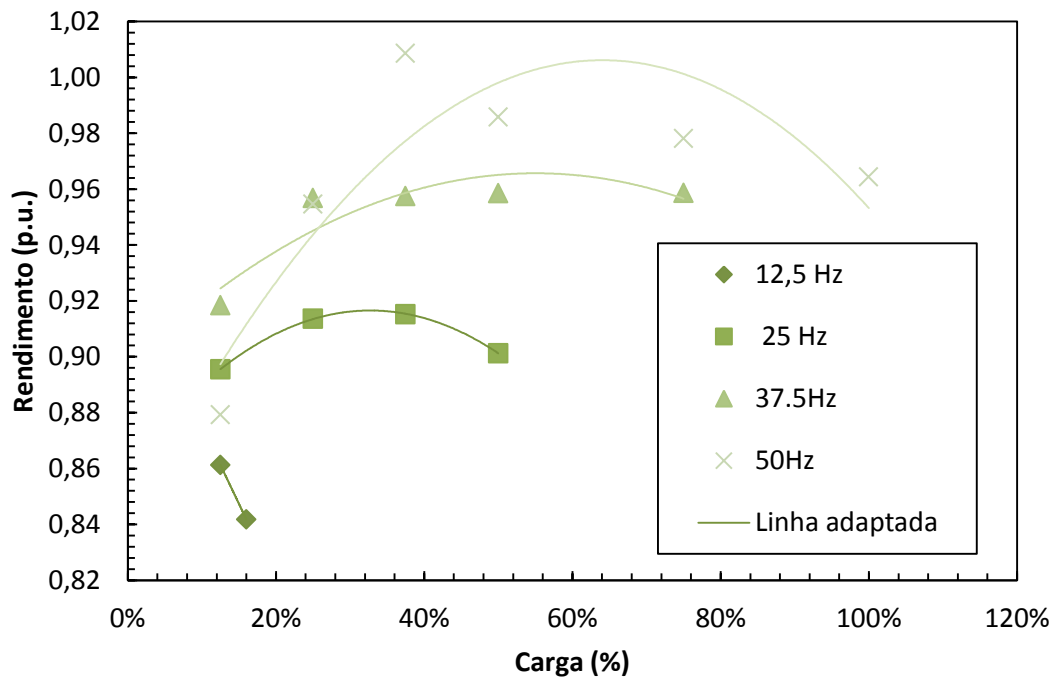


Figura 21: Rendimento em p.u. em função da carga no motor classe IE3.

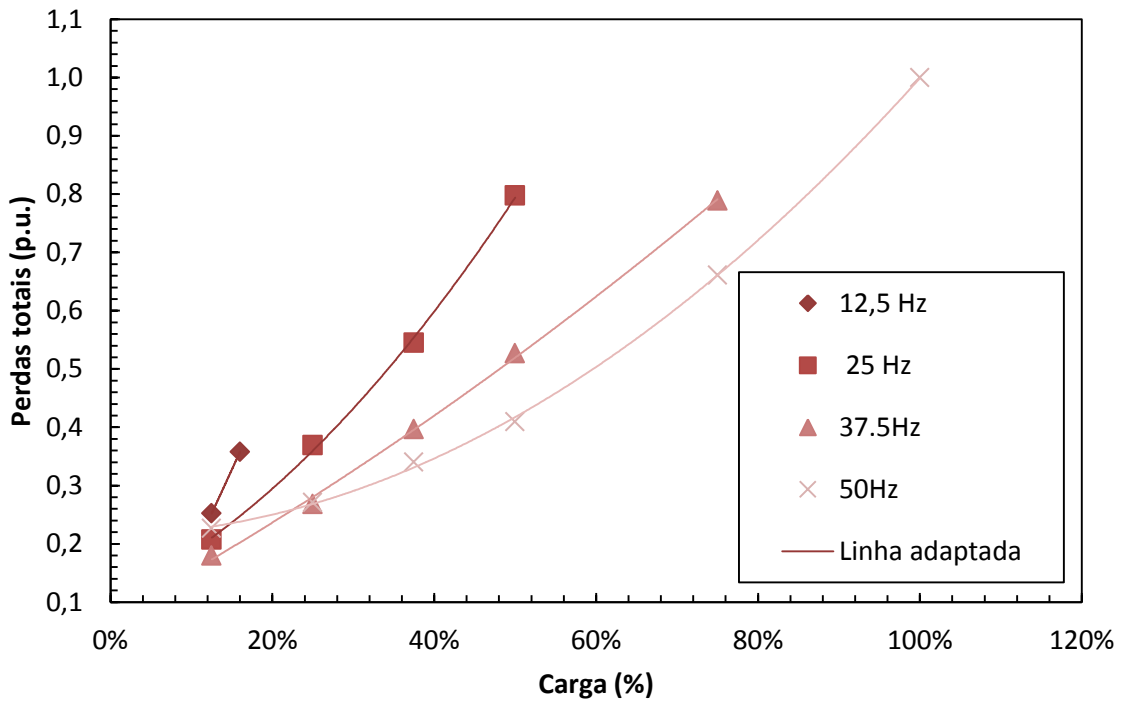


Figura 22: Perdas totais em p.u. em função da carga no motor classe IE3.

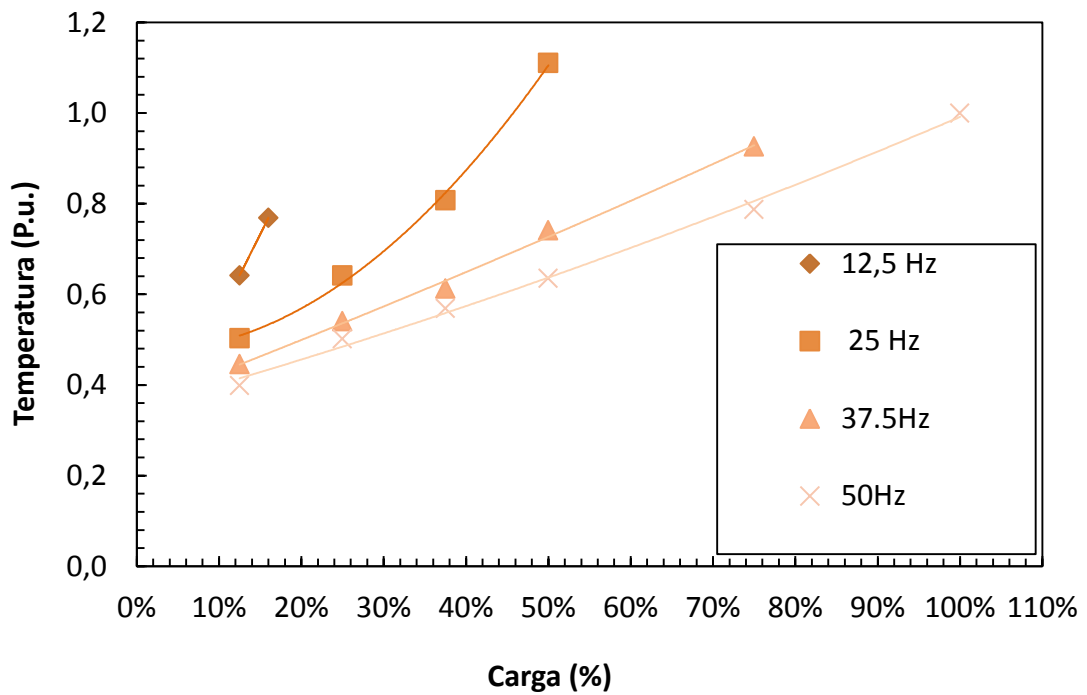


Figura 23: Temperatura em p.u. em função da carga no motor classe IE3.

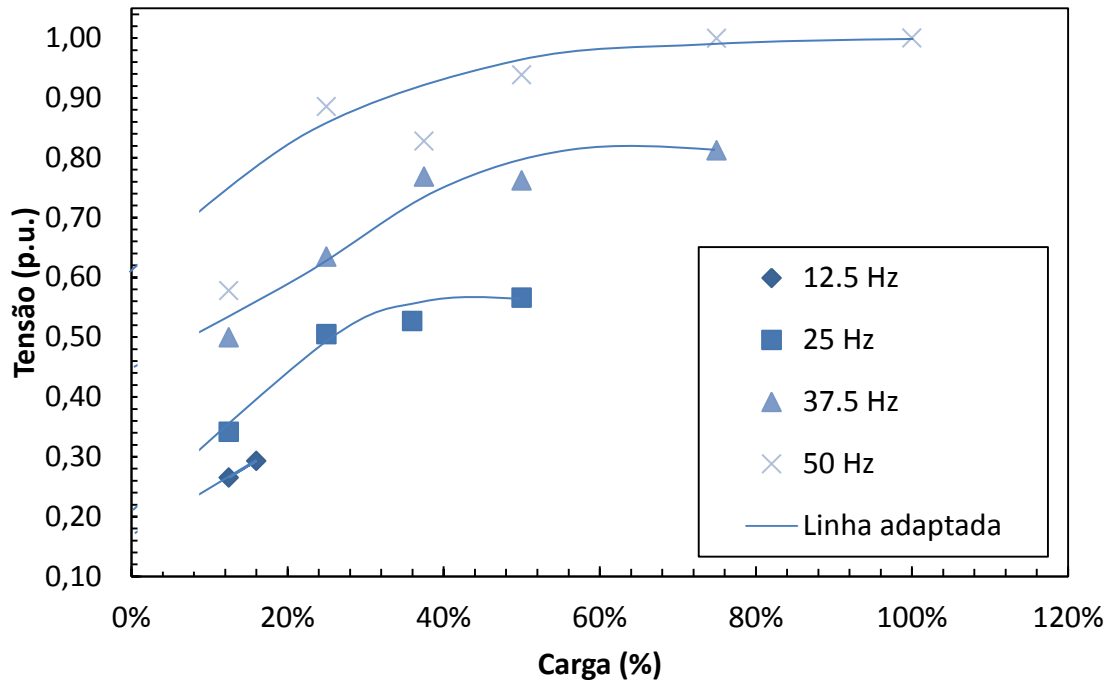


Figura 24: Tensão em p.u. em função da carga no motor classe IE2.

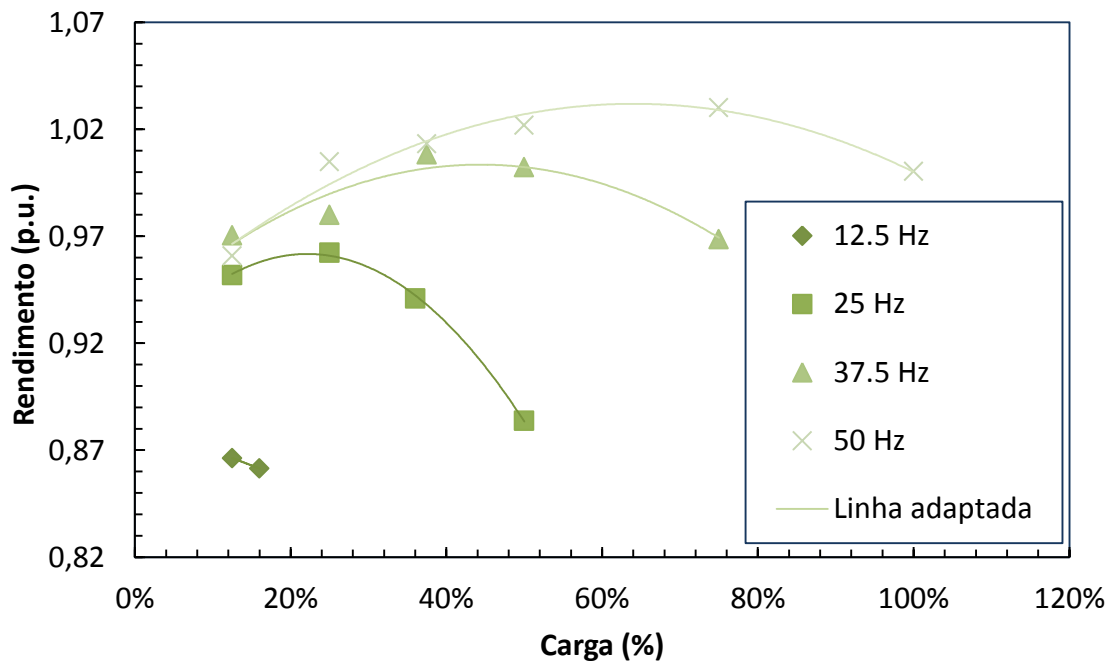


Figura 25: Rendimento em p.u. em função da carga no motor classe IE2.



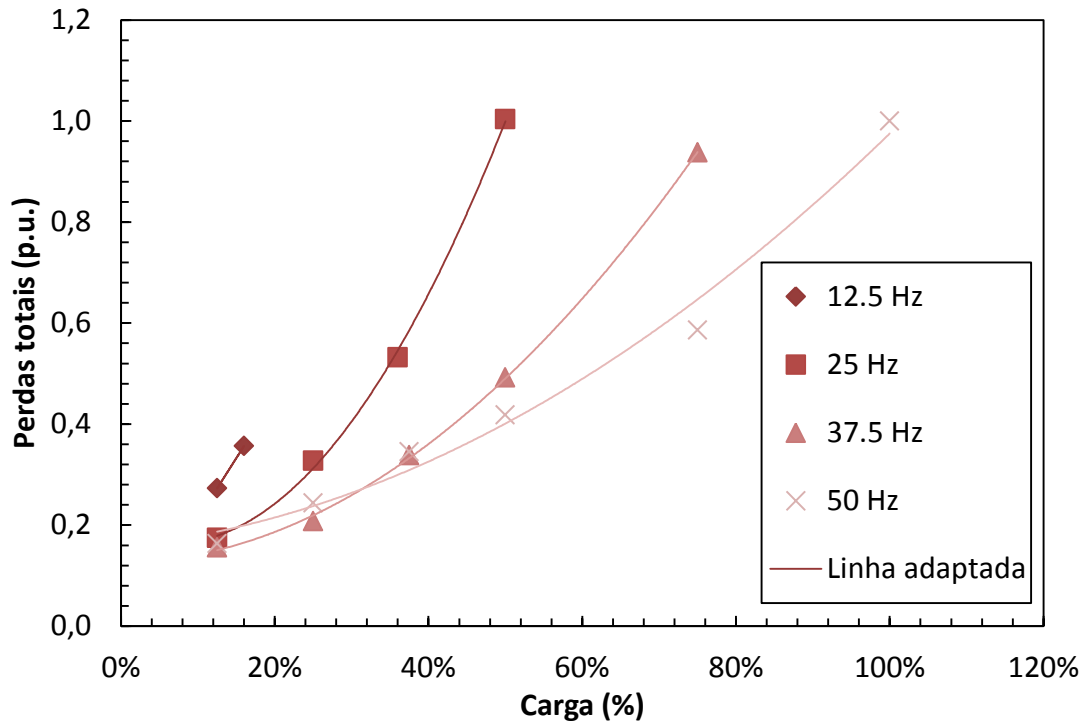


Figura 26: Perdas totais em p.u. em função da carga no motor classe IE2.

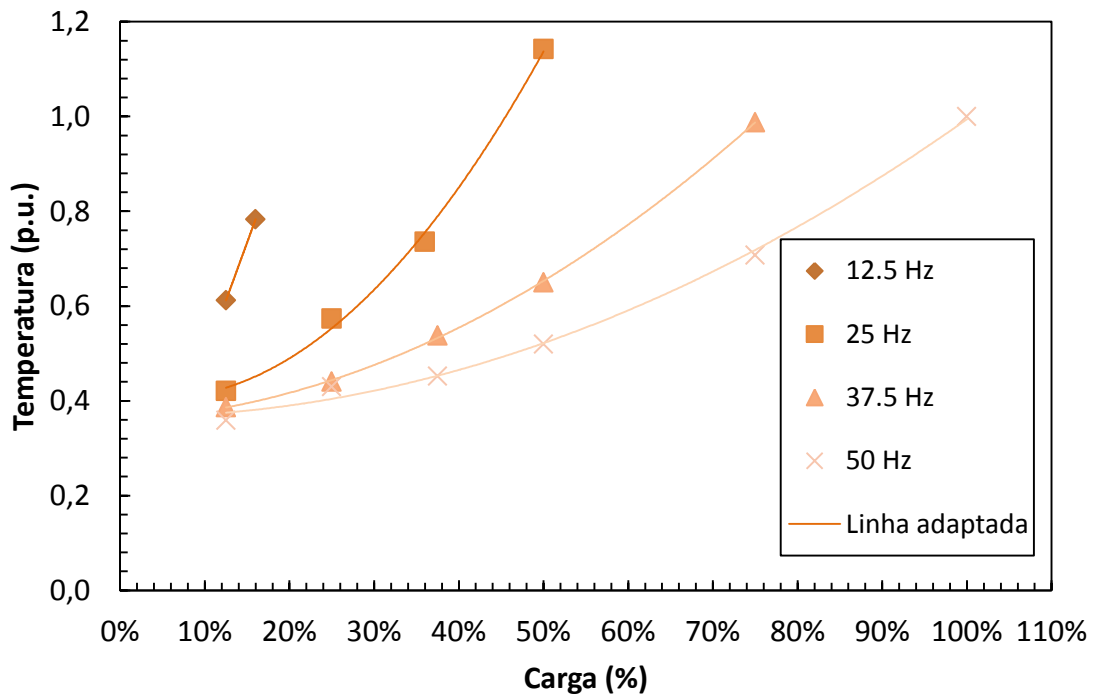


Figura 27: Temperatura em p.u. em função da carga no motor classe IE2.

Da análise dos gráficos 16 a 27, pode-se inferir que diminuindo a frequência, a tensão também diminui. O mesmo se verifica quando se diminui a carga. No entanto o motor não é capaz de produzir o mesmo binário, como é visível pela falta de pontos a baixas frequências nos pontos mais elevados de carga. Para pontos de carga mais elevados, a baixa frequência, o seu funcionamento não é possível, pois a corrente em vazio excede a corrente nominal no caso de tensões elevadas a baixa frequência (atentar nos gráficos 32 a 34). Isto é devido à não linearidade da curva de magnetização do material ferromagnético, que impõe um aumento da corrente em vazio com o aumento da relação tensão/frequência. Atentar também no facto de, com a redução da frequência, a impedância de magnetização do motor diminui o que, para a mesma tensão, vai originar um aumento da corrente absorvida devido novamente a não linearidade da magnetização do entreferro [5].

Como seria de esperar, os rendimentos nos pontos de cargas são sempre acima dos 80%, mesmo quando o ponto de carga é baixo. Isto entra em claro contraste com o rendimento obtido [14] com linearização da tensão com a frequência.

As perdas totais associadas ao trabalho do motor decrescem com a diminuição da carga. Para analisarmos este fenómeno tem de se desagregar as mesmas para poder avaliar com mais precisão os resultados. As perdas podem ser desagregadas, em perdas variáveis com a carga e perdas constantes segundo (10). As perdas variáveis com a carga têm a sua origem no efeito de Joule, directamente imputáveis à corrente absorvida. As perdas constantes, são devidas a correntes de Foucault e a histerese do material ferromagnético, bem como perdas mecânicas. Assim, faremos a análise tendo em conta a máxima transferência de potência [15]. Num transformador, a máxima transferência de potência dá-se quando a impedância no primário é equivalente a impedância no secundário. Uma análise semelhante pode ser feita para um motor assíncrono, uma vez que em termos de circuito equivalente, o motor assíncrono apresenta muitas características idênticas ao transformador. Desta forma, faz-se equivaler à impedância de magnetização, a impedância do primário e à impedância do rotor, em função do deslizamento, a impedância do secundário. Mais concretamente, pode-se relacionar as perdas constantes à impedância primária uma vez que esta é responsável pelos fenómenos de magnetização e histerese e a impedância do rotor, que é directamente proporcional à velocidade requerida pela carga, às perdas variáveis com a carga.

O máximo rendimento é obtido quando existe a máxima transferência de potência, ou seja, como exposto anteriormente, quando as impedâncias são iguais e assim sendo, quando as perdas constantes e variáveis com a carga são iguais [15]. Uma vez que as perdas variáveis com a carga neste trabalho vão oscilar, também o ponto de máximo rendimento irá variar. Com isto, e mantendo o objectivo de maximizar o rendimento, é necessário variar a tensão, de modo a aumentar o fluxo magnético de forma a regular as perdas constantes numa tentativa de igualar as perdas variáveis com a carga. Assim, o fenómeno de máxima transferência de potência verifica-se para o novo ponto de carga.

Diminuindo a frequência, diminui-se o peso (no total das perdas) das perdas por histerese e magnetização, e aumenta o factor das perdas no cobre (por efeito de Joule) alterando assim a forma da curva do rendimento, afastando-a do tradicional. Com isto obtém-se também, uma deslocação no sentido longitudinal do ponto de máximo rendimento no sentido decrescente da carga. Na Figura 28 pode-se observar o rendimento típico de um motor IE2 alimentado a 400V com frequência de 50Hz. Nas Figuras 29 a 31 ilustra-se a comparação do rendimento obtido com o rendimento a uma tensão nominal fixa sinusoidal. Idealmente, a comparação deveria ser feita com alimentação de onda PWM com as mesmas características da alimentação utilizada nestes ensaios, feita pelo mesmo tipo de conversor, o que não foi realizado por falta de resultados de ensaios com tensão fixa, devido a morosidade envolvida com ensaios adicionais, uma vez que este trabalho ocorreu em paralelo com [14]. Assim a análise limita-se à comparação da alimentação por conversor face a alimentação da rede.

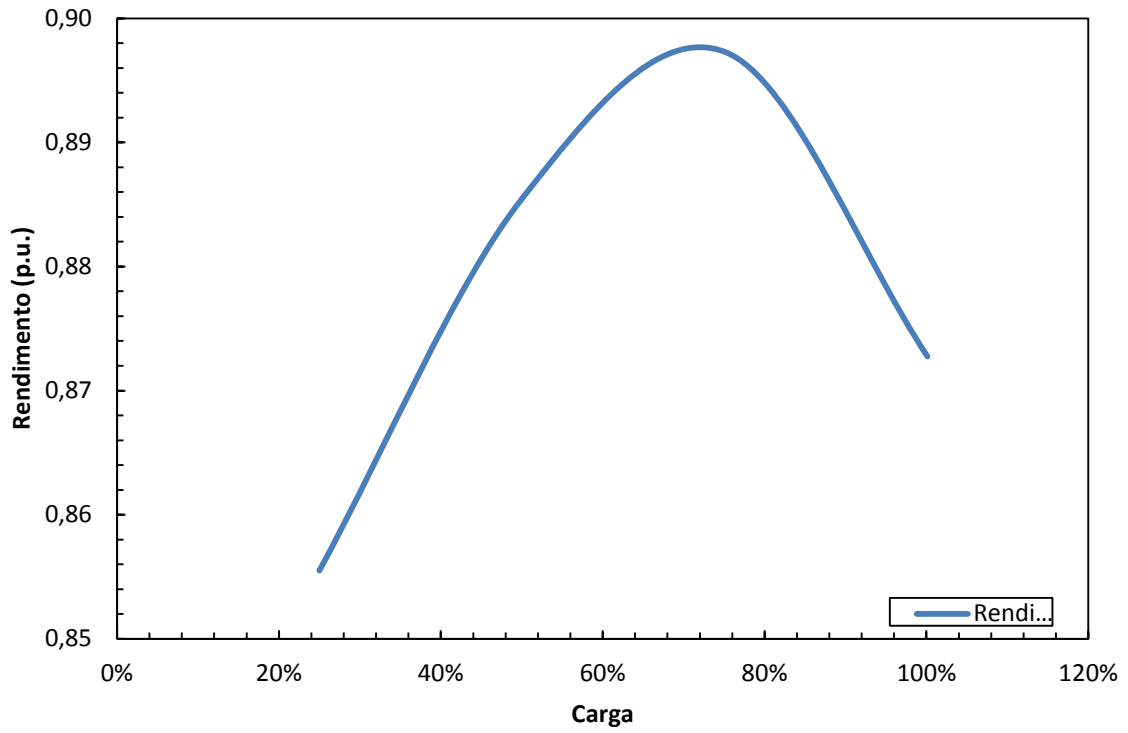


Figura 28: Rendimento de um motor classe IE2 com alimentação da rede.

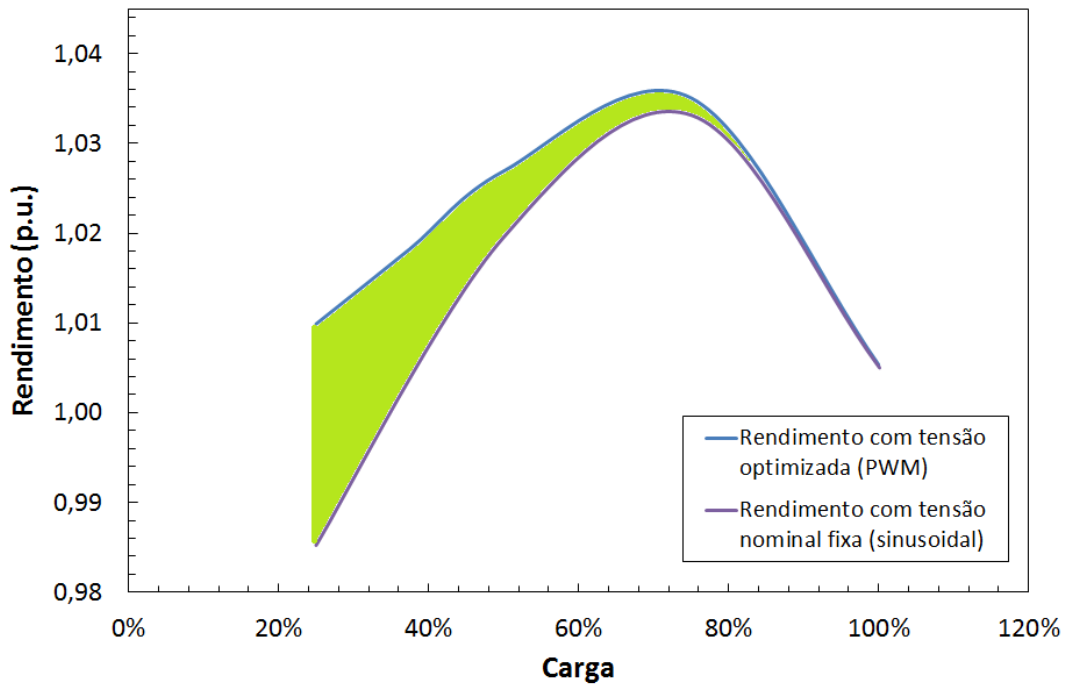


Figura 29: Comparativo do rendimento otimizado para o rendimento com tensão nominal fixa sinusoidal do motor classe IE2.

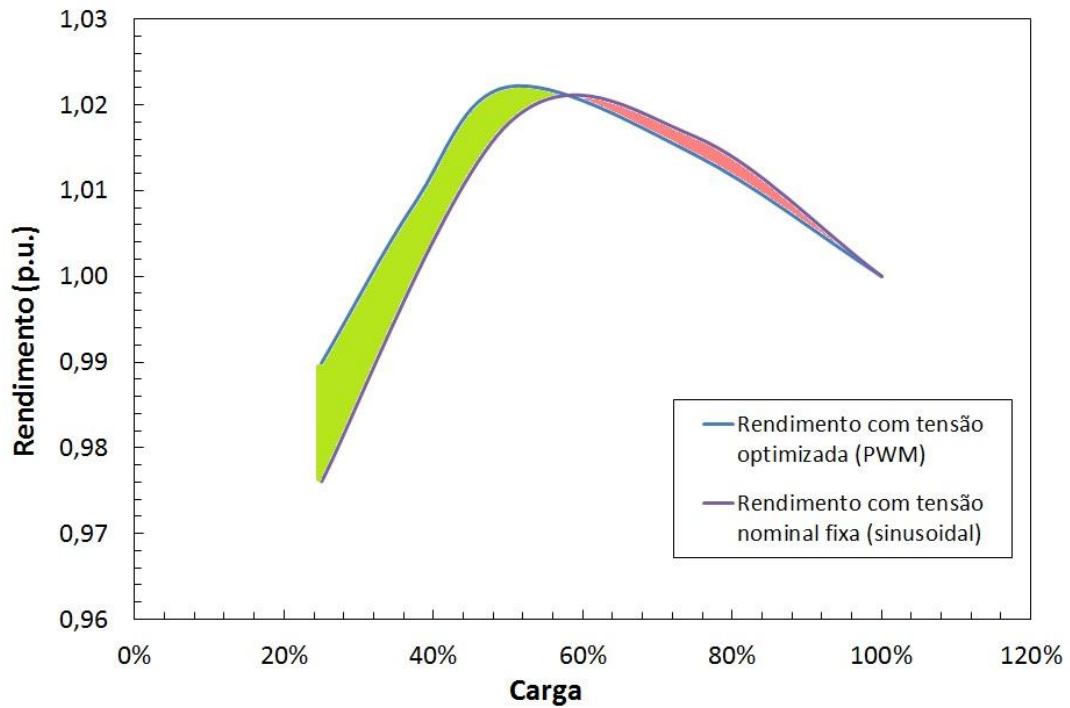


Figura 30: Comparativo do rendimento otimizado para o rendimento com tensão nominal fixa sinusoidal de um motor de classe IE3.

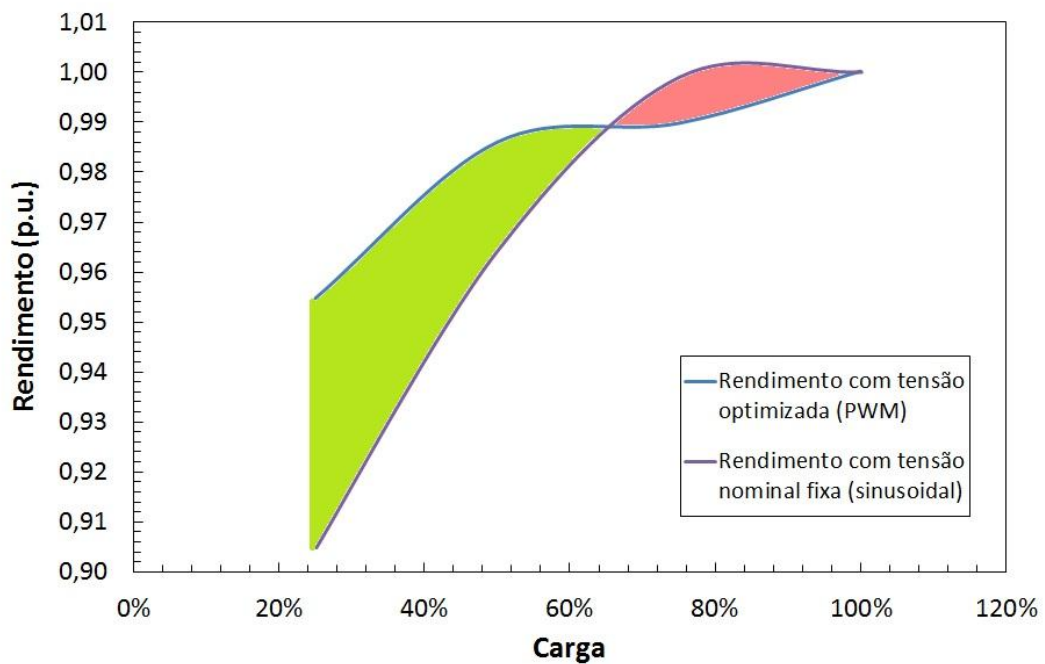


Figura 31: Comparativo do rendimento otimizado para o rendimento com tensão nominal fixa sinusoidal de um motor de classe IE4.

Atentando nas Figuras 29 a 31 observa-se que os ganhos são sobretudo situados abaixo da carga de 50%. Mais se observa que existem valores acima do 1 p.u., que se devem ao facto de a conversão de unidade ter sido feita face ao valor nominal presente na chapa de características do motor, Tabelas 1 a 3, e não ao valor obtido no primeiro ensaio a 100% carga com 50Hz de frequência de alimentação. Estes gráficos apenas relatam os ganhos a 50Hz, visto ser essa a frequência da rede, caso típico da indústria. Nos pontos de carga superiores a 50%, existem aumentos de rendimento no caso típico em relação ao rendimento otimizado. Isto deve-se ao facto de o conversor de potência introduzir harmónicos no motor, devido à tensão PWM, que produzem perdas não desprezáveis nos valores mais altos de carga, e daí reduzir o rendimento, sendo superadas estas perdas, nos valores inferiores a 50% de carga, pelo maior rendimento obtido por este método e que ultrapassa mesmo as perdas assim introduzidas. Com os dados dos gráficos elaborou-se a Tabela 4 que representa a diferença entre o rendimento típico e o rendimento otimizado em torno do valor 50% de carga

**Tabela 4: Variação de rendimento (p.u.) da tensão otimizada face ao rendimento típico.**

	30%	40%	50%	60%	70%
<b>IE2</b>	0,020	0,013	0,007	0,004	0,003
<b>IE3</b>	0,012	0,010	0,004	-0,005	-0,002
<b>IE4</b>	0,044	0,034	0,020	0,007	-0,005

Da Tabela 4 facilmente se conclui que, de um modo geral, quanto mais alta a classe energética maior a variação positiva do rendimento (em pontos iguais ou inferiores a 50% de carga). Com isto, e tendo em conta que cada vez mais são adquiridos motores de classe energética elevada, e que os motores de baixa classe, em uso na indústria estão a ser gradualmente substituídos, por motores de melhor rendimento, o potencial de poupança aumenta. Como era esperado, em cada motor nota-se uma diminuição da variação de rendimento com o aumento da carga. Os valores negativos na Tabela 4 representam pontos onde o rendimento típico de uma máquina alimentada na rede se sobrepõe ao rendimento otimizado. Esta característica é devido às perdas impostas pelos harmónicos nos pontos de carga acima de 50%. É de realçar que, em módulo, estes valores são muito menores que os valores das variações positivas e que os motores na indústria estão constantemente subaproveitados, ou seja, não são utilizados à sua carga nominal. Para mais fácil compreensão o valor de 0,044 p.u. representa 330W

enquanto que o valor de 0,005 representa 37,5W. O valor máximo de variação positiva calculou-se para 25% carga, no motor IE4, com o valor de 0,049 p.u. que representa 367,5W. Para além destes dados é necessário realçar que a perda de rendimento introduzida pela tensão PWM não ultrapassa os 0,5%, representando 37,5W. Aumentando a frequência de comutação no conversor poderemos obter uma diminuição de perdas por harmónicos no motor pois a onda aproxima-se mais da forma sinusoidal.

Este aumento de rendimento é também fruto do aumento de absorção de corrente por parte dos motores que, para o mesmo binário mas para menores frequências, necessita de maior corrente. Para melhor entendimento, apresentam-se também as Figuras 32 a 34 com a corrente absorvida em cada motor em p.u.. Novamente, os valores foram convertidos face ao valor da chapa de características que leva nos casos em que foi ultrapassado a uma absorção de corrente superior a 1 p.u. em determinados pontos de carga.

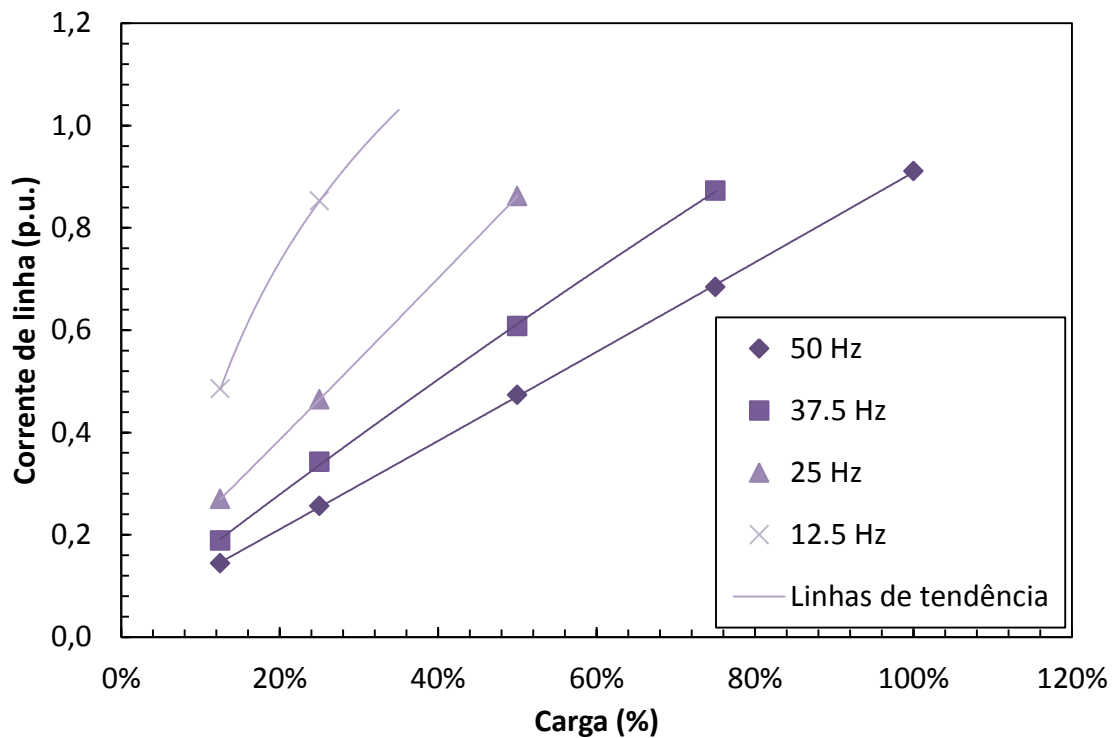


Figura 32: Corrente absorvida (p.u.) em função da carga no motor classe IE4.

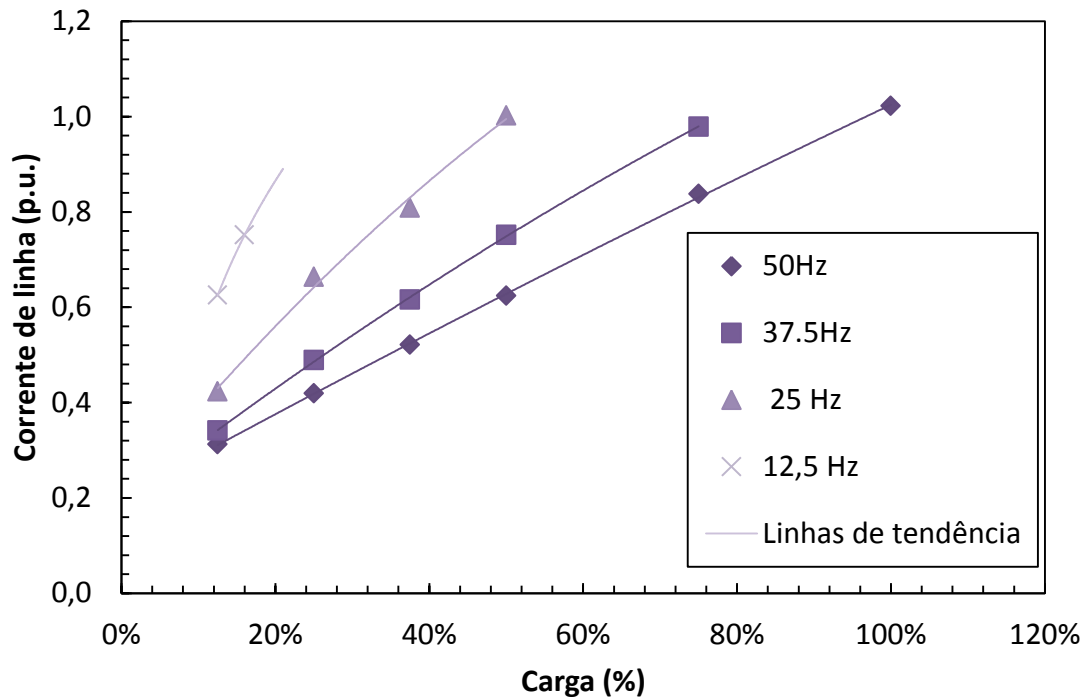


Figura 33: Corrente absorvida (p.u.) em função da carga no motor classe IE3.

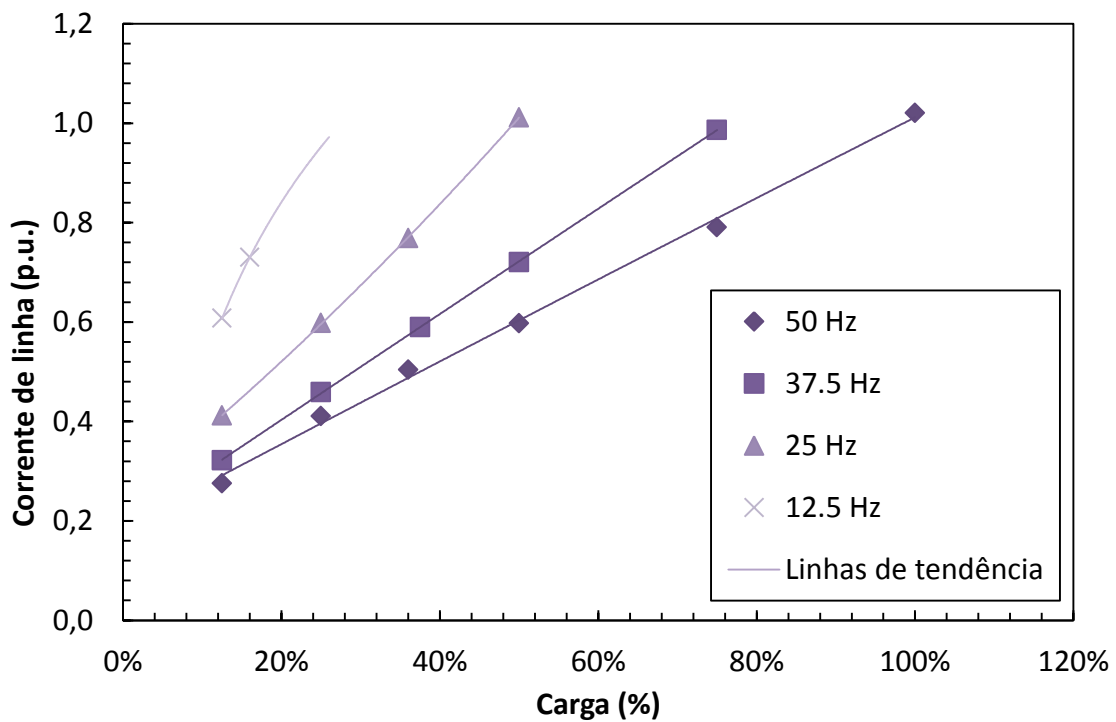


Figura 34: Corrente absorvida (p.u.) em função da carga no motor classe IE2.

Os gráficos 32 a 34 demonstram que a corrente necessária para o funcionamento é cada vez mais alta quando se diminui a frequência para os pontos de carga que podem ser



directamente comparados. Relacionando o aumento da corrente com a diminuição da ventilação, é esperado um aumento da temperatura, confirmado pelos gráficos 18, 22 e 26. As perdas totais são mais elevadas nos pontos de carga superiores a 25% o que nos leva a concluir que a ventilação até esse ponto não afecta tanto como a variação de carga. Para a mesma carga, quando existe decréscimo da frequência força uma menor velocidade que, aliada ao facto de se querer manter o ponto de carga implica um aumento de binário e conseqüentemente um aumento de corrente. A variação desta é importante pois condiciona as perdas por efeito de Joule. Neste trabalho foram realizados ensaios a diferentes frequências. Ao diminuir a frequência de alimentação do motor é notório o aumento da corrente absorvida, visível nas Figuras 32 a 34. Esta variação é traduzida pelo quociente entre a potência mecânica,  $P_{mec}$ , e a potência eléctrica,  $P_{elec}$ , a carga e expressa pela equação (17):

$$Carga = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} = \frac{T \cdot \omega}{P_{elec}}, \quad (17)$$

em que  $T$  é o binário e  $\omega$  a velocidade angular.

Uma vez que a potência mecânica é o produto do binário com a velocidade [5] e que esta é dependente da frequência (no caso de número de pólos constantes, dependente da construção do motor), para manter a mesma carga mantendo a potência de entrada, deve-se aumentar o binário expresso pela equação (18):

$$T_D = 3 \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r(1-s)}{s}, \quad (18)$$

onde  $T_D$  é o binário entregue à carga,  $I_r$  a intensidade de corrente no rotor,  $R_r$  a resistência no rotor e  $s$  o deslizamento. Este é directamente proporcional ao quadrado da corrente rotórica [12], que aliado ao decréscimo do caudal de ventilação, implica um aumento de temperatura. Enfatiza-se o cuidado que se deve de ter com a variação da temperatura, pois esta é reforçada com estes dois factores, o aumento das perdas por efeito de Joule e o decréscimo de ventilação. Mesmo maximizando o rendimento, a máquina só deve operar até um limite de carga que lhe permite retirar o máximo do rendimento, sem expor os enrolamentos a temperaturas excessivas. Essas temperaturas excessivas podem originar o envelhecimento precoce do isolamento nos enrolamentos. Com base nesta premissa, elaborou-se a Figura 35 que expõe a carga máxima a que a máquina pode ser sujeita sem ultrapassar a temperatura nominal em função da frequência e com maximização do rendimento.

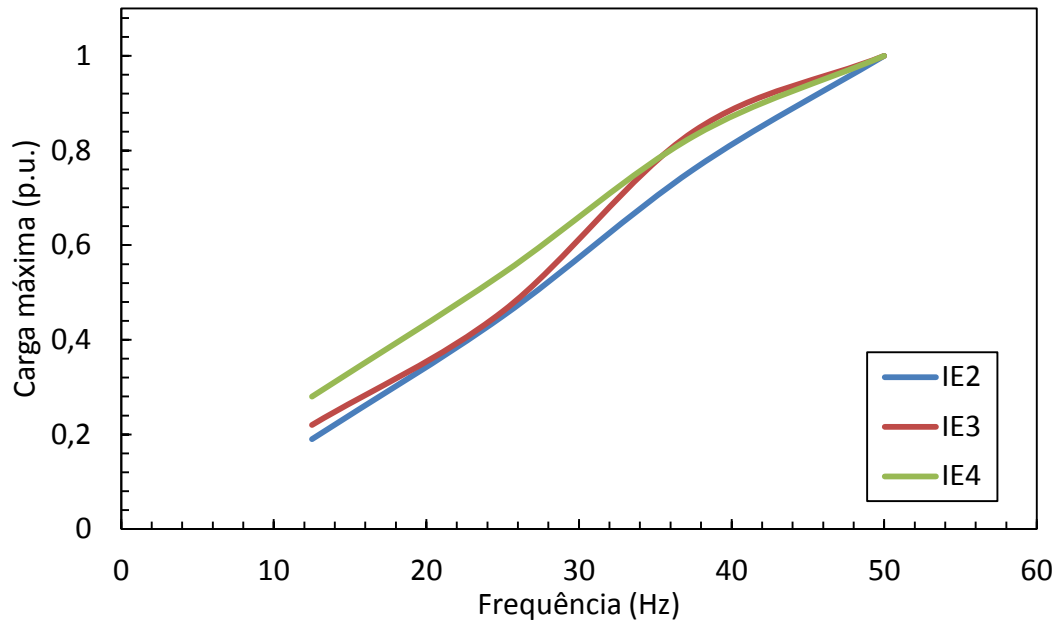


Figura 35: Carga máxima à temperatura nominal em p.u. em função da frequência com maximização de rendimento.

Observa-se na Figura 35 que há um aumento da carga máxima com o aumento da frequência, o mesmo se podendo relatar sobre o aumento de classe energética. Apresenta-se também a Figura 36 que demonstra o binário máximo à temperatura nominal que pode ser requerido ao motor, com maximização de rendimento, em função da velocidade no veio.

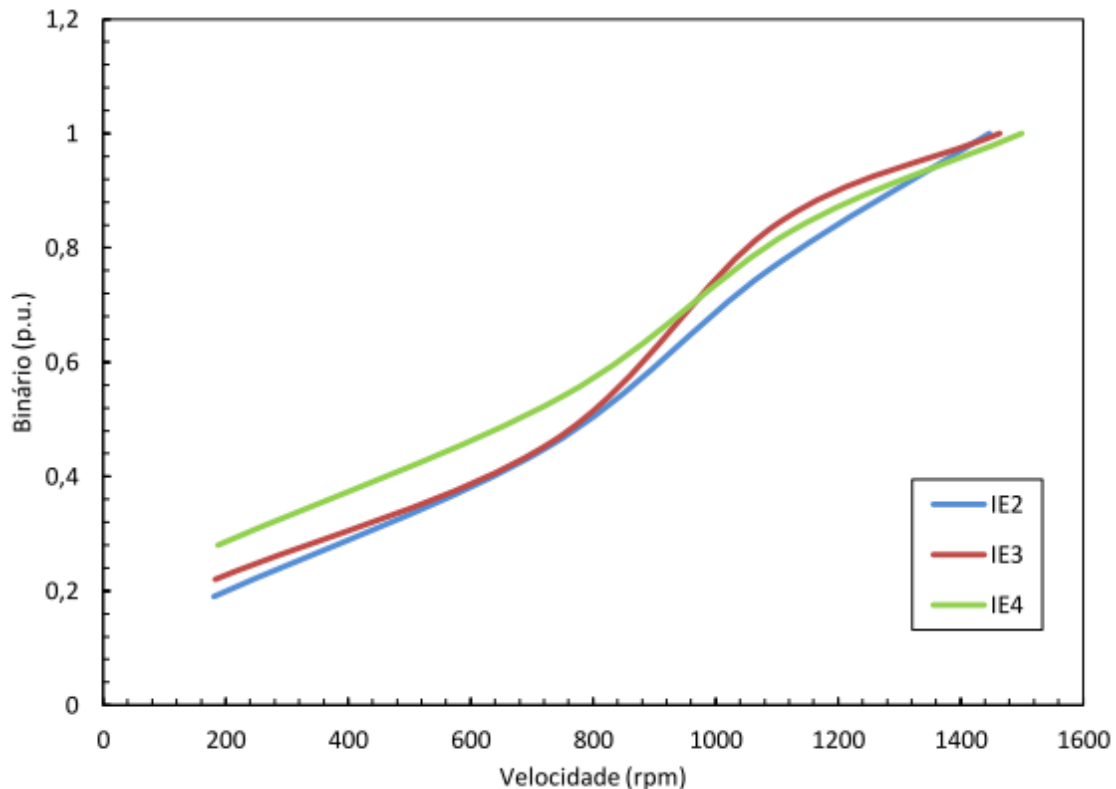


Figura 36: Binário máximo à temperatura nominal em p.u. em função da velocidade do veio com maximização de rendimento.

Nota-se na Figura 36 que a velocidade inicial é distinta nos três motores. Isto deve-se ao deslizamento que é inexistente no motor IE4 sendo uma máquina síncrona, estando presente nos motores IE3 e IE2 máquinas de indução e cujo deslizamento a 50Hz com 100% binário requerido se situa em 2,4% e 3,5% respectivamente.

Um outro comportamento observado é o aumento de temperatura a baixa frequência. Devido ao esforço do motor em acompanhar as cargas mais baixas, sendo capaz no entanto de acompanhar cargas superiores às obtidas no motor com linearização da curva  $U/f$  demonstradas em [14]. Este comportamento é também originado pela falta de ventilação, devido à redução do caudal de ar, providenciado pelo ventilador com 150 mm de diâmetro e 10 pás acoplado ao eixo, igual em todos os motores testados.

Nos gráficos 37 a 39 representam-se as curvas de tensão óptima em função da frequência para cargas quadrática e linearmente variantes com a variação da carga e para cargas constantes com a variação da carga.

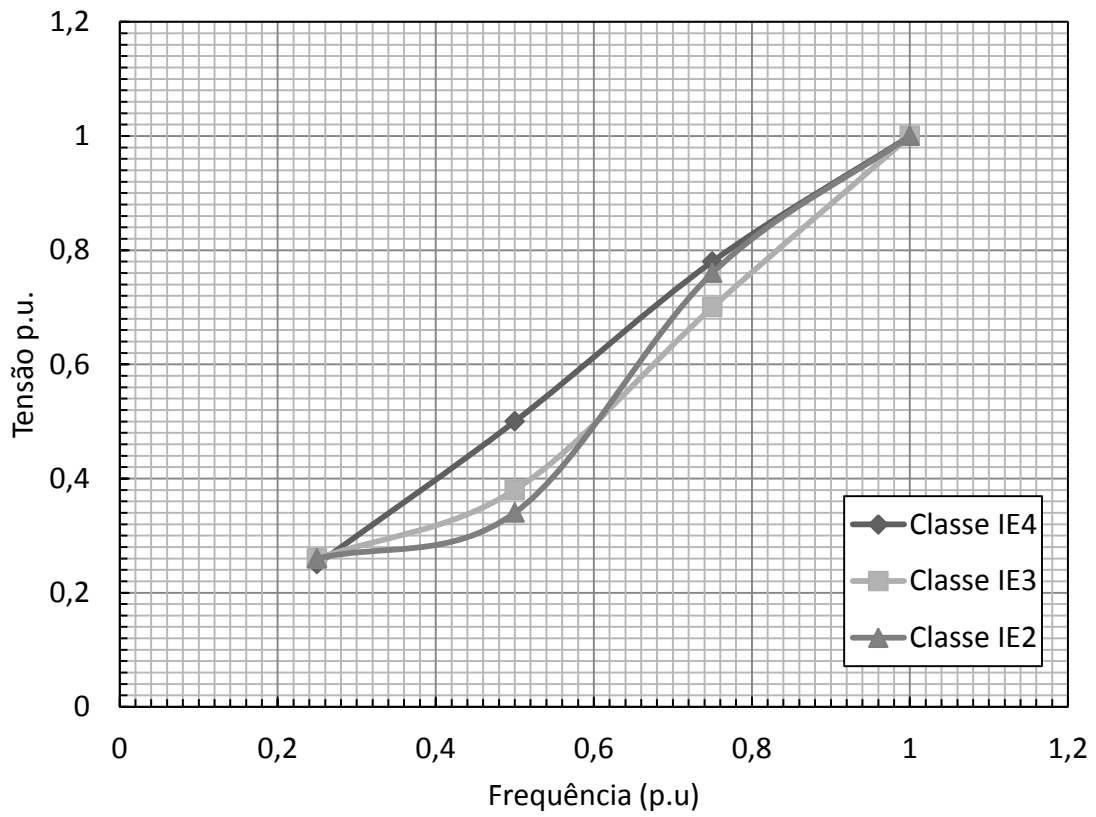


Figura 37: Tensão óptima em função da frequência para uma carga com variação quadrática em função da frequência.

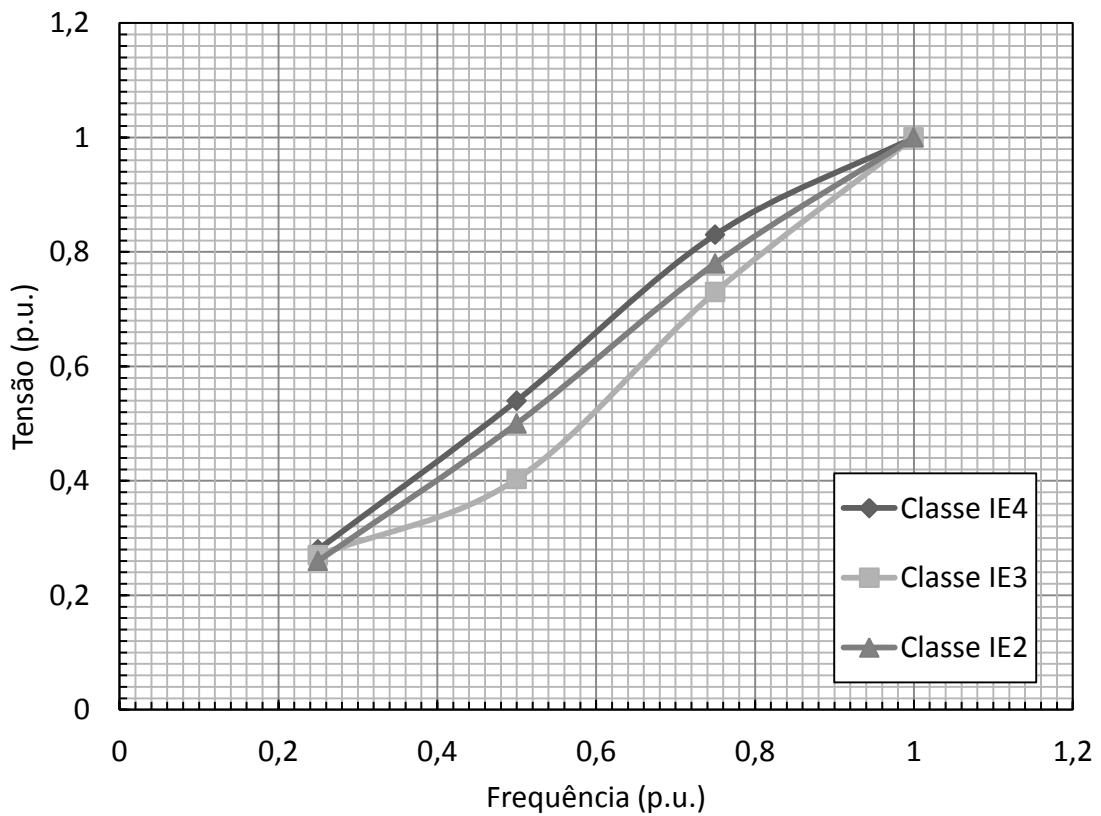


Figura 38: Tensão óptima em função da frequência para uma carga com variação linear em função da frequência.

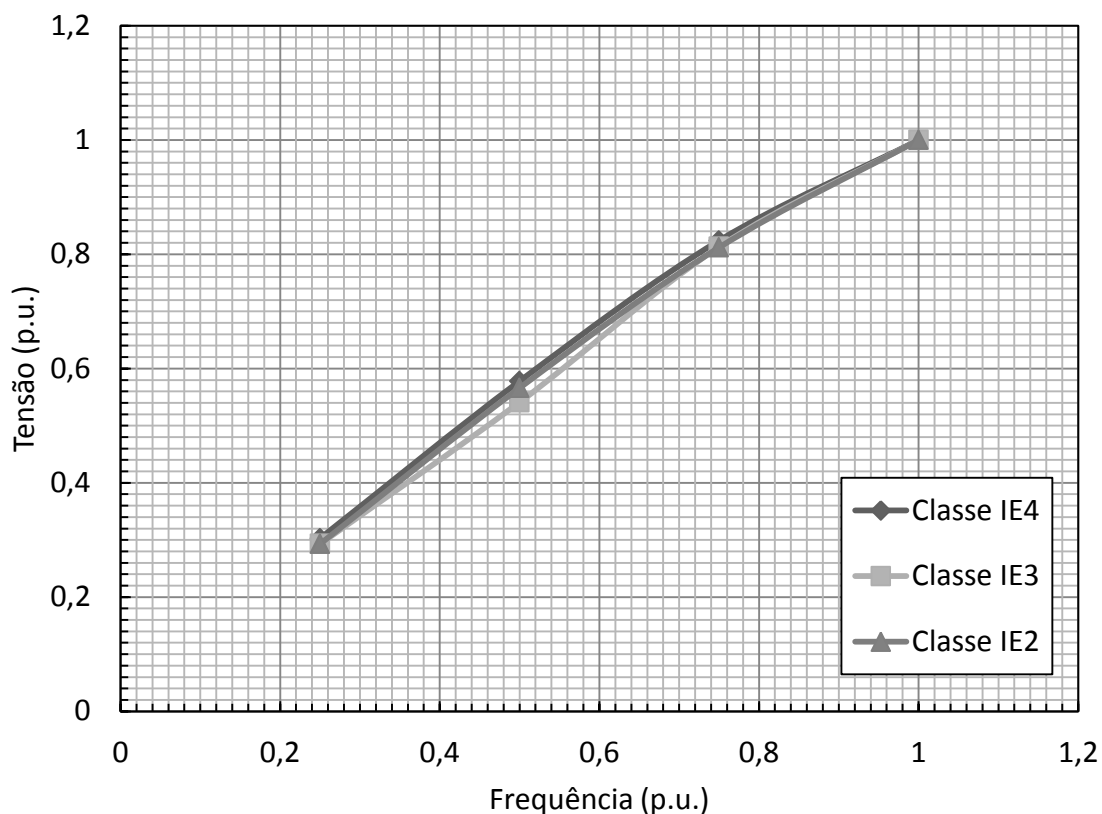


Figura 39: Tensão ótima em função da frequência para uma carga constante com a frequência.

Na Figura 37 observa-se um comportamento quase linear do motor da classe IE4. Este é um motor síncrono e a sua capacidade para manter a velocidade (aumentando o consumo de corrente) independentemente da carga imposta torna previsível esta forma da curva comportamento. Observa-se que o motor da classe IE2 possui uma curva que, para valores perto da frequência nominal, não evidencia as suas falhas mas que, desde os 35 Hz, apresenta um grande declive na sua forma, o que denuncia o seu fraco rendimento face aos motores de maior classe energética. O motor da classe IE3 apresenta desde 35Hz um declive menos acentuado, e uma tensão superior à do motor da classe IE2 demonstrando assim vantagem sobre este último. Na Figura 38, o motor da classe IE4 continua a ser o que menos oscilação de tensão necessita, para suportar a variação da carga enquanto que o motor da classe IE2 demonstra uma melhor habilidade para lidar com cargas lineares que o motor da classe IE3, visível pela sua curva ser mais elevada (requerendo portanto menor desvio da tensão inicial). O motor da classe IE3 apresenta uma curva com menos acentuação que na Figura 37, no entanto comporta-se como o pior entre as classes energéticas. Na Figura 39 a primeira conclusão é que as discrepâncias entre classes são muito menores que para os outros tipos de carga. O

motor da classe IE4 apresenta uma relação tensão/frequência muito linear. O motor da classe IE3 novamente apresenta uma maior oscilação a partir da frequência de 35Hz, e o motor da classe IE2 se mostra muito próximo da curva do motor da classe IE4 sendo a sua curva distinta deste último apenas a partir da frequência de 37,5 Hz.

Numa breve apreciação dos gráficos 16 a 27 para mais fácil apreensão dos resultados observa-se que o decréscimo de rendimento no motor IE4 é mais notório a partir de 25% de carga, onde acima deste valor, o rendimento obtido é sempre superior a 0,85 independentemente da frequência. Para 37,5 Hz a carga admitida como máxima em [14] que se rege pela linearização da tensão/frequência era de 69%. Com a otimização da tensão, a carga máxima foi de 75% com um rendimento de 0,90. Estas melhorias também se verificaram nas outras frequências testadas, onde para 25 Hz foi registada uma carga de 50% comparativamente aos 43,5% de carga em [14] e a 12,5 Hz obteve-se um registo aos 25% de carga quando com a linearização da tensão/frequência se obteve apenas 20%. De notar que o método utilizado visa otimizar a tensão para o máximo rendimento, o que foi alcançado obtendo-se ainda melhorias na carga que se pode acoplar ao motor.

As perdas verificadas com este método são inferiores as obtidas por [14], naturalmente, pois a maximização do rendimento implica a minimização das perdas. A resistência de magnetização depende directamente da frequência. Assim, quanto menor for a frequência menores serão as perdas por magnetização e consequentemente as perdas constantes. Deste modo a variação na tensão é importante pois permite nos regular o fluxo e com isso as perdas de magnetização. Focando a atenção nas curvas do motor IE4 nas Figuras 36 a 38, observa-se que estas têm uma forma diferente face às curvas dos motores de classe IE2 e IE3. Esta forma é justificada pelo uso de ímanes permanentes que sendo mais eficientes, isto é, não tendo perdas eléctricas no rotor, irão necessitar de menor oscilação na tensão, de forma a nivelar as perdas.

No motor IE3 o máximo do rendimento foi registado aos 50% de carga. A evolução do rendimento a 37,5 Hz é quasilinear até, novamente, ao ponto de 25% de carga onde se regista uma quebra de 0,87 para 0,80. Como esperado, os rendimentos registados são mais altos que com a linearização da  $U/f$ , havendo novamente melhorias no máximo de carga registado. A nível de temperaturas regista-se uma grande discrepância entre

valores do mesmo ponto de carga. A título de exemplo, há registos de temperatura das testas dos enrolamentos a funcionar de 75°C até 30°C para o motor de classe IE3 a 50 Hz. De notar que a 30°C o rendimento registado é de 0,80 o que nos permite inferir que não houve perda acentuada de rendimento neste ponto.

A análise do motor IE2 expõe que o seu comportamento se altera, visivelmente, com a variação da frequência. Isto era expectável pois o motor W22 *High Efficiency* era dos motores em teste o de menor rendimento, 89%, sendo o que maiores perdas apresenta, devido ao método de fabricação empregue na sua construção ser mais ineficaz que nos outros motores testados. Aliás, fruto da observação dos dados, pode-se afirmar que a oscilação da tensão no sentido de maximizar o rendimento ao longo da carga é menor nos motores de melhor classe de eficiência. Da observação das Figuras 16, 20 e 24 obtém-se que a variação de tensão entre os valores de carga máxima e carga mínima no motor de classe IE4 é de 0,125 p.u. enquanto que nos motores de classe IE3 e IE2 são 0,4175 p.u. e 0,5275 p.u., respectivamente. Foi realizada a análise à frequência de 50 Hz onde se conhecem mais pontos, resultando assim numa avaliação mais precisa dessa oscilação. Destas figuras também se retira que com o decréscimo da carga existe um decréscimo da tensão, tendência suportada pelas linhas adaptadas, que indicam o sentido descendente desta grandeza com a diminuição da carga. Este comportamento era expectável pois diminuindo a tensão reduzem-se as perdas como consta da equação (19) [5], onde se pode observar a relação directa da tensão,  $U$ , com o fluxo magnético,  $\Phi$ , e com a frequência,  $f$ .

$$U \approx K \cdot \Phi \cdot f \quad (19)$$

O fluxo magnético está relacionado directamente com o campo de indução magnética,  $B$ , quando a área,  $A$ , atravessada pelo mesmo é ortogonal ao campo de indução magnética, dado pela equação (20):

$$\Phi = B \cdot A \quad (20)$$

A equação (20) é útil pois permite relacionar a tensão com o campo de indução magnética. As perdas no ferro podem ser expressas em função da indução magnética e da frequência [25][26][27]. Com este conhecimento, a relação da tensão com as perdas no ferro torna-se evidente, conjugando as equações (19) e (20). Destas se retira que a uma frequência constante, diminuindo a tensão, ir-se-à provocar uma diminuição do

fluxo magnético. Este por sua vez produz uma redução da indução magnética, dado que a área não se altera, e que reduzirá assim as perdas no ferro, validando assim a premissa deste trabalho e os seus resultados.

A análise em cargas menores está condicionada pela falta de pontos nas frequências mais baixas e pelo facto de o sensor de binário, em regimes de baixa carga, ser pouco sensível, retirando assim precisão a qualquer análise feita. Mesmo com este método de maximização do rendimento, não se consegue obter em cargas baixas, um rendimento próximo do rendimento na carga máxima. Novamente, a precisão do sensor de binário, que nos indica a potência mecânica, condiciona a fiabilidade dos resultados para níveis tão baixos. Sendo um sensor cujo limite máximo se situa em 15 kW de potência mecânica [21], o ponto de carga mais baixo utilizado neste trabalho representa 6% da capacidade de medida do sensor, limitando assim a sua precisão.

Este decréscimo da oscilação de tensão necessária para regular as perdas deve-se a aspectos estruturais e de fabrico dos motores que lhe conferem a classe de rendimento atribuída.

Com isto, a utilização do motor de classe IE2 à frequência nominal apresenta bons resultados, próximos ou até superiores ao rendimento nominal descrito pelo fabricante enquanto que em frequências abaixo da frequência de trabalho o rendimento decresce significativamente. Este decréscimo pode ser explicado pela incapacidade em lidar com as perdas, quer devido à baixa ventilação a baixa frequência quer devido ao material utilizado na construção ser menos condutor termicamente mantendo no entanto um rendimento superior ao registado com uma alimentação da rede. Além disso, o facto das perdas constantes, e o seu peso, diminuir nas perdas totais, face ao peso das perdas por efeito de Joule (uma vez que as perdas por magnetização, dependentes directamente da frequência, decrescem) observa-se o aumento das últimas, originando maior aquecimento, registado na Figura 27 comparativamente com as Figuras 19 e 23.

As perdas por magnetização foram de facto a chave para o aumento do rendimento em todos os motores. De realçar que as perdas não variáveis com a variação da carga são, também elas, um somatório de perdas onde se incluem as perdas mecânicas. Estas, não variam com a carga, e não podem ser controladas com a variação de parâmetros eléctricos. Comparativamente às perdas no entreferro, as perdas mecânicas são muito reduzidas.



## 7- Conclusão

No contexto da maximização do rendimento em sistemas eléctricos de força motriz de velocidade variável em regime permanente, procurou-se neste trabalho definir o valor de tensão óptima a aplicar aos motores trifásicos de indução e de ímanes permanentes com gaiola de esquilo auxiliar, em função da sua frequência e carga, sem reduzir o binário, que conduz à maximização do rendimento e a uma melhoria significativa do factor de potência, traduzindo-se, em última instância, em poupanças energéticas significativas.

Com base nos resultados experimentais obtidos, uma das conclusões é que, independentemente da frequência de alimentação, para compensar o decréscimo da carga, a maximização do rendimento requer uma diminuição da amplitude do valor eficaz da tensão.

A variação da amplitude do valor eficaz da tensão em função da carga é tanto maior quanto menor for a classe de rendimento do motor.

Outra conclusão é, caso se esteja a utilizar controlo escalar no inversor, pode-se, através da interpretação dos gráficos de tensão óptima, escolher a relação  $U/f$  mais adequada para cada tipo de carga, seja ela constante, linear ou quadrática.

Neste trabalho, também se determinou por extrapolação a carga máxima que se pode impor aos motores de diferentes classes sem que estes ultrapassem a temperatura nominal, pressupondo que é escolhida a tensão óptima, sendo esta informação muito relevante para a imposição de restrições de funcionamento que evitem a avaria precoce do motor.

Saliente-se que este estudo incidiu apenas sobre o dispositivo de conversão electromecânica, o motor. Para um estudo sobre o sistema, motor e conversor de potência, seria necessário entrar em conta com as perdas do conversor electrónico de potência e assim avaliar o potencial de poupança da adaptação das leis de controlo  $U/f$  à carga, ficando este tema como sugestão para trabalho futuro.

## Bibliografia:

- [1] Luís Filipe Dias Carvalho Maia, *Análise do comportamento e controlo de velocidade de motores síncronos de ímanes permanentes*, DEEC-FEUP, 1995
- [2] João Pedro Rodrigues Cardoso, Aníbal Traça de Almeida, Fernando José Teixeira Estêvão Ferreira, *Desenvolvimento e ensaios de motores e variadores electrónicos de velocidade de alto eficiência*, DEEC-UC, 2011
- [3] Smith Lerdudomsak, Shinji Doki, Shigeru Okuma, *Analysis for Unstable Problem of PMSM Current Control System in Overmodulation Range*, Department of Electrical Engineering and Computer Science Nagoya University Nagoya, Japan, 2008
- [4] Fernando Ferreira, Aníbal T. de Almeida, *Method for In-Field Evaluation of the Stator Winding Connection of Three-Phase Induction Motors to Maximize Efficiency and Power Factor*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 21, No. 2, 2006
- [5] Stephen J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw-Hill, 1991
- [6] Clarence A. Phipps, *Variable Speed Drive Fundamentals*, The Fairmont Press, 1999
- [7] António J. M. Cardoso, *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*, Coimbra Editora, 1991
- [8] Ali Ahmed Adam , Kayhan Gulez, *Torque Control of PMSM and Associated Harmonic Ripples*, Fatih University, Engineering Faculty, Electrical-Electronics Buyukcekmece-Istanbul, 2011
- [9] João Roberto Cogo, Jocélio Souza de Sá, Néilson Simões, Jaime Burgoa, *Análise do desempenho de motores trifásicos nacionais*, Revista Electricidade Moderna, 1993
- [10] Márcio Luís Oleksinski, *Ensaio de máquinas de indução*, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2009
- [11] Mihail V. CISTELECAN, Mihail POPESCU, Leonard MELCESCU, Tiberiu TUDORACHE, *Three Phase Line Start Claw Poles Permanent Magnet Motor with Pole Changing Winding*, Politehnica University of Bucharest, 2008

- [12] Charles I. Hubert, *Electric Machines: Theory, Operation, Applications, Adjustment, and Control – Second Edition*, Prentice Hall, 2002
- [13] Fernando Ferreira, Aníbal T. de Almeida, *Novel Multiflux Level, Three-Phase, Squirrel-Cage Induction Motor for Efficiency and Power Factor Maximization*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 23, No. 1, 2008
- [14] Roberto Pinto, *Desenvolvimento e ensaio de motores e variadores eletrônicos de velocidade de alto rendimento*, DEEC-FCTUC, 2012
- [15] Irving I. Kosow, *Máquinas eléctricas e transformadores*, Editora Globo, 1979
- [16] D. F. Warne, *Newnes Electrical Engineer's Handbook*, Newnes, 2000
- [17] Theodore Wildi, *Electrical Machines, Drives and Power Systems*, Prentice-Hall, 2005
- [18] Fernando J. T. E. Ferreira, Aníbal T. de Almeida, Ge Baoming, *Three-Phase Induction Motor Simulation Model Based on a Multifrequency Per-Phase Equivalent Circuit Considering Stator Winding MMF Spatial Harmonics and Thermal Parameters*, International Conference on Electrical Machines, 2006
- [19] Fernando J. T. E. Ferreira, Aníbal T. de Almeida, Joaquim F. S. Carvalho, Mihail V. Cistelecan, *Experiments to Observe the Impact of Power Quality and Voltage-Source Inverters on the Temperature of Three-Phase Cage Induction Motors using an Infra-Red Camera*, Electric Machines and Drives Conference, 2009
- [20] Fernando J. T. E. Ferreira, Aníbal T. De Almeida, *Technical and Economical Considerations of Line-Start PM Motors Including the Applicability of the IEC600-34-2-1 Standard*, Energy Efficiency in Motor Driven Systems Conference, 2011
- [21] André Quintino, Nuno Abrantes, Fernando J. T. E. Ferreira, Aníbal T. De Almeida, *Four-Quadrant Electric Motor Test Bench with a Fully Programmable Load Profile*, Energy Efficiency in Motor Driven Systems Conference, 2011
- [22] Aníbal T. de Almeida, Fernando J. T. E. Ferreira, Dick Both, *Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives*

- With Electric Motor Systems*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, No. 1, 2005
- [23] Aníbal T. de Almeida, Fernando J.T.E. Ferreira, João A.C. Fong, *Standards for Efficiency of Electric Motors*, IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE, 2011
- [24] André Quintino, *Desenvolvimento e Ensaio de Motores e Variadores Eletrónicos de Velocidade de Alto Rendimento*, DEEC-FCTUC, 2011
- [25] Muhammad Sohail Ahmed, *Effect of harmonics on iron losses*, DEE-Chalmers University of Technology, 2007
- [26] Hafedh Trabelsi, Ali Mansouri, Mohamed Hedi Gmidon, *On the No-Load Iron Losses Calculations of SMPM Using VPM and Transient Finite Element Analysis*, International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control & computer engineering Vol. 2 No.1 pp 470-483, 2008
- [27] Carlos. A., Hernandez-Aramburo, C. Green, C. Smith, *Estimating Iron losses in an Induction machine*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, no.6 pp. 3527-3553, 2003
- [28] IEC technical committee2, *IEC 60034-2*, International Electrotechnical Commission, 2007
- [29] Magueijo, Vítor., Fernandes, Cristina., Matos, Henrique., Nunes, Pedro., Calau, João., Carneiro, Jorge., Oliveira, Fernando., *Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto*. s.l. : ADENE- Agência para a energia, 2010.
- [30] Motores eléctricos de ímanes permanentes. motoreletrico. [Online] [Citação: 20 de Novembro de 2011.] <http://www.motoreletrico.net/index.asp?InCdSecao=3&InCdEditoria=10&InCdMateria=172&Motores+E1%E9tricos+de+Im%E3s+Permanentes+Wmagnet>.
- [31] João Cardoso, *Desenvolvimento e ensaios de motores e variadores electrónicos de velocidade de alto rendimento*, DEEC-FCTUC, 2011

# Anexo A:

Tabelas de resultados segundo o método experimental

Tabela A - 1- Resultados para motor classe IE4 a 50 HZ com 75% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
400	5631.3	6207	0.9072
380	5631.3	6203	0.9078
355	5631.3	6234	0.9033
365	5631.3	6205	0.9075
370	5631.3	6268	0.8984
360	5631.3	6211	0.9066
375	5631.3	6217	0.9057
385	5631.3	6192	0.9094
390	5631.3	6218	0.9056
387	5631.3	6179	0.9114

Tabela A - 2 Resultados do motor classe IE4 a 50Hz com 50% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
280	3750	4293	0.87358
380	3750	4210	0.8907
360	3750	4210	0.8907

Tabela A - 3 Resultados para motor classe IE4 a 50 Hz com 25% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
310	1885	2118	0.8890
320	1885	2103	0.8963
330	1885	2116	0.8908
325	1885	2150	0.8767

Tabela A - 4 Resultados para motor classe IE4 a 50 HZ com 12,5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
320	937.5	1185	0.7911
340	937.5	1186	0.7905
300	937.5	1189	0.7885
260	937.5	1183	0.7925
280	937.5	1177	0.7965

Tabela A - 5 Resultados para motor classe IE4 a 37.5 Hz com 75% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
280	5619.5	6282	0.8945
300	5619.5	6226	0.9026
320	5619.5	6230	0.9020
310	5619.5	6228	0.9023
315	5619.5	6212	0.9046
305	5619.5	6229	0.9022

Tabela A - 6 Resultados para motor classe IE4 a 37.5 Hz com 50% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
315	3746.3	4190	0.8941
325	3746.3	4203	0.8913
335	3746.3	4225	0.8867
320	3746.3	4183	0.8956

**Tabela A - 7 Resultados para motor classe IE4 a 37.5 Hz com 25% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
220	1873.2	2197	0.8526
240	1873.2	2155	0.8692
260	1873.2	2119	0.8840
250	1873.2	2146	0.8729
270	1973.2	2107	0.8890
280	1873.2	2113	0.8865
290	1873.2	2126	0.8811
265	1873.2	2103	0.8907
267	1873.2	2125	0.8815
263	1873.2	2117	0.8848

**Tabela A - 8 Resultados para motor classe IE4 a 37.5 Hz com 12.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
165	936.6	1351	0.6932
185	936.6	1279	0.7323
205	936.6	1170	0.8005
225	936.6	1120	0.8363
245	936.6	1098	0.8530
255	936.6	1097	0.8537
260	936.6	1090	0.8593
270	936.6	1090	0.8593
280	936.6	1100	0.85815
265	936.6	1089	0.8600
275	936.6	1080	0.8672

**Tabela A - 9 Resultados para motor classe IE4 a 25 Hz com 50% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
200	3749.3	4253	0.8816
220	3749.3	4233	0.8857
240	3749.3	4241	0.8841
180	3749.3	4312	0.8695
230	3749.3	4202	0.8923
235	3749.3	4193	0.8942
225	3749.3	4205	0.8916

**Tabela A - 10 Resultados para motor classe IE4 a 25 Hz com 25% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
135	1873.2	2279	0.8219
155	1873.2	2209	0.8480
175	1873.2	2154	0.8696
195	1873.2	2135	0.8774
215	1873.2	2122	0.8828
235	1873.2	2141	0.8749
225	1873.2	2145	0.8732
220	1873.2	2128	0.8815
230	1873.2	2125	0.8815

Tabela A - 11 Resultados para motor classe IE4 a 25 Hz com 12.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
125	930.7	1201	0.7807
145	930.7	1130	0.8236
165	930.7	1109	0.8392
185	930.7	1080	0.8618
205	930.7	1084	0.8586
195	930.7	1075	0.8658
180	930.7	1104	0.8430
200	930.7	1068	0.8714

Tabela A - 12 Resultados para motor classe IE4 a 12.5 HZ com 25% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
100	1876.2	2240	0.8376
120	1876.2	2190	0.8567
140	1876.2	2244	0.8361
130	1876.2	2209	0.8493
125	1876.2	2101	0.8524
115	1876.2	2190	0.8567

Tabela A - 13 Resultados para motor IE4 a 21.5 Hz com 12.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
90	941.1	1132	0.8314
110	941.1	1099	0.8563
130	941.1	1200	0.7843
120	941.1	1108	0.8494
115	941.1	1103	0.8532

Tabela A - 14 Resultado para motor classe IE3 a 50 Hz com 75% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
350	5622.5	6283	0.8949
370	5622.5	6272	0.8964
320	5622.5	6281	0.8952
330	5622.5	6280	0.8953
340	5622.5	6275	0.8960
360	5622.5	6257	0.8986
355	5622.5	6284	0.8947
365	5622.5	6262	0.8978

Tabela A - 15 Resultado para motor classe IE3 a 50 Hz com 50% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
250	3760.2	4343	0.8658
200	3760.2	4353	0.8638
270	3760.2	4205	0.8942
290	3760.2	4186	0.8983
310	3760.2	4163	0.9032
330	3760.2	4138	0.9087
350	3760.2	4123	0.9120
370	3760.2	4140	0.9083
360	3760.2	4149	0.9063



355	3760.2	4146	0.9069
-----	--------	------	--------

Tabela A - 16 Resultados para motor IE3 a 50 Hz com 25% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
250	1863.8	2089	0.8922
270	1863.8	2074	0.8986
290	1863.8	2120	0.8792
280	1863.8	2108	0.8841
275	1863.8	2074	0.8986

Tabela A - 17 Resultados para motor classe IE3 a 50 Hz com 12.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
100	926.3	1095	0.8459
120	926.3	1062	0.8722
140	926.3	1080	0.8577
130	926.3	1091	0.8490
110	926.3	1068	0.8673

Tabela A - 18 Resultados para motor classe IE3 a 37.5 Hz com 75% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
300	5614.6	6350	0.8841
320	5614.6	6354	0.8878
280	5614.6	6361	0.8868
340	5614.6	6410	0.8801
330	5614.6	6376	0.8848
310	5614.6	6329	0.8913
315	5614.6	6349	0.8843
305	5614.6	6342	0.8895

Tabela A - 19 Resultados para motor classe IE3 a 37.5 Hz com 50% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
250	3753.8	4230	0.8875
270	3753.8	4191	0.8957
290	3753.8	4202	0.8933
280	3753.8	4200	0.8938
260	3753.8	4208	0.8921
265	3753.8	4217	0.8902
275	3753.8	4226	0.8883

Tabela A - 20 Resultados para motor classe IE3 a 37.5 Hz com 50% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
250	1885.1	2130	0.8850
270	1885.1	2135	0.8823
230	1885.1	2095	0.8998
240	1885.1	2117	0.8905
235	1885.1	2103	0.8964
225	1885.1	2115	0.8913

**Tabela A - 21 Resultados para motor classe IE3 a 37.5 Hz com 12.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
180	945.1	1057	0.8941
160	945.1	1115	0.8476
200	945.1	1130	0.8363
190	945.1	1120	0.8438
170	945.1	1104	0.8561
185	945.1	1099	0.8600

**Tabela A - 22 Resultados para motor IE3 a 25Hz com 50% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
220	3752.9	4400	0.8529
200	3752.9	4377	0.8574
210	3752.9	4382	0.8564
205	3752.9	4411	0.8508

**Tabela A - 23 Resultados para motor IE3 a 25 Hz com 25% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
150	1868.1	2101	0.8891
170	1868.1	2153	0.8677
190	1868.1	2167	0.8621
130	1868.1	2203	0.8480
160	1868.1	2160	0.8649
140	1868.1	2205	0.8472
155	1868.1	2161	0.8645

**Tabela A - 24 Resultados para motor classe IE3 a 25 Hz com 12.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
120	941.3	1105	0.8516
150	941.3	1079	0.8724
180	941.3	1098	0.8573
160	941.3	1103	0.8534
155	941.3	1096	0.8589
140	941.3	1102	0.8542
145	941.3	1087	0.8657

**Tabela A - 25 Resultados para motor classe IE3 a 12.5 Hz com 12.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
100	940.3	1182	0.7955
80	940.3	1195	0.7868
120	940.3	1250	0.7522
110	940.3	1197	0.7855
105	940.3	1183	0.7948

**Tabela A - 26 Resultado para motor classe IE3 a 12.5 Hz com 16% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>100</b>	1191.5	1536	0.7757
<b>120</b>	1191.5	1542	0.7727
<b>80</b>	1191.5	1550	0.7687
<b>90</b>	1191.5	1546	0.7707
<b>210</b>	1191.5	1551	0.7682

**Tabela A - 27 Resultados para motor classe IE3 a 37.5 Hz com 37.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>270</b>	2805.7	3180	0.8823
<b>250</b>	2805.7	3195	0.8782
<b>290</b>	2805.7	3200	0.8768
<b>260</b>	2805.7	3185	0.8809
<b>280</b>	2805.7	3183	0.8815
<b>265</b>	2805.7	3183	0.8815
<b>275</b>	2805.7	3175	0.8837

**Tabela A - 28 Resultados para motor classe IE3 a 25 Hz com 37.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>200</b>	2812.5	3280	0.8575
<b>220</b>	2812.5	3286	0.8560
<b>180</b>	2812.5	3323	0.8464
<b>210</b>	2812.5	3282	0.8569
<b>195</b>	2812.5	3315	0.8484

**Tabela A - 29 Resultados para motor classe IE2 a 50 Hz com 75% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>350</b>	5620.3	6391	0.8794
<b>330</b>	5620.3	6428	0.8743
<b>370</b>	5620.3	6362	0.8834
<b>390</b>	5620.3	6347	0.8855
<b>400</b>	5620.3	6344	0.8859
<b>310</b>	5620.3	6366	0.8829
<b>290</b>	5620.3	6453	0.8710

**Tabela A - 30 Resultados para motor classe IE2 a 50 Hz com 50% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>300</b>	3760.3	4109	0.9151
<b>280</b>	3760.3	4221	0.8909
<b>320</b>	3760.3	4175	0.9007
<b>340</b>	3760.3	4216	0.8919
<b>310</b>	3760.3	4190	0.8974
<b>290</b>	3760.3	4183	0.8989

<b>335</b>	3760.3	4190	0.8974
<b>325</b>	3760.3	4205	0.8942

**Tabela A - 31 Resultados para motor IE2 a 50 Hz com 25% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>320</b>	1868.4	2198	0.85
<b>220</b>	1868.4	2171	0.8606
<b>250</b>	1868.4	2158	0.8658
<b>270</b>	1868.4	2178	0.8579
<b>260</b>	1868.4	2166	0.8626
<b>240</b>	1868.4	2145	0.8710
<b>245</b>	1868.4	2154	0.8674
<b>235</b>	1868.4	2161	0.8646

**Tabela A - 32 Resultados para motor classe IE2 a 50 Hz com 12.5% de carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>200</b>	934.9	1036	0.9024
<b>220</b>	934.9	1054	0.8870
<b>180</b>	934.9	1084	0.8625
<b>240</b>	934.9	1060	0.8820
<b>210</b>	934.9	1041	0.8980
<b>190</b>	934.9	1034	0.9042
<b>185</b>	934.9	1031	0.9068
<b>195</b>	934.9	1028	0.9094

**Tabela A - 33 Resultados para motor classe IE2 a 37.5 Hz com 75% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>300</b>	5633.7	6414	0.8783
<b>320</b>	5633.7	6506	0.8659
<b>280</b>	5633.7	6540	0.8614
<b>340</b>	5633.7	6649	0.8473
<b>290</b>	5633.7	6566	0.8580
<b>310</b>	5633.7	6578	0.8564

**Tabela A - 34 Resultados para motor IE2 a 37.5 Hz com 50% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>250</b>	3740	4385	0.8529
<b>270</b>	3740	4322	0.8653
<b>290</b>	3740	4316	0.8665
<b>310</b>	3740	4336	0.8625
<b>280</b>	3740	4309	0.8680
<b>295</b>	3740	4315	0.8667
<b>285</b>	3740	4280	0.8738

**Tabela A - 35 Resultados para motor classe IE2 a 37.5 Hz com 25% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
200	1882	2180	0.8633
220	1882	2160	0.8713
240	1882	2127	0.8848
260	1882	2138	0.8803
250	1882	2142	0.8786
245	1882	2161	0.8709
235	1882	2130	0.8836

**Tabela A - 36 Resultados para motor classe IE2 a 37.5 Hz com 12.5% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
150	936.4	1094	0.8559
170	936.4	1080	0.8670
190	936.4	1077	0.8695
210	936.4	1116	0.8391
180	936.4	1092	0.8575
200	936.4	1102	0.8497
185	936.4	1087	0.8615
195	936.4	1108	0.8451

**Tabela A - 37 Resultado para motor classe IE2 a 25 HZ com 50% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
200	3748.6	4543	0.8251
220	3748.6	4585	0.8176
180	3748.6	4700	0.7976
190	3748.6	4652	0.8058
210	3748.6	4577	0.8190
205	3748.6	4580	0.8185

\*Neste ensaio apenas a temperatura da cabeça estabilizou tendo a temperatura do núcleo registado oscilações <0.1°C

**Tabela A - 38 Resultados para motor classe IE2 a 25Hz com 25% carga**

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
150	1873	2282	0.8208
170	1873	2256	0.8302
190	1873	2250	0.8324
210	1873	2310	0.8109
200	1873	2256	0.8302
180	1873	2237	0.8373
185	1873	2216	0.8452
175	1873	2228	0.8406

Tabela A - 39 Resultados para motor classe IE2 a 25 Hz com 12.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
150	936.7	1125	0.8326
170	936.7	1130	0.8289
130	936.7	1117	0.8386
110	936.7	1141	0.8294
120	936.7	1113	0.8416
125	936.7	1105	0.8477

Tabela A - 40 Resultados para motor classe IE2 a 12.5 Hz com 12.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
120	934	1383	0.6753
100	934	1275	0.7325
80	934	1277	0.7314
90	934	1225	0.7624
95	934	1222	0.7643
85	934	1242	0.7520

Tabela A - 41 Resultados para motor classe IE2 a 50 Hz com 37.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
200	2820	3240	0.8704
220	2820	3284	0.8587
180	2820	3407	0.8277
240	2820	3248	0.8682
260	2820	3214	0.8774
280	2820	3286	0.8851
300	2820	3194	0.8829
270	2820	3165	0.8910
295	2820	3187	0.8848
285	2820	3169	0.8899

Tabela A - 42 Resultados para motor IE2 a 37.5 Hz com 37.5% carga

Tensão Programa	Potência Mecânica	Potência Eléctrica	Rendimento
200	2825.6	3307	0.8544
300	2825.6	3203	0.8821
240	2825.6	3216	0.8786
290	2818.5	3156	0.8930
280	2181.5	3217	0.8761
285	2818.5	3214	0.8774
295	2818.5	3236	0.8710

Tabela A - 43 Resultados para motor IE2 a 25Hz com 37.5% de carga

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>200</b>	2819.3	3251	0.8672
<b>220</b>	2819.3	3428	0.8224
<b>180</b>	2819.3	3366	0.8376
<b>190</b>	2819.3	3357	0.8398
<b>210</b>	2819.3	3371	0.8363
<b>195</b>	2819.3	3364	0.8380

Tabela A - 44 Resultados para motor IE2 a 12.5 Hz com 16% carga

<b>Tensão Programa</b>	<b>Potência Mecânica</b>	<b>Potência Eléctrica</b>	<b>Rendimento</b>
<b>100</b>	1196.8	1622	0.7379
<b>80</b>	1196.8	1606	0.7452
<b>60</b>	1196.8	1762	0.6792
<b>70</b>	1196.8	1609	0.7438
<b>90</b>	1196.8	1586	0.7546
<b>85</b>	1196.8	1612	0.7424

# Anexo B:

Gráficos diversos



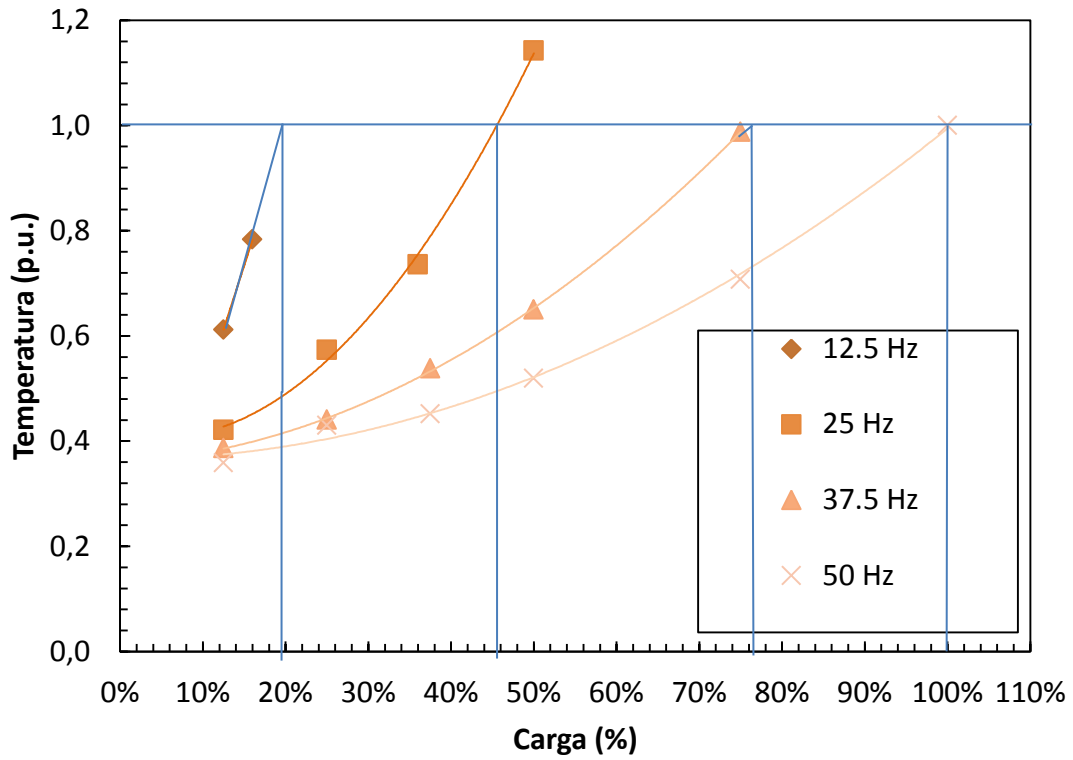


Figura B- 1: Limites de temperatura nominal em função da frequência para o motor IE2.

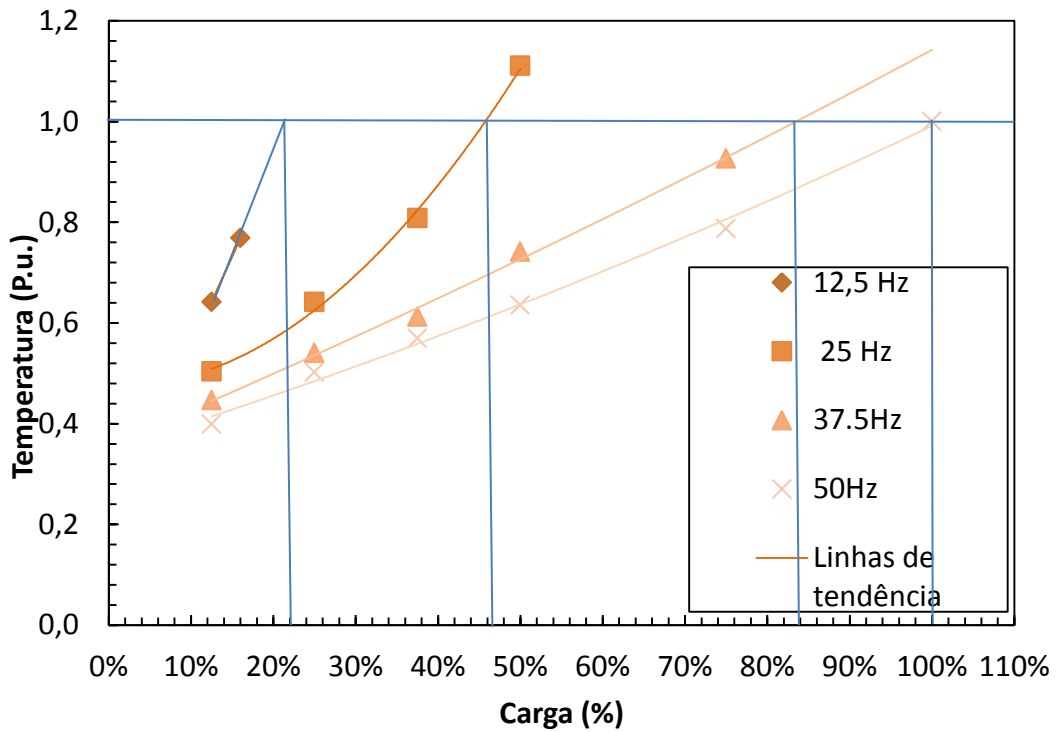


Figura B- 2: Limites de temperatura nominal em função da frequência para o motor IE3.

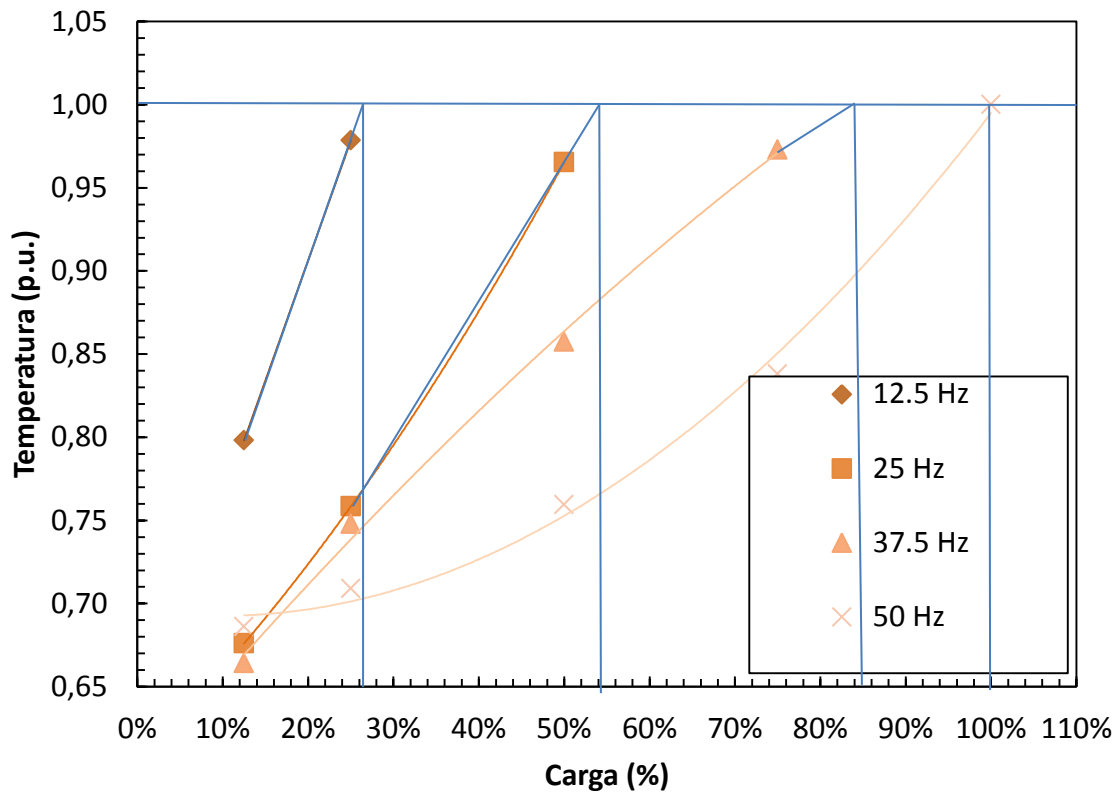


Figura B- 3: Limites de temperatura em função da frequência para o motor IE4.