



Received March 28, 2025; accepted July 25, 2025; Date of publication August 21, 2025.
The review of this paper was arranged by Associate Editor Allan F. Cupertino[✉] and Editor-in-Chief Heverton A. Pereira[✉].
Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.e202547>

Avaliação experimental da norma IEC 60034-2-3 2024

Guilherme Castro^{✉1,*}, Ademir Nied^{✉1}, Jaques Ruthes^{✉1}

¹Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Departamento de Engenharia Elétrica - Joinville, SC, Brasil

e-mail: guimdecastro@outlook.com*, ademir.nied@udesc.br, jacques.ruthes@udesc.br.

*Corresponding author.

RESUMO A norma IEC 60034-2-3 tem como objetivo definir os métodos de ensaios para determinar as perdas totais das máquinas elétricas, incluindo as perdas adicionais devido às altas frequências oriundas da alimentação por inversores de frequência. As perdas devido às altas frequências são apresentadas de maneira adicional às perdas em alimentação senoidal, conforme determinado pelo método normalizado pela IEC 60034-2-1. E, segundo a norma, as perdas harmônicas são constantes em toda faixa de operação do motor. Este artigo faz uma revisão da norma IEC 60034-2-3 e apresenta os resultados de uma série de experimentos para avaliar o comportamento das perdas harmônicas em relação aos setes pontos de operação propostos pela norma, determina o mapa de rendimento para as condições de alimentação não-senoidal, conforme instruído pela norma, e compara esses resultados com aqueles obtidos para o motor com alimentação senoidal.

PALAVRAS-CHAVE IEC 60034-2-3, Inversor, Método Direto, Motores Elétricos, Perdas.

Experimental Evaluation of IEC 60034-2-3 2024 Standard

ABSTRACT The IEC 60034-2-3 standard aims to define test methods to determine the total losses of electrical machines, including the additional losses due to high frequencies from the power supply by frequency inverters. Losses due to high frequencies are presented in addition to losses in sinusoidal supply, as determined by the method standardized by IEC 60034-2-1. And, according to the regulations, harmonic losses are constant throughout the motor's operating range. This article reviews the IEC 60034-2-3 standard and presents the results of a series of experiments to evaluate the behavior of harmonic losses in relation to the seven operating points proposed by the standard, determines the yield map for non-sinusoidal power supply conditions, as instructed by the standard, and compares these results with those obtained for the motor with sinusoidal supply.

KEYWORDS IEC 60034-2-3, Variable speed driver, Direct Method, Electric Motors, Losses.

I. INTRODUÇÃO

Há uma crescente preocupação com a conservação de energia elétrica e o rendimento de equipamentos elétricos, visto que a demanda vem crescendo em ritmo acelerado e o aumento da oferta de energia demanda grandes investimentos e impactos à sociedade. É importante observar que as máquinas elétricas são responsáveis por grande parte do consumo de energia elétrica. Na região europeia, os sistemas motrizes com motores elétricos são os principais consumidores de energia na indústria, utilizando cerca de 70% da energia consumida neste setor [1].

Regiões desenvolvidas possuem legislações e regulações próprias que determinam o nível de rendimento necessário para comercialização dos produtos. Há inúmeras regulações vigentes com diferentes níveis de rendimento, cobertura, nomenclatura e critérios para a determinação das perdas. Há diversos países com programas de etiquetagem de motores elétricos implantados e com sistemas não convergentes.

Recentemente, a União Europeia, através da legislação EU 1781/2019, determinou que a partir de julho de 2021 motores elétricos com potência nominal entre 0,75 kW até 1000 kW, tensão nominal até 1000 V e polaridade igual ou menor do que 8 polos, devem atender ao nível de rendimento IE3,

conforme norma IEC 60034-30-1, se aptos também a serem acionados por inversor. A partir de julho de 2023, motores também aptos a serem acionados por inversor devem atender o nível de rendimento IE4 conforme norma IEC 60034-30-1 para potência entre 75 kW até 200 kW, tensão nominal até 1000 V e polaridade igual ou menor do que 6. Motores projetados para operação unicamente através do inversor estão excluídos da regulamentação. A legislação EU 1781/2019 também determinou que a partir de julho de 2022, os fabricantes de motores elétricos devem informar, as perdas nos sete pontos de operação nas folhas de dados para os motores de indução, com alimentação senoidal.

No Brasil, em 2019 entrou em vigor a Portaria Interministerial nº 01/2017 do Ministério de Minas e Energia que regulamenta os níveis mínimos de rendimento para motores elétricos de indução trifásicos de gaiola de esquilo. Por meio dessa portaria ficou estabelecido que motores elétricos trifásicos de gaiola de esquilo com potência nominal entre 0,12 kW e 370 kW, tensão nominal até 1000 V e polaridade menor ou igual a 8 polos devem possuir o nível mínimo de rendimento IR3 conforme norma NBR 17094-1, independentemente do método de acionamento.

Os Estados Unidos e o Canadá, por meio da regulação DOE 10 CFR Part 431 - *Subpart B - Electric Motors e*

Amendment 13 to Energy Efficiency Regulations - Electric Motors, regulamentaram que motores elétricos trifásicos de gaiola de esquilo com potência nominal entre 0,75 kW e 375 kW, tensão nominal até 600 V e polaridade menor ou igual a 8 polos devem atender o nível de rendimento NEMA PREMIUM conforme NEMA MG 1, e que as perdas devem ser calculadas conforme norma IEEE 112-2004.

Até a emissão das normas IEC 60034-30-2 e IEC 60034-2-3 não existiam normas que determinassem as classes de rendimento para motores quando acionados por inversor, nem uma metodologia de ensaio para determinação do rendimento dos motores alimentados por inversor. Além disto, não há um consenso dos efeitos da alimentação chaveada em alta frequência e sua modulação no desempenho desse tipo de motor elétrico. Entretanto, a norma IEC 60034-2-3 afirma que as perdas harmônicas são constantes em toda faixa de operação do motor, o que pode gerar conclusões equivocadas.

Este artigo faz uma revisão da norma IEC 60034-2-3 e apresenta os resultados de uma série de experimentos para avaliar o comportamento das perdas harmônicas em relação aos setes pontos de operação propostos pela norma, determina o mapa de rendimento para as condições de alimentação não-senoidal, conforme instruído pela norma, e compara esses resultados com aqueles obtidos para o motor com alimentação senoidal.

II. ASPECTOS GERAIS DE MOTORES ELÉTRICOS ACIONADOS POR INVERSOR

Diferentemente da alimentação de tensão diretamente da rede, a tensão de saída do inversor apresenta espectros de harmônicas temporais. A amplitude e ordens dependem do controle utilizado pelo inversor para controlar os valores de tensão e frequência para cada ponto desejado de operação do motor elétrico, e consequentemente, a corrente também apresentará no seu espectro conteúdos de origens harmônicas. As harmônicas de corrente e tensão geram efeitos nocivos sobre o desempenho do motor elétrico. Diferentemente das harmônicas de tensão que dependem essencialmente do inversor, as amplitudes das harmônicas de corrente dependem também das características construtivas da máquina elétrica. Existem pesquisas sobre os efeitos das harmônicas sobre o desempenho da máquina elétrica [2][3][4][5].

De acordo com a norma IEC 60034-25, além das perdas já determinadas devido à tensão e à corrente fundamentais, a alimentação não-senoidal oriunda do inversor adiciona perdas à máquina elétrica. Essas perdas dependem da tensão e de sua respectiva forma de onda, da corrente, velocidade, e dos aspectos construtivos do motor elétrico. Em inversores de dois níveis, se não forem empregados filtros em série, as perdas podem alcançar de 10% a 30% do valor das perdas do motor operando na rede, representando de 1% a 2% da potência do motor elétrico.[6].

A. HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE

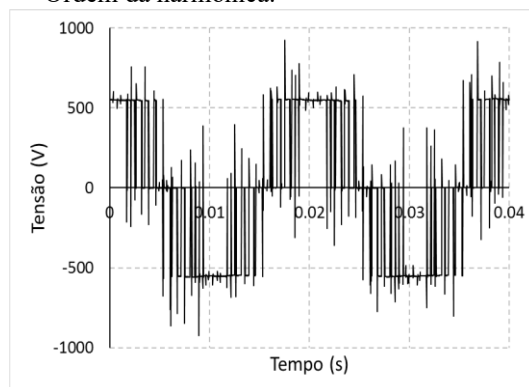
Ao energizar o motor com uma tensão com forma de onda não-senoidal como demonstrado na Fig. 1(a), que apresenta uma forma de onda de tensão na saída de um inversor com modulação PWM, é esperado que a corrente contenha componentes harmônicos como apresentado na Fig. 1(c). A periodicidade das formas de onda da tensão permite que essas possam ser analisadas por meio da Série de Fourier, como

demonstrado na Fig. 1(b), onde é representado o espectro de frequência com as amplitudes das componentes harmônicas da tensão V_h , em *pu*. Nela observa-se a componente fundamental (amplitude igual a 1) na frequência nominal que determina o funcionamento do motor, bem como as demais componentes harmônicas, todas com amplitude menor que a da fundamental. Levando em consideração que a forma de onda da tensão é conhecida, a expressão para a tensão de fase $v(t)$ é descrita em (1)[2]:

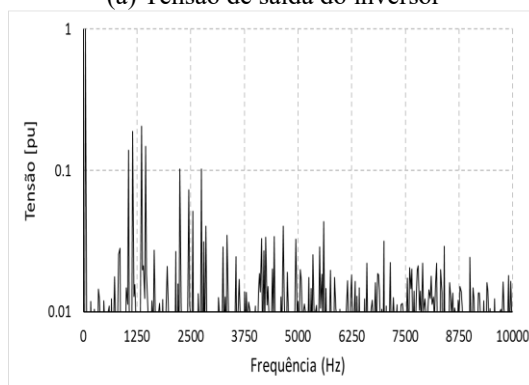
$$\sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t + \Phi V_h) \quad (1)$$

onde:

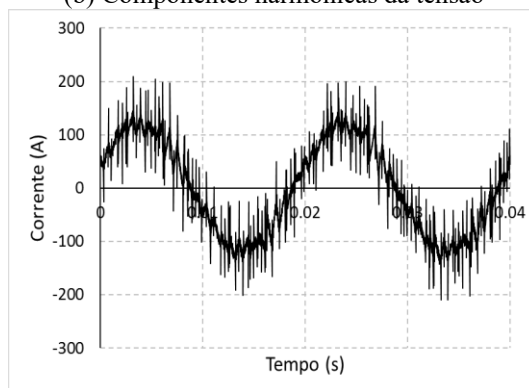
- V_h Amplitude da h-ésima harmônica de Tensão (V);
- ω Frequência angular da fundamental (rad/s);
- ΦV_h Fase da h-ésima harmônica de tensão (rad);
- h Ordem da harmônica.



(a) Tensão de saída do inversor



(b) Componentes harmônicas da tensão



(c) Corrente do MIT alimentado por inversor

FIGURA 1. Exemplo de tensão e corrente de um MIT alimentado por inversor -Tensão PWM e corrente do MIT medidas em ensaio (Frequência de chaveamento = 1.25 kHz) [2]

B. FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO

A Norma IEC 60034-25 através da Fig. 2 apresenta um exemplo da dependência das perdas em máquinas elétricas causadas pelas componentes harmônicas relacionadas à frequência de comutação do inversor. A perda harmônica total diminui com o aumento da frequência de comutação.

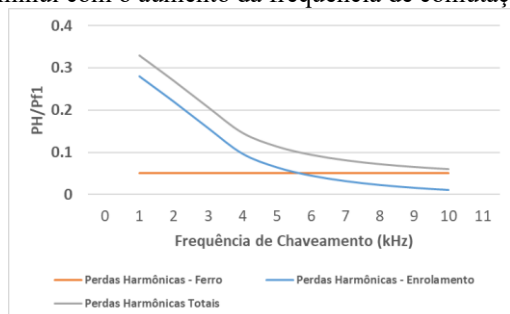


FIGURA 2. Exemplo da dependência das perdas nas máquinas elétricas causadas pelas componentes harmônicas relacionada a frequência de comutação do inversor [6].

A NEMA, em seu guia de aplicação, pondera os efeitos da frequência. No guia, é indicado que a distorção na corrente do motor elétrico varia inversamente com a frequência de chaveamento devido ao efeito de filtro de passa-baixa das indutâncias de dispersão dos enrolamentos do motor. Quanto mais elevada a frequência de chaveamento, menor é a distorção total e mais próxima da fundamental é a forma de onda da corrente, até determinado ponto. À medida que o valor de frequência de chaveamento se eleva, os efeitos na redução do conteúdo harmônico da corrente tornam-se pouco significativos. Entretanto, com o aumento da frequência de chaveamento ocorre um aumento significativo nas perdas do inversor. Geralmente, o ponto ótimo para a operação do conjunto motor elétrico e inversor, considerando o conteúdo harmônico da corrente e as perdas na comutação do inversor, é em torno de 5 kHz. Dessa forma, sob a perspectiva do motor elétrico, quanto menor a frequência de chaveamento, menor é o seu rendimento [7].

III. PERDAS NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

As perdas em motores elétricos são um resultado do processo de conversão da energia elétrica em mecânica e são as responsáveis pela geração de calor. O cálculo dessas perdas em máquinas elétricas é uma tarefa complexa, e algumas perdas são tratadas de forma qualitativa.

A norma IEC 60034-2-3 determina as perdas totais. A norma considera o controle em fluxo constante.

As perdas são classificadas da seguinte forma:

- A. Perdas fundamentais: São as componentes que ocorrem em uma máquina elétrica com frequência e tensão fundamentais, com ausência de componentes harmônicos e podem ser segregadas em cinco componentes distintos.

- ✓ Perdas nos enrolamentos do estator (P_{J1});
- ✓ Perdas nos enrolamentos do rotor (P_{J2});
- ✓ Perdas no ferro (P_{Fe});
- ✓ Perdas mecânicas por atrito e ventilação (P_{mec});
- ✓ Perdas suplementares em carga (P_{sup}).

- B. Perdas harmônicas (P_{harm}): São as componentes produzidas na máquina elétrica pelas harmônicas das formas de onda não fundamentais da tensão e corrente oriundas do inversor. Essas componentes somam-se às perdas fundamentais no ferro, nos enrolamentos do estator e rotor e nas perdas suplementares.

Essa classificação é utilizada na separação de perdas em ensaios de máquinas elétricas, sendo útil para a comparação entre os resultados obtidos no ensaio e os simulados.

Entretanto, para a determinação das perdas, é importante observar que, com exceção das perdas mecânicas, as demais componentes são oriundas dos fenômenos básicos: as perdas magnéticas nas lâminas que compõem o estator e o rotor e a perda ôhmica nos condutores. A perda magnética é composta pela perda por histerese e pela perda ôhmica devido à corrente parasita. A componente de perdas suplementares em carga é oriunda de todas as perdas eletromagnéticas resultantes das particularidades construtivas da máquina elétrica, como as aberturas das ranhuras no entreferro e a distribuição não-senoidal dos enrolamentos. As perdas suplementares ocorrem independentemente do nível de carga do motor.

A Tabela 1 apresenta uma correlação entre as componentes de perdas clássicas e os fenômenos que lhes dão origem. Mesmo as perdas harmônicas, que ocorrem nas máquinas elétricas quando alimentadas por inversores, são oriundas dos dois fenômenos citados anteriormente. Entretanto, neste caso, o agente causador é o conjunto de harmônicos temporais de tensão e corrente. Desse modo, assim como as perdas suplementares, também ocorrem independentemente do ponto de operação da máquina elétrica.

TABELA 1. Correlação entre componentes de perdas x fenômenos,

Componentes de perdas		Fenômenos		
		Ôhmico	Magnético	Mecânicos
Fundamentais	P_{J1}	X		
	P_{J2}	X		
	P_{Fe}	X	X	
	P_{mec}			X
	P_{sup}	X	X	
Harmônicos	P_{harm}	X	X	

A norma IEC 60034-25 apresenta um exemplo do aumento das perdas devido à alimentação não-senoidal. Atualmente não há uma padronização que defina os valores aceitáveis de perdas para os níveis de tensão e harmônicas de corrente. Entretanto, normas internacionais citam que pode haver aumento nas perdas devido à alimentação não-senoidal.

IV. NORMAS PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM MOTORES ELÉTRICOS QUANDO ACIONADOS POR INVERSOR

Há diversas normas nacionais e internacionais para a determinação das perdas nos motores elétricos com alimentação senoidal, e essas normas apresentam diferentes métodos para determinação do nível de rendimento e, consequentemente, com resultados diferentes. Isso gera uma dificuldade aos usuários visto que é difícil comparar as características e os resultados. Esse obstáculo é ainda maior quando os motores são alimentados por inversores, visto a ausência de normas para essa condição. Portanto, a norma

IEC 60034-2-3 foi concebida para harmonizar e simplificar os procedimentos de testes para a determinação do rendimento e de sua respectiva tolerância na condição de alimentação não-senoidal[8].

A. IEC 60034-2-3

O objetivo da norma é definir o método de ensaio para determinar as perdas totais, incluindo as perdas devido às componentes harmônicas e, consequentemente, o rendimento de motores alimentados por inversores. A norma apresenta os sete pontos normalizados para a determinação das perdas e do rendimento ao longo de toda a curva de operação do motor elétrico. A norma também apresenta um procedimento de interpolação para calcular as perdas e o rendimento em cada ponto de operação. A norma é aplicável a qualquer motor elétrico de corrente alternada, síncrono ou assíncrono enquadrado na norma IEC 60034-1, que seja alimentado com tensão de amplitude e frequência variáveis. A norma cita que a experiência tem demonstrado que as perdas devido às componentes harmônicas do inversor são praticamente constantes em todo a faixa de operação, desde que a frequência de comutação se mantenha constante [8].

1) Instrumentação

A norma indica que o motor, quando em carga, apresenta pequenas flutuações na potência de saída e outras variações podem ocorrer, as quais devem ser evitadas. Portanto, para cada ponto de medição recomenda-se que os dados sejam adquiridos automaticamente por pelo menos 15 segundos e, no máximo 60 segundos, sendo a média utilizada para determinação do rendimento. Para a aquisição da corrente e da tensão, deve ser considerada a média aritmética da corrente e da tensão de linha. Na medição de temperatura, pode ser utilizado um sensor instalado no ponto mais quente do estator, conforme descrito na IEC 60034-2-1. Equipamentos digitais devem ser utilizados sempre que possível [8].

A instrumentação para medição da potência e da corrente do motor deve atender aos requerimentos da IEC 60034-2-1, entretanto, devido à alta frequência, os seguintes requerimentos devem ser aplicados. O nível de incerteza dos transdutores deve ser de 0,2% ou melhor da potência nominal. A largura de banda dos transdutores deve ser suficiente para que o erro na medição da potência ativa total no espectro total da frequência seja igual ou inferior a 0,3% da potência aparente. De maneira geral, a largura de banda de 0 Hz a 10 vezes a frequência de comutação é suficiente [8].

A instrumentação para medição da frequência de alimentação deve ter precisão de $\pm 0,1\%$ do fundo de escala. Para a medição da velocidade deve ter precisão de 0,1 rotação por minuto para velocidades até 3000 rpm e 0,03% para velocidades superiores[8].

2) Setup

Para os testes utilizando inversores o inversor deve ser parametrizado de acordo com os requerimentos da norma. Caso o teste seja realizado apenas para uma única combinação de inversor e motor, os parâmetros devem ser ajustados de acordo com as especificações requeridas pela aplicação e devem ser informados no relatório de ensaio[8].

As seguintes condições devem ser utilizadas para a verificação do atendimento às regulamentações de rendimento governamentais, particularmente nos pontos de 90% e 100% do torque nominal. Para outros propósitos,

incluindo o procedimento de interpolação, a configuração original do sistema deve ser utilizada[8].

- ✓ Inversor com dois níveis de tensão;
- ✓ Ausência de componentes influenciando a tensão e corrente de saída entre o inversor e motor, com exceção dos equipamentos necessários para realização das medições;
- ✓ Operação com 90% da velocidade nominal, torque nominal e fluxo constante para motores de indução e síncronos;
- ✓ Para motores com velocidade nominal até 3600 rpm, a frequência de comutação não deve exceder 5 kHz;
- ✓ Para motores com velocidade nominal superior a 3600 rpm, a frequência de comutação não deve exceder 10 kHz;
- ✓ A área da seção do condutor deve ser selecionada de maneira que não apresente uma queda de tensão significativa no ponto nominal.

A norma indica que motores que operam com inversores que produzem componentes harmônicos menores, como por exemplo, conversores multiníveis ou inversores com altas frequências de chaveamento, que tipicamente produzem menores perdas quando comparados com inversores com frequência de chaveamento de 4 kHz ou 8 kHz, ainda assim, devem ser testados conforme indicado nos parâmetros descritos acima[8].

3) Método para determinação do rendimento em motores alimentados por inversores

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam os métodos normalizados para a verificação das perdas e do rendimento, de acordo com as regulamentações governamentais. O método 2-3-A é obrigatório para verificação do rendimento nominal declarado pelo fabricante e pode ser solicitado por usuários e órgãos reguladores [8].

Para a realização dos ensaios através do método direto, a potência mecânica P_{2c} do motor elétrico é determinada por meio da medição do torque e da velocidade, e a potência elétrica P_{1c} do estator é medida no mesmo teste [8].

TABELA 2. Método preferencial de ensaios conforme norma

Ref	Método	Cláusula	Equipamentos
2-3-A	Direto	6.2	Dinamômetro ou conversor de torque

A IEC 60034-2-3, apresenta métodos alternativos para a determinação do rendimento, que podem ser utilizados para outros propósitos além da verificação do rendimento pelos órgãos reguladores. A Tabela 3 apresenta os métodos alternativos.

TABELA 3. Métodos alternativos de ensaios conforme norma

Ref	Método	Cláusula	Equipamentos
2-3-B	Somatório das perdas	6.3	Alimentação senoidal e inversor na condição sem carga
2-3-C	AEDM <i>Alternate Efficiency Determination Method</i>	6.4	Modelo analítico e ferramentas de cálculos
2-3-D	Determinação do rendimento por cálculo	6.5	Padrões e ferramentas de cálculos

Os testes devem ser conduzidos com o inversor e o motor com todos os seus componentes, visando obter as condições

de teste o mais próximas possíveis das condições nominais de operação. Conforme descrito na norma IEC 60034-2-1, o dispositivo de medição do torque deve estar com *offset* zerado. O motor elétrico deve operar até atingir o equilíbrio térmico, o qual é considerado alcançado quando a variação de temperatura for inferior a 1 K por meia hora. Ao atingir o equilíbrio térmico, devem ser anotados os valores de Torque na ponta de eixo (Nm), Velocidade (RPM) e Potência nos terminais do motor (W).

Ao realizar as medições em diferentes pontos, o dispositivo de medição de torque deve ter seu *offset* verificado após a medição do último ponto.

Para o cálculo da potência de saída deve-se utilizar (2).

$$P_{2c} = 2 * \pi * T_c * f \quad (2)$$

onde:

- T_c - Torque na ponta de eixo (Nm);
- f - Frequência (Hz);
- P_{2c} - Potência na ponta de eixo do motor (W).

Para o cálculo do rendimento deve utilizar (3):

$$\eta = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} \quad (3)$$

onde:

- P_{1c} - Potência nos terminais do motor (W).

Deve-se realizar as medições nos sete pontos padronizados apresentados na Tabela 4. As medições devem ser feitas de forma subsequente e o mais rapidamente possível, a fim de mitigar variações de temperatura no motor elétrico durante o teste. Alternativamente, os pontos de medição podem ser avaliados na seguinte ordem 1,4,2,5,6,3 e 7. Cada um dos sete pontos deve ser obtido com exatidão de $\pm 1\%$ da velocidade nominal e do torque.

As Equações (4) a (10) devem ser utilizadas para determinar os coeficientes de interpolação.

TABELA 4. Métodos de ensaios conforme norma IEC 60034-2-3

Ponto.	Velocidade (pu)	Torque (pu)	Potência (pu)
1	0,9	1	0,9
2	0,5	1	0,5
3	0,25	1	0,25
4	0,9	0,5	0,45
5	0,5	0,5	0,25
6	0,5	0,25	0,125
7	0,25	0,25	0,0625

4) Determinação analítica das perdas relativas em qualquer ponto de operação

Para determinação das perdas em qualquer ponto de operação, as perdas podem ser medidas ou calculadas de acordo com os procedimentos descritos, e os resultados podem ser utilizados para a interpolação dos pontos. A norma IEC 60034-2-3 apresenta a Equação (4) para o cálculo das perdas em qualquer ponto de operação.

$$P_{L(n,T)} = C_{L1} + C_{L2}n + C_{L3}n^2 + C_{L4}nT^2 + C_{L5}n^2T^2 + C_{L6}T + C_{L7}T^2 \quad (4)$$

onde:

- $C_{L1...7}$ - Coeficientes calculados pelas Equações (5) a (11);
- n - Rotação (pu);
- T - Torque (pu).

As Equações (5) a (11) devem ser utilizadas para determinar os coeficientes de interpolação.

$$C_{L1} = -\frac{25}{156}P_{L1} + \frac{529}{780}P_{L2} - \frac{12}{65}P_{L3} + \frac{25}{39}P_{L4} - \frac{103}{39}P_{L5} - \frac{56}{195}P_{L6} - \frac{192}{65}P_{L7} \quad (5)$$

$$C_{L2} = \frac{25}{26}P_{L1} - \frac{599}{390}P_{L2} + \frac{112}{195}P_{L3} - \frac{50}{13}P_{L4} + \frac{50}{13}P_{L5} + \frac{1792}{195}P_{L6} - \frac{1792}{195}P_{L7} \quad (6)$$

$$C_{L3} = -\frac{50}{39}P_{L1} + \frac{22}{13}P_{L2} - \frac{16}{39}P_{L3} + \frac{200}{39}P_{L4} - \frac{200}{39}P_{L5} - \frac{256}{39}P_{L6} + \frac{256}{39}P_{L7} \quad (7)$$

$$C_{L4} = -\frac{50}{13}P_{L1} + \frac{2542}{195}P_{L2} - \frac{1792}{195}P_{L3} + \frac{50}{13}P_{L4} - \frac{50}{13}P_{L5} - \frac{1792}{195}P_{L6} + \frac{1792}{195}P_{L7} \quad (8)$$

$$C_{L5} = \frac{200}{39}P_{L1} - \frac{152}{13}P_{L2} + \frac{256}{39}P_{L3} - \frac{200}{39}P_{L4} + \frac{200}{39}P_{L5} + \frac{256}{39}P_{L6} - \frac{256}{39}P_{L7} \quad (9)$$

$$C_{L6} = -2P_{L2} + 10P_{L5} - 8P_{L6} \quad (10)$$

$$C_{L7} = \frac{25}{39}P_{L1} - \frac{181}{195}P_{L2} + \frac{192}{65}P_{L3} - \frac{25}{39}P_{L4} - \frac{287}{39}P_{L5} + \frac{1616}{195}P_{L6} - \frac{192}{65}P_{L7} \quad (11)$$

onde: P_{L1} a P_{L7} são as perdas relativas medidas nos pontos de operação 1 ao 7 em relação a potência nominal (pu).

A fórmula de interpolação é focada no controle V/f (tensão/frequência), portanto, as perdas podem ser imprecisas para velocidades $< 0,25$ e torques $< 0,25$. Nesses casos, é indicado que os valores de 0,25 da velocidade e torques sejam ser utilizados.

V. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta seção, será abordada a avaliação experimental da norma IEC 60034-2-3, o procedimento de teste realizado, os resultados obtidos e uma comparação dos resultados dos ensaios nos sete pontos normalizados, tanto com alimentação senoidal, sem as componentes harmônicas oriundas do inversor, e com alimentação através do inversor, com o objetivo de avaliar o comportamento das perdas harmônicas no modelo analítico proposto pela norma.

Para os ensaios, foi escolhido o método direto, que é o método recomendado pela norma para determinação das perdas. Utilizou-se, para o ensaio, um motor de indução de rotor de gaiola com nível de rendimento IE3. A Tabela 5 apresenta os dados de placa do motor ensaiado.

TABELA 5. Métodos de ensaios conforme norma IEC 60034-2-3

Potência	110 kW
Caraça	280S/M
Tensão Nominal	220/380/440 V
Corrente Nominal	350/203/175 A
Rotação Nominal	1786 RPM
Frequência Nominal	60 Hz
Fator de Serviço	1,25
IP/IN	7,9
Fator de Potência (100%)	0,86
Rendimento (100%)	95,8
Temperatura Ambiente	40 °C
Classe de Isolamento	F
Elevação de Temperatura	80 K
Grau de proteção	IP 55W
Regime de Serviço	S1
Altitude	1000 m

A bancada de ensaio foi composta de um dinamômetro para simular a carga mecânica, uma fonte de alimentação e instrumentação para medição e registro dos dados. A Fig. 3 apresenta um esquemático da bancada utilizada para as medições com alimentação não-senoidal. A bancada utilizada para medições com alimentação senoidal foi similar, porém, sem a utilização do inversor.

O procedimento de ensaio foi realizado conforme descrito na norma 60034-2-3, e os equipamentos de medição estavam calibrados de acordo com as suas instruções. A Tabela 6 apresenta as especificações básicas dos instrumentos e equipamentos utilizados nos ensaios. A frequência de chaveamento utilizada no inversor foi de 2 kHz, com controle escalar. Para a alimentação senoidal, foi utilizado um grupo gerador. A temperatura do enrolamento foi monitorada por meio de sensores PT-100 instalados no próprio enrolamento, carcaça e mancais.

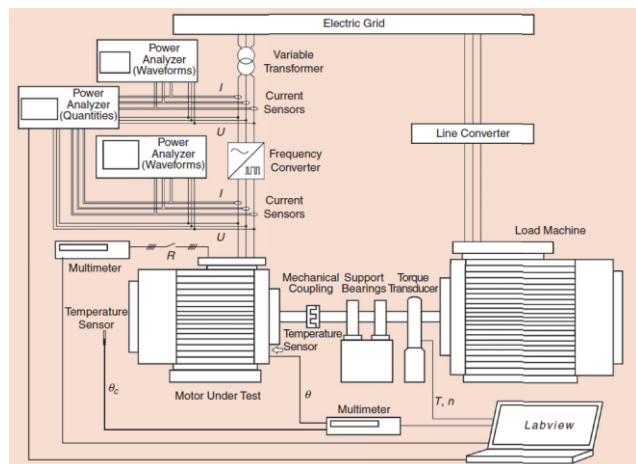
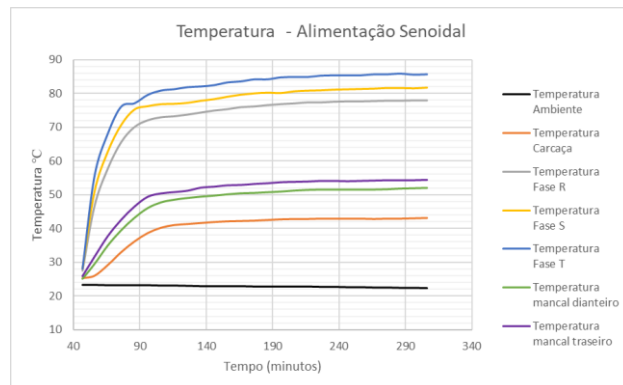


FIGURA 3. Esquemático da bancada de ensaios para alimentação não-senoidal [3].

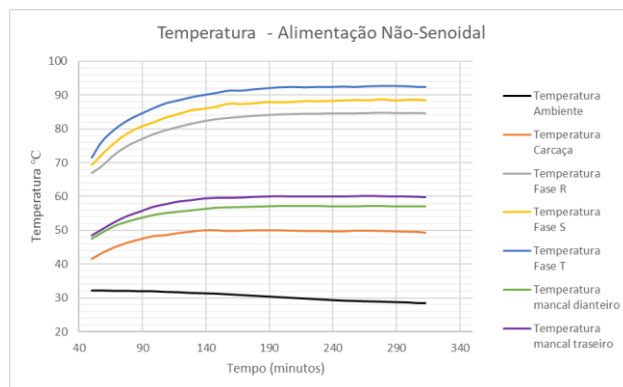
TABELA 6. Especificações básicas dos instrumentos utilizados nos ensaios.

Equipamentos Instrumentos	Fabricante	Modelo
Inversor	WEG	CFW11
Transdutor de Torque	HBK	T40B
Analisador de Potência	Yokogawa	WT1800
Grupo Gerador	WEG	WEG 380KVA
Termoresistor	Consistec	PT-100 Simples 3 Fios

O motor permaneceu ligado e acoplado ao dinamômetro até atingir o equilíbrio térmico. As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam a leitura da temperatura do enrolamento durante os testes. Após o equilíbrio térmico ser atingido, foram registrados os valores de tensão, frequência, rotação, torque, corrente e potência de entrada para os diferentes pontos de operação indicados na norma 60034-2-3. A medição foi realizada de forma subsequente, iniciando a coleta no ponto 1 e finalizando no ponto 7 da Tabela 4. A potência mecânica no eixo do motor foi determinada por meio da medição do torque e da rotação. As perdas foram determinadas pela diferença entre a potência de entrada e a potência mecânica no eixo do motor.



(a) Alimentação senoidal



(b) Alimentação não-senoidal

FIGURA 4. Elevação de temperatura.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios dos 7 sete pontos normalizados na condição de alimentação por inversor e a Tabela 8 apresenta os coeficientes de interpolação.

TABELA 7. Resultado dos ensaios na condição de alimentação por inversor

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Rotação (%)	89,8	49,5	24,3	90,2	50	50,1	25
Torque (%)	100,3	100,4	100,4	50	50,3	25,5	25,3
Rede	Tensão (V)	450	450	452,2	445,5	446,5	439,2
	Corrente (A)	145,6	85,1	48,8	76,6	47,3	29,2
	Potência (W)	106360	60593	31991	53498	30341	15803
	Freq. (Hz)	60	60	60	60	60	60
Motor	Rotação (rpm)	1603	884	434	1611	892	896
	Torque (Nm)	590,1	590,3	590,3	293,9	295,8	149,9

TABELA 8. Coeficientes de interpolação na condição de alimentação por inversor

CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7
0,0447	0,0379	0,0322	0,2652	0,0163	0,0116	0,0085

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios dos 7 sete pontos normalizados na condição de alimentação senoidal e, a Tabela 10 apresenta os coeficientes de interpolação.

TABELA 9. Coeficientes de interpolação na condição de alimentação senoidal

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Rotação (%)	89,8	49,7	24,3	90,3	50	50,2	25
Torque (%)	100	100,1	100	50,2	50,2	25	25,3
Rede	Tensão (V)	396,5	220,3	110,3	396,3	220,6	220,2
	Corrente (A)	177,6	178,4	181,3	100,4	100,1	68,7
	Potência (W)	103565	58089	29848	52140	29026	14680

	Freq. (Hz)	54	30	15	54	30	30	15
Motor	Rotação (rpm)	1604	887	434	1613	893	896	446
	Torque (Nm)	588,5	589	587,9	295	295	147,3	148,

TABELA 10. Coeficientes de interpolação na condição de alimentação senoidal

CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7
0,04263	0,0303	0,0285	0,0209	0,01310	0,0077	0,0049

As Figuras 5 (a) e 5 (b) apresentam o mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação não-senoidal e senoidal. O mapa foi elaborado através dos coeficientes de interpolação do modelo analítico da norma 60034-2-3 e aplicando (11).

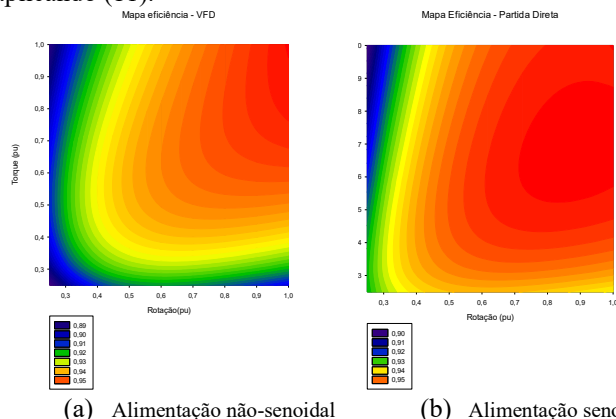


FIGURA 5. Mapa de eficiência do motor ensaiado com alimentação não-senoidal e senoidal.

VI. ANÁLISES DE RESULTADOS

Nesta seção, é realizada uma comparação entre os resultados em carga, tanto com alimentação senoidal quanto não-senoidal. A Fig. 6 apresenta uma sobreposição entre os mapas de eficiência do motor ensaiado. Para melhor visualização foi elaborada a Fig. 7, que mostra o nível de rendimento e as perdas totais para as operações com 25%, 50%, 75% e 100% de carga em relação a velocidade do motor, e a Fig. 8, que apresenta o nível de rendimento e as perdas totais para as operações com 25%, 50%, 75% e 100% da velocidade em relação a carga. Para o cálculo do rendimento, foi utilizada a metodologia apresentada pela norma IEC 60034-2-3.

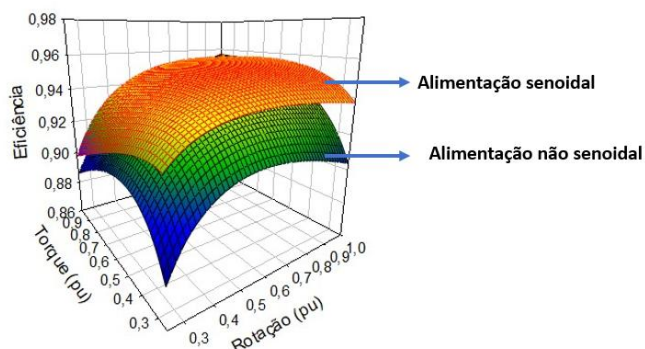


FIGURA 6. Mapa 3D da eficiência com alimentação não-senoidal e senoidal

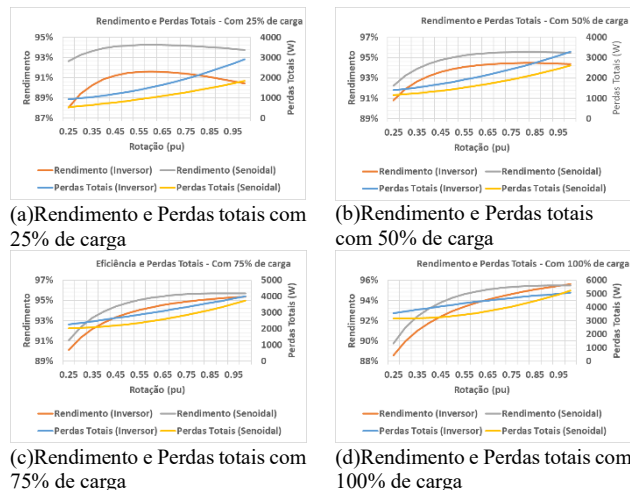


FIGURA 7. Rendimento e Perdas totais com 25, 50, 75 e 100 % de carga com alimentação senoidal e não-senoidal

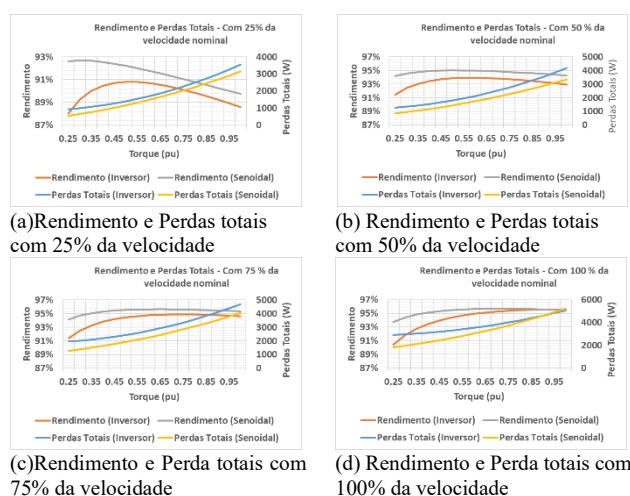


FIGURA 8. Rendimento e Perda totais com 25, 50, 75 e 100 % da velocidade com alimentação senoidal e não-senoidal

Para uma melhor compreensão dos resultados foi elaborada a Fig. 9, que apresenta a diferença entre as perdas dos ensaios quando em alimentação senoidal e não-senoidal e a metodologia apresentada pela norma IEC 60034-2-3 para a condição de 25%, 50%, 75% e 100% de carga. A diferença entre as perdas nos ensaios pode ser assumida como a perda devida a componente harmônica, ou seja, à perda harmônica.

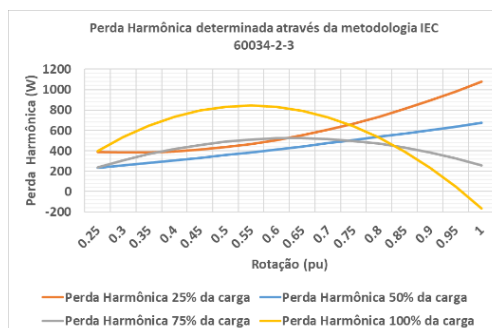


FIGURA 9. Perdas Harmônicas com 25, 50, 75 e 100% de carga

A Fig. 10 apresenta a diferença entre as perdas dos ensaios com alimentação senoidal e não-senoidal, utilizando a metodologia apresentada pela IEC 60034-2-3 para a condição de 25%, 50%, 75% e 100% de velocidade. A diferença entre as perdas nos ensaios foi assumida como a perda devida a componente harmônica, ou seja, à perda harmônica.

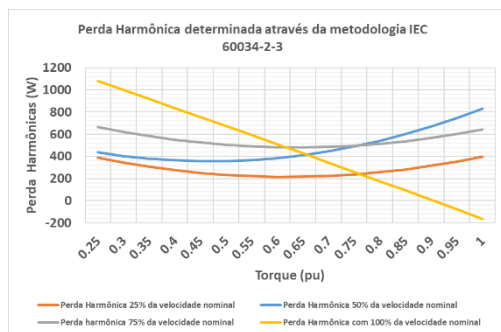


FIGURA 10. Perdas Harmônicas com 25,50,75 e 100% da velocidade nominal

Para uma comparação mais fidedigna, foram analisados os resultados nos sete pontos de operação sugeridos pela norma. A Fig. 11 apresenta as perdas totais obtidas nos ensaios com alimentação senoidal e não-senoidal. Com os resultados dos ensaios, é possível calcular a componente das perdas harmônicas nos sete pontos.

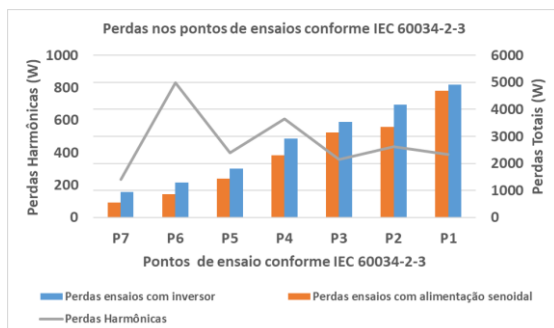


FIGURA 11. Perdas totais nos sete pontos normalizados e suas perdas harmônicas

O resultado obtido pela Fig. 11 é importante, pois apresenta os pontos ensaiados e as perdas harmônicas para cada um dos sete pontos indicado pela norma. Pela Fig. 11, é possível identificar que as perdas adicionais devido às componentes harmônicas oriundas do inversor, variaram com a carga e com a rotação, e não apresentaram um comportamento constante como indicado na IEC 60034-2-3.

A própria IEC através da norma 60034-25, indica que além das conhecidas perdas devido à tensão e corrente fundamentais, a alimentação não-senoidal fornecida pelo inversor produz perdas adicionais na máquina elétrica. Essas perdas adicionais dependem da velocidade, tensão, corrente, forma de onda, projeto e tamanho da máquina elétrica, e se nenhuma indutância ou filtro for utilizado, essas perdas podem variar de 10% a 30% das perdas para conversores de dois níveis e, portanto, chegando a 1% a 2% da potência nominal da máquina elétrica, reduzindo com o aumento da potência nominal da máquina elétrica.

A norma IEC 60034-25 também apresenta um exemplo do aumento das perdas no motor elétrico devido à alimentação não-senoidal como apresentado na Fig. 12. No exemplo apresentado pela IEC 60034-25, trata-se de um motor de 37kW e 50Hz, alimentado por inversor com frequência de comutação igual a 5,5kHz. Observa-se que o comportamento das perdas está em conformidade com os testes realizados neste trabalho. Verifica-se que, ao comparar as perdas do motor quando alimentado por uma tensão senoidal com aquelas originadas sob regime não-senoidal, o incremento

relativo de perda não ocorre de maneira constante, sendo mais acentuado à medida que a frequência aumenta.

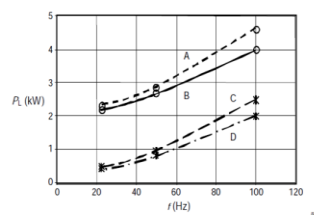


FIGURA 11. Exemplo de perdas medidas, em função da frequência e da alimentação para cada tipo de alimentação e condição [6]

Através da Fig 7 (d), Fig 8 (d), Fig 9, Fig 10 e Fig 10 foi possível identificar que o resultado obtido pelo método proposto pela norma apresentou inconsistências nos valores de rendimento e perdas totais nos pontos próximos ao ponto nominal do motor testado. Observou-se que o rendimento interpolado na condição nominal quando em alimentação senoidal foi inferior ao rendimento interpolado quando alimentado pelo inversor. Diversos fatores não analisados poderiam contribuir para a inconsistência, como níveis de harmônicos na alimentação senoidal, impedâncias dos cabos e conexões, variações de temperatura no momento dos ensaios e oscilações no dinamômetro. Conforme apresentado na Tabela 1 e apresentado pela norma IEC 60034-2-3, era esperado que, com a adição da componente de perdas harmônicas, o rendimento durante a operação com inversor fosse inferior ao rendimento quando operando com alimentação senoidal. Ao observar a Fig. 9 e a Fig. 10, verificou-se que as perdas harmônicas calculadas por meio do método de interpolação da IEC60034-2-3 apresentaram um comportamento variado, sendo maiores nos pontos de menor torque e maior velocidade.

Apesar de as perdas harmônicas apresentarem valores absolutos mais elevados nos pontos de operação como mencionado no parágrafo anterior, o impacto das perdas harmônicas na determinação do rendimento do motor ensaiado foi diferente, como verificado nas Fig. 7 e Fig. 8. Nos pontos de operação com torque inferior a 50% do torque nominal do motor, independentemente da rotação, as perdas harmônicas calculadas pelo método da interpolação representaram cerca de 20% das perdas totais do motor. Em pontos extremos de operação, a representatividade das perdas harmônicas foi superior a 40% das perdas totais. Estudos indicam que as perdas adicionais devido à componente harmônica normalmente variam entre 10-30% no ponto de operação de 25% do torque e velocidade nominal [9].

VII. CONCLUSÃO

Foi identificado que há uma crescente preocupação em relação às perdas dos motores elétricos quando operados por inversores. Diversos países estão emitindo regulamentações que exigem um nível mínimo de rendimento dos motores quando acionados por inversor, porém, tais regulamentações são baseadas nos níveis de rendimento obtidas com alimentação senoidal. Ainda há muita discussão na literatura sobre os efeitos dos inversores no rendimento dos motores.

O entendimento e a determinação das perdas harmônicas em motores elétricos de indução alimentados por inversores

ainda representam um desafio para os fabricantes e pesquisadores, apesar de esse tema estar sendo estudado há alguns anos. Dentre os motivos que dificultam a evolução do assunto estão a inexistência de uma teoria definitiva sobre o comportamento das perdas em motores com alimentação não-senoidal e a carência de normas de referências que orientem quanto aos procedimentos experimentais a serem adotados para determinação dessas perdas quando o motor é submetido a esse tipo de alimentação. Ainda que alguns organismos, como a IEC, já tenham iniciado o desenvolvimento de documentos abordando questões relacionadas aos ensaios e à determinação das perdas e do rendimento quando os motores são alimentados por inversor, a elaboração e emissão dessas normas ainda estão em fase inicial devido às inúmeras discussões que envolvem o tema[4][11][12][13]. Certamente, ainda haverá discussão até que essas normas sejam definitivamente aceitas e amplamente utilizadas pela indústria. Apesar das discussões existentes sobre a parcela adicional das perdas harmônicas ocasionadas pela alimentação com formas de onda de tensão não-senoidal, não há dúvidas de que as perdas no motor elétrico diferem daquelas observadas quando ele é alimentado por uma tensão puramente senoidal.

A IEC 60034-2-3, por meio do método direto com alimentação não-senoidal, é viável para a determinação das perdas e a apuração do rendimento do motor elétrico. Contudo, os resultados não refletem as perdas na aplicação final, e, portanto, para determinar o rendimento na aplicação final seria necessário a realizar o ensaio com a configuração do motor e do inversor que serão utilizados. O método direto é o recomendado pela norma para apuração das perdas totais do motor quando operado por inversor.

O método de interpolação para determinação do mapa de eficiência proposto pela norma, apresentou-se satisfatório e foi capaz de determinar o rendimento em rotações maiores do que 25 % da rotação nominal. Em velocidades inferiores a 25% deve ser avaliado de outra maneira, visto que apresenta um grande nível de incerteza nessa faixa de operação. Apesar da inconsistência apresentada nos pontos próximos ao ponto nominal do motor ensaiado, a seção 7.6 da norma IEC 60034-2-3 apresenta um procedimento opcional para a correção dos erros de interpolação. A norma recomenda a medição de dezesseis pontos adicionais, nas rotações de 25%, 50%, 75% e 90% da rotação nominal, e nos torques de 25%, 50%, 75% e 100% do torque nominal. Para trabalhos futuros, os autores sugerem que esses pontos sejam incluídos no plano de ensaio, visando uma maior acuracidade dos resultados.

Em relação ao comportamento das perdas harmônicas na faixa de operação do motor, foi identificado um comportamento diferente do sugerido pela norma. As perdas harmônicas não apresentaram um comportamento constante, como indicado pela norma. Observou-se que, nos pontos com menor torque e maior rotação, as perdas devido à componente harmônica foram maiores, e que essas perdas dependem tanto do torque requerido pela carga quanto da rotação do motor.

Em relação ao rendimento do motor elétrico, foi identificado que a componente das perdas harmônicas possui grande relevância na determinação do seu valor. Em casos extremos, as perdas harmônicas podem aumentar em até 40% as perdas totais do motor elétrico. O impacto no rendimento do motor ensaiado é muito significativo nos pontos de operação com torque inferior a 50% do torque nominal, independentemente da rotação. Apesar das regulamentações vigentes estarem baseadas em níveis mínimos de rendimento

no ponto nominal de operação do motor, não se pode ignorar o fato de que grande parte dos motores elétricos é dimensionada para operar no ponto máximo da carga acionada, mas funciona a maior parte do tempo com carga parcial. Portanto, os benefícios do aumento do nível de rendimento dos motores elétricos, propostos pelos órgãos reguladores, podem não ser tão efetivos quanto o correto dimensionamento do motor para a carga acionada.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

G.M.CASTRO: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição. **A.NIED:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição. **J.R.RUTHES:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

PLÁGIO E SIMILARIDADE

O artigo foi submetido para verificação de similaridade no sistema Crossref Similarity Check (iThenticate).

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados utilizados nesta pesquisa estão disponíveis no corpo do documento.

REFERÊNCIAS

- [1] Anibal, J. T. E. F. Fernando, F. Joao. *Perspectives on electric motor market transformation for a net zero carbon economy*. Energies, 16 (2023), p. 1248. Doi: [10.3390/en16031248](https://doi.org/10.3390/en16031248)
- [2] Ruthes, J. R. Análise do Motor de Indução Trifásico Alimentado por Conversor Estático / Jacques Roberth Ruthes. - UDESC - 2019. 187 p.
- [3] KARKKAINEN, H.; AARNIOVUORI, L.; NIEMELA, M.; PYRHONEN, J. *Converter-fed induction motor efficiency: Practical applicability of IEC methods*. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017. v. 11, n. 2, p. 45–57, June 2017. ISSN 1932-4529. Doi: [10.1109/MIE.2017.2693421](https://doi.org/10.1109/MIE.2017.2693421)
- [4] RUTHES, J. R.; NAU, S. L.; NIED, A. Performance evaluation of induction motors fed by PWM voltage with magnetic equivalent circuits. EEMODS 17, Rome (eemods17.org), Energy Efficiency in Motor Driven Systems, 2017. 2017..
- [5] Klingshim, E. A.; Jordan, H. E. Polyphase induction motor performance and losses on nonsinusoidal voltage sources. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1968. PAS-87, n. 3, p. 624–631, March 1968. ISSN 0018-9510. Doi: [10.1109/TPAS.1968.292172](https://doi.org/10.1109/TPAS.1968.292172)
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC) – IEC 60034-25 – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide, Geneva, Switzerland, Edition 3, 2014.
- [7] NEMA. Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems. [S.l.]: National Electrical Manufacturers Association, 2021. Application Guide.

- [8] IEC 60034-2-3, 2020 – Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motor
- [9] WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. Paris, France: International Energy Agency, 2011
- [10] L. Aarniovuori, A. Kosonen, M. Niemelä and J. Pyrhönen, "Frequency converter driven induction motor losses," IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria, 2013, pp. 2881-2886. Doi: [10.1109/IECON.2013.6699588](https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699588)
- [11] C. Nevoloso et al., "On the Inadequacy of IEC 60034-2-3 and IEC 60034-30-2 Standards for Power Losses, Efficiency and Energy Class Evaluation in PWM Multilevel Inverter-Driven PMSM," in IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol. 6, pp. 962-981, 2025. Doi: [10.1109/OJIES.2025.3574857](https://doi.org/10.1109/OJIES.2025.3574857)
- [12] M. Tiihonen, H. Kärkkäinen, L. Aarniovuori, M. Niemelä, D. Liu and J. Barta, "Converter-Fed Induction Motor Efficiency Measurements - IEC 60034-2-3," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy, 2024, pp. 1-7. Doi: [10.1109/ICEM60801.2024.10700500](https://doi.org/10.1109/ICEM60801.2024.10700500)
- [13] Graciola, C. L., Goedtel, A., Castoldi, M. F., Souza, W. A., Nunes, E. A., Santos, T. H., & da Silva, L. C. P. (2025). Comparison between predictive and scalar control strategies for minimizing losses in induction motors. *Systems Science & Control Engineering*, 13(1). Doi: [10.1080/21642583.2025.2481942](https://doi.org/10.1080/21642583.2025.2481942)

DADOS BIOGRÁFICOS

Guilherme Marangoni de Castro, nascido em 27/06/1988 possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina. Ele tem trabalhando como engenheiro de aplicação de máquinas elétricas desde de 2014. Suas áreas de interesse são máquinas elétricas, acionamentos elétricos e eletrônica de potência.

Ademir Nied, nascido em 12/06/1962 em Santo Ângelo-RS é engenheiro eletricitista (1987) pela Universidade Federal de Santa Maria, mestre em engenharia elétrica e informática industrial (1995) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Doutor em engenharia elétrica (2007) pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é professor titular da Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica. Suas áreas de interesse são máquinas elétricas, acionamentos elétricos, eletrônica de potência e energias renováveis.

Jacques Roberth Ruthes, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (1991), especialização em Máquinas Elétricas pela Universidade Federal de Santa Catarina (1996), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2019) e mestrado-profissionalizante em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2008). Atuou como Especialista da Weg Equipamentos Elétricos Matriz, por mais de 30 anos. Atualmente é professor na Universidade do Estado de Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atuando principalmente nos seguintes temas: motor de indução monofásico, harmônicas, torque síncrono.