

MANUAL DOS MOTORES ELÉCTRICOS

**UTILIZAÇÃO DE MOTORES  
DE ALTO RENDIMENTO  
NA INDÚSTRIA**



## ÍNDICE

- PÁG. 4.** I. Um pequeno resumo da história do motor eléctrico
- 5.** II. Principais grupos de motores eléctricos
- 6.** III. Algumas considerações técnicas de carácter funcional no consumo de energia por motores eléctricos
- 8.** IV. Alguma informação sobre a situação energética mundial
- 12.** V. A utilização de energia em Portugal
- 12.** VI. A utilização dos motores eléctricos
- 13.** VI. a. Motores de indução assíncronos
- 14.** VI. a1. Velocidade dos motores de indução assíncronos trifásicos
- 16.** VI. a2. Arranque dos motores de indução assíncronos trifásicos
- 17.** VI. a3. Arranquadores estrela/triângulo
- 20.** VI. a4. *Soft starters*
- 22.** VI. a5. Variadores Electrónicos de Velocidade (VEV)
- 25.** VI. b. Outros tipos de motores
- 25.** VI. b1. Motores de corrente alternada monofásicos
- 25.** VI. b1.1. Motor de repulsão
- 26.** VI. b1.2. Motor de tipo série (universal)
- 27.** VI. b1.3. Motor de indução com condensador (arranque por condensador)
- 28.** VI. b1.5. Motor de indução monofásico de fase auxiliar
- 29.** VI. b1.6. Motor de indução de espiras desfasadas
- 29.** VI. b1.7. Motor de indução de repulsão
- 30.** VI. c. Motor síncrono
- 31.** VI. c1. Utilização de motores síncronos
- 32.** VI. d. Motores de corrente contínua
- 32.** VI. d1. Inversão do sentido de marcha nos motores de corrente contínua
- 32.** VI. d2. Binário dos motores de corrente contínua
- 33.** VI. d3. Velocidade do induzido dos motores de corrente contínua
- 33.** VI. d4. Potência de motores de corrente contínua
- 34.** VI. d5. Motor de excitação independente
- 34.** VI. d6. Motor série
- 35.** VI. d7. Motor *shunt*
- 36.** VI. d8. Motor *compound*
- 36.** VI. e. Motores de ímanes permanentes (IP)
- 38.** VI. f. Outros tipos de motores
- 38.** VII. Motores de alto rendimento
- 40.** VII. a. Condições mais atraentes do ponto de vista económico, para instalar motores de alto rendimento
- 40.** VII. b. Eventuais desvantagens a considerar na substituição de um motor convencional por outro de alto rendimento
- 41.** VIII. Sobredimensionamento de motores.
- 41.** IX. Uso de motores de tensão mais elevada
- 42.** X. Normalização sobre eficiência dos motores eléctricos
- 44.** XI. Avaliação económica do investimento de substituição de um motor
- 48.** XII. Factor de Potência e sua correcção
- 50.** XII. a. Efeitos da energia reactiva nas redes eléctricas
- 52.** XII. b. Compensação do factor de potência
- 52.** XII. c. Cálculo da potência de compensação
- 53.** XII. d. Formas de compensação do factor de potência
- 54.** XII. e. Exemplo de compensação individual, no caso de uma carga indutiva
- 55.** XII. f. Cálculo da capacidade de correcção
- 56.** XII. g. Correcção centralizada automática do factor de potência
- 57.** XIII. Classes de isolamento
- 63.** XIV. Elementos para a substituição de um motor
- 64.** XV. Manutenção de motores
- 66.** XVI. Nota Final
- 67.** XVII. Bibliografia

# UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE ALTO RENDIMENTO NA INDÚSTRIA

A realidade actual



## I. Um pequeno resumo da história do motor eléctrico

Michael Faraday demonstrou, pela primeira vez em 1821, como se processa a conversão da energia eléctrica em energia mecânica através de meios electromagnéticos.

O cientista Húngaro Ányos Jedlik em 1827, chamou "*lightning-magnetic self-rotors*" a um sistema que rodava através de um campo electromagnético, como representado na figura seguinte.



*"lightning-magnetic self-rotors" de Ányos Jedlik*

O primeiro sistema capaz de produzir trabalho mecânico e transmitir, realmente, movimento rotativo a outro componente e como tal candidato a precursor do motor eléctrico, aparece pela mão de William Sturgeon em 1832. Cinco anos mais tarde, Thomas Davenport de nacionalidade norte-americana, acaba por patentear um motor que atinge as 600 rpm, que o inventor pensava poder usar para accionar máquinas ferramentas e máquinas de tipografia.

Estes motores, alimentados por baterias com eléctrodos de zinco (de elevados custos à época) levaram à falência do projecto e do seu inventor. É bom recordar que à data não havia redes de distribuição de energia eléctrica.

O ano de 1886 é, porém, referido por alguns historiadores como o ano de nascimento da máquina eléctrica, face a ter sido nesta data que o cientista alemão Werner von Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-induzido.

Recorrentemente incidentes, enganos ou erros dão origem a descobertas, tal como no caso do senhor Zénobe Gramme, considerado também inventor do dínamo que, inadvertidamente em 1873, ligou entre si dois destes equipamentos, descobrindo, deste modo, que um deles funcionava como motor. Foi de facto este erro que deu origem aos motores de corrente contínua que passaram a ser usados na indústria.

Só em 1888 Nikola Tesla inventou o motor de corrente alternada, bem como o sistema de múltiplas fases para a sua alimentação.

A Westinghouse Company, com a colaboração do senhor Tesla, desenvolveu este novo equipamento cujo rendimento demorou diversas décadas a atingir um valor aceitável.

Na base deste desenvolvimento esteve (e ainda está) o espaço entre o estator e o rotor designado por entreferro cuja dimensão influenciava o valor do binário do motor e das suas características de rendimento.

A aplicação do motor eléctrico revolucionou dramaticamente toda a indústria eliminando os accionamentos por linhas de transmissão colectivas, máquinas a vapor, aplicações hídricas e outras.

Também no sector primário o motor eléctrico contribuiu para o seu desenvolvimento, nomeadamente através da introdução das electrobombas nos sistemas de rega e os accionamentos de múltiplas funções nas máquinas agrícolas.

No sector doméstico e nos serviços praticamente não se utiliza um equipamento sem se encontrar motores eléctricos com as mais variadas características e funções, facilitando o trabalho, melhorando o conforto, enfim, dando uma qualidade de vida impensável sem eles.

Muitos outros nomes para além dos aqui mencionados estão para sempre ligados à história do motor eléctrico, face ao esforço de investigação que no século XIX aconteceu no ramo electromagnético.

Como o público-alvo a que se destina este documento poderá não ter conhecimentos técnicos no âmbito dos princípios de funcionamento dos

diversos tipos de motores eléctricos considera-se ser conveniente aflorar alguns conceitos que lhes permitam entender o objectivo deste manual.

## II. Principais grupos de motores eléctricos

Existem dois grandes grupos de motores cuja aplicação no quotidiano é uma realidade: - motores de corrente alternada e motores de corrente contínua.

No primeiro grupo, os motores assíncronos são os de maior utilização nos accionamentos de potência; os síncronos (com a velocidade de rotação sincronizada com a frequência da rede) têm campos de aplicação mais específicos como determinadas aplicações industriais quer de pequena dimensão (e.g. accionamento de gravadores, gira discos e leitores de áudio, relógios, etc.) quer de grande dimensão com aplicação na indústria pesada com elevadas potências e velocidade constante.

Os motores assíncronos de manutenção reduzida, facilidade de ligação e custos relativamente baixos são os motores típicos na indústria.

Os motores de corrente contínua estiveram fortemente ligados aos accionamentos de meios de transporte e muitas aplicações industriais, pelas suas características que se adaptavam de certo modo ao pretendido via distintas ligações dos seus pólos (ligação *Série*; ligação *Shunt* e ligação *Compound*). A variação de velocidade era conseguida e de certo modo dominada com estes motores. Tinham a desvantagem de requerer uma manutenção mais cuidada e dispendiosa em virtude de incorporarem colectores de lâminas e ser necessária a substituição, devido ao desgaste, das escovas que lhes estão associadas.

Mesmo no caso de se optar por motores síncronos sem escovas (com reguladores electrónicos de velocidade) o seu preço é significativamente mais elevado quando comparado com os motores assíncronos que têm a seu favor a reduzida manutenção e durabilidade. Os motores síncronos são utilizados no accionamento de (i) veículos eléctricos, (ii) leitores DVD/CDs, (iii) equipamentos pesados com velocidades controladas, etc.

De referir alguns outros motores, como os motores de corrente contínua “passo a passo” com aplicação nos sistemas de controlo de posição, sempre associados ao respectivo equipamento electrónico de comando.

Os servo motores usados para fins específicos, funcionam em função de um sinal de realimentação que os faz rodar até ao sinal de realimentação (erro) decrescer até ao valor de zero, corrigindo deste modo a posição do sistema.

Apesar dos motores de ímanes permanentes remontarem à década de 60 do século passado, a sua tecnologia tem evoluído nos últimos dez anos ao ponto de se afirmarem na indústria como alternativa nos accionamentos directos (i.e. sem sistemas de excitação, sem caixas de velocidade e com binário elevado).

As novas aplicações típicas para os motores de ímanes permanentes de elevada potência (e.g. indústria transformadora, accionamento de navios e aerogeradores) vêm demonstrar como uma tecnologia até então reservada a aplicações de baixa potência – accionamento de discos duros e outros equipamentos electrónicos – se torna competitiva face à diminuição dos custos de fabricação dos ímanes, contribuindo para o aumento da eficiência global através da eliminação de componentes consumidores de energia (e.g. caixas de velocidade).

Refira-se ainda a existência do motor linear que corresponde a um motor de indução ou a um motor passo a passo que foram “abertos” e “linearizados” de tal modo que em lugar de um binário de rotação passamos a ter uma força de deslocamento do antigo rotor em relação ao estator.

Uma aplicação relevante deste tipo de equipamento aparece no “*Transrapid*” o comboio monorrelé de alta velocidade de fabrico alemão que utiliza a tecnologia de levitação magnética, descoberta em 1934. O “*Transrapid*” atinge velocidades de 500 km/h com acelerações e desacelerações de  $1\text{m/s}^2$ .

Existem ainda outros tipos de motores para fins específicos prosseguindo a investigação no campo do accionamento eléctrico onde se incluem áreas como a das nano tecnologias, onde há um mundo novo de múltiplas aplicações.

Irá analisar-se as características de alguns destes motores, com um pouco mais de detalhe, para que o leitor se aperceba de alguns aspectos de apoio à decisão da substituição destes equipamentos.

### **III. Algumas considerações técnicas de carácter funcional no consumo de energia por motores eléctricos**

Os motores eléctricos, como qualquer outro equipamento transformador de energia (recebe energia eléctrica e produz trabalho sob a forma de movimento, vulgarmente, rotativo), fá-lo com um determinado rendimento que pode

ser quantificado pela simples expressão:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e}$$

O que equivale dizer que o rendimento é a razão entre a energia utilizada e a energia fornecida. Nesta expressão tem-se:

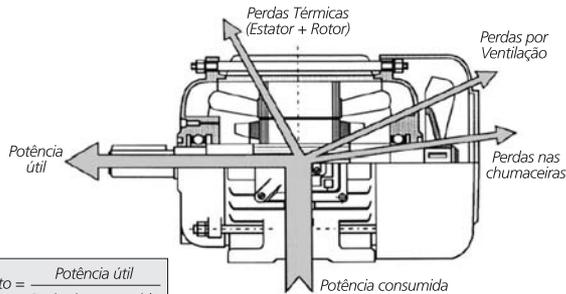
$\eta$  = Rendimento

$P_m$  = Potência mecânica fornecida pelo motor ao seu veio

$P_e$  = Potência eléctrica fornecida ao motor

O valor do rendimento é, como se sabe, sempre inferior à unidade e quanto mais perto dela se aproximar, mais eficiente é o equipamento em análise.

Num motor eléctrico e para a situação descrita, a figura seguinte contribui para esclarecer o facto do rendimento ser inferior à unidade.



$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência Útil}}{\text{Potência consumida}}$$

Como a figura refere o rendimento desta unidade é dado pela relação entre a potência útil e a potência consumida; nela pode ver-se as perdas típicas nestes equipamentos.

Para melhor entendimento de algumas considerações que serão apresentadas convém recordar a expressão que permite calcular a potência eléctrica.

Assim a potência “P” é dada pelo produto da tensão “U” a que está sujeito o equipamento pela intensidade “I” que o mesmo absorve da rede de acordo com:

$$P = U \times I$$

Esta expressão e de modo simplificado aplica-se quer a circuitos de corrente contínua quer a equipamentos puramente resistivos atravessados por uma corrente alternada monofásica.

Se se estiver perante corrente alternada a expressão seguinte fornece a potência, sendo  $\varphi$  o ângulo de desfasamento dos vectores representativos da tensão e da intensidade de corrente.

$$P = U \times I \times \cos \varphi \quad \text{monofásico}$$

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \quad \text{trifásico}$$

Recorda-se ainda da física que a Lei de Ohm afirma que  $U = r \times I$  e que se

substituir nas expressões de potência a tensão “U” por “r x I”, ter-se-á a mesma potência em função da resistência “r” e da intensidade de corrente “I” ou seja, no primeiro caso de potência em circuitos monofásicos resistivos puros ou de corrente contínua, ter-se-á:

$$P = r \times I^2$$

Esta expressão traduz o facto de num dado circuito resistivo a intensidade aumentar, a potência é proporcional ao quadrado do referido aumento. Esta é a situação a ter em consideração nas perdas por efeito de Joule que mais adiante se retoma.

Relativamente à relação existente entre a potência mecânica, o binário e a velocidade angular, a expressão seguinte permite correlacionar tais grandezas:

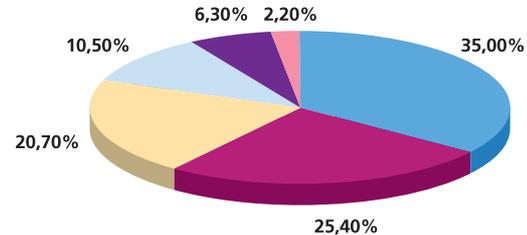
$$P_m = T \times \omega$$

## IV. Alguma informação sobre a situação energética mundial

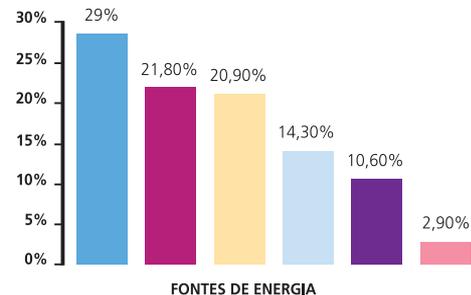
Será conveniente ter uma ideia sumária das situações energéticas quer do mundo, quer da UE e, naturalmente, de Portugal.

Assim, nos gráficos seguintes obtidos do site da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG) pode observar-se a desagregação das formas da energia nos três casos supracitados.

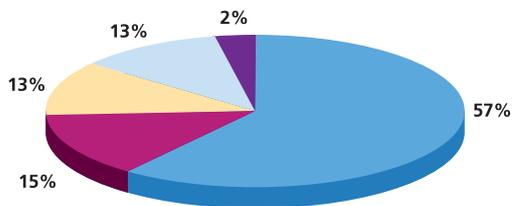
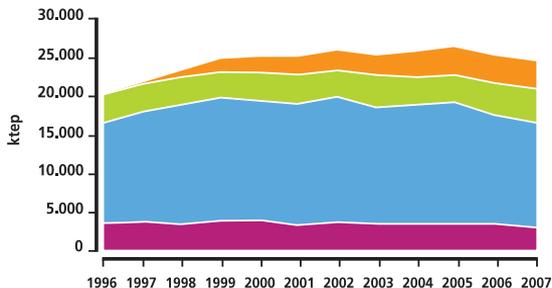
DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA • NÍVEL MUNDIAL



DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA NA UE



- PETRÓLEO
- CARVÃO
- GÁS NATURAL
- OUTRAS ENERGIAS - RENOVÁVEIS
- NUCLEAR
- HÍDRICAS

**FONTES DE ENERGIA PRIMÁRIA • PORTUGAL (2004)**

**EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA PRIMÁRIA EM PORTUGAL**


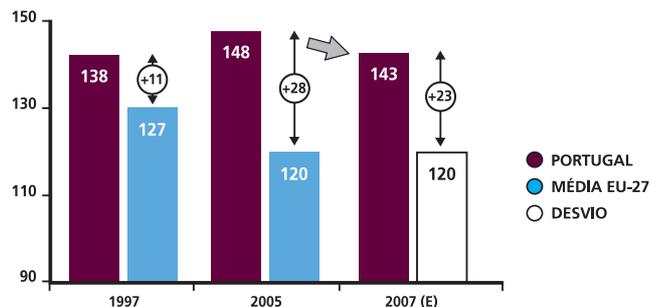
A forma utilizada de comparação energética entre países é dada pela relação entre a energia final consumida em toneladas equivalentes de petróleo (tep) e o PIB (Produto Interno Bruto).

**Intensidade Energética = Energia Utilizada/Riqueza Produzida (tep/euros)**

Por este processo de análise pode observar-se como Portugal se situa em relação aos seus parceiros da UE, existindo um desvio assinalável como demonstrado nos gráficos seguintes.

**INTENSIDADE ENERGÉTICA DE PORTUGAL E MÉDIA EUROPEIA**  
 ENERGIA FINAL / PIB

*Toneladas Equivalentes de Petróleo por milhão de euros de PIB*

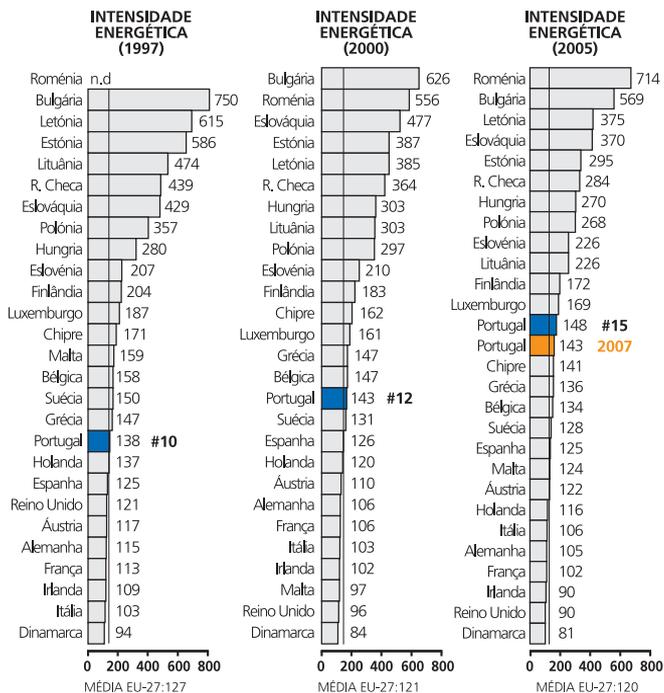


NOTA: PIB a preços constantes de 2000

Fonte: Eurostat; Balanços Energéticos (DGEG); Análise ADENE/DGEG

## A INVERSÃO VERIFICADA NÃO ALTEROU A POSIÇÃO RELATIVA DE PORTUGAL

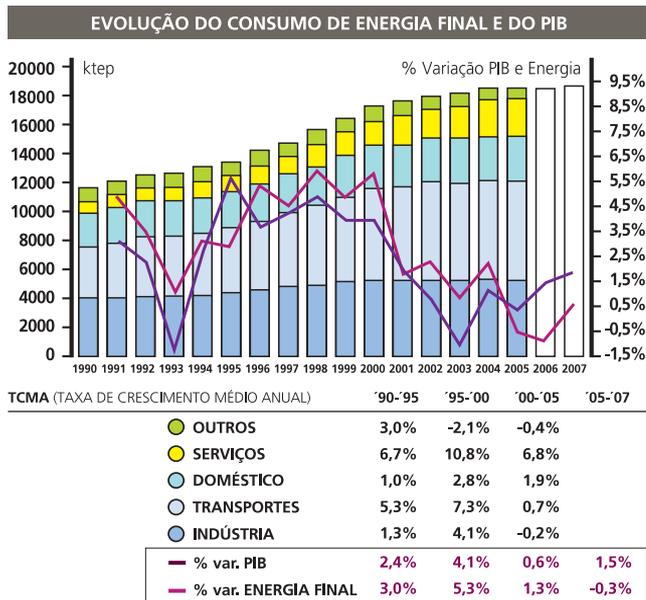
Portugal tem vindo, desde 1997, a piorar a sua posição relativa no contexto europeu



Fonte: Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

## NO ÚLTIMO QUINQUÉNIO PORTUGAL CONSEGUIU DESACELERAR DE FORMA SIGNIFICATIVA O CONSUMO DE ENERGIA

tendo nos dois últimos anos invertido a relação entre crescimento económico e energético



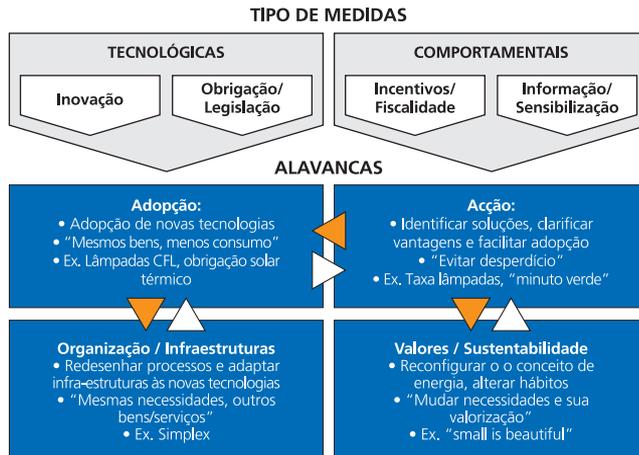
- A desaceleração do consumo de energia não deixa de estar associada a um contexto de arrefecimento económico.
- Apesar deste contexto, o sector dos Serviços mantém taxas de crescimento elevadas.

Fonte: Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

Num esforço de coordenação as entidades oficiais portuguesas responsáveis pela área energética lançaram linhas de orientação estratégicas que procuram que a melhoria da eficiência energética seja uma tarefa de todos nos mais diversos campos, como se pode observar nos seguintes esquemas:

### ABORDAGEM ESTRATÉGICA À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Em 2 vertentes: equipamentos e comportamentos



#### Sistema de Eficiência Energética na Indústria

- Acordo com a indústria transformadora para a redução de 8% do consumo energético.
- Criação do Sistema de Gestão de Consumos Intensivos de Energia com alargamento às médias empresas (>500 tep) e incentivos à implementação das medidas identificadas

Fonte: Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética

Para as empresas nacionais a Intensidade energética está também definida pela relação seguinte.

$$\text{Intensidade Energética} = \frac{\text{Consumo total de Energia}}{\text{VAB}} \frac{\text{kgep}}{\text{Euros}}$$

Aqui o VAB (*Valor Acrescentado Bruto*) tem um significado idêntico ao PIB numa análise macroeconómica quando se consideram os países.

Nas empresas nacionais (as instalações consumidoras intensivas de energia – i.e. com consumos superiores a 500 tep/ano) e pela via do Decreto-Lei 71/2008 de 15 de Abril e do Despacho n.º 17449/2008 da DGEG, está definido o processo aceite pela DGEG do VAB.

Para além do conhecimento do estado da utilização da energia nas empresas (levantado através das auditorias energéticas, obrigatórias para todas as empresas com um consumo anual superior a 500 tep), importa saber que medidas tomar com o objectivo de redução do consumo específico de energia.

Naturalmente olhando para as facturas energéticas e equipamentos, logo surge a dúvida se não é possível gastar menos energia - a resposta imediata é sim.

Não irá abordar-se como atingir este objectivo nas diferentes vertentes energéticas à excepção da energia eléctrica que é consumida nos motores utilizados em meio empresarial.

## V. A utilização de energia em Portugal

Consumo de Energia Eléctrica em Portugal:

**Consumo per capita = 4 799 kWh (2007)**

**Consumo per capita = 5 010 kWh (2008)**

O consumo de Energia Final em Portugal (2007) foi de 1,76 tep/habitante

Para 10 000 000 habitantes, teremos:

**17 600 000 tep**

A Intensidade Energética foi de:

**225,14 kgep/1 000 Euros**

e a Emissão per capita:

**5,32 t CO<sub>2</sub>**

Consumo Final de Energia por Sector, em tep, foi:

- **Indústria: 5 139 200 <> 29,2%**
- **Transportes: 6 406 400 <> 36,4%**
- **Doméstico: 3 009 600 <> 17,1%**
- **Serviços: 2 147 200 <> 12,2%**
- **Outros: 897 600 <> 5,1%**

Em 2008 a “produção – consumo” de Energia Eléctrica teve a seguinte base:

- **Origem fóssil: 54% (21% carvão; 28% gás natural; 5% petróleo)**
- **Renováveis: 28%**
- **Importada: 18%**

O consumo de energia com motores eléctricos foi equivalente a 64% da energia consumida pela indústria, o que corresponde a:

**3 289 088 tep**

ou seja:

**3 289 088 tep <> 15 298 GWh**

Valorizando o GWh a 84 000 Euros tem-se um total de:

**1 285 M Euros**

As perdas nos motores correspondem a cerca de 11,3% do total da energia consumida na Indústria o que em termos de custos representa:

**1 285 x 0.113= 145 M Euros**

Perante este número coloca-se a questão: *“Quanto pode a minha empresa contribuir para a sua redução e como?”*

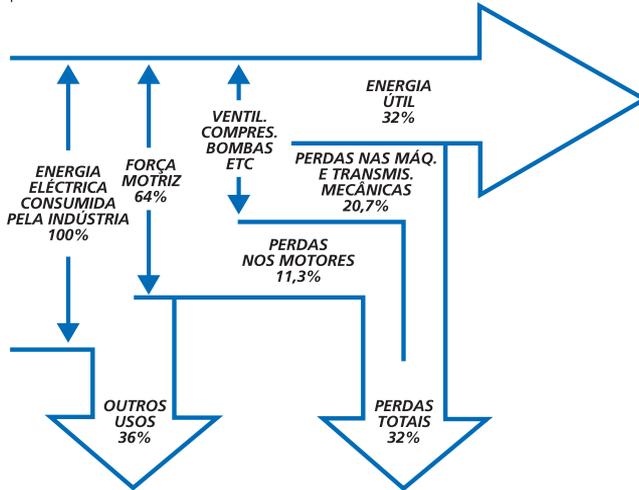
Fornece-se um contributo para melhorar o processo de decisão com vista à redução de consumos.

## VI. A utilização dos motores eléctricos

Como referido anteriormente nenhuma máquina tem um rendimento de 100% o que implica, no caso dos motores eléctricos, que estes tenham um consumo de energia superior ao exclusivamente necessário à realização do trabalho útil ao veio.

O seguinte diagrama de Sankey ilustra a percentagem média das perdas

em motores eléctricos (i.e. 11,3%) em relação à energia eléctrica consumida pela indústria.

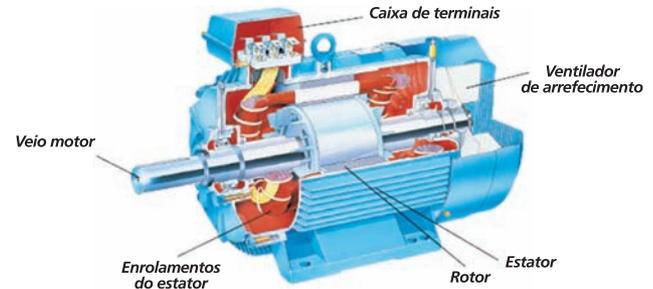


Como referido no secção II – *Principais grupos de motores eléctricos*, existe um sem número de tipos de motores que se destinam a aplicações específicas.

Naturalmente, o grupo de motores que mais estão disseminados na indústria e que constituem o objecto deste manual são os **motores de corrente alternada e, dentro destes, os de indução assíncronos**.

No decurso deste Manual abordar-se-ão outros tipos de motores, incluindo os de corrente contínua.

## VI. a. Motores de indução assíncronos



Um motor de indução tem, em termos construtivos, dois componentes básicos:

(i) Estator e (ii) Rotor.

Da alimentação das bobinas do estator com energia eléctrica resulta a interacção destes dois componentes da qual resulta o movimento de rotação do rotor. Naturalmente existem outros componentes indispensáveis ao bom funcionamento do motor tal como rolamentos, veio, carcaça, etc.

O Rotor, montado sobre o veio, é composto pelo empilhamento de chapas finas de aço magnético laminado (aço-silício), tratadas termicamente e isoladas com verniz entre si. No caso de motores de “gaiola de esquilo”, têm o formato circular (vista frontal) e com os condutores de cobre ou alumínio alojados longitudinalmente, interligando os dois anéis condutores que servem

de travamento ao empilhamento.

No caso dos motores de rotor bobinado (mais caros) o formato circular do empilhamento apresenta recortes que dão origem às cavas de alojamento das bobinas de cobre que serão ligadas aos anéis colectores – um por fase - montados coaxialmente no veio. O número de pólos do rotor terá de ser igual ao do estator o que permite a variação de velocidade dos motores. Tal é conseguido, através de ligação dos colectores de anel, via escovas, a um sistema externo de regulação do escorregamento eléctrico (por exemplo um conjunto de resistências variáveis).

De notar que há motores de indução especiais, denominados motores “*Schrage*”, de rotor bobinado (com duas bobinagens distintas) e com dois tipos de colectores, de anéis e de lâminas, que foram bastante usados na indústria para accionamentos de máquinas com velocidade variável e ventiladores. Hoje ainda se encontram em bastantes indústrias com equipamentos mais antigos.

O estator (parte estática) é igualmente composto de finas chapas empilhadas, de aço magnético (aço-silício), também tratadas termicamente. Estas particularidades técnicas destinam-se a reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. As chapas estão concebidas de modo a formar ranhuras (cavas) onde se alojam as bobinas de fio ou barras de cobre isolado, protegidas por outros componentes específicos que garantem a fixação rígida das bobinas nas cavas, evitando-se, deste modo, avarias face aos esforços electrodinâmicos decorrentes da passagem de energia eléctrica.

O espaço entre o estator e o rotor é denominado entreferro, contribuindo

o seu aumento para a perda de rendimento do motor.

Neste tipo de motores, dar-se-á particular atenção aos motores trifásicos por serem os de maior expressão no mundo do accionamento industrial de potência. São motores de arranque imediato, quando sujeitos à tensão de serviço não necessitando de órgãos auxiliares como ocorre nos motores monofásicos.

## VI. a1. Velocidade dos motores de indução assíncronos trifásicos

Em virtude das suas características construtivas estes motores têm velocidade predefinida, função do seu número de pólos.

A velocidade de sincronismo não é atingida, na prática, por este tipo de motores devido ao escorregamento que reduz, ligeiramente, a velocidade de rotação.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Em que:

**s** = Escorregamento, cujo valor nominal varia entre 1 a 3%

**n<sub>1</sub>** = Velocidade de sincronismo

**n** = Velocidade nominal (*rated speed*)

Num motor sem carga o seu escorregamento é pequeno e a sua velocidade é próxima da de sincronismo. Com a carga o escorregamento aumenta e a velocidade atinge o valor nominal (*rated speed*).

A seguinte expressão matemática permite calcular qual a velocidade angular de sincronismo (rpm) do motor em função da frequência da rede e do número de pares de pólos.

$$V = \frac{60 \times f}{P}$$

Em que:

**V** = velocidade de rotação em rpm (rotações por minuto)

**f** = frequência da rede eléctrica (50 Hz para o nosso país)

**P** = número de pares de pólos.

Exemplo de cálculo:

Qual a velocidade de um motor trifásico que está construído com 2 pares de pólos a trabalhar na rede eléctrica nacional (50 ciclos/s)?

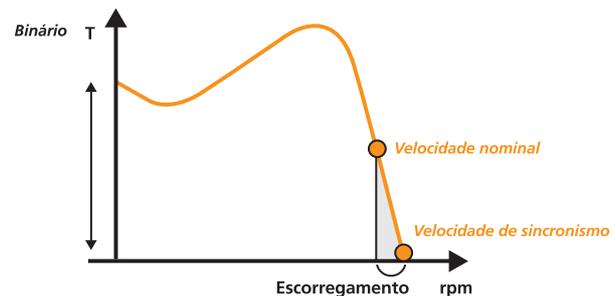
Ter-se-á então  $V = 60 \times 50 / 2 = 1\,500$  rpm

Logo o motor terá uma velocidade de sincronismo de 1 500 rpm.

Assim e para diferentes números de pares de pólos apresenta-se a seguinte tabela construída com recurso à formula anterior.

Nº de Pares de pólos	Frequência de 50 Hz Velocidade (em rotações por minuto)	
	de sincronismo	Real (Rated Speed)
1	3 000	2 800
2	1 500	1 400
3	1 000	900
4	750	700
5	600	570
6	500	470
7	430	400
8	375	360

Convém recordar que se a frequência de rede variar por questões de qualidade da energia ou da rede ocorrerão, naturalmente, alterações nas velocidades acima apresentadas, função dos novos valores da frequência.



Velocidade de sincronismo vs. velocidade nominal

## VI. a2. Arranque dos motores de indução assíncronos trifásicos

Na ligação directa à rede de motores trifásicos verifica-se que a corrente absorvida no momento de arranque é diversas vezes superior à sua corrente nominal (por vezes de um factor superior a 5). Tais correntes podem provocar quedas de tensão significativas na rede dependentes das características da mesma. Se tais quedas de tensão forem significativas haverá interferência quer com os sistemas de iluminação quer com certos equipamentos particularmente electrónicos.

Pode observar-se nos gráficos seguintes quer a variação de intensidade de corrente quer o andamento do binário com a velocidade de rotação para o caso da ligação directa à rede de motores em gaiola de esquilo.

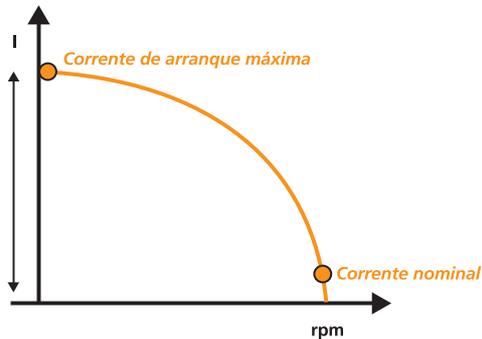


Gráfico da intensidade de corrente para um motor gaiola de esquilo típico

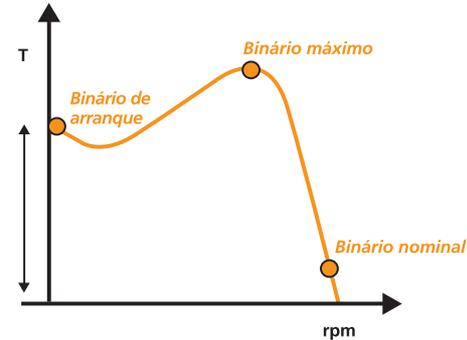
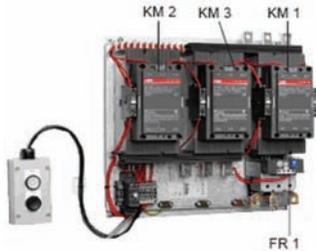


Gráfico do binário para um motor gaiola de esquilo típico

Um dos métodos de prevenir este problema foi o de dotar estes equipamentos com arrancadores denominados "estrela/triângulo" que permitem ligar a bobinagem do motor em "estrela" no momento de arranque e comutá-la para "triângulo" após o motor estar próximo da velocidade nominal. Com este procedimento o pico de corrente no arranque fica limitado a 1,8 a 2 vezes a intensidade nominal, não ultrapassando o seu valor nominal no momento da comutação.

Com a utilização de um arrancador estrela/triângulo prova-se que a tensão aplicada a cada enrolamento é  $1/\sqrt{3}$  da tensão aplicada em funcionamento normal (ver esquema na secção seguinte).

## VI. a3. Arranadores estrela/triângulo



Arranador estrela - triângulo com contactores e relé de sobrecarga

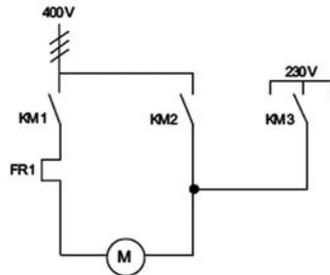
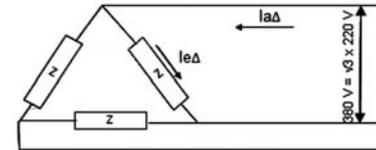
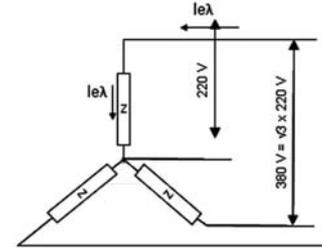


Diagrama unifilar para arranador estrela - triângulo

**KM 1** CONTACTOR PRINCIPAL    **KM 3** CONTACTOR ESTRELA  
**KM 2** CONTACTOR TRIÂNGULO    **FR 1** RELÉ DE SOBRECARGA

O que se passa com as intensidades das correntes envolvidas:



Em que:

**$I_{e\lambda}$**  = Corrente no enrolamento na ligação em estrela que é igual à corrente na linha

**$I_{e\Delta}$**  = Corrente no enrolamento na ligação em triângulo

**$I_{a\Delta}$**  = Corrente na linha quando da ligação em triângulo

Mas também se pode deduzir num sistema de 380 / 220 V, as seguintes situações:

$$I_{a\lambda} = I_{e\lambda} = \frac{220}{Z}$$

Assim na expressão anterior, a corrente de arranque em estrela é igual à corrente no enrolamento e tem o valor da tensão simples a dividir pela impedância do enrolamento.

$$I_{e\Delta} = \frac{380}{Z} = \frac{\sqrt{3} \times 220}{Z}$$

Já na expressão acima verifica-se que a corrente no enrolamento em triângulo é igual à tensão composta a dividir pela impedância ou seja é igual ao produto de  $\sqrt{3}$  pela tensão simples a dividir pela impedância do enrolamento.

Verifica-se ainda que:

$$I_{a\Delta} = \sqrt{3} \times I_{e\Delta} = \sqrt{3} \times \frac{\sqrt{3} \times 220}{Z} = \frac{3 \times 220}{Z}$$

Ou seja a corrente na linha em triângulo é igual 3 vezes a tensão simples a dividir pela impedância do enrolamento.

Se se quiser relacionar  $I_{a\lambda}$  com  $I_{a\Delta}$  tem-se:

$$\frac{I_{a\lambda}}{I_{a\Delta}} = \frac{\frac{220}{Z}}{\frac{3 \times 220}{Z}} = \frac{1}{3}$$

ou seja

$$I_{a\lambda} = \frac{1}{3} \times I_{a\Delta}$$

Ou seja quando se utiliza o arranque em estrela a intensidade de corrente na linha reduz-se a 1/3 do valor que teria se o arranque fosse realizado em triângulo.

**O que se passa com binários de arranque:**

O binário de arranque é aproximadamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada aos enrolamentos. Assim e representando por K uma constante de proporcionalidade, tem-se:

$M_{a\lambda}$  = binário de arranque em estrela

$M_{a\Delta}$  = binário de arranque em triângulo

$M_{a\lambda} = k \times 220^2$

$M_{a\Delta} = k \times 380^2$

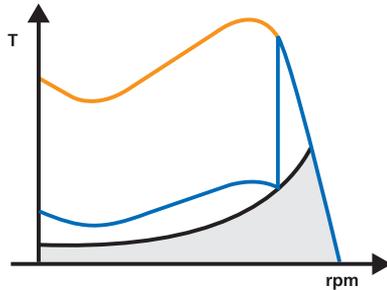
Relacionando estas duas grandezas virá:

$$\frac{M_{a\lambda}}{M_{a\Delta}} = \frac{k \times 220^2}{k \times 3 \times 220^2} = \frac{1}{3}$$

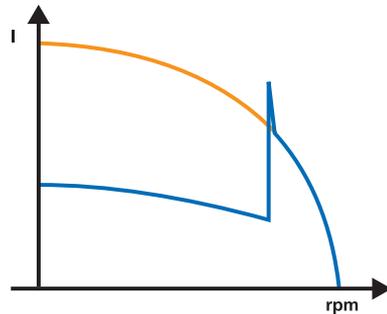
$$M_{a\lambda} = \frac{1}{3} \times M_{a\Delta}$$

Tanto esta última expressão como a da intensidade de arranque acima são verdadeiras para quaisquer que sejam as **tensões** em sistemas trifásicos equilibrados.

Nos gráficos seguintes pode observar-se tanto a evolução do binário como a variação de intensidade de corrente com a velocidade de rotação do motor (rpm) para o caso da utilização de arrancadores estrela/triângulo.



Curva binário / velocidade para arranque estrela - triângulo



Curva de intensidade de corrente para arranque estrela - triângulo

**Conclusão:** Quando se utiliza o arranque em estrela de um motor trifásico, a intensidade da corrente na linha e o binário de arranque, são reduzidos a 1/3 dos respectivos valores quando o mesmo arranque se faz em triângulo.

O **binário de arranque** de um motor em gaiola de esquilo varia de certo modo com o seu tamanho (potência).

Para motores com menos de 30 kW, o binário de arranque é duas a três vezes menor que o binário à velocidade nominal. Para motores acima dos 30 kW e até cerca de 250 kW, o valor do binário de arranque é 2 a 2,5 vezes menor que o binário à velocidade nominal.

Os motores acima dos 250 kW têm, tendencialmente, binários de arranque muito baixos, por vezes inferiores ao binário à velocidade nominal. Devido a este facto estes motores não arrancam em carga mesmo que ligados directamente à rede.

O binário de um motor à velocidade nominal pode calcular-se através da simples fórmula seguinte:

$$M_r = \frac{9550 \times P_r}{n_r}$$

Em que:

$M_r$  = Binário à velocidade nominal em Nm.

$P_r$  = Potência nominal do motor em kW.

$n_r$  = Velocidade nominal (*rated speed*) em rpm.

Em gráfico observa-se a variação do binário com a velocidade:

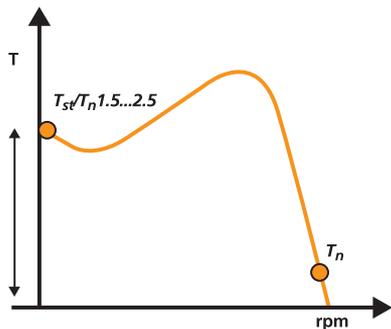


Gráfico do binário para um motor gaiola de esquilo típico

Embora o número sistemas de arranque estrela / triângulo em funcionamento no nosso país seja de difícil de contabilização, o contributo fornecido é relevante para a sua compreensão.

## VI. a4. Soft starters

Hoje os arrancadores estrela/triângulo podem ser substituídos com vantagens por equipamentos electrónicos designados arrancadores suaves ou **soft starters**.

Os **soft starters** são hoje já muito utilizados nos equipamentos mais recentes, para arrancar, parar e proteger motores eléctricos trifásicos. O seu funciona-

mento é baseado no controle da tensão aplicada ao motor durante a aceleração e desaceleração do mesmo. Acrescenta-se que os **soft starters** são dispositivos electrónicos compostos por tiristores cujo ângulo de disparo controla, em cada momento, a tensão eficaz e deste modo a corrente de arranque de motores de corrente alternada trifásicos.

À parte de uma pequena poupança de energia durante a rampa de subida em velocidade, os arrancadores suaves não reduzem a energia que o motor consome. No entanto, reduzem o desgaste mecânico durante o arranque e a paragem, permitindo a poupança de energia desligando os motores com maior frequência.

Estes arrancadores electrónicos do tipo estado sólido (*solid state*), permitem arranques suaves ou graduais por aplicação de tensões variáveis progressivas, obtendo-se correntes e binários limitados durante o arranque, como acima referido. Permitem, por isso, poupar energia no funcionamento dos motores eléctricos, por aplicação, em cada momento, da tensão adequada relativamente ao estado de carga do motor. Oferecem também a possibilidade de escolha de três modos diferentes de arranque programado:

- Arranque suave;
- Limitação de corrente de arranque;
- Arranque à tensão plena.

Além destes modos de arranque, o controlador electrónico permite, também, o ajuste do tempo da rampa de arranque suave, ou do valor máximo da corrente limite por selecção das características de arranque, optimizando deste modo todo o processo.

### Principais aplicações e vantagens:

Entre as variadas aplicações dos controladores de arranque, apresentam-se algumas das mais típicas:

- Maquinaria têxtil: impede a ruptura do fio ou fibra.
- Telas transportadoras: evitam danos nos materiais que transportam.
- Bombas: eliminam os golpes de ariete.
- Ventiladores e centrifugadores: devido à sua elevada inércia e baixo binário.
- Compressores.
- Trituradores e agitadores nos processos químicos.
- Moinhos, guas e guinchos.

Entre as principais vantagens da utilização dos “soft-starters” conducentes a economias, destacam-se:

- Arranque suave/ paragem suave;
- Menores desgastes mecânicos;
- Poupança de energia;
- Corrente de arranque limitada;
- Menores picos de corrente;
- Menos paragens de produção;
- Menores necessidades de reparação e manutenção.

A sua aplicação garante a eliminação de quedas bruscas de tensão na rede de alimentação, como ocorre nos arranques directos.

Costumam funcionar com a tecnologia chamada *by-pass*, a qual, após o

motor arrancar e receber toda a tensão da rede, liga-se um contactor que substitui os módulos de tiristores, evitando sobreaquecimento dos mesmos.

Na figura seguinte apresenta-se um exemplo de um destes sistemas bem como o respectivo esquema unifilar.



Arrancador soft start

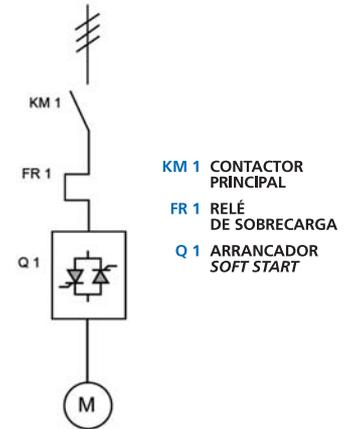
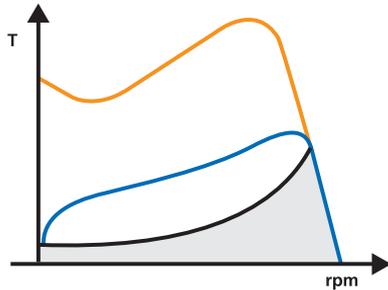


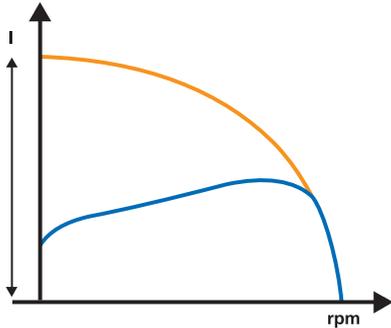
Diagrama unifilar para arrancador soft start

Nos gráficos seguintes pode observar-se tanto o andamento do binário como a variação de intensidade com a velocidade de rotação para o caso da utilização de arrancadores *soft start*, permitindo a comparação com o arranque estrela/triângulo anteriormente analisado.

Verifica-se uma variação de binário menos intensa e correntes de arranque muito mais baixas.

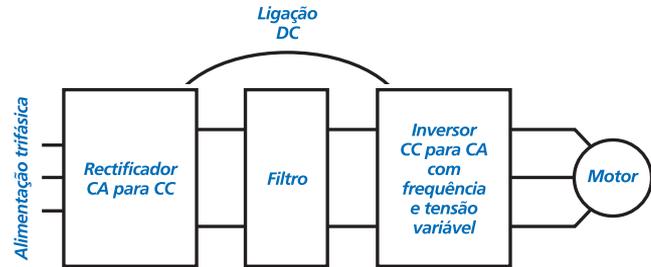


Curva binário / velocidade para arranque com soft start



Curva de intensidade de corrente para arranque com soft start

## VI. a5. Variadores Electrónicos de Velocidade (VEV)



Esquema de blocos simplificado de um VEV

Os variadores electrónicos de velocidade (VEV) garantem, também, que no momento do arranque não ocorrem perturbações na rede, sendo cada vez mais utilizados quando é necessário variação de velocidade em função das condições de funcionamento dos sistemas. É assim possível substituir sistemas mecânicos de variação de velocidade tais como polias, variadores hidráulicos ou mesmo motores de corrente contínua por um conjunto motor assíncrono e inversor menos oneroso e de manutenção mais simples.

Os VEV também designados conversores de frequência ou inversores de frequência, são dispositivos electrónicos que convertem a tensão da rede alternada sinusoidal, em tensão contínua de amplitude e frequência constantes sendo esta última convertida numa tensão de amplitude e frequência variáveis.

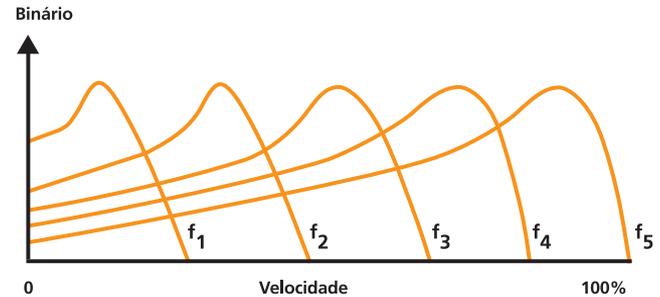
Os VEV costumam também actuar como dispositivos de protecção para os mais variados problemas de rede eléctrica que podem ocorrer, como desequilíbrio entre fases, sobrecarga, queda de tensão, adaptação do factor de potência, etc.

Normalmente, os VEV são montados em painéis eléctricos de grande difusão em automação industrial.

Podem comunicar através de diversos protocolos com computadores, centrais de comando e conduzir, simultaneamente, dezenas de motores, dependendo do tamanho e da tecnologia utilizada.

Os VEV são vulgarmente dimensionados pela corrente do motor. O dimensionamento pela potência do motor pode também ser feita, no entanto a corrente é a principal grandeza eléctrica limitativa do dimensionamento. É importante também considerar outros aspectos da aplicação no momento do dimensionamento e escolha, como por exemplo, o binário (constante ou quadrático), precisão de controle, arranques e paragens bruscas ou em intervalos curtos ou muito longos, o regime de trabalho e outros aspectos particulares de cada aplicação.

Os VEV de últimas gerações controlam não só a velocidade dos motores eléctricos trifásicos de corrente alternada, como também, outros parâmetros inerentes ao seu funcionamento, nomeadamente, o binário. Como usam microprocessadores no seu controlo, os fabricantes “criam” aspectos específicos para os seus sistemas, procurando cada um ter vantagens competitivas relativas à sua concorrência.



Estes equipamentos geram harmónicas, que vulgarmente perturbam a rede e logo outros equipamentos. Os fabricantes de VEV disponibilizam filtros de harmónicas, uns já integrados no produto, outros opcionais. Existem várias técnicas para filtragem de harmónicas, que vão desde as mais simples e menos onerosas, como bobines na barra DC ou bobines nas entradas do conversor, antes da ponte rectificadora, passando pela utilização de rectificadores de 12 ou 18 diodos, utilizando transformadores de desfaseamento até chegar aos filtros activos e rectificadores, para diminuição ou até mesmo eliminação das harmónicas tanto da corrente como da tensão eléctrica.

Como referido acima existem no mercado diferentes tipos destes equipamentos que face ao recurso a microprocessadores e programação adequada, apresentam características que os permitem distinguir.

Os principais tipos são:

- Inversor por fonte de tensão (VSI, “*Voltage Source Inverter*”): Este tipo de montagem pode ser encarado como aproximação a uma fonte de tensão trifásica, desprezando o efeito dos harmónicos, e a saída respectiva pode ser usada para alimentar directamente o motor sem nenhuma forma de controlo em malha fechada. No andar de saída é produzida uma onda de tipo quadrado. Este tipo de VEV tem sido progressivamente abandonado devido aos harmónicos gerados e ao baixo factor de potência quando a carga é reduzida.
- Modulação por largura de impulso (PWM, “*Pulse Width Modulated VSI*”): No andar de saída é sintetizada uma sinusóide de amplitude e frequência variável através da comutação a frequência elevada de uma tensão contínua, permitindo obter uma tensão de amplitude e frequência variável. Tal como na montagem VSI, também a PWM pode ser encarada como aproximação a uma fonte de tensão trifásica, desprezando o efeito dos harmónicos e a saída respectiva pode ser usada para alimentar directamente o motor sem nenhuma forma de controlo em malha fechada. A indutância do motor funciona como filtro sendo a corrente praticamente sinusoidal. Devido ao bom factor de potência (em qualquer regime de carga) e ao baixo conteúdo de harmónicos, os VEV com PWM dominam largamente o mercado para aplicações até algumas centenas de kW. Na gama até 1000 kW, o tipo predominante utiliza a modulação por largura de impulso com saída a transístores/IGBTs.
- Inversor por fonte de corrente (CSI, “*Current Source Inverter*”): este tipo,

juntamente com o VSI e o PWM, constitui um dos três tipos mais comuns de montagem de inversores. A alimentação trifásica é convertida em corrente contínua, sendo depois filtrada numa indutância que fornece uma corrente constante ao inversor. Este, por sua vez, vai gerar uma corrente que aproxima a sinusóide por patamares. Este tipo de VEV é simples e robusto, sendo sobretudo utilizado em motores de indução na gama 150 kW a 750 kW. É apropriado em aplicações em que se pretende recuperação de energia na frenagem do motor. Apresenta, contudo, um baixo factor de potência quando a carga é reduzida.

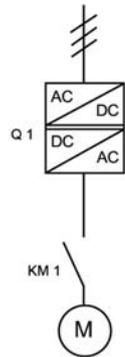
- VEV para motores de indução de rotor bobinado: neste tipo de motores, em vez de se controlar a velocidade através da ligação de uma resistência variável ao rotor (o que conduz a perdas elevadas), é possível utilizar VEV ligados ao rotor do motor, que devolvem à rede a energia que seria de outro modo dissipada. Podem ser usados VEV tipo *Kramer* estático ou *Scherbius* estático. Estes VEV apresentam a vantagem de só terem que estar dimensionados para a variação de velocidade pretendida. Por exemplo, num motor de rotor bobinado de 375 kW, se a velocidade variar entre 70% e 100% da velocidade nominal, o VEV necessita apenas de ter uma capacidade de 110 kW.
- Inversores com comutação pela carga: em motores síncronos acima de 750 kW é utilizado o VEV com inversor comutado pela carga. Esta configuração permite simplificar consideravelmente o andar de saída do VEV, pois a força contra-electromotriz do motor síncrono é utilizada para comutar naturalmente os interruptores electrónicos (tirístores) do inversor. Para motores síncronos de pequena e média potência é possível utilizar VEV com PWM ou com inversor por fonte de corrente.

- Ciclo conversores: em aplicações de grande potência (> 750kW) e baixa gama de velocidades é recomendável o uso de ciclo conversores. Neste tipo de VEV, os 50 Hz da rede são convertidos directamente numa frequência variável (tipicamente 0 – 25 Hz), através da comutação sequencial da tensão trifásica por um grande número de interruptores electrónicos (tiristores). O ciclo conversor permite obter velocidades muito baixas (sem recurso a caixas de velocidade) com binários elevados, sendo recomendável a sua aplicação em fornos de cimento rotativos, moinhos de grandes dimensões e trens de laminagem.

Em resumo, o uso de um determinado tipo de VEV dos atrás referidos depende da aplicação a que se destina o motor ou motores. Alguns sistemas são capazes de controlar vários motores, embora numa gama restrita de velocidades, e outros apenas um motor, mas numa gama mais ampla de velocidades.



Conversor de frequência (VEV)



**KM 1** CONTACTOR PRINCIPAL  
**Q 1** CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

Diagrama unifilar para um conversor de frequência (VEV)

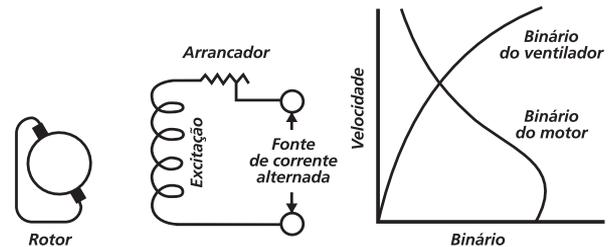
## VI. b. Outros tipos de motores

Apesar deste pequeno manual se dirigir, fundamentalmente, aos motores trifásicos de corrente alternada, convém lembrar que existem actualmente diversos tipos de motores que caem fora do âmbito deste trabalho. Não obstante, recorda-se o princípio de funcionamento de alguns destes equipamentos.

### VI. b1. Motores de corrente alternada monofásicos

Nos exemplos que se apresentam consideram-se as características destes motores no accionamento de ventiladores onde vulgarmente se aplicam.

#### VI. b1.1. Motor de repulsão



É um motor que incorpora um rotor bobinado com colectores e escovas em curto-circuito e uma bobine de excitação. A velocidade e o sentido de rotação dependem da posição do eixo das escovas.

É usado para comando de ventiladores com baixas potências com ligação directa à rede. Para potências mais elevadas são usados sistemas de redução da tensão aplicadas tais como auto transformadores, reactâncias ou resistências em série. Em algumas situações o arranque e a regulação de velocidade são realizados pela variação do ângulo das escovas.

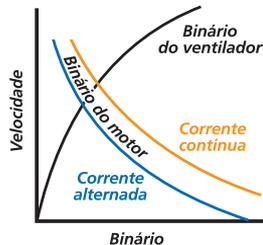
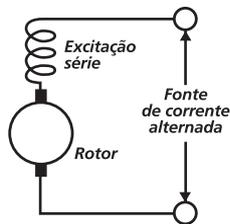
O seu binário de arranque é elevado.

Provocam ruído com frequências que interferem no espectro das ondas de rádio, pelo que uma filtragem é necessária.

Como características relevantes refere-se:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,35 e 7,5 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 300% a 400% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 3 a 4 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,7 a 0,8.

## VI. b1.2. Motor de tipo série (universal)



É um motor de rotor bobinado com colector e escovas e com uma bobine de excitação ligada em série. A sua designação de universal advém do facto de poder trabalhar com corrente alternada e com corrente contínua.

As suas características velocidade/binário são praticamente idênticas quando alimentado em corrente alternada ou contínua. Todavia para a mesma tensão, a sua velocidade será maior em corrente contínua.

No caso de accionamento de ventiladores, a variação de velocidade pode ser realizada com a utilização de uma resistência variável em série.

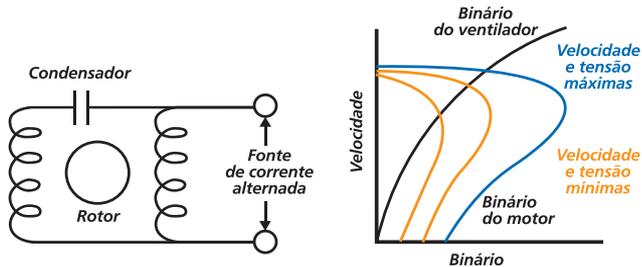
Provoca, também, interferência nas frequências de rádio, recorrendo-se a supressores para atenuação do ruído. Apresenta em certos casos, problemas de comutação (a baixas velocidades).

Arranca por ligação directa à rede, apresentando um elevado binário de arranque.

Como características relevantes refere-se:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,0074 e 0,35 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 300% a 500% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 5 a 9 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,5 a 0,7.

### VI. b1.3. Motor de indução com condensador (arranque por condensador)



É um motor de rotor em gaiola de esquilo, com duas bobinas que, face ao condensador, são “vistas” pela rede como desfasadas de 90° uma da outra.

Pode-se considerar este motor praticamente como um motor bifásico. Assim, está-se perante um motor com características excelentes para uma determinada gama de ventiladores.

Estes motores, cuidadosamente seleccionados, permitem obter uma boa regulação da velocidade função da carga do ventilador. Tal é obtido com a instalação de um autotransformador ou reactâncias em série, conseguindo-se reduções de velocidade na ordem dos 50% da velocidade nominal.

A alteração do sentido de rotação nestes motores obtém-se pela inversão das ligações de uma das bobinas estáticas.

Os motores de menor potência arrancam directamente por ligação à rede com recurso a um condensador seleccionado pelo fabricante cujas características são adequadas quer para o desfasamento das bobinas quer para o arranque.

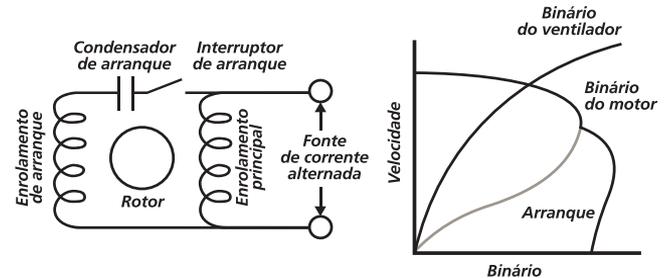
Os motores de potências mais elevadas são providos de um segundo condensador, destinado ao arranque, que se desliga após o motor atingir a velocidade nominal.

Estes motores com dois condensadores não se prestam à regulação de velocidade.

Como características relevantes referem-se as seguintes:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,35 e 7,5 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 200% a 300% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 1,5 a 2,5 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,95.

### VI. b1.4. Motor de indução de arranque por condensador



Trata-se, também, de um motor de rotor em gaiola de esquilo com duas bobines que, face ao condensador, são “vistas” pela rede como desfasadas entre si de 90°.

Neste motor a segunda bobine e o condensador são colocados fora de serviço no momento de arranque, usando-se, normalmente, para tal, um relé ou um interruptor centrífugo montado sobre o veio. Assim a máquina funciona como um motor monofásico de indução.

É também um motor de velocidade constante em que o sentido de rotação se consegue pela inversão das ligações da bobinagem principal.

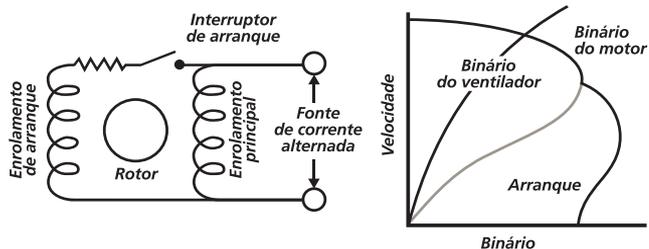
É um motor com elevado binário de arranque e com uma corrente de arranque também elevada.

Estes motores não produzem ruído no seu funcionamento normal que interfira com as frequências de rádio, à excepção do momento da actuação do interruptor centrífugo.

Como características relevantes refere-se:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,09 e 0,75 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 200% a 300% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 3 a 5 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,65 a 0,75.

## VI. b1.5. Motor de indução monofásico de fase auxiliar



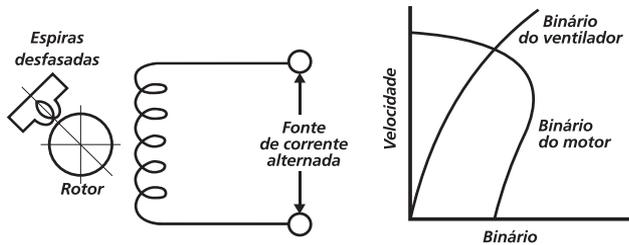
Trata-se, também, de um motor de rotor em gaiola de esquilo com duas bobines em que o desfasamento das bobines é conseguido pela inserção de uma resistência colocada em série com o enrolamento de arranque, que é desligada através de um interruptor centrífugo, quando é atingida a velocidade nominal. Se em lugar do interruptor o fabricante usar um relé este pode ser actado pela intensidade da corrente que passa no enrolamento principal do motor.

Estes motores não produzem ruído no seu funcionamento normal que interfira com as frequências de rádio, à excepção do momento da actuação do interruptor centrífugo.

Como características relevantes refere-se:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,036 e 0,22 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 100% a 200% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 4 a 6 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,5 a 0,7.

## VI. b1.6. Motor de indução de espiras desfasadas



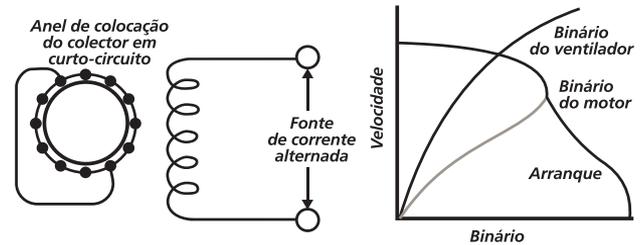
Este tipo de motor de indução monofásico é o mais simples sob o ponto de vista de auto-arranque. Comporta-se como um motor de gaiola de esquiló e os seus pólos são construídos de tal modo que uma bobine em curto-circuito, produz um campo magnético desfasado relativamente ao campo magnético principal.

Estes motores têm características bastante inferiores se comparados com os demais, todavia a sua robustez e o seu baixo custo fazem com que sejam bastante utilizados.

Como características relevantes refere-se:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,0007 e 0,015 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 50% a 150% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 1,5 a 2 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,4 a 0,6.

## VI. b1.7. Motor de indução de repulsão



Este motor tem uma só bobine de campo e um rotor bobinado com colector e escovas em curto-circuito, possuindo, ainda, um sistema que curto-circuita todas as lâminas do colector quando é atingida a velocidade nominal. Quando à velocidade nominal o seu funcionamento é o de um motor monofásico de indução.

O sentido de rotação é invertido pela modificação do ângulo de calagem das escovas.

Estes motores de repulsão não são muito adequados ao accionamento de ventiladores, aplicando-se, maioritariamente, em máquinas de velocidade constante e com forte binário de arranque.

Como características relevantes refere-se:

- Potências: \_\_\_\_\_ entre 0,18 e 3,7 kW.
- Binário de arranque: \_\_\_\_\_ 300% a 500% do binário a plena carga.
- Corrente de arranque: \_\_\_\_\_ 4 a 6 vezes a de plena carga.
- Factor de potência: \_\_\_\_\_ 0,7 a 0,8



utilizarem motores síncronos para fazerem a compensação – designados por compensadores síncronos.

Estes motores podem ter o rotor alimentado por CC ou constituído por ímanes permanentes dependente da sua dimensão.

A ligação à rede realiza-se do mesmo modo que um alternador correspondente. Como o campo magnético do rotor é independente do campo magnético do estator, a sua velocidade acompanha o campo magnético girante estabelecido pelo estator, sendo por este motivo denominado síncrono. O aumento ou diminuição da carga não afecta a sua velocidade.

Se a carga ultrapassar os limites nominais do motor, este pára definitivamente. Alguns motores síncronos não são auto-suficientes no momento de arranque pelo que recorrem a motores auxiliares para atingir a velocidade de rotação nominal. Quando atingem uma velocidade próxima da rotação nominal, procede-se à alimentação dos seus rotores alcançando-se rapidamente a velocidade de sincronismo.

O sentido de rotação destes motores síncronos é dado pelos motores auxiliares que lhes permitem atingir a velocidade nominal.

$$N = 120 \times \frac{f}{p}$$

Onde:

**N** = velocidade em rpm

**f** = frequência em hertz

**p** = nº de pólos

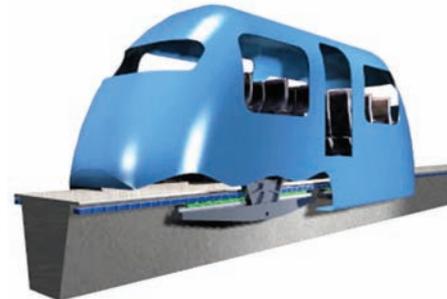
## VI. c1. Utilização de motores síncronos

Têm aplicações industriais específicas de velocidade constante, num só sentido de rotação e para potências elevadas, tais como bombas de funcionamento praticamente contínuo, compressores rotativos, etc.

São, como acima se referiu, usados para compensação do factor de potência – compensador síncrono.

Os motores síncronos monofásicos de pequeníssima potência têm grande utilização na técnica da mecânica de precisão

Estão a ser realizados ensaios com a adaptação deste tipo de motores à tecnologia de motores lineares para transporte a alta velocidade como é o caso do *Maglev*.



*Os motores síncronos em virtude da sua velocidade constante, têm aplicação numa versão linear, no sistema de transporte “Urban MagneMotion Maglev”*

## VI. d. Motores de corrente contínua

Estes motores têm características naturalmente distintas dos de corrente alternada, nomeadamente o seu formato, sendo a sua placa de características e / ou os seus bornes de ligações o processo, óbvio, de distinção.

A alimentação destes motores é vulgarmente realizada através de dois condutores activos (positivo e negativo), que têm hoje, por sistema, origem num rectificador de meia onda ou de onda completa, mais ou menos complementados por sistemas electrónicos que garantem a funcionalidade do equipamento.

As velhas redes de distribuição de corrente contínua com produção centralizada (muito raras actualmente) quando necessária a sua produção, esta é conseguida, localmente, com recurso a equipamentos como acima referidos.

Os motores de corrente contínua são agrupados em 4 tipos principais:

- Motor de excitação independente;
- Motor série;
- Motor *shunt*;
- Motor *compound*.

Como referido estes motores caíram em desuso face à evolução tecnológica dos motores de corrente alternada e dos sistemas de controlo, todavia foram motores profusamente utilizados antes da década de 90 face às suas características de binário e possibilidade de variação de velocidade. Tinham custos elevados de manutenção (particularmente os de colectores e escovas) e estavam sujeitos a avarias significativas quando tal manutenção era descuidada.

Hoje continuam presentes em equipamentos industriais mais antigos e de longa vida útil. Por este facto são motores em que se deve considerar a sua possível substituição por motores de corrente alternada associados a VEV.

Apresenta-se alguma informação e esquemas destes motores que permitem ao leitor ter uma ideia mais concreta sobre os mesmos.

### VI. d1. Inversão do sentido de marcha nos motores de corrente contínua

Se se alterar o sentido da corrente apenas num enrolamento, do induzido ou do indutor, o sentido das forças electromagnéticas muda, modificando assim o sentido de rotação do motor.

### VI. d2. Binário dos motores de corrente contínua

Nestes motores o fluxo magnético e a intensidade de corrente são as grandezas preponderantes na determinação do binário. Este é calculado pela expressão:

$$M = K \times \phi \times I_a$$

Em que:

**M** = Binário motor (no arranque é designado binário de arranque) em N.m

**K** = Constante do motor ( $K=n/2\pi$ )

**$\phi$**  = Fluxo magnético polar em Weber

**$I_a$**  = Corrente no induzido em Ampere

Se se estiver perante um motor de excitação separada o seu fluxo é constante e então o binário é apenas proporcional à corrente.

## VI. d3. Velocidade do induzido dos motores de corrente contínua

Pode calcular-se pela expressão:

$$N = 60 \times \frac{U - r \times I}{n \times \phi}$$

Em que:

**N** = Número de rotações por minuto

**U** = Tensão nos terminais em Volt

**I** = Intensidade de corrente em Ampere

**r** = Resistência do induzido em Ohm

**φ** = Fluxo magnético de cada pólo em Weber

**n** = Número de condutores activos do induzido.

Pela expressão acima constata-se que o número de rotações (velocidade) do motor cresce com a tensão aplicada aos terminais do induzido e que diminui quando aumenta o produto  $r \cdot I$  (tensão absorvida). Observa-se ainda que o aumento do fluxo magnético actua como um freio do motor, originando uma redução da velocidade, verificando-se o inverso com a diminuição do fluxo. Assim, a utilização de um reóstato de excitação permite a regulação da velocidade do motor.

A força contra-electromotriz destes motores é dada pela expressão:

$$E' = \frac{p}{a} \times \frac{n \times N \times \phi}{60}$$

Em que:

**E'** = Força contra-electromotriz gerada

**N** = Número de rotações por minuto

**a** = Número de pares de secções do enrolamento do induzido

**p** = Número de pares de pólos

**r** = Resistência do induzido em Ohm

**φ** = Fluxo magnético de cada pólo em Weber

**n** = Número de condutores activos do induzido.

## VI. d4. Potência de motores de corrente contínua

A potência nestes motores é facilmente calculada pela fórmula seguinte:

$$P = p' + r \times I^2$$

Em que:

**P** = **U x I** = Potência absorvida pelo induzido

**p'** = **E' x I** = Potência eléctrica transformada em potência mecânica

**r x I<sup>2</sup>** = Perda por efeito de Joule

**r** = resistência eléctrica do induzido em Ohm

**I** = intensidade de corrente no induzido

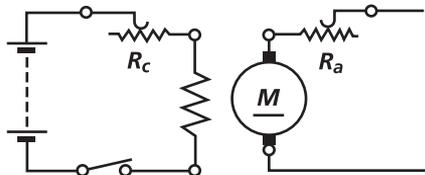
Diversas considerações e análises poderiam ser levadas a cabo para se entender bem quão flexíveis são estes motores, todavia tal fica fora do âmbito deste documento, pelo que serão referidos apenas alguns aspectos relevantes que convém não descurar.

Nestes motores se estiverem presentes pólos auxiliares, o ângulo de calagem das escovas é nulo – colocado sobre a linha neutra.

Se não tiverem pólos auxiliares (máquinas mais antigas) é necessário ajustá-las deslocando-as em atraso ao sentido de rotação do motor para se eliminar o faiscar da comutação que deteriora o colecter.

A escolha de um motor para um fim específico tem normalmente a ver com a velocidade pretendida e com o binário em causa.

## VI. d5. Motor de excitação independente

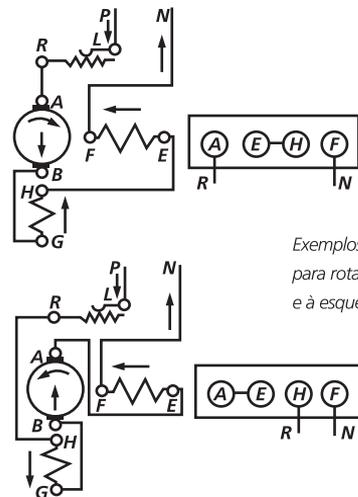


Características:

- Velocidade estável em vazio para tensão constante.
- Velocidade em carga praticamente igual à velocidade em vazio.
- Intensidade da corrente absorvida praticamente proporcional ao binário resistente.

Devido aos circuitos (induzido e excitação) serem independentes neste tipo de motores, os custos de instalação eléctrica são mais elevados pelo que a sua utilização é menos comum. Utilizam-se em laminadores, caixas de extracção de minérios e outras aplicações onde são requeridas potências elevadas (várias centenas de kW). Face à sua elevada segurança de funcionamento estes motores são também empregues em servo motores de máquinas automáticas.

## VI. d6. Motor série



*Exemplos de ligações para rotação à direita e à esquerda*

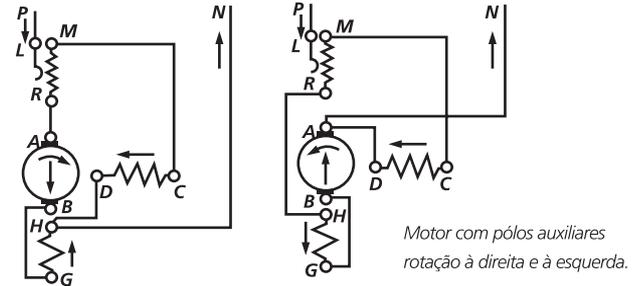
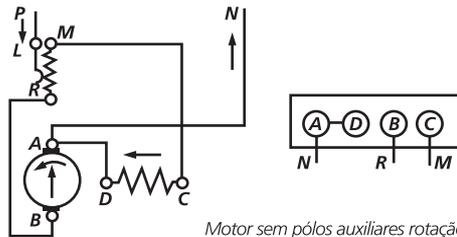
Características:

- Motor de velocidade variável proporcional à carga com tendência a embalar perigosamente em vazio (*na expressão da velocidade se o valor de  $\phi$ , for zero o denominador da expressão será igual a zero e logo  $N$  virá igual a infinito*).
- Para o mesmo aumento de carga a intensidade de corrente absorvida é menor que no motor *shunt*.
- O binário de arranque é sempre elevado, mesmo com uma queda de tensão significativa na rede de alimentação (o que não acontece com o motor *shunt*).

São utilizados em tracção eléctrica (eram os motores por excelência para este tipo de aplicação nos antigos sistemas ainda em funcionamento). Era também usual a sua utilização em pontes rolantes e monta-cargas, equipamentos de velocidade muito variável e que requerem grandes binários.

Os motores de cc de potência muito pequena (inferiores a 0,1 kW) por razões construtivas são sempre do tipo série.

## VI. d7. Motor *shunt*



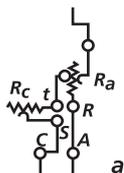
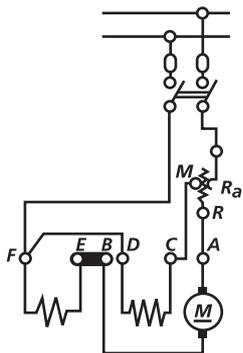
Características:

Este tipo de motores é geralmente projectado para funcionar a determinada velocidade correspondente à tensão para que foi estudado. A velocidade pode todavia ser variada numa gama de 15 a 30% através da actuação de uma resistência variável montada no circuito de excitação.

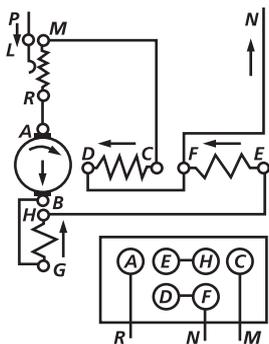
- Velocidade estável em vazio, para tensão de alimentação constante.
- Velocidade em carga aproximadamente igual à velocidade em vazio, para tensão de alimentação constante.
- Velocidade pouco variável com o binário.
- Intensidade de corrente absorvida da rede, aproximadamente proporcional ao binário resistente.
- Potência absorvida proporcional ao binário.

São utilizados em máquinas ferramentas, em algumas aplicações de bombas centrífugas e em máquinas com binário de arranque relativamente pequeno.

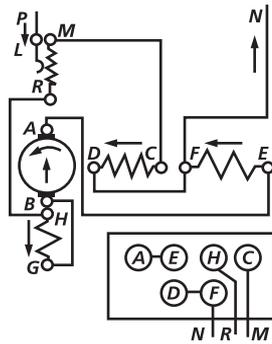
## VI. d8. Motor compound



**Pormenor a)** relativo à regulação de velocidade com a colocação em série com o enrolamento shunt, de uma resistência variável (reóstato de campo)



Esquema para rotação à direita



Esquema para rotação à esquerda

Características:

Este tipo de motores tem características intermédias entre os motores *shunt* e os motores série.

Estes motores têm aplicação no accionamento de antigos compressores, bombas alternativas e equipamentos que necessitam de um binário de arranque importante. De notar que a velocidade destes motores se reduz com o aumento da carga, sendo todavia fácil a regulação de velocidade.

## VI. e. Motores de ímanes permanentes (IP)

Estes motores remontam à década de 60 mas nos últimos 10 anos têm visto a sua tecnologia evoluir até ao ponto de hoje serem uma alternativa a considerar, particularmente em accionamentos directos (sem sistemas de excitação, sem caixas de velocidade e com binário elevado).

São cada vez mais usados na indústria transformadora, para accionamento directo de órgãos evitando o recurso a caixas de velocidade e outros equipamentos auxiliares, tais como acoplamentos (múltiplos) entre órgãos, sensores de velocidade e outros, minimizando perdas e maximizando o rendimento global.

Recorda-se que as máquinas (motores de indução) de corrente alternada, projectadas para funcionarem entre 750 e 3000 rpm não são muito adequadas para accionamentos directos a baixa velocidade, baixando a sua eficiência e binário com a redução de velocidade.

Cumulativamente, nestas máquinas, quando o n.º de pólos aumenta, dimi-

nui o seu factor de potência devido a um aumento da indutância de fugas. Logo não se está perante uma boa solução quando se requer accionamentos directos a baixa velocidade. Estes problemas são minimizados, com recurso a caixas de velocidade e motores mais adaptados ao fim em vista reduzindo-se, no entanto, a eficiência dos sistemas de accionamento.

Com o aparecimento dos motores de IP este problema é ultrapassado na grande parte das aplicações, face ao seu elevado binário mesmo a muito baixas rotações, permitido a eliminação das caixas de velocidade e demais órgãos necessários em tais aplicações.

Como acima se referiu, as máquinas desta tecnologia, já permitem aplicações de baixa velocidade e com binários elevados, tendo aplicação na indústria transformadora, na propulsão naval e nos equipamentos eólicos.

Estes motores de IP usam os ímanes de NdFeB (Neodímio, Ferro e Boro) sendo considerados como os mais modernos e potentes do mercado.

Estes ímanes apresentam características de densidade de fluxo elevado e são muito resistentes à desmagnetização. São ainda mais económicos e menos quebradiços que os de Samário-Cobalto (Sm e Co).

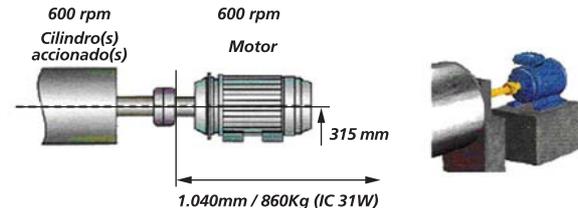
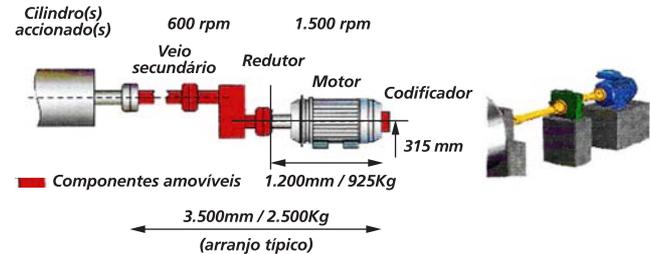
O custo dos ímanes permanentes podem representar numa máquina entre 15 e 30% do custo dos materiais totais empregues na sua construção.

Estes motores não necessitam de geradores de impulsos para referência da velocidade e utilizam conversores de velocidade variável com controlo directo do binário. São praticamente tão robustos e simples quanto os motores de

indução de rotor em gaiola de esquilo, para potências equivalentes.

Na figura seguinte compara-se o accionamento de um cilindro com o esquema tradicional ou recorrendo a um motor IP.

Verifica-se uma redução significativa quer de elementos activos quer passivos, quer, ainda, de espaço ocupado.



É de recordar o facto que estes motores ao possuírem ímãs permanentes não necessitam de energia da rede para provocar a sua magnetização, o que origina uma poupança energética a contabilizar a seu favor. Consequentemente os VEV que os comandam podem ser de menor dimensão com a inerente redução de custo.

## VI. f. Outros tipos de motores

Há uma variedade significativa de motores com aplicações muito específicas, que não foram referidos para não tornar fastidiosa a leitura deste documento. Recordamos, porém, os motores passo a passo muito usados para controlo de posição em máquinas-ferramenta e outras aplicações. Outros motores como os usados nos sistemas de accionamento de equipamentos de som e vídeo (motores de IP) e mesmo em aplicações industriais como a dos acumuladores/alimentadores de fio dos insersores de trama em alta velocidade nos teares têxteis merecem ser aqui lembrados. Todavia eles não são mais que evoluções/adaptações dos motores acima referidos.

## VII. Motores de alto rendimento

Com a crise petrolífera dos anos 70 e consequente aumento dos preços de energia, são introduzidos no mercado motores de alto rendimento, cuja utilização se pode traduzir em poupanças significativas nos custos de funcionamento do motor, poupanças essas que compensam o maior custo inicial de um motor eficiente relativamente aos motores standard.

Relativamente aos motores standard, os motores de alto rendimento apresentam, tipicamente, menos 30% – 50% de perdas.

As técnicas utilizadas para aumentar o rendimento dos motores incluem:

- aumento da secção dos condutores no estator para redução das perdas de condução;
- aumento do comprimento do circuito magnético para reduzir a densidade de fluxo magnético, tendo em vista a redução das perdas magnéticas;
- uso de lâminas de chapa magnéticas, mais finas e com materiais de melhores características (ciclo de histerese mais estreito e maior resistividade) para igualmente reduzir as perdas magnéticas;
- redução da potência de ventilação (uma vez que as perdas do motor de alto rendimento são menores) e utilização de rolamentos com baixo atrito;
- optimização do entreferro, tendo em vista a sua redução e a melhoria do acabamento das superfícies para diminuir as correntes de magnetização necessárias e as perdas extraviadas.

Consequentemente os motores de alto rendimento **são mais volumosos** e mais caros que os motores standard, pois usam maior quantidade de matérias-primas, sendo também, algumas destas de superior qualidade.

Tipicamente, os motores de alto rendimento têm um acréscimo de preço de 25-30% relativamente aos motores standard.

Os motores de alto rendimento, por terem menores perdas funcionam normalmente a mais baixa temperatura, o que conduz a uma vida útil mais longa. Há, contudo, aspectos menos positivos no funcionamento de um motor de alto rendimento, que são causados pela menor resistência do rotor. Assim, à medida que a resistência do rotor diminui, verifica-se:

- Diminuição do binário de arranque, o que pode trazer problemas no accionamento de cargas com elevada inércia, especialmente em situações em que se verifiquem flutuações de tensão apreciáveis. Recorde-se que o binário de arranque decresce rapidamente com a diminuição de tensão.
- Aumento da corrente de arranque, o que pode ter implicações no dimensionamento da alimentação e accionamento do motor.
- Diminuição do escorregamento, ou seja, um pequeno aumento da velocidade do motor. Por exemplo, motores de 10 hp (7,5 kW) podem apresentar velocidades à plena carga de 1 460 r.p.m. ou 1 450 r.p.m., para motores de alto rendimento e standard respectivamente. Este facto faz com que, em aplicações tais como bombas e ventiladores, a carga e portanto o consumo suba, anulando uma parte substancial da economia obtida com a introdução do motor de alto rendimento. Recorde-se que a carga das bombas e ventiladores centrífugos cresce, aproximadamente, com o cubo da velocidade.

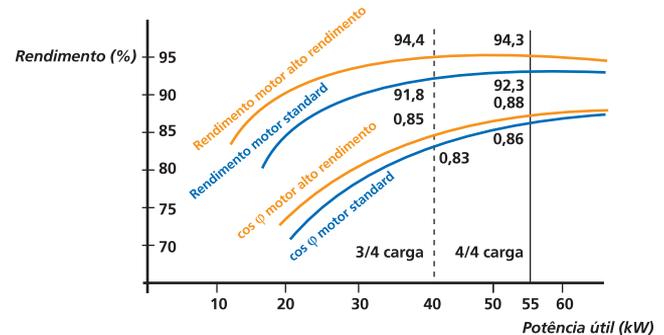
Há, contudo, a possibilidade de evitar este aumento de carga através de ajustamentos na transmissão, na bomba ou sobretudo utilizando o controlo

electrónico de velocidade.

Os motores de alto rendimento, com níveis de rendimento superiores aos motores standard em cerca de 2 – 6 pontos percentuais, permitem outros benefícios, tais como:

- Suportam melhor as variações de tensão e harmónicos que os motores standard.
- Apresentam, normalmente, um factor de potência superior, relativamente aos motores standard.
- Têm um modo de operação mais silencioso, devido à menor potência de ventilação requerida.

No gráfico pode observar-se as curvas de rendimento e factor de potência para as versões standard e de alto rendimento, de um motor de 55 kW.



## VII. a. Condições mais atraentes do ponto de vista económico, para instalar motores de alto rendimento

Normalmente ocorrem nas condições seguintes:

- Instalação de um novo equipamento ou motor. O sobrecusto no investimento num motor de alto rendimento é de cerca de 25 – 30%. Neste tipo de situação um motor de alto rendimento é normalmente vantajoso (tempo de recuperação do investimento inferior a três anos) para um número de horas de funcionamento superior a 2 000 horas por ano numa instalação industrial.

No sector terciário, devido aos preços da electricidade serem superiores, 1 000 horas por ano podem, tipicamente, ser suficientes para justificar a aquisição.

- Substituição de um motor existente que avariou. Se o motor existente avariou, precisa de ser rebobinado e, se tem um número elevado de horas de funcionamento por ano, deverá ser considerada a sua substituição por um motor de alto rendimento. Com a excepção de motores pequenos (menos que 5 kW), a reparação de um motor custa cerca de 30 – 50% do preço de um motor de alto rendimento. Assim, a diferença no investimento é significativamente maior do que no caso anterior.
- O motor existente está fortemente sobredimensionado. Nestas condições e se o motor tem um número elevado de horas de funcionamento por ano, deverá ser considerada a sua substituição por um motor de alto rendimento com uma potência não excedendo o máximo da potência mecâ-

nica requerida. Esta substituição é particularmente vantajosa em empresas que têm um parque numeroso de motores instalado. O motor sobredimensionado, depois de ser substituído pode servir como unidade sobressalente.

*A substituição de motores standard que se encontram em bom funcionamento raramente é atraente do ponto de vista económico, pois neste caso, o investimento adicional representa 100% do custo do motor de alto rendimento.*

## VII. b. Eventuais desvantagens a considerar na substituição de um motor convencional por outro de alto rendimento

Aquando da decisão de substituição de um motor convencional por outro de alto rendimento, face ao maior volume deste último pelos motivos já referidos, deverão ser considerados os custos adicionais de adaptação da base e da altura do veio que poderão ser diferentes. Provavelmente, os acoplamentos e espaçadores poderão requerer substituição com eventual adaptação, pelo que os custos inerentes deverão, também, ser considerados.

## VIII. Sobredimensionamento de motores

O sobredimensionamento de motores de indução é uma situação muito frequente na indústria em Portugal, devido à utilização sistemática de factores de segurança muito elevados no dimensionamento desses motores. Como muitas vezes não se sabe com rigor qual vai ser a carga que o motor vai ter de vencer opta-se pelo seu sobredimensionamento e, por vezes, do próprio dispositivo actuado (por exemplo, a bomba ligada ao motor).

O sobredimensionamento excessivo (superior a 30%) dos motores de indução acarreta as seguintes desvantagens:

- Maior investimento inicial na aquisição do motor e correspondente equipamento de comando e protecção.
- Degradação do rendimento do motor, conduzindo a maiores custos de funcionamento da instalação.
- Degradação do factor de potência da instalação, com o conseqüente aumento dos custos na factura de energia eléctrica ou na necessidade de aquisição de equipamentos para compensar o **factor de potência**.  
Convém salientar que o factor de potência decresce continuamente com a diminuição da carga.

## IX. Uso de motores de tensão mais elevada

Uma boa prática para a poupança de energia pode passar pela utilização, em novos projectos, de um sistema de tensões de 690/400 V.

É de recordar que com o aumento da tensão e para a mesma impedância dos enrolamentos dos motores se reduz a corrente. Como as perdas por efeito de Joule são proporcionais ao quadrado da corrente ( $r \times I^2$ ), a poupança de energia é apreciável.

Em novos projectos em que se tem que introduzir um transformador, este pode ser dimensionado para baixas tensões de 690/400 V, dando origem a uma rede com estas características. Recorde-se ainda que a redução de corrente e logo o dimensionamento dos órgãos de comando, será diferente (menor intensidade) o que contribuirá para investimentos mais reduzidos uma vez que o aumento da tensão não implicará custos da mesma ordem de grandeza.

Recorde-se quanto aos motores eléctricos trifásicos quando ligados em triângulo têm aplicada aos seus terminais a tensão de 400 V na rede actual de 400/230 V, valor que, na nova filosofia, ficará também aplicado a cada enrolamento mas agora com o motor definitivamente ligado em estrela.

## X. Normalização sobre eficiência dos motores eléctricos

A Comissão Electrotécnica Internacional (IEC) reconhece como um dos seus objectivos, a Eficiência Energética.

A definição de perdas nos motores eléctricos está associada a normas internacionais, destacando-se as seguintes:

- IEC 60034-2 - Usada principalmente na Europa, Índia e China para além da aplicação na Austrália e Nova Zelândia.
- IEEE 112 método B ou IEEE 112-B. – Empregue nos Estados Unidos e demais países com redes a 60 Hz.
- Cerca do ano 2000 a Austrália e a Nova Zelândia introduziram regras similares às da Norma IEEE 112-B, continuando a aplicar a Norma IEC 60034-2, situação que se deveu, entre outros, a problemas de sobreaquecimento no âmbito do cálculo das perdas nos enrolamentos do estator.

O Comité Europeu de Fabricantes de Máquinas Eléctricas e Electrónicas de Potência (CEMEP) define 3 Classes possíveis de eficiência para os motores eléctricos (IEC 60034-2 de 1972 e mod. 1996):

- EFF3 Motores de Baixa Eficiência
- EFF2 Motores de Eficiência Melhorada
- EFF1 Motores de Alta Eficiência

Define também 3 Classes possíveis de eficiência para os motores eléctricos (IEC 60034-30 de 2008):

- IE3 Motores de Eficiência Superior
- IE2 Motores de Alta Eficiência
- IE1 Motores de Eficiência Standard

No quadro seguinte apresenta-se a calendarização na aplicação da normalização pelos diferentes países.

IMPLANTAÇÃO A NÍVEL INTERNACIONAL DA NORMA IEC 60034-30

Nível de Eficiência	Classe de Eficiência IEC 60034-30	CEMEP IEC 60034-2	Incerteza de conformidade com a Norma IEC 60034-2-1 (2007)	Países que aplicam os regulamentos sobre o Rendimento
Superior	IE3		Baixa	USA (2011) Europa (2015 a 2017)
Alta	IE2	EFF1	Baixa	USA; Canadá; México; Austrália; Nova Zelândia; Brasil (2009); China (2011); Europa (p. 2012); Suíça (p. 2012)
Standard	IE1	EFF2	Média	China; Brasil; Costa Rica; Israel; Taiwan; Suíça (p. 2012)
		EFF3		

Na UE está previsto:

- A partir de 16 de Junho de 2011, todos os motores de potências entre 0,75 e 375 kW devem cumprir os requisitos de eficiência da Classe IE2.
- A partir de 1 de Janeiro de 2015, os motores de potências entre 7,5 e 375 kW não podem ter uma eficiência inferior ao nível IE3 ou devem cumprir os requisitos de eficiência da Classe IE2 e devem ser equipados com sistemas de accionamento de velocidade variável.
- A partir de 1 de Janeiro de 2017, os motores de potências entre 0,75 e 375 kW não podem ter uma eficiência inferior ao nível IE3 ou devem cumprir os requisitos de eficiência da Classe IE2 e devem ser equipados com sistemas de accionamento de velocidade variável.

Se um dos objectivos da Comissão Electrotécnica Internacional (IEC) é a Eficiência Energética ao estabelecer metas para a introdução de motores de alta eficiência, então as **empresas que operam actualmente**, ficarão em desvantagem competitiva, em termos de custos energéticos, comparativamente às novas empresas que venham a entrar no mercado. A solução passa pela antecipação da remodelação dos equipamentos nas empresas mais antigas para precaver desvantagens competitivas no mercado.

Como acima referido o CEMEP e a Comissão Europeia concordaram com a definição de 3 classes de rendimentos (Classe I, Classe II e Classe III) de motores trifásicos de indução de 2 e 4 pólos, cujos valores de rendimento mínimo para as Classes II e I estão discriminados na tabela seguinte:

Potência	Rendimento mínimo da classe II (%)		Rendimento mínimo da classe I (%)		
	kW	2 Pólos	4 Pólos	2 Pólos	4 Pólos
1,1		76,2	76,2	82,2	83,8
1,5		78,5	78,5	84,1	85
2,2		81	81	85,6	86,4
3		82,6	82,6	86,7	87,4
4		84,2	84,2	87,6	88,3
5,5		85,7	85,7	88,5	89,2
7,5		87	87	89,5	90,1
11		88,4	88,4	90,6	91
15		89,4	89,4	91,3	91,8
18,5		90	90	91,8	92,2
22		90,5	90,5	92,2	92,6
30		91,4	91,4	92,8	93,2
37		92	92	93,3	93,6
45		92,5	92,5	93,7	93,9
55		93	93	94	94,2
75		93,6	93,6	94,6	94,7

Os motores de Classe III correspondem aos motores standard com valores de rendimento inferiores aos valores mínimos para a classe II, que são considerados "*motores de rendimento melhorado*". Os motores cujos rendimentos excedem os valores indicados para os mínimos da Classe I são considerados "*motores de alto rendimento*".

A tabela anterior mostra a distribuição para a gama de potências (1,1 – 75 kW) dos rendimentos mínimos para as classes II e I e dos rendimentos médios para a Classe II (RM) e para a Classe III (RO), para os motores disponíveis no mercado europeu em 1999, disponíveis na base de dados **EuroDEEM**, que pode ser consultada. No respectivo site, poderá também ser descarregado um simulador para análise da eventual substituição de motores.

A Base de Dados EuroDEEM foi projectada pelo centro de pesquisa da Comissão Europeia (CE/JRC), com vista a reunir num só suporte as informações mais importantes sobre os motores eléctricos disponíveis no mercado, sistemas electro-mecatrónicos, variadores electrónicos de velocidade, acoplamentos e transmissões. Pretende-se, deste modo, possibilitar aos utilizadores uma escolha bem fundamentada dos seus sistemas em termos técnicos e económicos.

## XI. Avaliação económica do investimento de substituição de um motor

A avaliação económica do investimento num motor de alto rendimento poderá ser feita de um modo simples, pela determinação do período de recuperação do investimento.

$$\text{Payback simples} = \frac{\text{Valor do Investimento de substituição}}{\text{Economia Anual}}$$

O *payback* – (anos)

O valor do Investimento em equipamento e adaptações a realizar (euros)

Sendo a Economia anual (em euros) calculada pela simples expressão:

$$\text{Economia anual} = \frac{\text{Redução horária de consumo de energia}}{\text{valor unitário do kWh}} \times N \times \text{valor unitário do kWh}$$

Em que:

**N** – número de horas de funcionamento por ano.

Tendo em conta que:

$$\frac{\text{Redução horária de consumo de energia}}{\text{Potência mecânica da carga / Rendimento do motor standard}} = \frac{\text{Potência mecânica da carga / Rendimento do motor de alto rendimento}}$$

Os responsáveis empresariais poderão, naturalmente, proceder a outras análises económico-financeiras, função das suas directrizes particulares, todavia e para uma primeira estimativa o cálculo do *payback* dá uma boa orientação.

Nunca é demais salientar, pela sua relevância, que a instalação de motores de alto rendimento faz particularmente sentido em termos económicos nas seguintes situações (cf pág. 40):

• **Instalação de um novo equipamento ou motor:**

O sobrecusto no investimento num motor de alto rendimento é de cerca de 25 – 30%. Neste tipo de situação um motor de alto rendimento é normalmente vantajoso (tempo de recuperação do investimento inferior a três anos) para um funcionamento superior a 2 000 horas por ano numa instalação industrial. No sector terciário, devido aos preços da electricidade serem superiores, 1.000 horas por ano podem, tipicamente, ser suficientes para justificar a aquisição.

• **Avaria do motor existente:**

Em caso de avaria do motor existente com necessidade de rebobinagem e um elevado número de horas de funcionamento anual, deverá ser considerada a sua substituição por um motor de alto rendimento. Com a excepção de motores pequenos (menos que 5 kW), a reparação de um motor custa cerca de 30 – 50% do preço de um motor de alto rendimento. Assim, a diferença no investimento é significativamente maior do que no caso anterior.

• **Sobredimensionado exagerado do motor existente:**

Nestas condições e se o motor tem um número elevado de horas de funcionamento anual, deverá ser considerada a sua substituição por um motor de alto rendimento com uma potência que não exceda o máximo da potência mecânica requerida. Esta substituição é particularmente vantajosa em empresas que têm um parque numeroso de motores instalado. O motor sobredimensionado, depois de ser substituído pode servir como unidade sobressalente.

*A substituição de motores standard que se encontram em bom funcionamento raramente é atraente do ponto de vista económico, pois neste caso, o investimento adicional representa 100% do custo do motor de alto rendimento.*

Como exemplo, considere-se a comparação de dois motores classe II, respectivamente de 11 e 55 kW com motores de alto rendimento - classe I de iguais potências e velocidade de rotação (1 500 rpm), tendo-se analisado no simulador da EuroDEEM cada uma das seguintes situações:

- Motor novo
- Substituição de existente
- Substituição em caso de rebobinagem

Consideram-se os seguintes pressupostos de base para ambas as potências:

- Custo médio do kWh: 0,0856 euro
- Custo médio de potência tomada: 7,27 euro/kW
- Funcionamento anual: 5 250 h
  
- Custo de um motor novo de classe II de 11 kW, 1500 rpm: 462 Euros.
- Custo de um motor novo de classe I de 11 kW, 1500 rpm: 832 Euros.
- Custo de rebobinagem de um motor de classe II de 11 kW, 1500 rpm: 421 Euros.
- Custo de um motor novo de classe II de 55 kW, 1500 rpm: 2 276 Euros.
- Custo de um motor novo de classe I de 55 kW, 1500 rpm: 3 347 Euros.
- Custo de rebobinagem de um motor de classe II de 55 kW, 1500 rpm: 1 242 Euros.

Com base nos pressupostos acima listados foi calculado o payback para cada uma das situações:

#### **Motor de 11 kW**

a) Montagem de um motor de alto rendimento (classe I) num equipamento em vez do seu equivalente de classe II:  
*O período de recuperação - payback - do investimento adicional será de 3,06 anos.*

b) Substituição de motor existente da classe II por outro novo da classe I:  
*O período de recuperação - payback - do investimento adicional será de 4,1 anos.*

c) Substituição de motor da classe II a ser rebobinado por outro novo da classe I:  
*O período de recuperação - payback - do investimento adicional será de 1,44 anos.*

#### **Motor de 55 kW**

d) Montagem de um motor de alto rendimento (classe I) num equipamento em vez do seu equivalente de classe II:  
*O período de recuperação - payback - do investimento adicional será de 2,93 anos.*

e) Substituição de motor existente da classe II por outro novo da classe I:  
*O período de recuperação - payback - do investimento adicional será de 6 anos.*

f) Substituição de motor da classe II a ser rebobinado por outro novo da classe I:

*O período de recuperação - payback - do investimento adicional será de 2,86 anos.*

Apresenta-se, como exemplo, a impressão do relatório de resultados do simulador da EuroDEEM:

**ANÁLISE DAS POUPANÇAS DO MOTOR - REBOBINADO**
**DADOS DE INPUT**
**CARACTERÍSTICAS DO MOTOR**

	Motor rebobinado		Motor de alto rendimento EFF1	
Descrição:	Motor de rendimento EFF3 por defeito		Motor de alto rendimento EFF1 por defeito	
Potência (kW) / Velocidade (rpm) (Pólos):	55,0 kW 1500 rpm		55,0 kW 1500 rpm	
Grau de protecção / Tensão (V):	IP55 400 V		IP55 400 V	
Carga (%):	80		80	
Rendimento (%):	91,9		94,6	
RPM a plena carga:	ORPM		0 RPM	
Carga centrífuga	Falso			
Perda de rendimento por rebobinagem (%):	0,5			

**CUSTOS**

	Motor rebobinado	Motor de alto rendimento EFF1	Dados empresa de distribuição	
Desconto distribuidor (%):	N/A	35	Preço da energia (Euro / kWh):	0,08555
Preço de compra (Euro):	N/A	3.347	Preço da potência (Euro / kW / mês):	7,2
Custo da instalação (Euro):	N/A	0	Factor de potência (%):	N/A
Desconto no motor (Euro):	N/A	0	Programa de descontos:	Não
Meses de procura máxima:	12	12	Período de amortização (anos):	10
Horas de funcionamento anual:	5250	5250		

**RESULTADOS - POUPANÇAS**

	Motor Rebobinado	Motor de alto rendimento EFF1	Poupanças de Energia	
Custo diferencial (Euro):		2.105	Energia (kWh / ano)	7.197
Consumo de energia (kWh / ano):	251292	244094	Potência (kW):	1,4
Custo da energia (Euro / ano):	21.498	20.882	Poupança de Energia (Euro / ano)	616
Custo da potência (Euro / ano):	4.136	4.017	Poupança no custo da potência (Euro / ano)	118
Redução de gases de efeito de estufa (tCO <sub>2</sub> / ano)			Potência total (Euro / ano)	734
			Período de retorno simples do investimento (anos)	2,9

A manipulação do simulador permite aceder a elementos não contemplados no exemplo que são esclarecedores de toda a análise.

## XII. Factor de Potência e sua correcção

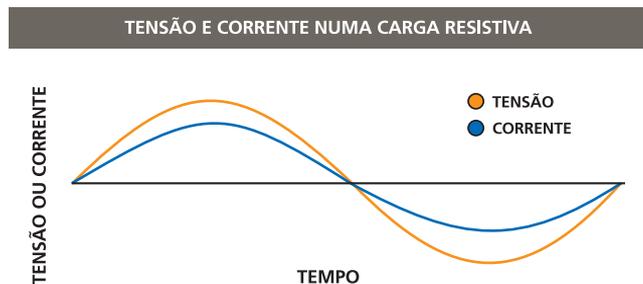
A realidade das nossas empresas em termos de energia reactiva é de modo geral questionável.

A energia reactiva indutiva que se consome nas empresas é indesejável mas é, em geral, consequência dos campos magnéticos indispensáveis ao funcionamento das máquinas eléctricas.

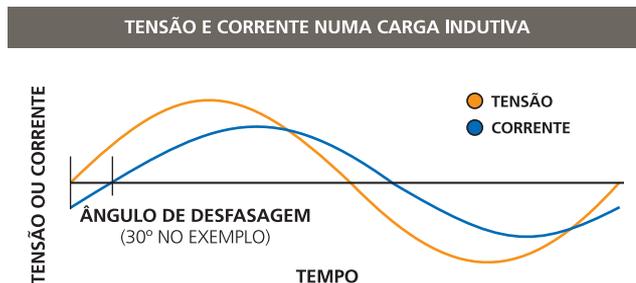
Procede-se a um pequeno enquadramento teórico sobre a energia reactiva.

Em presença de uma carga resistiva (por exemplo resistências de aquecimento, lâmpadas de incandescência, etc.) a componente reactiva quer indutiva quer capacitiva é praticamente nula. Utiliza-se o termo “praticamente” pois na realidade não existem elementos resistivos, indutivos ou capacitivos puros.

No caso das resistências a tensão alternada sinusoidal da rede está em fase com a corrente absorvida como documentado na figura seguinte:



Em meio empresarial onde existe, geralmente, um grande número de motores, cargas monofásicas que desequilibram o sistema, fornos bifásicos, equipamentos de soldadura, lâmpadas de descarga (fluorescentes e outras) tem como consequência a desfasagem, em avanço, da tensão em relação à corrente eléctrica absorvida, como ilustrado:



Num caso em que o desfasamento seja de 30° a potência útil é calculada pela equação:

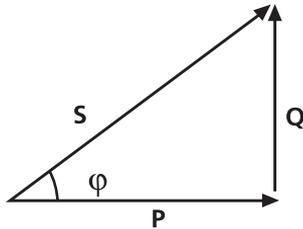
$$Pot. \text{ útil} = Pot \text{ aparente} \times \cos 30^\circ$$

ou seja

$$Pot. \text{ útil} = 0,87 \times Pot. \text{ Aparente}$$

O que significa que por exemplo de 1000 W de potência que a rede de energia eléctrica forneça, somente 870 W são utilizados na produção de trabalho, enquanto a potência restante é canalizada para a produção de campos magnéticos.

Para melhor entendimento apresenta-se, de modo simplificado, o seguinte esquema vectorial:



Donde se verifica que:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

**S** = Potência aparente – a que é absorvida da rede

A potência **P** é a componente útil – a que produz trabalho útil – da potência **S**

A potência **Q** (*potência reactiva*) serve apenas para permitir que **P** origine trabalho (*campos magnéticos*).

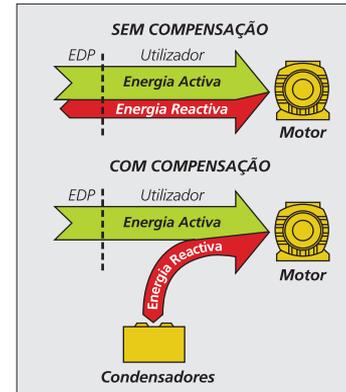
No entanto, a potência **S** representa a carga que efectivamente é apresentada a todo o sistema de **produção e transporte de energia eléctrica**.

Do triângulo e da equação, concluiu-se que mantendo constante o valor de **P**, quanto menor for **Q** menor será **S**.

Facilmente se compreende que a situação ideal corresponde a **S=P**, isto é **Q=0**, o que acontece teoricamente nos sistemas resistivos.

Anular **Q** não é possível, no entanto pode criar-se artificialmente uma potência reactiva de sinal contrário através da introdução de condensadores.

Isto significa compensar a potência reactiva, anulando o seu efeito para fora da fábrica com recurso à instalação de baterias de condensadores cuja entrada e saída de serviço é devidamente controlada através de relés variométricos.



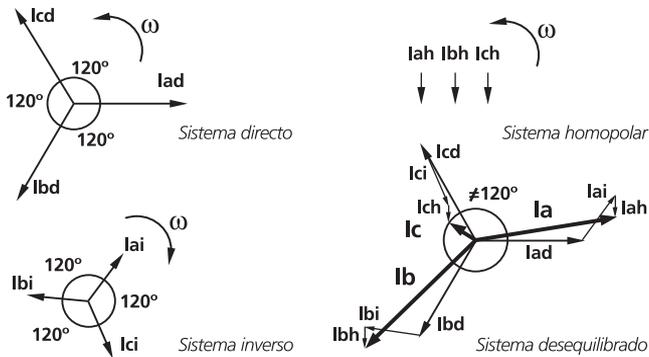
A indústria tem de manter o seu factor de potência igual ou maior que 0,93.

Para valores de  $\cos\phi$  inferiores a 0,93 a potência reactiva é superior a 40% da potência activa. O valor da potência aparente aumenta rapidamente, e assim, aumentam as perdas nos condutores.

Para que essas perdas se mantenham dentro de certos limites, a rede impôs um valor (0,93) como limite inferior para o factor de potência, a partir do qual a energia reactiva é taxada.

Esta explicação simples nem sempre é válida para empresas com redes internas de certa complexidade, onde a exigência de uma análise mais profunda é necessária face ao desequilíbrio da rede eléctrica trifásica.

Recorre-se, nestes casos, a uma análise vectorial mais profunda com recurso a métodos de utilidade prática, como por exemplo o das "componentes simétricas" (*Fortescue e Stokvis*). No método das componentes simétricas é considerado que qualquer sistema trifásico desequilibrado pode decompor-se na soma de três sistemas: um de sequência directa, outro de sequência inversa e o terceiro de sequência nula ou homopolar, como se verifica na figura seguinte:

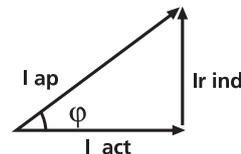


Como a análise de situações mais complexas sai fora do âmbito deste trabalho, deixa-se para os interessados a referência.

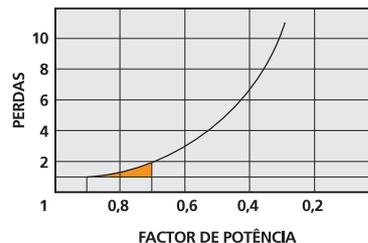
## XII. a. Efeitos da energia reactiva nas redes eléctricas

Os consumos excessivos de energia reactiva, determinados por baixos valores do factor de potência, apresentam inconvenientes diversos que se traduzem geralmente em piores condições de exploração da instalação, das quais se destacam:

- **As perdas na rede** que são proporcionais ao quadrado da corrente ( $I_{ap}$ ) e não apenas à componente activa da corrente ( $I_{act}$ ).



Na figura seguinte, pode observar-se como variam as perdas em linha com o  $\cos \varphi$  para uma mesma potência activa transportada. Quando o factor de potência passa de 0.7 para 0.93 as perdas reduzem-se para metade.



### • Redução da vida útil dos equipamentos

A presença de energia reactiva contribui para sobrecargas frequentes que provocam o aquecimento excessivo nos dispositivos de comando e protecção das redes eléctricas, encurtando a sua duração e comprometendo a segurança das instalações.

### • Penalizações tarifárias

A solicitação de energia reactiva implica que as empresas produtoras têm de proceder a investimentos suplementares ao nível da produção e distribuição, o que se repercute, necessariamente, em condições tarifárias mais gravosas para os consumidores.

### • Substituição da capacidade instalada

Ao sobrecarregar uma instalação eléctrica com energia reactiva, diminui-se o seu factor de potência e inviabiliza-se a sua plena utilização, condicionando futuras aplicações.

Assim a entrada em funcionamento de novos equipamentos pode vir a implicar investimentos vultuosos, que seriam certamente evitáveis se o factor de potência apresentasse valores suficientemente altos para reduzir significativamente a solicitação de energia reactiva à rede. Os investimentos referidos reportam-se a:

- Transformadores de maior potência que o necessário;

Na tabela seguinte pode verificar-se a influência do valor do factor de potência

no dimensionamento de um transformador do qual se pretende, por exemplo, uma potência útil de 1 000 kW:

Potência útil (absorvida) kW	Factor de potência	Potência dos transformadores (kVA)
1000	1	1000
	0,8	1250
	0,5	2000

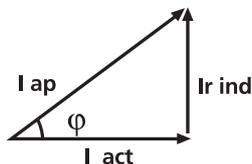
- Aparelhagem sobredimensionada;
- Cabos de maior secção.

Neste último caso e para transportar a mesma potência activa com o menor nível de perdas nos condutores, a secção destes tem de aumentar na proporção apresentada na tabela seguinte:

Secção relativa do condutor	Factor de potência
1	1
1,23	0,9
1,56	0,8
2,04	0,7
2,78	0,6
4	0,5
6,25	0,4
11,1	0,3

## XII. b. Compensação do Factor de Potência

De uma segunda análise às grandezas vectoriais em jogo (ver figura), facilmente se observa que a compensação do factor de potência (redução de  $I_r$ ) conduz a uma dupla redução na factura de energia eléctrica, uma devido à diminuição das perdas de energia relativa às perdas por aquecimento e a outra resultante da redução significativa da energia reactiva.



A forma de limitar ou evitar a absorção de energia reactiva da rede consiste em produzi-la dentro da própria instalação, utilizando equipamentos adequados a esse fim, *os condensadores*.

Na realidade, os condensadores ao compensarem a energia reactiva que os motores necessitam, estabelecem de certo modo algum equilíbrio.

Quando a laboração pára, se os condensadores não forem desligados, a situação de desequilíbrio inverte-se, aparecendo como que uma ‘injecção’ de energia reactiva na rede. Para manter o equilíbrio há que desligar os condensadores.

O tarifário penaliza também esta “injecção” de energia reactiva por poder provocar aumentos indesejados na tensão da rede.

Por outro lado, à medida que a instalação fabril aumenta de complexidade, as necessidades de compensação não são constantes. Há que controlar, permanentemente, a energia reactiva de compensação, introduzindo e retirando condensadores, por forma, a manter o factor de potência entre +0,93 e -0,93. Isto implica que entre os condensadores e a rede eléctrica da fábrica se deve instalar equipamento de controlo dos condensadores, nomeadamente um relé varimétrico.

## XII. c. Cálculo da Potência de Compensação

Considere-se uma instalação que absorve uma potência aparente  $S_1$ , para alimentar uma potência activa de carga  $P_1$ .

O factor de potência da instalação será obtido por qualquer das expressões:

$$\cos \varphi = \frac{P_{act}}{P_{ap}}$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{act}}{I_{ap}}$$

A potência reactiva é obtida a partir de qualquer das expressões:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{Q_1}{P_{act1}}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_r \operatorname{ind}}{I_{act}}$$

Donde se tira:

$$Q_1 = P_{act1} \times \operatorname{tg} \varphi_1$$

Se se pretender compensar o factor de potência para um valor superior ( $\cos \varphi_2$ ), a potência reactiva correspondente a essa nova situação será:

$$Q_2 = P_{act1} \times \operatorname{tg} \varphi_2$$

Fazendo a diferença entre os dois valores ter-se-á o valor da potência que a fonte de energia reactiva (bateria de condensadores) terá que fornecer ao sistema.

Designando esta potência por  $Q_C$ , virá:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P_{act1} \times (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

## XII. d. Formas de compensação do Factor de Potência

Tendo em conta a localização dos condensadores, a compensação do factor de potência poderá ser efectuada de diversas maneiras:

- Individualmente – carga a carga (caso de cargas importantes);
- Por grupos de receptores;
- Globalmente;
- Combinada – utilizando conjuntamente os métodos anteriores.

### Compensação Individual do Factor de Potência

A compensação individual é efectuada ligando os condensadores junto ao equipamento cujo factor de potência se pretende melhorar. Representa, do ponto de vista técnico, a melhor solução, apresentando as seguintes vantagens:

- Reduz as perdas energéticas em toda a instalação, diminuindo os encargos com a energia eléctrica.
- Diminui a carga sobre os circuitos de alimentação dos equipamentos compensados.
- Melhora os níveis de tensão em toda a instalação.

Todavia, apresenta as seguintes desvantagens:

- Maior investimento que nas outras opções.
- O ajustar da potência de compensação dos diferentes equipamentos, não é fácil face às potências normalmente disponíveis no mercado.

Nota: Recomenda-se esta actuação para casos específicos como de motores de potência significativa e com cabos de alimentação bastante longos.

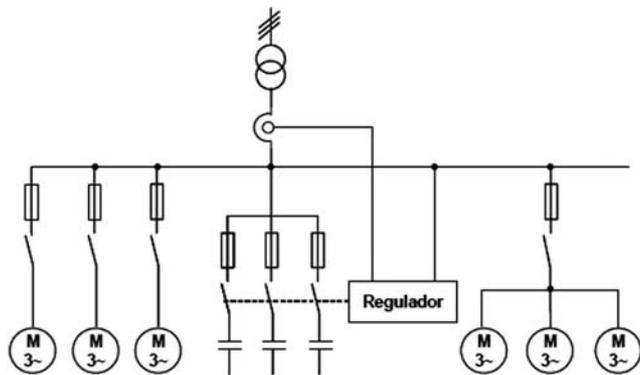
### Compensação do factor de potência por grupos de equipamentos

- A bateria de condensadores é instalada de forma a compensar um sector ou um conjunto de máquinas. É colocada junto ao quadro parcial que alimenta esses receptores.
- A potência necessária será menor que no caso da compensação individual, o que torna a instalação mais económica.

Nota: Esta é a solução mais vulgar nas pequenas e médias empresas.

### Compensação do factor de potência na entrada geral da instalação

- A bateria de condensadores é instalada à saída do transformador se a instalação for alimentada em MT ou do Quadro Geral se a instalação for alimentada em BT.



Nota: Utiliza-se em grandes instalações eléctricas, com um grande número de receptores de potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes.

A compensação centralizada possui as seguintes vantagens:

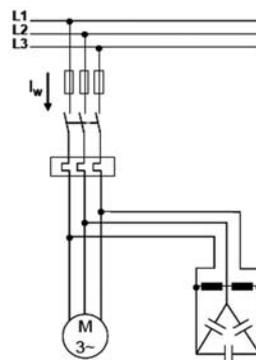
- Os bancos de condensadores, por estarem centralizados, podem ser supervisionados mais facilmente.
- Ampliações futuras tornam-se mais simples.
- A potência dos condensadores pode ser adaptada constantemente por aumento de potência da instalação eléctrica
- Considerando-se o factor de simultaneidade, a potência reactiva necessária é, geralmente, inferior à potência necessária para a compensação individual das cargas.

## Compensação combinada do factor de potência

Em muitas situações, a combinação de todos os tipos de compensação é uma realidade que se recomenda face às circunstâncias presentes.

## XII. e. Exemplo de compensação individual, no caso de uma carga indutiva

Cálculo da corrente reactiva:



A correcção do factor de potência do motor é feita com recurso a condensadores conectados aos seus terminais que são ligados e desligados juntamente com o motor (ver figura). Somente a corrente activa  $I_w$  será fornecida pela rede. Esta corrente passará pelo contactor e pelo relé de sobrecarga. O ajuste do relé de sobrecarga deverá ser feito com base nesta corrente.



Factor de potência actual da rede	Potência do banco de condensadores em kVAr por kW de potência activa para factor de potência desejado $\cos \varphi_2$				
	0,8	0,85	0,9	0,95	1
0,4	1,54	1,67	1,81	1,96	2,29
0,42	1,41	1,54	1,68	1,83	2,16
0,44	1,29	1,42	1,56	1,71	2,04
0,46	1,18	1,31	1,45	1,6	1,93
0,48	1,08	1,21	1,34	1,5	1,83
0,5	0,98	1,11	1,25	1,4	1,73
0,52	0,89	1,02	1,16	1,31	1,64
0,54	0,81	0,94	1,08	1,23	1,56
0,56	0,73	0,86	1	1,15	1,48
0,58	0,66	0,78	0,92	1,08	1,41
0,6	0,58	0,71	0,85	1	1,33
0,62	0,52	0,65	0,78	0,94	1,27
0,64	0,45	0,58	0,72	0,87	1,2
0,66	0,39	0,52	0,66	0,81	1,14
0,68	0,33	0,46	0,59	0,75	1,08
0,7	0,27	0,4	0,54	0,69	1,02
0,72	0,21	0,34	0,48	0,64	0,96
0,74	0,16	0,29	0,43	0,58	0,91
0,76	0,11	0,24	0,37	0,53	0,86
0,78	0,05	0,18	0,32	0,47	0,8
0,8	-	0,13	0,27	0,42	0,75
0,82	-	0,08	0,21	0,37	0,7
0,84	-	0,03	0,16	0,32	0,65
0,86	-	-	0,11	0,26	0,59
0,88	-	-	0,06	0,21	0,54
0,9	-	-	-	0,15	0,48

## XII. g. Correção centralizada automática do factor de potência

Em instalações eléctricas onde diversas cargas são manobradas durante o processo produtivo, o valor de  $\cos \varphi$  altera-se constantemente. Neste caso aconselha-se a implantação de um sistema de correção de factor de potência centralizado automático com regulador, que verifica constantemente os valores instantâneos da rede, comandando os estágios da bateria de condensadores. Em função do processo produtivo, poderá ser adoptada uma solução mista, na qual os factores de potência das grandes cargas, que tenham longos períodos de operação, são corrigidos individualmente, enquanto que as demais cargas serão corrigidas de forma centralizada.

Para a determinação da potência da bateria de condensadores numa instalação nova, deverá ser somada a potência reactiva total das cargas individuais, considerando-se um factor de simultaneidade "a".

No cálculo deverão ser considerados os valores reais de potência activa e factor de potência  $\cos \varphi$  durante a operação do sistema. Os valores poderão diferir substancialmente dos valores nominais, por exemplo, para os casos de accionamentos controlados.

Em geral, um cálculo aproximado da potência do banco de condensadores é suficiente. A seguinte fórmula empírica pode ser utilizada:

$$Q_c = 0,3 \times a \times S$$

**Qc** = Potência reactiva  
**a** = Factor de simultaneidade  
**S** = Potência aparente instalada.

Nesta fórmula empírica parte-se do princípio de que será feita a compensação do factor de potência médio de  $\cos \varphi_1 = 0,75$  para um valor corrigido de  $\cos \varphi_2 = 0,9$ .

Em instalações eléctricas já em operação, os valores necessários para correcção do factor de potência podem ser determinados através de medições. Esta é a forma mais fácil, quando houverem medidores de potência activa e reactiva disponíveis.

Exemplo:

$$\tan \varphi = (\text{energia reactiva}) / (\text{energia activa})$$

Energia reactiva = 131 670 kVArh

Energia activa = 99 000 kWh

$$\tan \varphi = 131\,670 / 99\,000 = 1,33$$

A que corresponde o  $\cos \varphi_1 = 0,6$  calculado ou obtido da tabela abaixo.

Isto significa que, durante o período de medição, o sistema operou com  $\cos \varphi_1$  médio de 0,6.

Para corrigir este valor para  $\cos \varphi_2 = 0,9$ , deve-se determinar a potência do banco de condensadores através da fórmula:

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

O valor de P é calculado a partir dos valores da energia activa de 99 000 kWh e do intervalo de medição considerado por exemplo de 180 h:

$$99\,000/180 = 550 \text{ kW}$$

Retirando da tabela infra o valor de  $(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$  a que corresponde  $(\cos \varphi_1 = 0,6; \cos \varphi_2 = 0,9)$  obtém-se o valor de 0,85.

Assim, é calculada a potência do banco de condensadores:

$$550 \times 0,85 = 467,5 \text{ kVAr}$$

O cálculo pela fórmula abaixo resulta no mesmo valor:

$$Q_c = \text{energia reactiva} - (\text{energia activa} \times \tan \varphi_2) / \text{tempo} \\ = (131\,670 - (99\,000 \times 0,48)) / 180 = (131\,670 - 47\,520) / 180 = 467,5 \text{ kVAr}$$

Esta fórmula, porém, é válida se a instalação operar com carga aproximadamente constante. No caso de haver alta variação de carga - por ex., durante o dia por motores (cargas indutivas) e, durante a noite, somente aquecimento e iluminação (cargas resistivas) - a potência do banco de condensadores obtida pela medição não será suficiente para os casos de picos de cargas indutivas. Nestes casos, sugere-se efectuar a medição, por ex., durante uma hora no período com grandes cargas indutivas ou determinar os valores instantâneos exactos com analisadores de energia.

Determinação da potência da bateria de condensadores para a correcção do factor de potência de $\cos \varphi_1$ para $\cos \varphi_2$												
Factor de potência da instalação = $\cos \varphi_1$			Factor de potência desejado = $\cos \varphi_2$									
			1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
$\cos \varphi_1$	$\sin \varphi$	$\tan \varphi$	$\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2$									
0,40	0,92	2,29	2,29	2,09	2,00	1,93	1,86	1,81	1,67	1,54	1,41	1,27
0,45	0,89	1,99	1,99	1,79	1,70	1,63	1,56	1,51	1,37	1,24	1,11	0,97
0,50	0,87	1,73	1,73	1,53	1,44	1,37	1,30	1,25	1,11	0,98	0,85	0,71
0,55	0,83	1,52	1,52	1,32	1,23	1,16	1,09	1,04	0,90	0,77	0,64	0,50
0,60	0,80	1,33	1,33	1,13	1,04	0,97	0,90	0,85	0,71	0,58	0,45	0,31
0,65	0,76	1,17	1,17	0,97	0,88	0,81	0,74	0,69	0,55	0,42	0,29	0,15
0,70	0,71	1,02	1,02	0,82	0,73	0,66	0,59	0,54	0,40	0,27	0,14	-
0,75	0,66	0,88	0,88	0,68	0,59	0,52	0,45	0,40	0,26	0,13	-	-
0,80	0,60	0,75	0,75	0,55	0,46	0,39	0,32	0,27	0,13	-	-	-
0,85	0,53	0,62	0,62	0,42	0,33	0,26	0,19	0,14	-	-	-	-
0,90	0,44	0,48	0,48	0,28	0,19	0,12	0,05	-	-	-	-	-

Um exemplo calculado:  $I_a$  = Corrente aparente = 1 400 A  
 U = Tensão da rede = 380 V      Factor de potência =  $\cos \varphi = 0,6$

Cálculo da potência aparente (S):

$$S = \frac{U \times I_a \times \sqrt{3}}{1000}$$

$$S = (380 \times 1\,400 \times 1,73) / 1\,000 = 920 \text{ kVA}$$

Donde se pode calcular a potência activa (P):

$$P = S \times \cos \varphi$$

$$P = 920 \times 0,6 = 550 \text{ kW}$$

Com estes dois valores pode calcular-se a potência reactiva (Q<sub>1</sub>):

$$Q_1 = S \times \sin \varphi$$

$$Q_1 = 920 \times 0,8 = 736 \text{ kVAr}$$

Nota: Os valores calculados do desfaseamento  $\varphi$  correspondem realmente a  $\varphi_1$

Para efectuar a correcção para um factor de potência  $\cos \varphi_2$  praticamente igual a 0,9, ter-se-á:

Potência aparente ( $S_2$ ):

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2}$$

Donde:

$$S_2 = 550/0,9 = 610 \text{ kVA}$$

A potência necessária da bateria de condensadores será:

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_2 = S_2 \times \sin \varphi_2$$

$$Q_2 = 610 \times 0,44 = 268 \text{ kVAr}$$

Alternativamente poderia utilizar-se  $\tan \varphi_2$  usando a expressão:

$$Q_2 = P \times \tan \varphi_2$$

Donde viria:

$Q_2 = 550 \times 0,48 = 264 \text{ kVAr}$  – valor não muito diferente do acima calculado, que para o fim em causa é irrelevante.

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = 736 - 268 = 468 \text{ kVAr}$$

Valor da bateria de condensadores a aplicar.

Em conclusão

- Pode afirmar-se que a compensação do factor de potência, diminui a factura de electricidade, pela redução das perdas internas na rede e pelo não pagamento da componente da energia reactiva. Aumenta ainda o tempo de vida útil dos equipamentos e melhora a estabilidade da rede interna.

A compensação da potência reactiva através da utilização de baterias de condensadores é rentável para o utilizador, apresentando o equipamento de compensação um período de recuperação do investimento efectuado relativamente curto.

Naturalmente que para situações mais complexas, recomenda-se o recurso a especialistas, no sentido da determinação mais rigorosa das condições existentes e da selecção dos equipamentos que melhor se adaptam.

### XIII. Classes de Isolamento

A vida útil de um motor eléctrico é determinada por diversos factores entre os quais se salientam:

- O conveniente dimensionamento
- As adequadas protecções eléctricas
- As adequadas protecções mecânicas
- O regime de trabalho
- As condições ambientais

O projectista tem a responsabilidade de proceder ao dimensionamento eléctrico e mecânico do motor tendo em conta a severidade das condições

de funcionamento e do meio ambiente onde o equipamento irá operar.

As protecções eléctricas devem também ser definidas quer em termos de protecção das pessoas e animais quer do próprio equipamento e para tal a regulamentação das instalações no nosso país (RTIEBT - *Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão* e outros), referem as respectivas características.

Os motores eléctricos quando utilizados em regimes desadequados poderão ser submetidos a reparações, devendo existir a preocupação por parte do projectista em definir os materiais e isolantes a aplicar numa nova bobinagem para salvaguardar as intervenções realizadas por técnicos menos habilitados.

O material usado no isolamento é afectado por muitos factores, o mais importante é, sem dúvida, a temperatura de funcionamento dos materiais isolantes empregues.

Um aumento de cerca de 10 graus Celsius acima da temperatura de funcionamento estabelecida reduz para metade a vida útil do motor.

Quando se refere a diminuição da vida útil de uma máquina (motor eléctrico) por efeito da temperatura, entende-se, naturalmente, a sua utilização prolongada a uma temperatura elevada. A queima do isolante por sobre-aquecimento ocorre repentinamente.

Mesmo que o isolamento suporte temperaturas abaixo daquela em que ocorre deterioração (queima) acelera-se o seu envelhecimento gradual, ficando ressequido com perda das suas características dieléctricas, originando

curto-circuitos.

Assim, o limite de temperatura depende do tipo de material utilizado.

**CLASSES DE ISOLAMENTO** - Classificam os materiais isolantes e os sistemas de isolamento associados de acordo com a normalização aplicável.

Cada Classe de Isolamento é definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que os materiais podem suportar continuamente sem que a sua vida útil seja afectada.

De acordo com a normalização em vigor, as classes de isolamento e respectivos limites de temperatura que se aplicam às máquinas eléctricas são as seguintes:

- Classe A (105 °C)
- Classe E (120 °C)
- Classe B (130 °C)
- Classe F (155 °C)
- Classe H (180 °C)

As classes B e F são as mais utilizadas em motores normais embora muitas indústrias especifiquem a Classe H para segurança acrescida dos seus motores.

De acordo com experiência dos próprios fabricantes a medição directa da temperatura dos enrolamentos é difícil com os equipamentos disponíveis, (i.e. termopares, termómetros, etc.) uma vez que não se conhece de antemão as zonas (pontos) mais quentes.

O método mais preciso e recomendável para se medir a temperatura de um

enrolamento será através da variação de sua resistência óhmica com a temperatura cuja relação funcional é conhecida.

A variação da resistência, resultante do aumento da temperatura de um enrolamento pode ser calculada através da seguinte expressão, para condutores de cobre:

$$\Delta t = t_2 - t_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \times (235 + t_1) + t_1 - t_a$$

**$\Delta t$**  - elevação de temperatura.

**$t_1$**  - temperatura do enrolamento antes do ensaio, praticamente igual à do meio refrigerante, medida via um termómetro.

**$t_2$**  - temperatura dos enrolamentos no fim do ensaio.

**$t_a$**  - temperatura do meio refrigerante no fim do ensaio.

**$R_1$**  - resistência do enrolamento antes do ensaio.

**$R_2$**  - resistência do enrolamento no fim do ensaio.

Assim, a temperatura do ponto mais quente do enrolamento deve ser mantida abaixo do limite da classe respectiva.

A temperatura total é igual à soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura  $\Delta t$  mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento e a do ponto mais quente.

As normas de motores fixam a máxima elevação de temperatura  $\Delta t$ , de modo a que a temperatura, no ponto mais quente, fica limitada de acordo

com as seguintes considerações:

a) A temperatura ambiente é, no máximo, 40 °C. Acima deste valor as condições de trabalho são consideradas especiais.

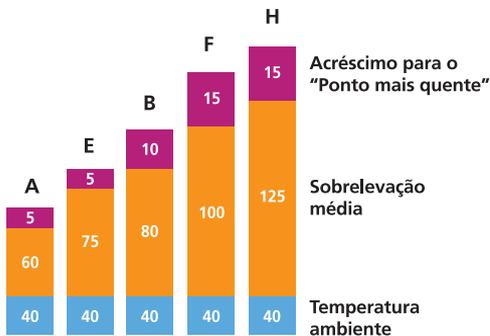
b) A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e o seu valor estabelecido em norma e baseado na prática é 5 °C para as classes A e E e 10 °C para as classes B, F e H.

As normas de motores estabelecem portanto, um máximo para a temperatura ambiente e especificam uma elevação de temperatura máxima para cada classe de isolamento. Deste modo, fica indirectamente limitada a temperatura do ponto mais quente do motor.

Os valores numéricos das temperaturas admissíveis no ponto mais quente são indicados na tabela e gráfico seguintes:

Classe de isolamento		A	E	B	F	H
<b><math>\Delta t</math></b> = Elevação de temperatura (método da resistência)	°C	40	40	40	40	40
	°C	60	75	80	105	125
<b>Diferença entre o ponto mais quente e a temperatura média</b>	°C	5	5	10	10	15
<b>Total: temperatura do ponto mais quente</b>	°C	105	120	130	155	180

*Esta tabela é aplicada para altitudes entre 0 e 1000 m*



Classes de temperaturas dos motores eléctricos

Os materiais isolantes que são presentemente utilizados em máquinas eléctricas podem ser classificados termicamente, de acordo com normas aplicáveis, nas seguintes classes:

- **Classe A** - Engloba materiais fibrosos, à base de celulose ou seda (tipicamente), impregnados com líquidos isolantes e outros materiais similares. A sua temperatura característica é de 105° C.
- **Classe E** - Engloba algumas fibras orgânicas e sintéticas e outros materiais. A sua temperatura característica é de 120° C.
- **Classe B** - Engloba materiais à base de poliéster e poli-imídicos aglutinados com materiais orgânicos ou impregnados com estes. A temperatura característica desta classe é de 130° C.

- **Classe F** - Engloba materiais à base de mica, amianto e fibra de vidro, aglutinados com materiais sintéticos, usualmente silicões, poliésteres e resinas epóxicas. Temperatura característica de 155° C.

- **Classe H** - Engloba materiais à base de mica, asbestos ou fibra de vidro, aglutinados tipicamente com silicões de alta estabilidade térmica, apresentando uma temperatura característica de 180° C.

À medida que os motores têm que operar a altitudes maiores, o decréscimo na densidade do ar leva a uma dissipação de calor inferior àquela verificada ao nível do mar. Praticamente, na faixa de 0 a 1 000 m de altitude, assume-se dissipação constante, para uma dada temperatura ambiente.

Assim, motores da mesma classe de isolamento, trabalhando em ambientes e altitudes distintos acima de 1 000 m mas à mesma temperatura, os dois ou pelo menos um deles, deverá trabalhar a uma potência diferenciada (i.e. o motor instalado à maior altitude deve ser solicitado a uma potência menor).

Os fabricantes fornecem informação sobre definição de condições de funcionamento e recomendações específicas para aplicações acima dos 1000m.

Deve referir-se, também, a protecção dos motores no que respeita a algumas condições de ambiente de trabalho através do índice de protecção (**IP**).

**IP** - índice de protecção – apresenta uma variação entre IP-00 até IP-68 e identifica o grau de protecção do motor em relação ao tamanho de partículas ou corpos estranhos e à projecção de água, constituindo o IP-55 o índice "standard".

Por outras palavras o IP caracteriza a protecção do motor contra a entrada de corpos estranhos (poeira, fibras, etc.), contacto accidental e penetração de água. Assim, por exemplo, um equipamento a ser instalado num local sujeito a jactos de água, deve possuir um invólucro capaz de os suportar, para determinados valores de pressão e ângulo de incidência, sem que haja penetração de água que possa ser prejudicial ao funcionamento do motor.

O grau de protecção é definido por duas letras (**IP**) seguido de dois algarismos.

O primeiro algarismo, indica a protecção contra entrada de corpos estranhos e contacto accidental, enquanto o segundo refere-se à protecção contra penetração de água.

1º Algarismo	
Algarismo	Definição
0	Sem protecção
1	Protecção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 50 mm
2	Protecção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 12 mm
3	Protecção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 2,5 mm
4	Protecção contra entrada de corpos estranhos de dimensões acima de 1 mm
5	Protecção contra acumulação de poeiras prejudiciais ao motor
6	Protecção total contra poeiras

2º Algarismo	
Algarismo	Definição
0	Sem protecção
1	Protecção contra pingos de água na vertical
2	Protecção contra pingos de água até à inclinação de 15° com a vertical
3	Protecção contra pingos de água até à inclinação de 60° com a vertical
4	Protecção contra pingos de água de toda e qualquer direcção
5	Protecção contra jactos de água vindos de todas as direcções
6	Protecção contra vagas de água
7	Imersão temporária
8	Imersão permanente

Perante estas tabelas e como exemplo pode afirmar-se que um motor eléctrico com classe de protecção IP21 ou IP23 deve trabalhar em ambiente limpo e abrigado.

Um motor eléctrico com classe de protecção IP55, IP56, IP65 ou IP66, pode trabalhar em ambiente desabrigado.

#### XIV. Elementos para a substituição de um motor

Naturalmente que na substituição de um motor existe a necessidade de reunir o tipo de informação a apresentar aos diferentes fornecedores potenciais,

de modo a que as propostas de solução sejam, minimamente, comparáveis.

Assim os parâmetros seguintes deverão ser reunidos no pedido:

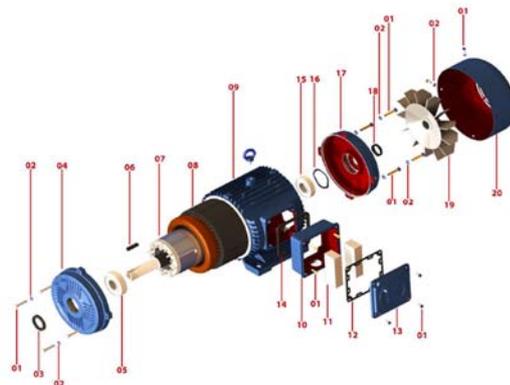
- a) Potência nominal do motor, função do binário necessário para movimentar a respectiva carga a accionar.
- b) Características mecânicas em função do binário de arranque e do binário resistente da carga a accionar.
- c) Velocidade (n.º de pólos) em função da velocidade da carga a ser accionada.
- d) Tensão e frequência da rede eléctrica ou fonte de alimentação.
- e) Altitude da instalação e temperatura ambiente (para o respectivo arrefecimento).
- f) Informação da classe de isolamento em função da temperatura esperada.
- g) Tipo de carcaça e nível de protecção IP.
- h) Informação da forma e posição de montagem normalizada face à sua colocação.
- i) Recomenda-se a informação de características dimensionais relevantes (veio, chaveta, altura de veio, distâncias entre pontos de fixação, etc.)

## XV. Manutenção de motores

Num sistema de manutenção bem estruturado, todos os motores estarão codificados e atribuídos às respectivas Unidades Funcionais de cada um dos equipamentos.

Os motores terão, naturalmente, os seus **Processos Técnicos** ou estarão incluídos nos processos técnicos da respectiva Unidade Funcional, como um órgão da mesma. A lista de componentes (*part list*) correspondente, com

todas as peças devidamente codificadas, será um suporte indispensável ao gestor e aos técnicos de manutenção.



Como exemplo, a figura apresentada acima, retirada dum manual de fabricante, poderá ajudar à elaboração do *part list* com os códigos que a empresa entenda atribuir a cada um dos componentes dos motores, tendo por base o seu sistema de organização interno.

Naturalmente, os motores deverão possuir, também, um **Processo Histórico** com o historial das intervenções realizadas, tenham sido elas de carácter preventivo (manutenção preventiva sistemática ou não), condicionada (manutenção sustentada na análise, não exclusiva, das condições de funcionamento), ou de reparação de avaria intempestiva.

Não se irá avançar mais sobre a organização da manutenção pois tal sai fora do contexto deste trabalho. Todavia não se deixará de referir alguns aspectos relativos à manutenção dos motores e a algumas técnicas usadas.

Recomenda-se a **limpeza** sistemática dos motores, particularmente quando estes estão em ambientes de trabalho severos, com presença de pó, poeiras, produtos químicos, águas, etc., recordando que estes ambientes condicionam, normalmente, a refrigeração dos motores, afectando negativamente a sua longevidade. Enrolamentos, rolamentos ou mesmo o próprio veio ou carcaça, podem vir a ser profundamente prejudicados. A sistematização destas limpezas deverá ser estabelecida de modo a garantir-se a ausência de problemas nos motores. Nas situações em que estes equipamentos dispõem de elementos filtrantes do ar de arrefecimento, a verificação sistemática do estado de colmatação ou a aplicação de indicadores de pressão diferencial é, também, recomendada.

A **lubrificação** dos motores (rolamentos, chumaceiras e outros órgãos a ela sujeitos) de acordo com as recomendações dos fabricantes faz parte integrante da manutenção a implementar. O respeito pelas recomendações do tipo de lubrificante, deve ser observado bem como a frequência e a quantidade a aplicar em cada lubrificação para se evitarem “gripagens” dos elementos rotativos.

Naturalmente recomenda-se a utilização preventiva de **técnicas de inspeção condicionada**, como a análise de vibrações, verificação de temperaturas, medição de isolamento das bobinagens e outras como a medição da carga que o motor está accionar.

Não se deve descurar o reaperto de terminais, a verificação do estado de desgaste dos colectores, a pressão das escovas usando se necessário um dinamómetro adequado, a estanquicidade da caixa de terminais e, em certas instalações, o alinhamento do próprio motor com o órgão accionado.

Recorde-se que nas situações de transmissão por correias as mesmas devem ser periodicamente verificadas e devidamente tensionadas pois podem originar perdas de potência assim como o aquecimento do tambor (polia) do motor, resultando na sua avaria.

## XVI. Nota Final

O nosso país atravessa, na companhia de grande parte da sociedade ocidental e mesmo mundial, uma crise que pode levar muitos dos responsáveis empresariais a nada fazer até que a mesma se atenuar ou resolva. Todavia, para esses, será bom terem presente o seguinte ensinamento:

*A verdadeira crise é a crise da incompetência.*

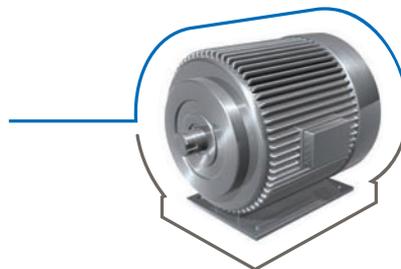
*Sem crise não há desafios, sem desafios a vida é uma rotina, uma lenta agonia.*

*Sem crise não há méritos. É na crise que desabrocha o melhor de cada um, porque sem crise todo o vento é carícia.*

*Falar da crise é promovê-la e calar-se na crise é exaltar o conformismo. Em vez disto, trabalhem no duro. Acabemos de vez com a única crise ameaçadora: a tragédia de não querer lutar para a superar.*

*Albert Einstein*

Esperamos que este pequeno manual, possa ser útil a alguns responsáveis pelas nossas empresas, no auxílio ao esforço na adaptação das suas organizações à realidade actual dos equipamentos e na contribuição nacional para a melhoria da eficiência energética de que tanto carece este país.



## XVII. Bibliografia

---

- AIE Agência Internacional de Energia – EC Research, Research Sectorial
- Adene – Agência para a Energia
- Wikipédia – Alguma informação histórica
- ERSE
- Prof J.Pedro Sucena Paiva – expresso 10.04.2009
- ABB – Revistas técnicas
- Avelino Poole da Costa – Lições de Electricidade
- Simões Morais e António Roseira – Laboratório de Electricidade
- W.C. Osborne e C.G. Turner - Woods – Guide Pratique de Ventilation
- Siemens - Conceitos e Definições para Correção do Factor de Potência
- Siemens Lda. - Unidade Automação e Controle – Accionamentos e Motores Eléctricos
- Weg – Equipamentos Eléctricos S/A - Motores Eléctricos
- Weg - Guia Prático de Treinamento Técnico Comercial



ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E PROMOÇÃO DA COGERAÇÃO

Rua de Salazares, 842 • 4149-002 Porto

Tel. +351 226 153 310 • Fax +351 226 153 319

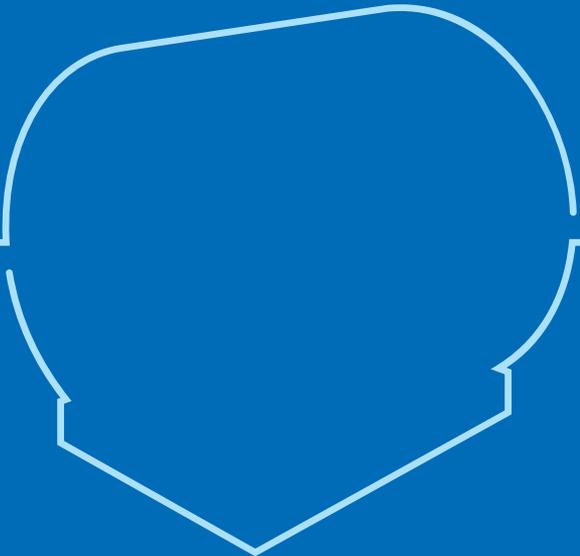
[cogen.portugal@cogenportugal.com](mailto:cogen.portugal@cogenportugal.com)

[www.cogenportugal.com](http://www.cogenportugal.com)

DEZEMBRO 2010







**COGEN PORTUGAL**

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E PROMOÇÃO DA COGERAÇÃO