

## EVOLUÇÃO DAS CLASSES DE RENDIMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

Edição n.º 23, 1.º Semestre de 2019

### Resumo

*Os acionamentos eletromecânicos são os maiores consumidores mundiais de energia elétrica, pelo que a melhoria dos seus rendimentos tem um elevado impacto na poupança de energia. Os motores de indução trifásicos são a opção dominante, razão pela qual a procura de máquinas com melhores rendimentos tem estado centrada nestes motores. No entanto, a ausência de um sistema universal de classificação dos rendimentos e, principalmente, a diversidade de métodos usados na sua estimação (com resultados distintos), constituiu um sério obstáculo à comercialização mundial destas máquinas. A classificação IE (CEI) foi decisiva na superação dessas dificuldades.*

*Este artigo pretende fazer uma síntese da evolução das classes de rendimento de motores elétricos de alcance internacional. Começa-se pelo acordo CE/CEMEP, no contexto europeu, referindo depois as sucessivas normas internacionais CEI, as quais traduzem a evolução da classificação IE.*

### 1 Introdução

Estima-se que mais de 50% da energia elétrica consumida mundialmente esteja associada a acionamentos eletromecânicos [1]. Globalmente, o sector industrial é responsável por cerca de 64% desse consumo, enquanto na União Europeia (UE), cerca de 70 % da energia elétrica consumida neste sector é devida a motores elétricos [2].

Os motores de indução trifásicos (MIT) continuam a ser dominantes, pelo que a melhoria nos seus rendimentos tem um impacto substancial na redução do consumo de energia elétrica. Há já mais de 20 anos que os principais fabricantes têm vindo a direccionar esforços no desenvolvimento de motores com melhores rendimentos.

A nível mundial, a sua disseminação foi difícil e lenta, embora dependente da zona geográfica (e.g., EU e EUA). Os principais obstáculos foram a falta de consenso na classificação e definição de métodos para determinação do rendimento: consoante as regiões do mundo, as respetivas metodologias aplicadas na determinação do rendimento dos MIT tinham resultados distintos [3].

A procura de um consenso global motivou a Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI) a desenvolver um conjunto de normas, com o objetivo de definir classes de rendimento, com base em métodos de estimação comuns. Resultam, pois, de um longo processo de discussões técnicas, económicas e políticas. Com vista à integração das tecnologias de motores mais recentes, este processo continua em evolução. Estas normas foram globalmente aceites, tendo sido transpostas para as normas nacionais e regionais em praticamente todo o mundo. Deste modo, deram um contributo importante na definição de critérios mínimos de eficiência energética (*Minimum Energy Performance Standards (MEPS)*), em vigor na maioria das economias avançadas e também nas que se encontram em desenvolvimento [3].

Atendendo ao perfil de cargas mais usual, a utilização de variadores eletrónicos de velocidade (VEVs) contribui significativamente para a redução dos consumos de energia desses sistemas. Por este motivo, a sua integração nos MEPS tem sido crescente.

Este artigo pretende fazer uma síntese da evolução das classes de rendimento de motores elétricos. Está estruturado do seguinte modo: a Secção 2 refere-se à distribuição do consumo de energia em função da potência e tipos de motores. Esta contextualização torna mais perceptível o domínio de aplicação das normas referidas neste artigo.

Na Secção 3 são indicados os pontos essenciais e consequências do acordo CE/CEMEP, bem como das normas internacionais mais relevantes. O seu conjunto constitui uma resenha do processo evolutivo, que conduziu à definição das classes de rendimento atuais, cuja abrangência ultrapassa já os motores elétricos.

Finalmente, a Secção 4 contém algumas conclusões.

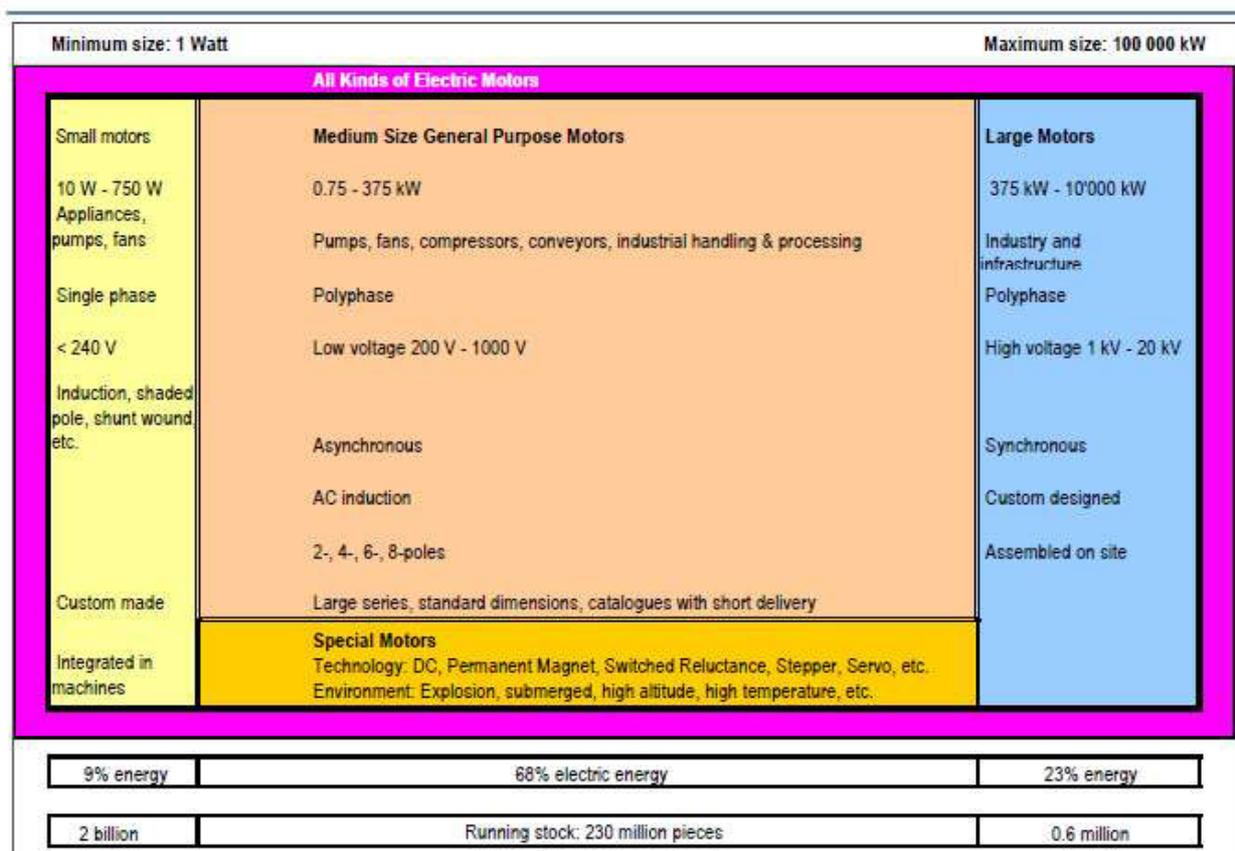
## 2. Tipos de Motores Elétricos: Distribuição de Potência e Consumos

A Figura 1 apresenta uma síntese relativa à distribuição dos consumos de energia por gamas de potência, tipos de motores e cargas associadas [1].

Destaca-se o seguinte:

1. Os consumos na gama [10-750] W (baixa tensão) apresentam um valor residual (9%), muito embora o número de unidades existente seja o mais elevado das gamas de potência definidas
2. A gama [0,75-375] kW (baixa tensão) é responsável pelos maiores consumos de energia (68%).
3. Na gama [375-10 000] kW (média tensão), o número de unidades é menor, mas o seu impacto no consumo de energia é significativo (23%).

Os MIT são claramente dominantes, mas há outras opções cuja relevância tem vindo a aumentar, sendo de destacar os motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP), motores síncronos de relutância (MSR) e motores de relutância comutados (MRC).



Source: A+B International, 2009.

Figura 1– Distribuição de motores elétricos: tipos, potência e energia consumida

Em particular, os primeiros apresentam maiores densidade de potência e rendimento, sobretudo na gama das baixas e médias velocidades. Por seu turno, o preço, robustez e fiabilidade dos MIT são as suas principais vantagens [1].

Os motores são utilizados numa vasta gama de aplicações, com destaque para as cargas parabólicas (i.e., bombas, sistemas de ventilação, compressores), a que corresponde o ponto 2. A potência requerida por estas é função de  $n^3$  ( $n$  – velocidade angular), pelo que a regulação da velocidade de operação através de VEVs apresenta um elevado potencial de poupança de energia.

### 3. Classificação de Motores: Evolução da Normalização Europeia

#### 3.1 Acordo CE/CEMEP [4]

Em 1999 foi assinado um acordo voluntário, entre a Comissão Europeia e a Associação Europeia de Fabricantes de Máquinas Elétricas e de Eletrónica de Potência (CEMEP), que definia três classes distintas de rendimento:

- EFF3 – Motores convencionais;
- EFF2 – Motores de rendimento aumentado;
- EFF1 – Motores de alto rendimento.

Este acordo englobava somente MIT (gaiola de esquilo), de 2 ou 4 pólos, 400 V, 50 Hz, IP 54 ou IP 55, com potências nominais compreendidas entre 1,1 e 90 kW. A Figura 2 ilustra o impacto verificado na distribuição dos motores pelas três classes, durante praticamente todo o período de vigência do acordo.

Houve uma transferência dos motores da classe inferior (EFF3) para a classe intermédia. Embora as máquinas da classe EFF3 tenham sido praticamente eliminadas, o fabrico de motores da classe EFF1 atingiu uma percentagem muito aquém do inicialmente previsto. Assim, os objetivos deste acordo foram parcialmente atingidos.

Os rendimentos eram determinados de acordo com o método indireto da norma CEI 60034-2:1996. A determinação das perdas adicionais foi o principal motivo de discórdia com outras metodologias (nomeadamente, o método B da norma 112 do IEEE), pelo que o alcance deste acordo ficou confinado à União Europeia. Não obstante, este foi um primeiro passo para o estabelecimento de uma classificação global dos níveis de rendimento de MIT.

Com vista a atingir esse objetivo é, entretanto, publicada a norma IEC 60034-30, que resultou dos esforços promovidos pela CEI em obter uma classificação de alcance mundial, que viesse substituir as normas nacionais/regionais existentes [3].

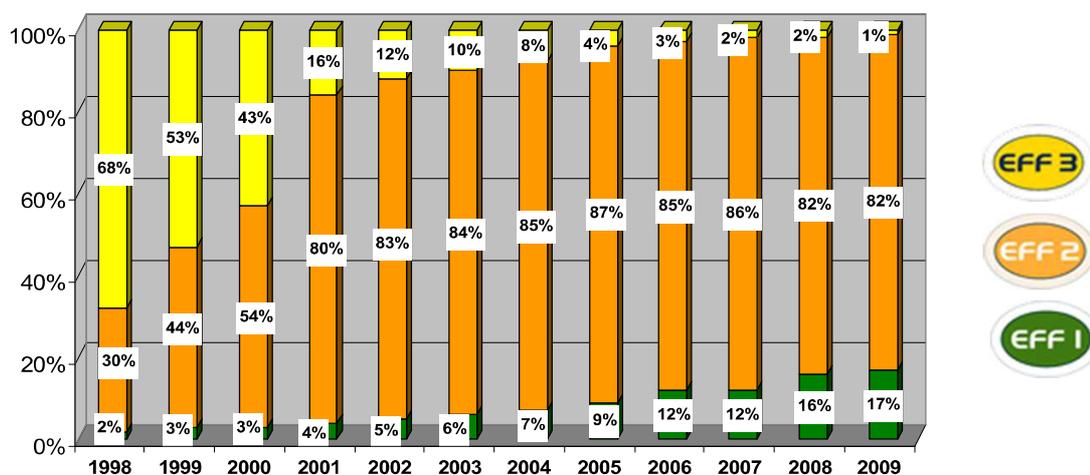


Figura 2 – Evolução da distribuição dos MIT pelas classes de rendimento CE/CEMEP

### 3.2 Norma CEI 60034-30 [5]

Em Outubro de 2008 foi publicada a 1ª edição da norma CEI 60034-30 (Rotating electrical machines - Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)).

- Motores de 50Hz e 60Hz, 2, 4 e 6 pólos, na gama [0,75 – 375] kW;
- Tensão nominal  $\leq 1000$  V
- Operação em modo contínuo (fator de serviço S1);
- Inclui motores com 2 valores nominais (ou mais) de tensão e/ou frequência
- Aplicável a motores dimensionados para alimentação direta da rede;

A Tabela 1 apresenta as classes de rendimento IE:

Tabela 1 – Configurações de MRC

Classe	Designação
IE1	Standard Efficiency
IE2	High Efficiency
IE3	Premium Efficiency
IE4	Super Premium Efficiency (não definida, em fase de preparação)

Esta classificação resultou da integração de diversas classes de rendimento normalizadas, definidas por vários organismos regionais: Energy Policy Act “EPAct” (EUA), NEMA (EUA) e CE/CEMEP (UE) [2].

A Figura 3 ilustra a correlação entre a classificação IE e as classificações regionais mais relevantes.

O rendimento é determinado com base na norma CEI 60034-2-1:2007. A determinação das perdas adicionais baseia-se num método equivalente ao da norma IEEE 112.

A classificação IE e a norma CEI 60034-2-1 foram determinantes na definição dos MEPS na UE, através do regulamento (EC) No. 640/2009, de execução da Directiva 2005/32/EC.

A implementação faseada dos MEPS foi a seguinte (o acordo CE/CEMEP terminou em 06/2011):

- Desde 06/2011: classe mínima IE2 para todos os novos motores;
- Desde 01/2015: novos motores na gama [7,5 – 375] kW deverão ser IE3 ou IE2 c/ VEV;
- A partir de Janeiro de 2017, novos motores na gama [0,75 - 375] kW deverão ser IE3 ou IE2 c/ VEV.

O domínio de abrangência da norma CEI 60034-30<sup>(1)</sup> foi posteriormente aumentado, de que resultou uma subdivisão: motores AC convencionais (CEI 60034-30-1) e motores não convencionais, alimentados por variadores de velocidade (CEI TS 60034-30-2).

Em seguida, referem-se os pontos mais importantes de ambas.

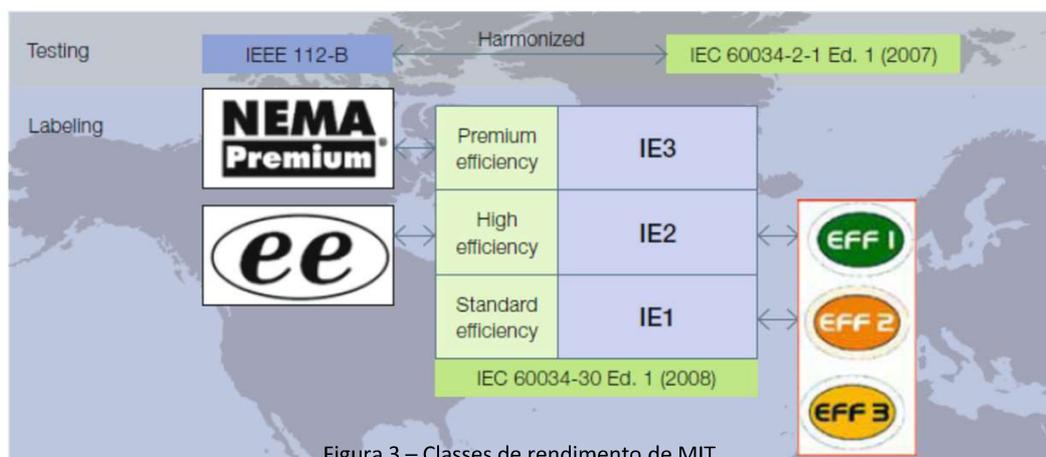


Figura 3 – Classes de rendimento de MIT

<sup>(1)</sup> Foi revogada pela norma CEI 60034-30-1.

### 3.3 Norma CEI 60034-30-1 [6]

Publicada em Março de 2014, a 1ª edição da norma CEI 60034-30-1 (*Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE-code)*) veio substituir a norma CEI 60034-30.

- Motores de uma velocidade (monofásicos & trifásicos);
- Motores de 50Hz e 60Hz, 2, 4, 6 e 8 pólos, na gama [0,12 – 1000] kW;
- Tensão nominal: [50 – 1000] V;
- Operação em modo contínuo (factor de serviço S1);
- Aplicável a motores dimensionados para alimentação direta pela rede (não limitado a motores de indução);

A Tabela 2 apresenta as classes IE.

Tabela 2 – Configurações de MRC

Classe	Designação
IE1	Standard Efficiency
IE2	High Efficiency
IE3	Premium Efficiency
IE4	Super Premium Efficiency
IE5	Ultra-Premium Efficiency (não definida, em fase de preparação)

Comparando com a norma anterior, há a realçar uma maior abrangência: não só na gama de potências, mas também nos tipos de motores, deixando de estar confinados aos MIT. Os limites da classe IE4 são definidos, deixando em aberto uma nova classe (IE5), a definir futuramente.

De referir ainda que o rendimento é agora determinado com base na 2ª edição da norma CEI 60034-2-1, publicada também em 2014.

### 3.4 Especificação técnica CEI TS 60034-30-2 [7]

Em Dezembro de 2016 foi publicada a 1ª edição da especificação técnica CEI TS 60034-30-2 (*Rotating Electrical Machines - Part 30-2 Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)*).

- Aplicável a motores de todos os tipos (AC), na gama [0,12 – 1000] kW, não alimentados através da rede (excluindo algumas tecnologias, como servomotores);
- Tensão nominal: [50 – 1000] V;
- Velocidade nominal: [600 – 6000] rpm;
- Operação em modo contínuo (fator de serviço S1)
- O rendimento é especificado para o seguinte regime: 90% da velocidade nominal, com binário nominal;
- As perdas devidas aos harmónicos são consideradas na determinação do rendimento;
- São definidas 5 classes distintas de rendimento: IE1 a IE5.

Esta especificação técnica surge em consequência da importância crescente das aplicações baseadas em VEVs. Os limites da classe IE5 são aqui definidos, refletindo o facto destes motores poderem funcionar em regimes com melhores rendimentos. De referir que os regimes de funcionamento dos motores abrangidos correspondem a cargas na vizinhança dos valores nominais, com variações de velocidade lentas e pouco frequentes. Importa ainda mencionar que o rendimento é determinado com base na especificação técnica CEI TS 60034-2-3, de 2013.

### 3.5 Norma CEI 61800-9-2 [8]

A 1ª edição da norma CEI 61800-9-2 foi publicada em 2017, que define classes de rendimento e métodos de determinação das perdas dos seguintes sistemas:

- Conversores de potência
- Motor+Conversor – Power Drive System (PDS).

As especificações para cada sistema são as seguintes:

- Conversores de potência
- Tensão nominal: [100 – 1000] V (AC);
- Potência nominal: [0,278 – 1209] kVA;
- Não inclui conversores com modo regenerativo;
- Classes: IE0, IE1 e IE2;
- Motor + conversor (PDS)
- Tensão nominal: [100 – 1000] V (AC);
- Potência nominal: [0,12 – 1000] kW;

- (excluindo algumas tecnologias, como servomotores)
- Não inclui conversores com modo regenerativo;
- Classes: IES0, IES1 e IES2;

São definidos dois sistemas de classificação: um para conversores (IE) e outro para PDS (IES). As classes IE1 e IES1 são as referências de ambos os sistemas (Figura 4).

Um aspeto muito relevante é que esta publicação não se dirige apenas a motores, indiciando um primeiro passo para a inclusão de todos os componentes do sistema eletromecânico – ainda que apenas o conversor e a sua integração com o motor sejam aqui tratados. Com efeito, o rendimento global depende dos rendimentos dos seus componentes, pelo que futuras normas sobre classificação de rendimentos e a sua determinação tenderão a integrar os restantes componentes.

### 3.6 Síntese Final

A Figura 5 apresenta uma síntese das normas abordadas neste artigo.

O conteúdo das normas que definem os ensaios de estimação do rendimento não foi aqui abordado. Este assunto requer um espaço próprio, pelo que será tratado noutras oportunidades.

		Scope	Testing	Efficiency classification
1		motor	IEC 60034-2-1 ed 2: published 2014	IEC 60034-30-1 ed 2: published 2014
2	 	motor, driven by a VFD	IEC 60034-2-3 ed 2: CD 2017	IEC TS 60034-30-2 Technical Specification spring of 2017
3	 	VFD	IEC 61800-9 IEC 61800-9-1 Extended Products IEC 61800-9-2 VFD Classification/Testing published March 2017 edition 2: work starts now	
4	 	Motor + VFD		

IEC = International Electrotechnical Commission      VFD = variable frequency drive

Figura 5 – Normas CEI para motores e conversores: classes e métodos para determinação do rendimento

### 4. Conclusões

O consumo de energia dos sistemas eletromecânicos é atualmente estimado em mais de 50% da energia elétrica consumida mundialmente. O impacto dos MIT é preponderante, pelo que o esforço na obtenção de motores com melhor rendimento tem sido muito direcionado para estas máquinas. No caso da UE, o acordo CE/CEMEP foi um estímulo importante na disseminação de motores de rendimento melhorado. Dado o seu carácter de adesão voluntária, os resultados ficaram aquém dos objetivos inicialmente traçados.

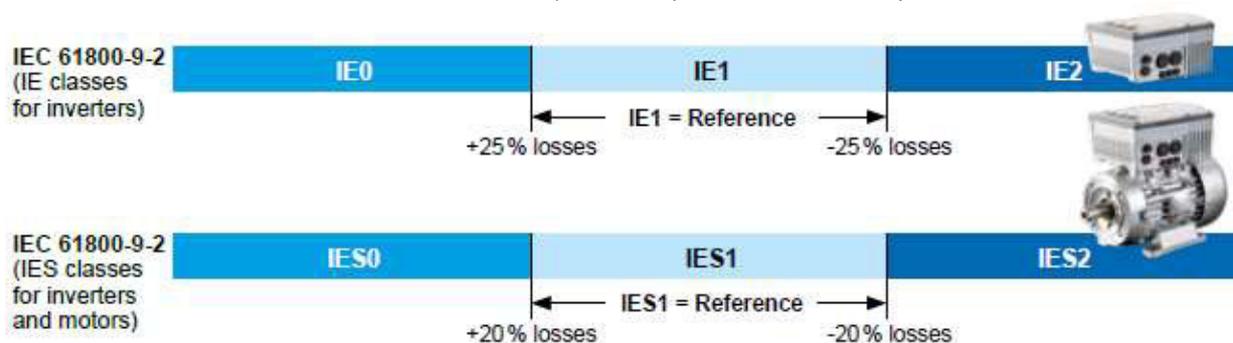


Figura 4 – Classes de rendimento IE e IES (CEI 61800-9-2)

A aceitação global das normas CEI, que definem as classes IE e respetivos métodos de determinação do rendimento, fez destas normas a plataforma de referência usada no desenvolvimento de MEPS, em quase todas as regiões mundiais.

A ênfase exclusiva sobre o rendimento do motor tem vindo a ser alterado, com vista a incluir todos os componentes do sistema eletromecânico (*drive*) – conversor de potência e respetivo controlador, motor, sistema mecânico de transmissão de potência e a carga a acionar. A evolução a que se tem assistido permite antever uma clara tendência para as futuras normas integrarem todos os componentes mencionados.

Referências

[1] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems," 2011.

[2] H. Gavrila, V. Manescu, G. Paltanea, G. Scutaru, and I. Peter, "New Trends in Energy Efficient Electrical Machines," *Procedia Engineering*, vol. 181, pp. 568-574, 2017.

[3] "Energy efficiency roadmap for electric motors and motor systems", 4E report, IEA, 2015.

[4] "Electric Motors and Variable Speed Drives - Standards and legal requirements for the energy efficiency of low-voltage three-phase motors", CEMEP, 2011.

[5] "Optimização da utilização da energia eléctrica em força motriz", EDP Corporate.

[6] Conrad U. Brunner et al., "New technology needs new policy - From component to systems", EEMODS 2017, Rome, Italy, 2017.

[7] "International standard IEC TS 60034-30-2 for variable speed motors", Bauer Gear Motor, 2018.

[8] Martin Doppelbauer, "Update on IEC Motor and Converter Standards", Motor Summit.

DIVULGAÇÃO

