UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME MARANGONI DE CASTRO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA NORMA IEC60034-2-3 2020 E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EM DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTAÇÃO

JOINVILLE
2022

GUILHERME MARANGONI DE CASTRO

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA NORMA IEC60034-2-3 2020 E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EM DIFERENTES TIPOS DE ALIMENTAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração em Sistemas Eletroeletrônicos.
Orientador: Prof. Dr. Ademir Nied.

JOINVILLE

2022

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da

Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,

com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Castro, Guilherme Marangoni
Avaliação Experimental da Norma IEC60034-2-3 2020 e comparação dos resultados em diferentes tipos de alimentação / Guilherme Marangoni Castro. -- 2022.
91 p.

Orientador: Ademir Nied
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2022.

1. Motores elétricos. 2. Inversores de frequência. 3. Perdas . 4. Método direto. 5. IEC 60034-2-3. I. Nied, Ademir . II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

GUILHERME MARANGONI DE CASTRO

Avaliação experimental da norma IEC 60034-2-3 2020 e comparação dos resultados em diferentes tipos de alimentação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração em Sistemas Eletroeletrônicos.
Orientador: Prof. Dr. Ademir Nied

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ademir Nied
CCT/UDESC

Membros:

Prof. Dr. Ademir Nied
CCT/UDESC (Presidente/orientador)

Prof. Dr. Tiago Jackson May Dezuo
CCT/UDESC

Dr. Jacques Roberth Ruthes
WEG

Joinville, 08 de dezembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível se não estivesse presente a participação de inúmeras pessoas, em especial:

A meus pais Vera e Robson pela criação, pelos princípios, exemplos e por todo incentivo e esforço.

A minha esposa Clarissa, agradeço pela compreensão, incentivo, companheirismo, carinho e apoio.

Ao Professor Orientador Ademir Nied pela confiança, paciência, parcimônia, apoio e incentivo para a conclusão do trabalho.

Ao colega e “coorientador” Jacques Roberth Ruthes pelo estímulo, orientação e contribuição ao longo deste trabalho.

A WEG, por amparar o desenvolvimento de seus colaboradores.

A todos os colegas da WEG que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

A Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade, professores, laboratórios e estrutura do curso.

RESUMO

O objeto de estudo deste trabalho é realizar uma revisão da norma IEC 60034-2-3 e realizar uma série de experimentos para avaliar o comportamento das perdas harmônicas em relação aos sete pontos de operação propostos pela norma, determinar o mapa de rendimento para as condições de alimentação não senoidal, conforme instruído pela norma, e comparar os resultados quando em alimentação senoidal. 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 à alta frequência oriundas da alimentação por inversores de frequência. As perdas devido às altas frequências são apresentadas de maneira adicional as perdas em alimentação senoidal como determinado pelo método normalizado pela IEC 60034-2-3 e, segundo a norma, as perdas harmônicas são constantes em toda faixa de operação do motor.

Palavras-chaves: Motores Elétricos; Perdas; Inversores de Frequência; Método Direto; IEC 60034-2-3.

ABSTRACT

The purpose of this document is to run an analyze of IEC 60034-2-3 regulation and performance experiments to evaluate the behavior of harmonic losses on the seven standardized operating points indicated by IEC standard, to elaborate the efficiency map for the non-sinusoidal power as indicated by standard and to compare results against operating in sinusoidal power. The IEC 60034-2-3 specifies test methods and an interpolation procedure for determining losses and efficiencies of converter fed motors within the scope of IEC 60034-2-3 and according to IEC harmonic losses are constant on all operation range.

Keywords: Electric Motor; Losses; Variable speed driver; Direct Method; IEC 60034-2-3.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Infográfico de motor elétrico alimentado por inversor de frequência e as curvas típicas de operação e desempenho do conjunto 20
Figura 02 - Onda distorcida decomposta através da série de Fourier.....21
Figura 03 - Exemplo de tensão e corrente de um MIT alimentado por inversor. 25
Figura 04 - Circuitos equivalentes para determinação das correntes harmônicas - As figuras mostram os circuitos utilizados nas primeiras análises das correntes harmônicas. 26
Figura 05 - Exemplo da dependência das perdas nas máquinas elétricas causadas pelas componentes harmônicas relacionada a frequência de comutação do inversor. 28
Figura 06 - Localização das perdas em um motor elétrico.....31
Figura 07 - Influência da alimentação por conversor de frequência nas perdas de um motor de indução de gaiola operando com valores nominais de torque e velocidade 33
Figura 08 - Distribuição das perdas em um motor de indução trifásico com alimentação senoidal.....34
Figura 09 - Perdas em função da carga 34
Figura 10 - Curva de redução de torque para tensões harmônicas 36
Figura 11 - Curva típica de operação motor com variação de velocidade.....37
Figura 12 - Rendimento do Sistema (Inversor + Motor) com variação de velocidade 38
Figura 13 - Requisitos MEPS para o mercado Europeu.....40
Figura 14 - Requisitos MEPS para os Estados Unidos 40
Figura 15 - Classificação de eficiência de acordo com a IEC 60034-30-1 - 50 Hz....42
Figura 16 - Classificação de eficiência de acordo com a IEC 60034-30-2 44
Figura 17 - Classificação de eficiência de acordo com a NBR 17094-1.....45
Figura 18 - Classificação de Eficiência de acordo com a NEMA MG 1 46
Figura 19 - Pontos Normalizados Para Medição 53
Figura 20 - Pontos Alternativos Para Medição 55
Figura 21 - Motor Ensaiado.....58
Figura 22 - Esquemático da bancada de ensaios para alimentação não senoidal....58

Figura 23 - Diagrama de ligação dos sensores de temperatura.....60
Figura 24 - Temperatura do bobinado, mancal e carcaça com alimentação senoidal 63
Figura 25 - Mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação senoidal.....65
Figura 26 - Temperatura do bobinado, mancal e carcaça com alimentação não senoidal.....66
Figura 27 - Mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação não senoidal.....68
Figura 28 - Mapa 3D da eficiência com alimentação não senoidal e senoidal 69
Figura 29 - Eficiência e Perdas Totais com 25, 50, 75 e 100 % de carga com alimentação através do inversor e senoidal 69
Figura 30 - Eficiência com 25, 50, 75 e 100 % da velocidade nominal com alimentação senoidal e não senoidal 70
Figura 31 – Perdas Harmônicas com 25, 50, 75 e 100 % de carga 71
Figura 32 - Perdas Harmônicas com 25, 50, 75 e 100 % da velocidade nominal 72
Figura 33 - Perdas totais nos sete pontos normalizados e suas perdas harmônicas 72
Figura 34 - Perdas Harmônicas absolutas nos pontos de 25, 50, 75 e 100% da velocidade e torque nominal.....73
Figura 35 - Perdas Harmônicas absolutas calculadas pelo método da interpolação da norma IEC 60034-2-3 para distintos pontos de operação 73
Figura 36 - Perdas Harmônicas (%) das perdas totais calculadas pelo método da interpolação da norma IEC 60034-2-3 para distintos pontos de operação.....74
Figura 37 - Perdas harmônicas (%) que representam sobre as perdas totais calculadas através do método de interpolação da IEC 60034-2-3 74
Figura 38 - Exemplo de perdas medidas, em função da frequência e da alimentação 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Classificação das Harmônicas para a frequência fundamental de 60 Hz 23
Tabela 02 - Limites de Distorção da Tensão estabelecidos na norma IEEE-519.....24
Tabela 03 - Limites de Distorção da Corrente (%) estabelecidos pela norma IEEE-519 para sistemas com tensões entre os 120V e os 69kV.....24
Tabela 04 - Recomendação da distribuição das perdas mecânicas para motor com método de refrigeração IC411.....30
Tabela 05 - Correlação entre componentes de perdas x fenômenos.....32
Tabela 06 - Regulamentos, normas e nível mínimo de eficiência quando apto a operar com inversor de frequência.....41
Tabela 07 - Tecnologia de motores elétricos e seu potencial de classificação de eficiência 43
Tabela 08 – Comparativo entre as classes de eficiência da NEMA, ABNT e IEC.....46
Tabela 09 - Métodos de ensaios conforme norma IEC 60034-2-3.....49
Tabela 10 – Os pontos normalizados para medição 53
Tabela 11 - Os pontos alternativos para medição.....54
Tabela 12 - Dados de placa do motor ensaiado.....57
Tabela 13 - Lista de ensaios a ser realizados 60
Tabela 14 - Resultado ensaios de resistência a frio.....61
Tabela 15 - Ensaios de tensão aplicada 62
Tabela 16 - Ensaios de resistência de isolamento 62
Tabela 17 - Ensaios de rotor bloqueado 62
Tabela 18 – Resultado do ensaio de elevação de temperatura com alimentação senoidal.....63
Tabela 19 - Dados adquiridos nos sete pontos de operação determinados com alimentação senoidal.....64
Tabela 20 - Coeficientes de interpolação na condição de alimentação senoidal 64
Tabela 21 - Rendimento nos principais pontos de operação quando alimentação senoidal obtidos através do modelo analítico da norma 60034-2-3 65
Tabela 22 - Resultado do ensaio de elevação de temperatura com alimentação não senoidal.....66

Tabela 23 - Dados adquiridos nos sete pontos de operação determinados com alimentação não senoidal.....67
Tabela 24 - Coeficientes de interpolação na condição de alimentação não senoidal. 67
Tabela 25 - Rendimento nos principais pontos de operação quando alimentação não senoidal obtidos através do modelo analítico da norma 60034-2-3 68
Tabela 26 - Perdas Totais e Harmônicas calculadas pelo método da interpolação da norma IEC 60034-2-3 para os pontos com 25%, 50% e 75% da potência nominal do motor ensaiado.....75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
RPM	Rotações por minutos
DOE	*Department of Energy*
EU	*European Union*
HVF	*Harmonic Voltage Factor*
IE	*Efficiency Classification*
IEC	*International Electrotechnical Commission*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
NEMA	*National Electrical Manufacturers Association*
MEPS	*Minimum Energy Efficiency Performance Standard*
PDS	*Power Driver System*
PWM	*Pulse Width Modulation*
THD	*Total Harmonic Distortion*

LISTA DE SÍMBOLOS

A_n	Valores eficazes das componentes harmônicas
A_1	Valor eficaz da componente fundamental
C_{L1}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
C_{L2}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
C_{L3}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
C_{L4}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
C_{L5}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
C_{L6}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
C_{L7}	Coeficiente de interpolação conforme norma 60034-2-3
h	Ordem da harmônica
I_{cc}	Componente contínua da corrente (A)
I_f	Modulo da corrente na frequência fundamental (A)
I_{harm}	Parcela da corrente devido às harmônicas (A)
I_h	Amplitude da h-ésima harmônica de corrente (A)
I_{sc}	Corrente máxima de curto circuito no ponto de conexão (A)
I_L	Corrente máxima exigida no ponto de conexão (A)
n	Velocidade (min^{-1})
P	Potência consumida (W)
P_{1c}	Potência nos terminais do motor testado (W)
P_{2c}	Potência na ponta de eixo do motor testado (W)
$P_{1_{60034-2-1}}$	Potência nos terminais do motor testado conforme IEC 60034-2-1 (W)
$P_{2_{60034-2-1}}$	Potência na ponta de eixo do motor testado conforme IEC 60034-2-1 (W)
P_{30Hz}	Potência consumida em 30 Hz (W)
P_{60Hz}	Potência consumida em 60 Hz (W)
$P_{C_{con}}$	Perdas na operação com inversor de frequência (W)
$P_{c_{sin}}$	Perdas na operação com alimentação senoidal (W)
P_{fe}	Perdas no ferro (W)
P_{harm}	Perdas harmônicas (W)

P_{j1}	Perdas nos enrolamentos do estator (W)
P_{j2}	Perdas nos enrolamentos do rotor (W)
P_{in}	Potência de entrada no motor (W)
P_{L1}	Perdas reativas no ponto de operação 1 da norma 60034-2-3 (W)
P_{L2}	Perdas reativas no ponto de operação 2 da norma 60034-2-3 (W)
P_{L3}	Perdas reativas no ponto de operação 3 da norma 60034-2-3 (W)
P_{L4}	Perdas reativas no ponto de operação 4 da norma 60034-2-3 (W)
P_{L5}	Perdas reativas no ponto de operação 5 da norma 60034-2-3 (W)
P_{L6}	Perdas reativas no ponto de operação 6 da norma 60034-2-3 (W)
P_{L7}	Perdas reativas no ponto de operação 7 da norma 60034-2-3 (W)
P_{out}	Potência de saída no motor (W)
P_u	Potência consumida (W)
P_{LHL}	Perdas adicionais devidas a componentes harmônicas provenientes da alimentação do inversor (W)
P_{mec}	Perdas mecânicas (W)
T	Torque nominal do motor elétrico (Nm)
T_c	Torque do motor elétrico quando alimentado por inversor de frequência (Nm)
$v(t)$	Tensão em função do tempo (V)
V_f	Módulo da tensão na frequência fundamental (V)
V_h	Amplitude da h-ésima harmônica de Tensão (V)
V_{cc}	Componente contínua da tensão (V)
η	Rendimento
Φ_{V_h}	Fase da h-ésima harmônica de tensão (rad)
Φ_{I_h}	Fase da h-ésima harmônica de corrente (rad)
ω	Frequência angular da fundamental (rad/s)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 16
1.1. MOTIVAÇÃO 17
1.2. OBJETIVOS 18
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 18
2. ASPECTOS GERAIS DA APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS ACIONADOS COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA 20
2.1. HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE 21
2.2. FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO 28
2.3. PERDAS NO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO 29
2.3.1. Considerações em relação a eficiência quando acionado por inversor de frequência 36
2.3.2. Influência da variação de velocidade na eficiência do motor 36
3.REGULAMENTAÇÕES GLOBAIS DE EFICIÊNCIA PARA MOTORES ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO 39
3.1. IEC 60034-30-1 41
3.2. IEC 60034-30-2 43
3.3. ABNT NBR 17094-1 45
3.4. NEMA MG 1 45
4. IEC 60034-203 - NORMA PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM MOTORES ELÉTRICOS QUANDO ACIONADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA 47
4.1. INSTRUMENTAÇÃO 47
4.2. SETUP 48
4.3. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM MOTORES ALIMENTADOS POR INVERSORES DE FREQUÊNCIA 49
4.3.1. Método 2-3-A - Direto 50
4.3.2. Método 2-3-B - Somatório das Perdas 50
4.3.3. Método 2-3-C - AEDM 51
4.3.4. Método 2-3-D - determinação da eficiência por cálculo 52
4.3.5. Os sete pontos padronizados de operação 53
4.3.6.Determinação analítica das perdas relativas em qualquer ponto de operação 56
4.3.7. Determinação opcional do erro de interpolação 56

5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL 57
5.1. MOTOR ENSAIADO 57
5.2. BANCADA DE ENSAIO 58
5.3. PROCEDIMENTO DE TESTES 59
5.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS 60
5.4.1. Ensaios gerais 61
5.4.2.Ensaios em carga dos 7 pontos normalizados com alimentação senoidal 63
5.4.3. Ensaios em carga dos 7 pontos normalizados com alimentação através do inversor de frequência 65
5.5. COMPARATIVO DE RESULTADOS 69
6. CONCLUSÃO 79
REFERÊNCIAS 82
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES QUANDO ALIMENTAÇÃO SENOIDAL 85
APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES QUANDO ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL 87
APÊNDICE C – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM ALIMENTAÇÃO SENOIDAL 89
APÊNDICE D – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL 90

1. INTRODUÇÃO

Há uma crescente preocupação com a conservação de energia elétrica e a eficiência 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 o principal consumidor de energia na indústria, utilizando cerca de 70% da energia consumida neste setor (ALMEIDA; FERREIRA; DUARTE, 2014).

Regiões desenvolvidas possuem legislações e regulações próprias que determinam o nível de eficiência necessária para comercialização do produto. Há inúmeras regulações vigentes com diferentes níveis de eficiências, cobertura, nomenclatura e determinação das perdas. Há diversos países com programas de etiquetagem de motores elétricos já implantados e com sistemas que não são 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 0,75kW até 1000kW, tensão nominal até 1000V e polaridade igual ou menor do que 8 polos, devem atender o nível de rendimento IE3 conforme norma IEC 60034-30-1 se aptos também a serem acionados por inversor de frequência, e que partir de julho de 2023 motores também aptos a serem acionados por inversor de frequência devem atender o nível de rendimento IE4 conforme norma IEC 60034-30-1 para potência entre 75kW até 200kW, tensão nominal até 1000V e polaridade igual ou menor do que 6. Motores projetados para operação unicamente através do inversor de frequência estão exclusos da regulamentação.

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 eficiência energética para motores elétricos de indução trifásicos de gaiola de esquilo. Através da portaria ficou estabelecido que motores elétricos trifásicos de gaiola de esquilo com potência nominal entre 0,12kW e 370kW, tensão nominal até 1000V e polaridade menor ou igual a 8 polos devem possuir o nível mínimo de eficiência energética IR3 conforme norma NBR 17094-1, independentemente do método de acionamento.

Os Estados Unidos e Canadá, através 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 0,75kW e 375kW, tensão nominal até 600V e polaridade menor ou igual a 8 polos devem atender o nível de rendimento NEMA PREMIUM conforme NEMA MG 1, e as perdas devem ser calculadas conforme norma IEEE 112-2004.

Devido às inúmeras legislações vigentes e a larga empregabilidade na indústria, existe uma discussão em relação à padronização do método de determinação das perdas para motores elétricos de gaiola de esquilo quando acionado por inversor de frequência, visto que até a emissão das normas IEC 60034-30-2 e IEC 60034-2-3 não existiam normas que determinavam as classes de eficiência para motores quando acionados por inversor de frequência, ou uma metodologia de ensaio para determinação do rendimento dos motores quando alimentados por inversor de frequência. Além disto, não há um consenso dos efeitos da alimentação chaveada em alta frequência e sua modulação no real desempenho deste tipo de motor elétrico.

1.1. MOTIVAÇÃO

O panorama exposto anteriormente e a experiência na indústria serviram como base de motivação para as pesquisas realizadas neste trabalho. Via de regra, os motores elétricos são testados com alimentação senoidal e sua eficiência é declarada desta forma, mesmo quando projetados para operar com inversor de frequência.

A norma IEC 60034-2-3 foi emitida em 2020, com o objetivo de definir a metodologia de teste para determinar as perdas totais, incluindo as perdas adicionais devido à alta frequência e a eficiência dos motores alimentados por inversor de frequência. A norma indica que as perdas harmônicas devido às altas frequências são praticamente constantes em toda faixa de operação, desde que a frequência de comutação se mantenha constante.

A primeira motivação trata-se da necessidade de se avaliar o procedimento de ensaio proposto pela IEC, e facilitar a implementação em caso de regulamentações baseadas na norma.

Outra motivação é avaliar o comportamento das perdas devido às componentes harmônicas em relação aos diferentes pontos de operação da máquina elétrica.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar experimentalmente a metodologia de ensaio proposto pela norma 60034-2-3 tanto para alimentação senoidal e como para a alimentação não senoidal.

Os objetivos específicos são:

(a) Realizar uma análise crítica da norma 60034-2-3;
(b) Avaliar experimentalmente o comportamento das perdas devido às componentes harmônicas nos sete pontos indicados pela norma;
(c) Comparar os resultados dos ensaios com alimentação senoidal e não senoidal.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para atingir os objetivos definidos, este trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- ✓ Introdução: no Capítulo 1 é apresentado a introdução do trabalho, motivação, objetivo e sua organização.

- ✓ Aspectos Gerais da Aplicação de Motores Elétricos Acionados com Inversor de Frequência: a proposta no Capítulo 2 é apresentar os aspectos gerais da utilização de motores elétricos trifásicos alimentados por inversores de frequência. O objetivo é situar o leitor sobre as consequências que uma alimentação com uma forma de onda não senoidal produz sobre os parâmetros da máquina elétrica. Apresentar as perdas consideradas no dimensionamento dos motores elétricos quando alimentado com alimentação senoidal e não senoidal.

- ✓ Regulamentações Globais de Eficiência para Motores Elétricos de Baixa Tensão: a proposta no Capítulo 3 é apresentar as regulamentações vigentes em relação ao nível de eficiência mínimo exigido na utilização de motores elétricos e comparar as exigências quando operado com inversor de frequência.
- ✓ Normas para Determinação das Perdas em Motores Elétricos Quando Acionados por Inversor de Frequência: a proposta no Capítulo 4 é realizar uma análise crítica da norma 60034-2-3 que é a vanguarda na metodologia para determinação das perdas de motores quando alimentado por inversores de frequência.

- ✓ Avaliação Experimental: a proposta do Capítulo 5 é apresentar os ensaios realizados, seus resultados e o resultado da comparação do motor ensaiado com inversor e alimentado diretamente da rede.

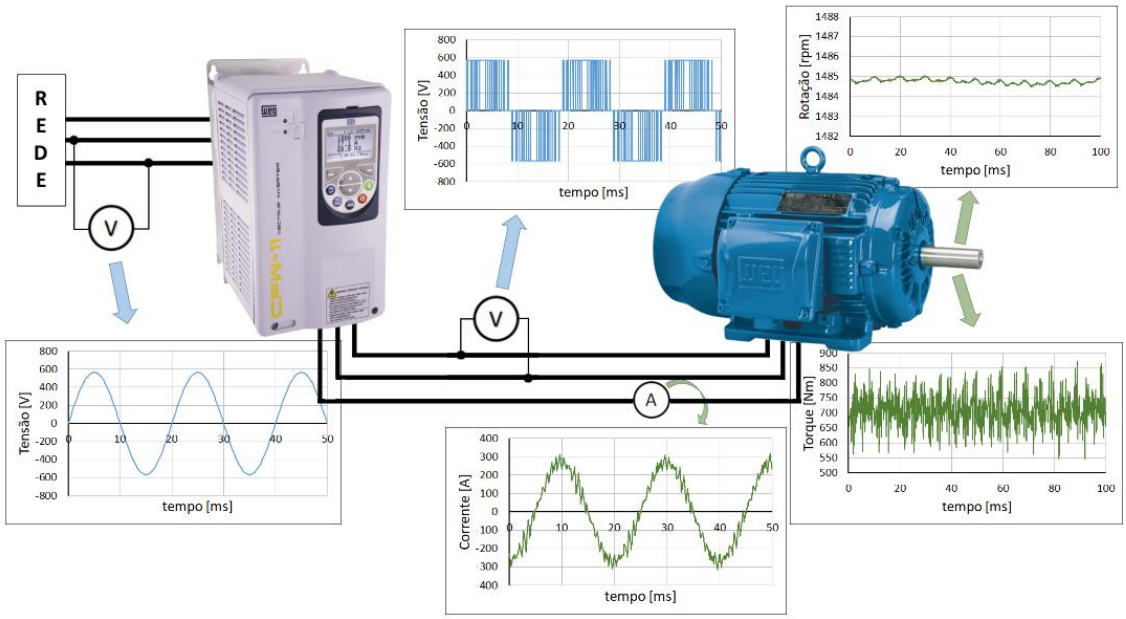
- ✓ Conclusão: O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e lista sugestões de trabalhos futuros.

2. ASPECTOS GERAIS DA APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS ACIONADOS COM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Diferentemente da alimentação de tensão diretamente da rede, que normalmente possui comportamento senoidal e que alimenta o inversor, a tensão de saída do inversor de frequência possui espectros de harmônicas temporais com amplitude e ordem dependentes do controle utilizado pelo inversor de frequência 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 de frequência, as amplitudes das harmônicas de corrente dependem também das características construtivas da máquina elétrica. Existem diversas pesquisas sobre os efeitos oriundos dessas harmônicas sobre o desempenho da máquina elétrica (RUTHES, 2019).

A Figura 01 apresenta um infográfico de motor elétrico alimentado por inversor de frequência e as curvas típicas de operação e desempenho do conjunto.

Figura 01 - Infográfico de motor elétrico alimentado por inversor de frequência e as curvas típicas de operação e desempenho do conjunto



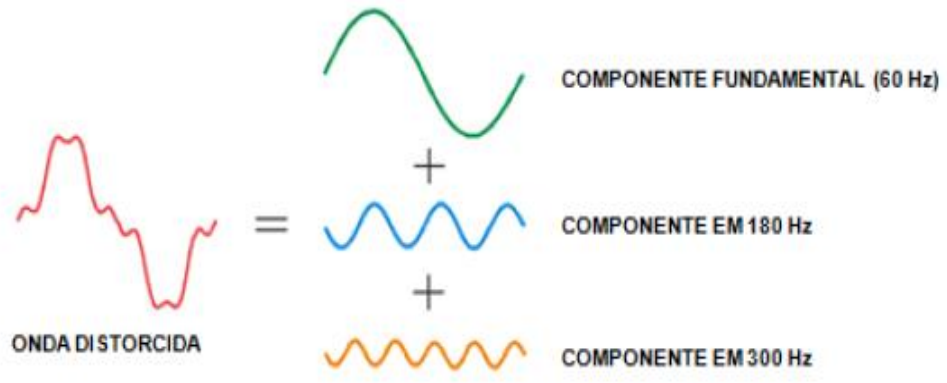
Fonte: (RUTHES; NAU; NIED, 2017).

De acordo com a norma IEC 60034-25, além das perdas já determinadas devido à tensão e corrente fundamentais, a alimentação não senoidal oriunda do inversor de frequência adiciona perdas a máquina elétrica. As perdas dependem da tensão e sua respectiva forma de onda, da corrente, velocidade, e dos aspectos construtivos do motor elétrico. Em inversores de frequência 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. Em inversores de frequência de três níveis, as perdas adicionais devido à alimentação não senoidal são menores, caracteristicamente de 0,2% a 1% da potência do motor elétrico (RUTHES, 2019).

2.1. HARMÔNICAS DE TENSÃO E CORRENTE

As distorções harmônicas são fenômenos associados com as imperfeições na forma de onda da corrente e tensão em relação a sua componente fundamental. Uma forma de onda com presença de harmônicas pode ser decomposta via série de *Fourier* em uma onda puramente senoidal na frequência fundamental, ondas puramente senoidais de frequências diferentes e uma componente contínua. As diferentes frequências quando múltiplas da fundamental, são chamadas de ordens da harmônica (ANEEL, 2012). A Figura 02 apresenta a decomposição de uma onda com distorção harmônica.

Figura 02 - Onda distorcida decomposta através da série de *Fourier*



Fonte: (NEVES, 2014)

As ondas decompostas da tensão e corrente através da série de *Fourier* são expressas pelas Equações (1) e (2) , respectivamente.

$$v(t) = V_{cc} + V_f sin(\omega t) + \sum_{h=2}^{\infty} V_h \sin(\omega t + \phi_{V_h}) \quad (1)$$

$$i(t) = I_{cc} + I_f sin(\omega t) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sin(\omega t + \phi_{I_h}) \quad (2)$$

Os possíveis agentes causadores da distorção harmônica são (LEE, 1999), (SILVA, 2010), (BRITO, 2006):

- ✓ Indutores em série com as linhas de transmissão;
- ✓ Bancos de capacitores utilizados para correção do fator de potência, ligados em paralelo ao sistema de distribuição;
- ✓ Corrente de magnetização de transformadores;
- ✓ Transformadores e máquinas rotativas durante condições transitórias ou quando operam fora da sua condição nominal;
- ✓ Reatores saturados para isolar componentes de corrente contínua quando a carga não requer esta componente; e
- ✓ Utilização de cargas não lineares como equipamentos eletrônicos, inversor de frequência, compensadores etc.

A maior causa para o surgimento das distorções harmônicas é a presença de cargas não lineares, o que vem se intensificando devido à empregabilidade cada vez maior da eletrônica de potência e causando um impacto na qualidade da energia. Indutores e capacitores não produzem harmônicas, porém, eles podem ser elementos que amplificam os níveis harmônicos existentes (NEVES, 2014) (SHAH, 2013).

Para um sistema trifásico equilibrado as harmônicas podem ser divididas em três sequências: a sequência negativa (-), a sequência zero ou nula (0) e a de sequência positiva (+) (SILVA, 2021). A Tabela 01 representa as diversas ordens das harmônicas, identificando a sua frequência e sequência para a frequência fundamental de 60Hz.

Tabela 01 - Classificação das Harmônicas para a frequência fundamental de 60 Hz

Ordem	1°	2°	3°	4°	5°	6°	$n°$
Frequência (Hz)	60	120	180	240	300	360	$n * 60$
Sequência	+	-	0	+	-	0	...

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado de (SILVA, 2021)

As harmônicas de sequência positiva induzem campos magnéticos e giram no mesmo sentido do campo magnético fundamental, assim aceleram o eixo do motor acionado. As harmônicas de sequência negativa induzem campos magnéticos que giram no sentido oposto ao do campo magnético fundamental, causando um torque oposto e freando o eixo. Essas interações levam a uma oscilação de torque e há uma tendência de o motor não fornecer um conjugado constante para a carga e essas oscilações poderão originar torques oscilatórios, responsáveis pela ocorrência de vibrações e, logo, aumento na fadiga mecânica (PEÇAS LOPES, 2008).

Já as harmônicas de sequência zero ou nula, não contribuem no torque do motor, porém induzem campos magnéticos de resultante nula e podem provocar o aumento da corrente do neutro para até o triplo da amplitude de fase. Assim, é importante notar que as harmônicas de sequência nula são aquelas cuja verificação se manifesta como a mais relevante para uma instalação, pois levam a um aumento da corrente do neutro, originando problemas tanto nas instalações, como nos equipamentos existentes. É importante ressaltar que elas provocam o aumento da perda por efeito Joule, contribuindo para a elevação da temperatura de operação do motor, visto que não possuem sentido de rotação, lembrando que se o aquecimento for superior ao limite admissível, ocorrerá redução da vida útil (DECKMANN, POMILIO). Para sistemas compostos de motor elétrico + inversor, geralmente quanto maior a ordem da harmônica, menor será a sua magnitude e as harmônicas poderão ser mais facilmente filtradas (WEG, 2018).

De maneira geral, o surgimento das harmônicas é associado a um conjunto de consequências negativas para os parâmetros dos motores. Pode-se citar como efeitos das harmônicas (ABREU, 2001), (BRITO E LEÃO, 2006), (SILVA, 2021):

- ✓ Tendência a frear ou acelerar o motor;
- ✓ Aumento no escorregamento;

- ✓ Aumento das perdas nos enrolamentos e no ferro;
- ✓ Aumento das perdas suplementares;
- ✓ Redução do fator de potência, torque e do rendimento;
- ✓ Aumento no tempo de partida do motor; e
- ✓ Aumento da elevação de temperatura de operação do motor.

A norma IEEE 519-2014 através da Tabela 02 apresenta os limites máximos recomendados de distorção harmônica da tensão e a Tabela 03 apresenta os limites recomendados de distorção harmônica da corrente. Os valores apresentados pela norma IEEE 519-2014 são limites meramente indicativos e, portanto, não são imperativos, podendo ser excedidos em casos transitórios. As normas emitidas pela IEC não apresentam o limite da distorção harmônica permitida para inversores de frequência (WEG, 2018). O parâmetro que apresenta o quanto as harmônicas distorcem a rede é o THD (*Total Harmonic Distortion*), normalmente fornecido pelo fabricante do inversor e é definido pela Equação (3).

Tabela 02 - Limites de Distorção da Tensão estabelecidos na norma IEEE-519

Tensão (V)	Harmônicas Individuais (%)	Distorção Harmônica Total THD (%)
V < 1kV	3	8
1 kV < V < 69 kV	3	5

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da (IEEE, 2014)

Tabela 03 - Limites de Distorção da Corrente (%) estabelecidos pela norma IEEE-519 para sistemas com tensões entre os 120V e os 69kV

I_{sc}/I_L	3≤ h <11	11≤ h <17	17≤ h <23	23≤ h <35	35≤ h ≤60	THD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
50<1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

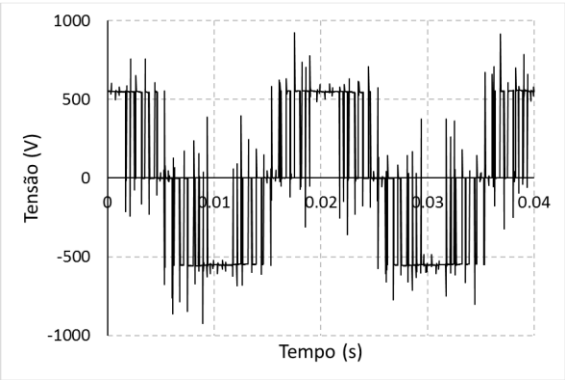
Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da (IEEE, 2014)

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{A_n}{A_1}\right)^2} \tag{3}$$

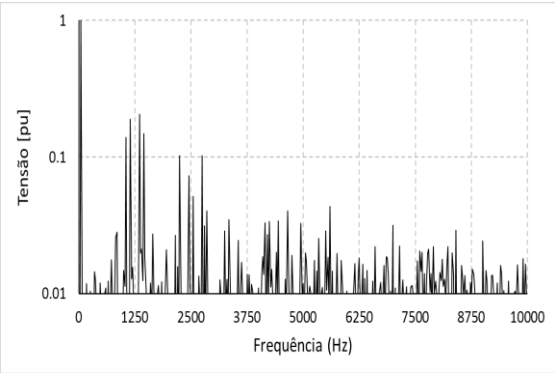
Ao energizar o motor elétrico com uma tensão com forma de onda não senoidal como demonstrado na Figura 03 (a), que apresenta uma forma de onda de tensão na saída de um inversor com modulação PWM, é esperado que a corrente também contenha componentes harmônicos como apresentado na Figura 03 (c). A periocidade das formas de onda da tensão admite que as formas possam ser analisadas por meio da Série de Fourier como apresentado na Figura 03 (b) e é representado o espectro de frequência com as amplitudes das diversas componentes harmônicas da tensão V_h, em pu. Identifica-se que a componente fundamental, que possui amplitude igual a 1, na frequência nominal determina o comportamento da máquina elétrica, e suas demais componentes harmônicas que possuem amplitude menor que a fundamental. Levando em consideração que a forma de onda da tensão é conhecida, a expressão genérica para a tensão de fase $v(t)$ é descrita na Equação (4), onde, h é a ordem da harmônica, V_h e ΦV_h são respectivamente, amplitude e fase da h-ésima harmônica, e ω é a velocidade angular da componente fundamental (RUTHES, 2019).

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cos(h\omega t + \Phi V_h) \tag{4}$$

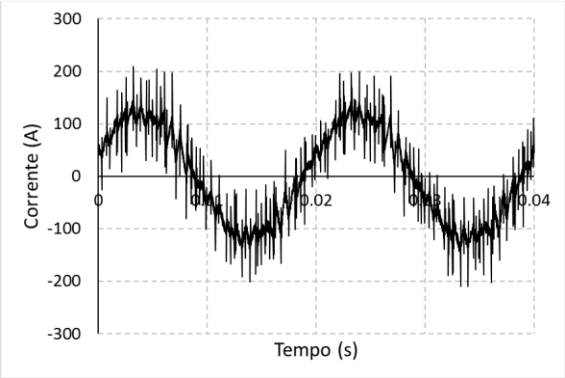
Figura 03 - Exemplo de tensão e corrente de um MIT alimentado por inversor.



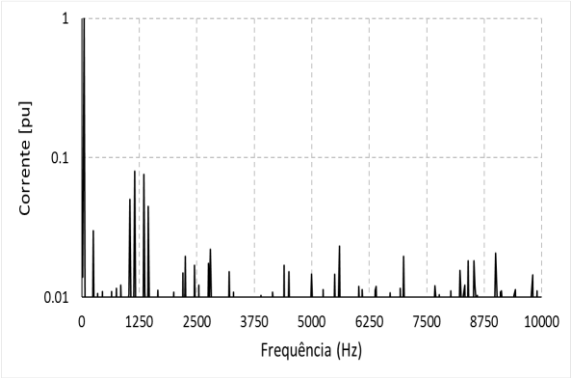
(a) Tensão de saída do inversor



(b) Componentes harmônicas da tensão



(c) Corrente do MIT alimentado por inversor

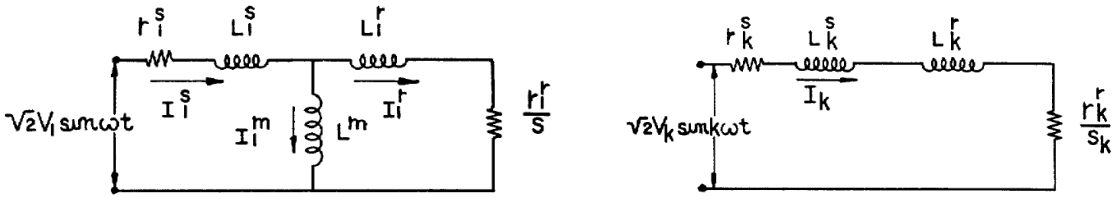


(d) Componentes harmônicas da corrente

Fonte: (RUTHES, 2019).

A interpretação representada na Equação (4) foi a base para o início das análises de máquinas elétricas alimentadas por tensões não senoidais abordadas por diversos autores. A partir dela a máquina elétrica era analisada independentemente para cada componente harmônica de tensão e seus efeitos contabilizados no somatório. Para cada componente harmônica de tensão era estabelecido um circuito equivalente, a componente fundamental era analisada pelo circuito clássico apresentado na Figura 04 (a), e as demais componentes harmônicas pelo circuito em condição de rotor bloqueado, excluindo o ramo magnetizante apresentado na Figura 04 (b) (RUTHES, 2019).

Figura 04 - Circuitos equivalentes para determinação das correntes harmônicas - As figuras mostram os circuitos utilizados nas primeiras análises das correntes harmônicas.



(a) (b)

Fonte: (RUTHES, 2019).

Na Figura 04, onde k representa a ordem da harmônica e para a componente fundamental $k = 1$. As variáveis para cada k-ésima harmônica são as seguintes: V_k é a tensão eficaz, s_k é o escorregamento e I_k^s, I_k^m e I_k^r são as correntes do estator, magnetizantes e do rotor. Os parâmetros do circuito equivalente também são

determinados para cada componente harmônica, onde r_k^s, L_k^s, r_k^r, L_k^r e L^m representam a resistência e indutância de dispersão do estator, resistência e indutância de dispersão do rotor e a indutância de magnetização respectivamente (RUTHES, 2019).

Nas harmônicas fundamentais, o circuito equivalente apresentado na Figura 04 (a) pode ser simplificado, o escorregamento s_k é aproximadamente unitário quando o motor opera próximo a velocidade síncrona da frequência fundamental. Nesta condição, o circuito se aproxima ao de rotor bloqueado, para a harmônica considerada, e o ramo magnetizante pode ser desconsiderado sem grandes desvios, como apresentado na Figura 04 (b). Em situações em que $s_k \approx 1$, a frequência no rotor é praticamente o valor da frequência da própria harmônica, desta maneira, para considerar o efeito de barra profunda, é necessário corrigir os valores da resistência e indutância de dispersão do rotor (KLINGSHIRN; JORDAN, 1968). Nestas análises, a corrente harmônica resultante é alcançada pela Equação (5), onde I_h é a corrente calculada para cada harmônica de tensão.

$$I_{harm} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \tag{5}$$

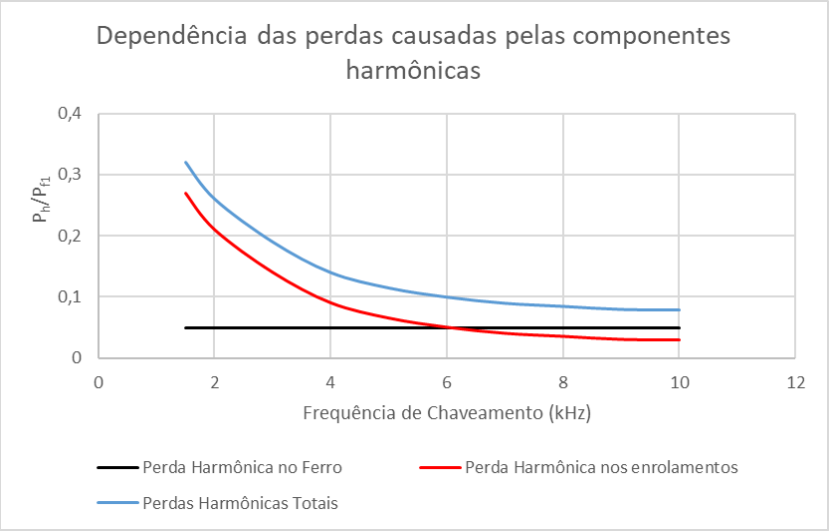
Com o avanço dos estudos, notou-se que a consideração do motor elétrico como um sistema linear afetava os resultados obtidos. Analisando os espectros de harmônicas presentes na Figura 03 (b) e (d), notou-se que a relação entre as harmônicas de tensão e corrente não é simplória, indicando a existência de relação entre as harmônicas, com características não lineares (RUTHES, 2019).

Ainda hoje não é consenso entre os pesquisadores e estudiosos o comportamento do incremento de corrente que ocorre quando a máquina elétrica é alimentada por inversores de frequência. Isto já é um indicativo de que a análise do motor elétrico quando alimentado com uma tensão com conteúdo harmônico expressivo não é uma tarefa simples e trivial (RUTHES, 2019).

2.2. FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO

A norma IEC 60034-25 através da Figura 05 apresenta um exemplo da dependência das perdas nas máquinas elétricas causadas pelas componentes harmônicas relacionadas à frequência de comutação do inversor. A perda total harmônica diminui com o aumento da frequência de comutação.

Figura 05 - Exemplo da dependência das perdas nas máquinas elétricas causadas pelas componentes harmônicas relacionada a frequência de comutação do inversor.



Fonte: (Autor, 2022) Adaptado de (IEC, 2014)

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 passa-baixa das indutâncias de dispersão dos enrolamentos do motor. Quanto mais elevada a frequência de chaveamento, menor a distorção total e mais próxima da fundamental é a forma de onda da corrente, até determinado ponto, pois frequências de chaveamento elevadas são filtradas pelo circuito do motor que atua como um filtro passa baixa e atenua as harmônicas de tensão de ordem elevada e tendem a reduzir as correntes harmônicas e, consequentemente, as perdas nos condutores. À medida que o valor de frequência de chaveamento se eleva, não há efeitos significativos na redução do conteúdo harmônico da corrente. 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 de frequência, considerando o

conteúdo harmônico da corrente e as perdas na comutação do inversor, é em torno de 5kHz. Deste modo, na perspectiva do motor elétrico, quanto menor a frequência de chaveamento, menor o rendimento do motor elétrico (NEMA, 2021) (RUTHES, 2019) (PIRES, 2008).

Assim sendo, a frequência de comutação ideal depende de cada conjunto motor, inversor e carga, e está ligada não apenas às perdas no motor elétrico, mas também ao desempenho do inversor de frequência.

2.3. 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 das perdas em máquinas elétricas é uma tarefa difícil, e algumas perdas são tratadas qualitativamente em função da complexidade para determiná-las.

A norma 60034-2-3 determina as componentes que compõem as perdas totais. A norma considera o controle em fluxo constante e as perdas são classificadas da seguinte forma:

A. **Perdas fundamentais:** São as componentes que ocorrem em uma máquina elétrica com frequência e tensão fundamental, 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 fundamental da tensão e corrente oriundas pelo inversor. Estas são adicionadas as perdas fundamentais no ferro, nos enrolamentos do estator e rotor e nas perdas suplementares.

As perdas nos enrolamentos do estator (P_{j1}) e rotor (P_{j2}) são as perdas por efeito Joule, que ocorrem nos condutores pelo efeito da passagem da corrente. Essas perdas são independentes da frequência e variam quadraticamente com o torque, visto que a corrente varia com o torque (IEC, 2020).

As perdas no ferro (P_{Fe}), que são dependentes da frequência e podem ainda ser separadas em duas partes: as perdas devidas as correntes parasitas (Focault), que são proporcionais ao quadrado da frequência, e às perdas por histerese, que são proporcionais à frequência (IEC, 2020).

As perdas mecânicas por atrito e ventilação (P_{mec}) são as perdas oriundas do atrito do mancal e da ventilação, por isso são dependentes do tipo de mancal e seu método de lubrificação, do sistema de ventilação, da velocidade de rotação e do estado de conservação do motor. A norma IEC 60034-2-3 indica que essas perdas podem ainda ser divididas em duas partes: as perdas por ventilação e as perdas por atrito. A Tabela 04 apresenta a recomendação de distribuição das perdas mecânicas por atrito e ventilação para motores com método de refrigeração IC411 quando essa divisão entre esse tipo de perda não é conhecida (IEC, 2020).

Tabela 04 - Recomendação da distribuição das perdas mecânicas para motor com método de refrigeração IC411

Rotação Nominal (min^{-1})	Perdas por Atrito	Perdas por ventilação
3000 a 3600	0,7	0,3
1500 a 1800	0,5	0,5
1000 a 1200	0,3	0,7
<1000	0,2	0,8

Fonte: (Autor, 2022) – Adaptado da IEC 60034-2-3.

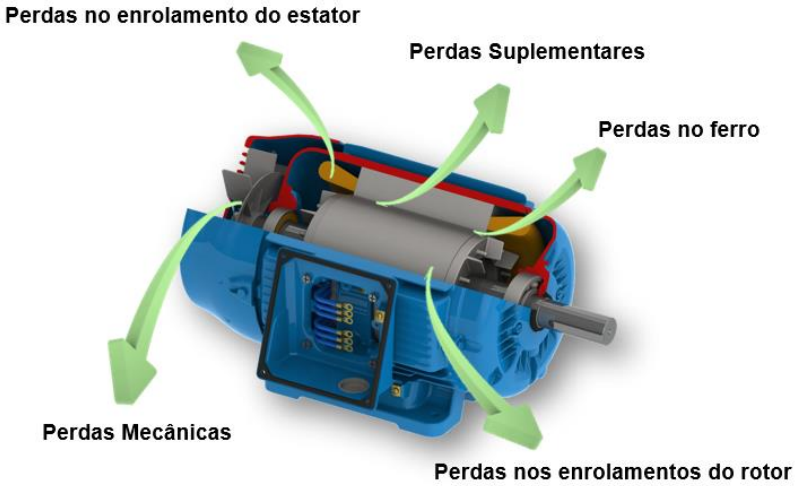
As perdas suplementares em carga (P_{sup}) são todas as perdas não classificadas anteriormente e que crescem com a carga do motor. Alguns dos fatores causadores de tais perdas são: irregularidades do entreferro, fluxo de dispersão, a distribuição não uniforme da corrente, imperfeições mecânicas, etc. De acordo com a norma IEC 60034-2-3 as perdas suplementares podem ser divididas em duas partes: as perdas proporcionais a frequência e ao quadrado do torque e as perdas

suplementares causadas pela corrente Foucault e, portanto, proporcionais ao quadrado da frequência e torque (YAMACHITA, 2013).

As perdas harmônicas (P_{harm}) são as perdas devido à alta frequência que são causadas pela alimentação não senoidal oriunda do inversor de frequência e não estão presentes quando o motor é alimentado por uma tensão senoidal. A alta frequência da tensão fornecida pelo inversor, que basicamente é dependente da frequência de comutação e controle do inversor, cria correntes de alta frequência nos enrolamentos que aumentam as perdas do motor elétrico (IEC, 2020).

Esta classificação é utilizada na separação de perdas em ensaios de máquinas elétricas sendo útil para comparação entre os resultados obtidos nos ensaios e os simulados. A Figura 06 representa um esquema de motor de indução trifásico, com as perdas que ocorrem em seu interior.

Figura 06 - Localização das perdas em um motor elétrico



Fonte: (Autor, 2022).

Entretanto, para a determinação das perdas é importante observar que, com exceção das perdas mecânicas, as componentes são oriundas dos fenômenos básicos que são as perdas magnéticas nas lâminas que compõem o estator e rotor e a perda ôhmica nos condutores. A perda magnética consiste na perda por histerese e a perda ôhmica devido a corrente parasita. A componente de perdas suplementares em carga é oriunda de todas as perdas eletromagnéticas como resultado das particularidades construtivas da máquina elétrica, como as aberturas das ranhuras no

entreferro e a distribuição dos enrolamentos de maneira não senoidal. As perdas suplementares acontecem independentemente do nível de carga do motor (RUTHES, 2019).

A Tabela 05 apresenta uma correlação entre as componentes de perdas clássicas e os fenômenos que lhes originam. Mesmo as perdas harmônicas, que ocorrem nas máquinas elétricas quando alimentadas por inversores de frequência, são oriundas de dois fenômenos citados anteriormente. Entretanto, neste caso, o agente causador é o conjunto de harmônicos temporais de tensão e corrente. Deste modo, como as perdas suplementares, também ocorrem independente do ponto de operação da máquina elétrica (RUTHES, 2019).

Em (LIPO, 1996), teoricamente, todas as perdas eletromagnéticas podem ser calculadas através das equações de Maxwell, determinando-se os campos magnéticos e elétricos em todos os pontos do material magnético e dos condutores. Este procedimento exigiria muito recurso computacional e é, ainda nos tempos atuais uma tarefa árdua. Uma alternativa é considerar as perdas como causadas por fenômenos independentes e separados. Cada fenômeno pode ser tratado fisicamente de maneira mais simplória. Os parâmetros físicos podem então serem simplificados a um conjunto de elementos, como reatâncias e resistências, e serem usados em circuito equivalente. Infelizmente, os efeitos das perdas não são independentes, uma vez que a saturação torna os fenômenos não lineares (RUTHES, 2019).

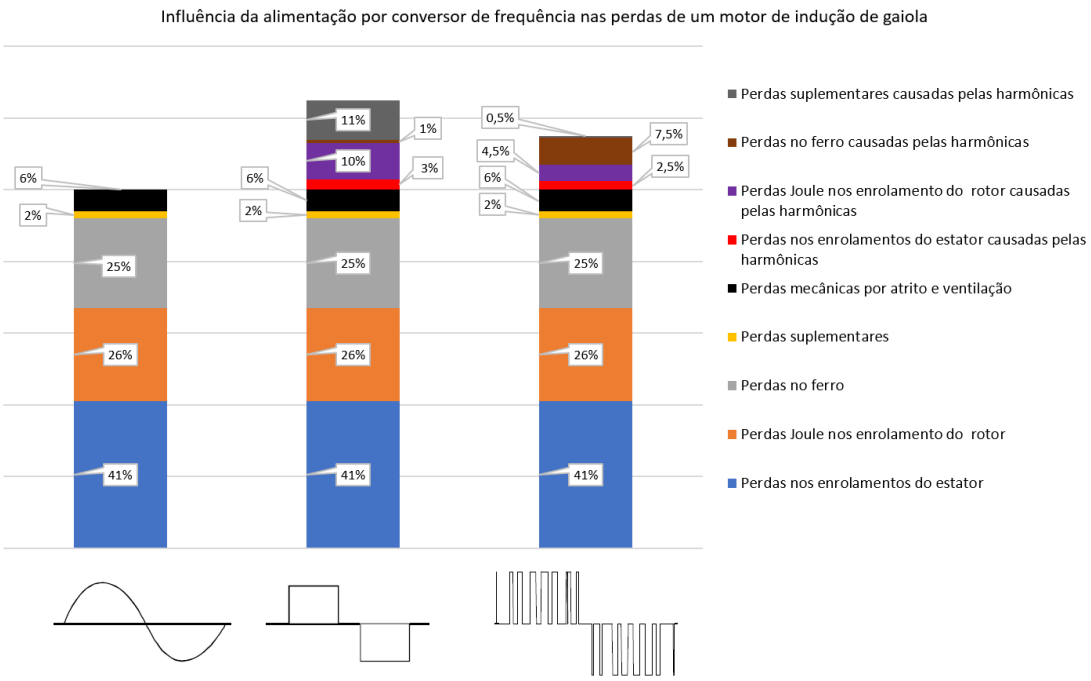
Tabela 05 - Correlação entre componentes de perdas x fenômenos

Componentes de perdas		Fenômenos		
		Ôhmico	Magnético	Mecânicos
Fundamentais	P_{j1}	X		
	P_{j2}	X		
	P_{Fe}	X	X	
	P_{mec}			X
Harmônicos	P_{sup}	X	X	
	P_{harm}	X	X	

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado de (RUTHES, 2019)

A norma IEC 60034-25, através da Figura 07, apresenta um exemplo do aumento das perdas em um motor, carcaça 315 M e *design* N, devido às componentes harmônicas oriundas do inversor de frequência com o motor operando em condições nominais de velocidade e torque, e é possível identificar que as perdas com mais representatividade são as perdas nos enrolamentos do estator (P_{j1}) e rotor (P_{j2}); e a perda ferro (P_{Fe}) para os casos de alimentação senoidal e não senoidal, respectivamente.

Figura 07 - Influência da alimentação por conversor de frequência nas perdas de um motor de indução de gaiola operando com valores nominais de torque e velocidade



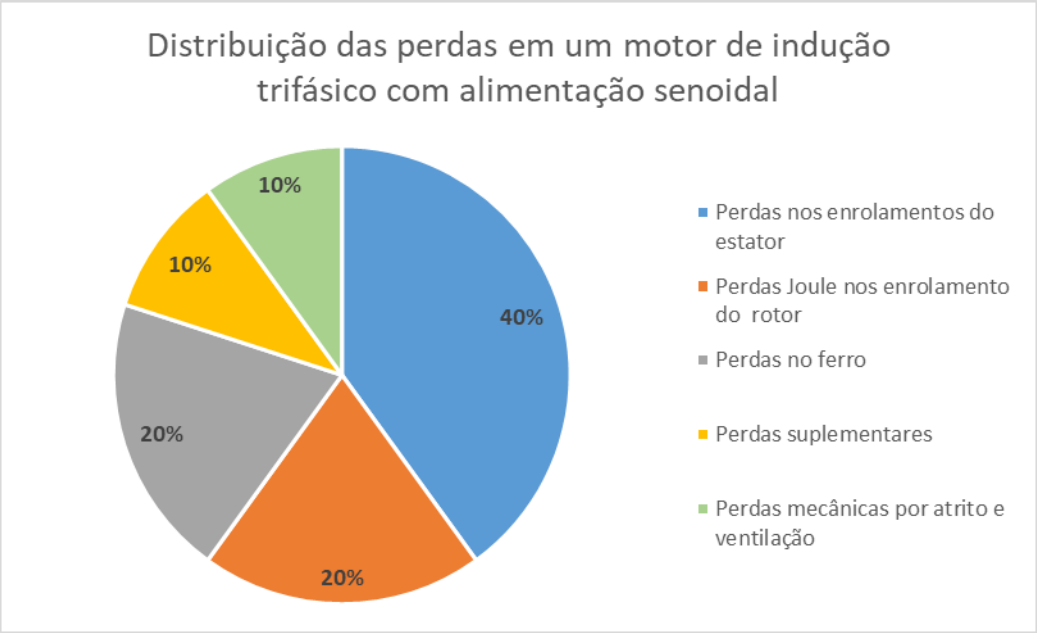
Eficiência	95,3%	94,2%	94,6%
Perdas	100%	125%	115%

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado de (IEC, 2014)

Segundo BORTONI, HADDAD e YAMACHITA (2007) a distribuição das perdas no motor varia de acordo com a sua carga. A Figura 08 apresenta a relação de proporção e distribuição média das perdas em motor operando em condições nominais e com alimentação senoidal. Entretanto, quando operando fora da condição nominal, a distribuição percentual das perdas é totalmente diferente, uma vez que o valor absoluto de cada componente varia significativamente. A Figura 09 apresenta a evolução típica das perdas de um motor com potência nominal de 15cv, de projeto

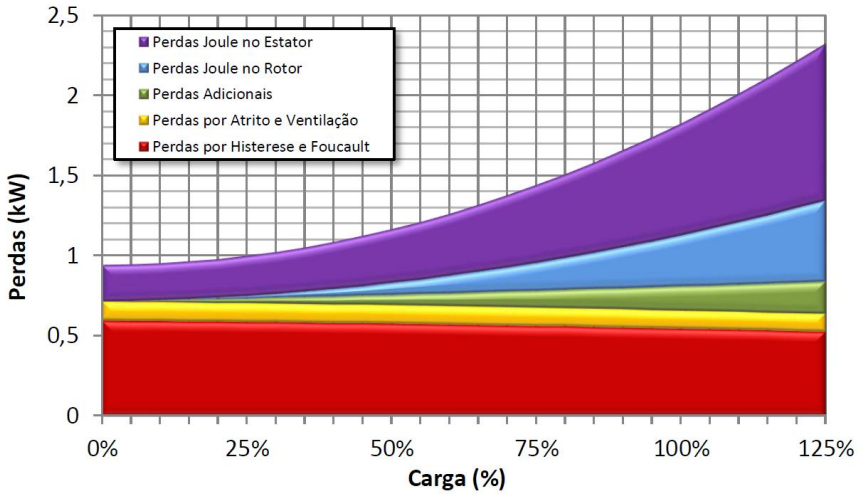
padrão, em função da potência disponível na ponta de eixo. Nota-se que embora os valores percentuais das perdas variam conforme a potência disponível, a soma das perdas ferro e mecânica e suplementares permanecem praticamente constante, enquanto as perdas nos enrolamentos do estator e rotor variam quadraticamente com a carga.

Figura 08 - Distribuição das perdas em um motor de indução trifásico com alimentação senoidal



Fonte: (Autor, 2022) Adaptado de (BORTINI, HADDAD, YAMACHITA 2007)

Figura 09 - Perdas em função da carga

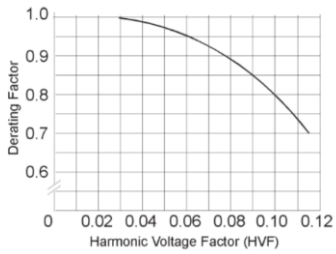


Fonte: (BORTINI, HADDAD, YAMACHITA 2007)

Na literatura é possível encontrar diversos estudos de casos apresentando os efeitos da alimentação oriunda do inversor de frequência no aumento das perdas do motor elétrico como em KIM, JUN, MOON e JUNG (2018), onde é apresentado um estudo comparativo das perdas totais do motor elétrico quando operado com inversor de frequência e com alimentação senoidal. No estudo foi realizado o ensaio para a alimentações senoidais e através do inversor de frequência em um motor de 11 kW, 4 polos, para diferentes níveis de carga no motor e foi possível identificar o aumento das perdas totais no motor ensaiado. Em AARNIOVUORI (2016) é apresentado um estudo de caso do aumento de perdas devido ao uso do inversor de frequência para um motor de 37kW, 4 polos, em diferentes níveis de carga. Em KARAVASILIS (2008), é também apresentado um exemplo do aumento das perdas de um motor elétrico de 2500cv, 4 polos, quando acionado por inversor de frequência em diferentes níveis de carga. É importante perceber que, independentemente da potência do motor elétrico, a literatura aponta que há um aumento nas perdas totais do motor e consequentemente uma redução no seu rendimento em todos os pontos de operação.

Atualmente não há uma padronização definindo os valores aceitáveis de perdas para os níveis de tensão e harmônicas de correntes. Entretanto, as normas internacionais citam que pode ocorrer aumento nas perdas devido ao uso de alimentação não senoidal. Por exemplo, a norma NEMA MG1, em sua parte 30, apresenta uma diminuição no torque para evitar o aquecimento de um motor projetado para operação com alimentação senoidal quando alimentado por inversor de frequência, em função das correntes harmônicas oriundas da tensão não senoidal ao qual o motor estará submetido. Como as perdas são fontes de calor, a redução do torque indicada pela norma visa compensar termicamente o aumento da temperatura de operação que as harmônicas provenientes do inversor causariam, evitando dessa forma a redução da vida útil do motor. A Figura 10 apresenta a curva de redução de torque para as tensões harmônicas (PIRES, 2008).

Figura 10 - Curva de redução de torque para tensões harmônicas



The harmonic voltage factor (HVF) is defined as follows:

$$\sqrt{\sum_{n=5}^{n=\infty} \frac{V_n^2}{n}}$$

Where:

n = order of odd harmonic, not including those divisible by three

V_n = the per unit magnitude of the voltage at the nth harmonic frequency

Fonte: (NEMA, 2022).

2.3.1. Considerações em relação a eficiência quando acionado por inversor de frequência

A carência de normas internacionais que determinam procedimentos para avaliar o sistema motor elétrico + inversor de frequência em relação a eficiência permitem que os testes sejam efetuados de diferentes maneiras e às vezes contestáveis. Portanto, os resultados obtidos não deveriam influenciar o aceite ou não do motor pelo usuário. A experiência apresenta a efetividade das seguintes considerações (WEG, 2018):

A. Motor elétrico alimentado com alimentação não senoidal apresentará um nível de eficiência menor quando comparado com um motor alimentado por uma tensão puramente senoidal, devido ao aumento de perdas causadas pelas harmônicas;

B. Frequências de chaveamento elevadas aumentam a eficiência do motor elétrico e reduzem a eficiência do inversor;

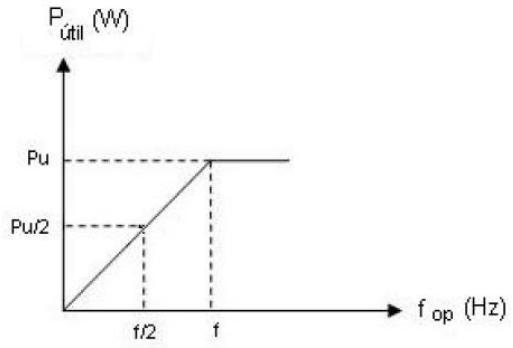
C. Motores elétricos com alta eficiência mantêm eficiência elevada quando comparado com motores de baixa eficiência, quando ambos são alimentados por alimentação não senoidal.

2.3.2. Influência da variação de velocidade na eficiência do motor

Os efeitos da variação de velocidade na eficiência dos motores elétricos podem ser entendidos através do comportamento da potência consumida e sua

relação com a velocidade de operação. A Figura 11 apresenta a relação entre potência e frequência (ver Equações (6) e (7)), supondo que a frequência base na Figura 11 é 60Hz.

Figura 11 - Curva típica de operação motor com variação de velocidade



Fonte: (WEG, 2018).

$$P_{60Hz} = P_u \tag{6}$$

$$P_{30Hz} = \frac{P_u}{\frac{60}{30}} = 0{,}5P_u \tag{7}$$

Considerando que as perdas estão concentradas nas perdas do enrolamento do estator e rotor ($P_{j1} + P_{j2}$) e nas perdas no ferro (P_{Fe}), e assumindo que as perdas nos enrolamentos do estator e rotor prevalecem, portanto, a eficiência reduz em baixas velocidades, quando a potência do motor é reduzida e apesar da ligeira diminuição das perdas no ferro (dependente da frequência), as perdas nos enrolamentos (dependentes do quadrado da corrente) são mantidas quase constantes para uma carga de torque constante, de modo que não há variação significativa das perdas globais. A eficiência é dada pela Equação (8):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum perdas} \tag{8}$$

E, de acordo com exposto, pela Equação (9) e considerando que as perdas nos enrolamentos são superiores a perda no ferro como exposto na Equação (10):

$$\sum perdas \cong \mathrm{P}_{j1} + \mathrm{P}_{j2} + \mathrm{P}_{Fe} \quad (9)$$

$$\left(\mathrm{P}_{j1} + \mathrm{P}_{j2}\right) > \mathrm{P}_{Fe} \quad (10)$$

Então, pode-se concluir que os resultados da redução de velocidade são dados pela Equação(11) e (12):

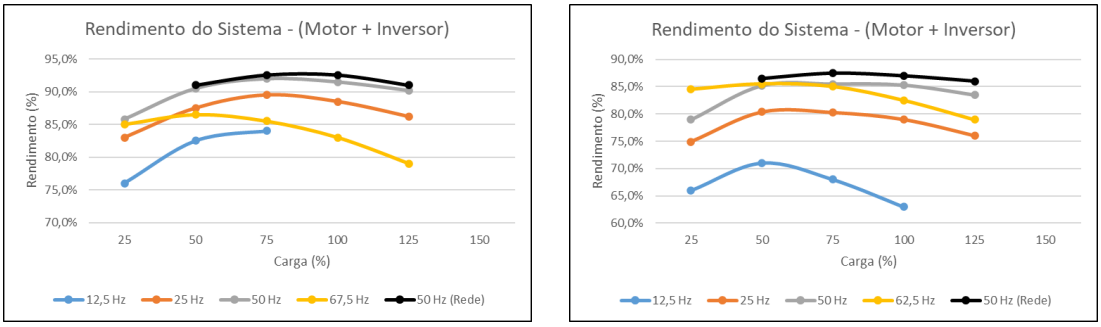
$$\downarrow P_{Fe} + (P_{j1} + P_{j2}) \cong constante\ (P_{Fe} \ll (P_{j1} + P_{j2})) \quad (11)$$

$$\sum perdas \cong constante \quad (12)$$

Portanto, quando menor a potência consumida do motor elétrico menor será a eficiência.

Há alguns exemplos práticos na literatura que podem exemplificar as considerações indicados neste capítulo. A Figura 12 (a) apresenta um caso de um motor de 55kW-6P-400V-50Hz e a Figura 12 (b) apresenta um caso de um motor de 11kW-4P-400V-50Hz.

Figura 12 - Rendimento do Sistema (Inversor + Motor) com variação de velocidade



(a) 55kW 6 Polos 400V 50Hz (b) 11kW 4 Polos 400V 50Hz

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado de (WEG, 2018).

3. REGULAMENTAÇÕES GLOBAIS DE EFICIÊNCIA PARA MOTORES ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO

Como consequência da necessidade de redução do consumo de energia, diversos governos têm implementado medidas regulatórias, conhecidas como as MEPS (*Minimum Energy Perfomance Standard*), para diversos equipamentos, incluindo motores elétricos. Essas regulamentações são baseadas em normas técnicas emitidas pelas entidades de classes como, por exemplo, a IEC para o mercado europeu, IEEE/NEMA para o mercado norte americano e ABNT para o mercado brasileiro. Neste capítulo serão abordadas as principais normas para determinação de eficiência de motores elétricos. As normas MEPS são constantemente atualizadas e cada vez mais as normas regulamentadoras dos países vêm incluindo o nível mínimo de eficiência quando o motor é que também possam operar com inversor de frequência.

A IEC em 2020 em um movimento de vanguarda emitiu a norma 60034-30-2 que determina as classificações de eficiência de motores quando acionados por inversor de frequência. A norma deve ser a base para que outras entidades técnicas como ABNT e IEEE/NEMA também emitam normas técnicas para classificação de eficiência dos motores elétricos quando acionado por inversor de frequência.

A Figura 13 apresenta os requisitos MEPS para a União Europeia atual e a legislação que entrará em vigor em julho de 2023. A Figura 14 apresenta os requisitos MEPS para os Estados Unidos. A Tabela 06 apresenta os regulamentos vigentes e a norma utilizada para determinação do nível de rendimento dos motores trifásicos em diferentes países. Todos os regulamentos se baseiam em normas que determinam a classe de eficiência para motores elétricos alimentados com tensão puramente senoidal.

Figura 13 - Requisitos MEPS para o mercado Europeu

	NOVO 07/2023				
Regulamento	Regulation EU 1781/2019				
Norma	IEC 60034-30-1				
Sistema fornecedor de energia	Trifásico				Monofásico
Nível mínimo de eficiência	IE3	IE2	IE4	IE2	IE2
Nível mínimo de eficiência quando apto a operar com inversor de frequência	IE3	IE2	IE4	IE2	Não aplicável
Potência (kW)	0,75 até 1000 kW	0,12 a <0,75 kW	75 a 200 kW	0,12 até 1000 kW	
Polaridade	2, 4, 6 e 8		2, 4 e 6	2, 4, 6 e 8	
Tensão (V)	até 1000 V				
Frequencia (Hz)	50 Hz ou 60 Hz				
Regime de serviço	S1, S3 ≥ 80% ou S6 ≥ 80%				
Metodo de refrigeração	TEFC, TEBC, ODP, TEAO				
Grau de proteção	IP 00 até IP 66				
Classificação de área	Área segura e classificada (Ex ec, Ex tc, Ex tb, Ex db, Ex dc, Ex db eb)		Área segura	Área classificada (Ex eb)	Área segura e classificada
Altitude	Até 4000 m				
Temperatura ambiente	-30 a 60 ºC				
Documentação requerida	Auto declaração				

Fonte: (WEG, 2022)

Figura 14 - Requisitos MEPS para os Estados Unidos

Regulamento	DOE 10 CFR Part 431 - Subpart X - Small Electric Motors	DOE 10 CFR Part 431 - Subpart B - Electric Motors
Norma	IEEE Std 114-2010, IEEE Std 112-2004, CSA C390-10, CSA C747-09	IEEE Std 112-2004, CSA C390-10
Sistema fornecedor de energia	Monofásico ou Trifásico	Trifásico
Nível mínimo de eficiência	Premium	NEMA Premium
Nível mínimo de eficiência quando apto a operar com inversor de frequência	Não aplicável	NEMA Premium
Potência (kW)	0.25 a 3 HP (0,18 até 2,2 kW) *	1 a 500 HP (0,75 até 375 kW)**
Polaridade	2, 4 e 6	2, 4, 6 e 8
Tensão (V)	Todas	até 600 V
Frequencia (Hz)	60 Hz ou 50/60 Hz	
Regime de serviço	S1	
Metodo de refrigeração	ODP	TEFC, ODP, TENV, TEBC
Grau de proteção	Todos	
Classificação de área	Área segura	Área segura e classificada
Altitude	Todos	
Temperatura ambiente	Todos	
Documentação requerida	Certificado	

Nota:
**Aplicável para as carcaças NEMA 42, 48 e 56 (IEC 63 e 71).*
***Aplicável para as carcaças a partir da NEMA 143 (IEC 90 e acima).*
**** Motores NEMA de até 5 kV podem receber a Marca NEMA Premium, desde que atendam aos valores mínimos estimados, mesmo que estejam fora do escopo DOE sem CC029A.*

Fonte: (WEG, 2022)

Tabela 06 - Regulamentos, normas e nível mínimo de eficiência quando apto a operar com inversor de frequência

País	Regulamento	Norma	Potência	Polaridade	Nível mínimo de eficiência quando apto a operar com inversor de frequência
Arábia Saudita	BOD (Board of Directors) MEETING N°163	SASO 2893:2018	0,75 até 375kW	2,4,6 e 8	IE1
Argentina	Disposición 230/2015	IRAM 62405:2012	0,75 até 30kW	2,4 e 6	IE0
Australia	GEMSAct of 2019	IEC 60034-30-1	0,73 até 185kW	2,4,6 e 8	IE2
Brasil	Portaria nº01/2017	ABNT NBR17094-1	0,12 até 370kW	2,4,6 e 8	IR3
Canadá	Amendment 13 to Energy Efficiency Regulations - Electric Motors	IEEE Std112-2004, CSAC390-10	0,75 até 375kW	2,4,6 e 8	NEMA Premium
Chile	NCh 3086 de 2008	IEC 60034-30-1	0,75 até 7,5kW	2,4 e 6	IE2
China	CEL 007:2021	GB 18613-2020	0,12 até 1000kW	2,4,6 e 8	GB3(IE3)
Cingapura	Energy Conservation Act (Cap.92C)	IEC 60034-2-1	0,75 até 375kW	2,4 e 6	IE3
Colômbia	RETIQ 2015	Resolução nº4 1012:2015	0,75 até 375kW	2,4,6 e 8	IE2
Equador	RTE INEN 145	IEC60034-30-1	0,746 até 373kW	2,4,6 e 8	IE2
India	The Gazette of India S.O.178	IS 12615:2018	0,12 até 1000kW	2,4,6 e 8	IE2
Inglaterra	Statutory Instrument 2021 No.745	IEC 60034-30-1	0,75 até 1000kW	2,4,6 e 8	IE3
México	NOM-016-ENER-2016	NOM-016-ENER-2016	0,75 até 375kW	2,4,6 e 8	NEMA Premium
Nova Zelândia	GEMSAct of 2019	IEC 60034-30-1	0,73 até 185kW	2,4,6 e 8	IE2
Peru	Decreto Supremo N°009-2017-EM	Lei 27345-2000	0,75 até 375kW	2,4 e 6	IE1
Ucrânia	Decree N°157, Resolution N°804 and Resolution N°1184	IEC 60034-2-1	0,75 até 375kW	2,4 e 6	IE2

Fonte: (Autor, 2022)

3.1. IEC 60034-30-1

A norma IEC 60034-30-1 estabelece os níveis de eficiência para motores elétricos de velocidade única que são cobertos pelas normas IEC 60034-1 ou IEC 60079-0. Na revisão emitida em 2014, o escopo foi ampliado e, com a nova revisão a classificação de eficiência foi ampliada para motores com potência de 0,12kW a 1000kW, e todas as tecnologias de motores elétricos são cobertos desde que possam

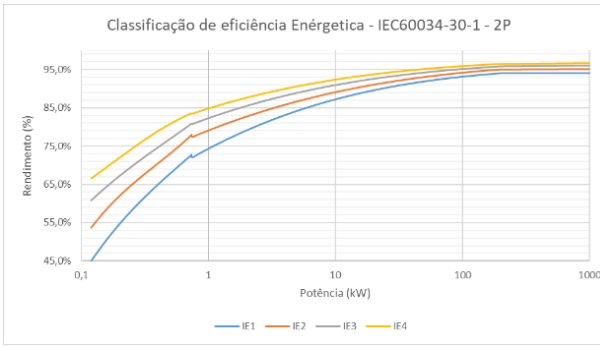
operar com alimentação senoidal e não apenas motores trifásicos com gaiola de esquilo, como na primeira edição.

A classificação de eficiência da norma 60034-30-1 é relacionada às perdas quando em operação com alimentação senoidal e a determinação da eficiência deve ser de acordo com a norma IEC 60034-2-1.

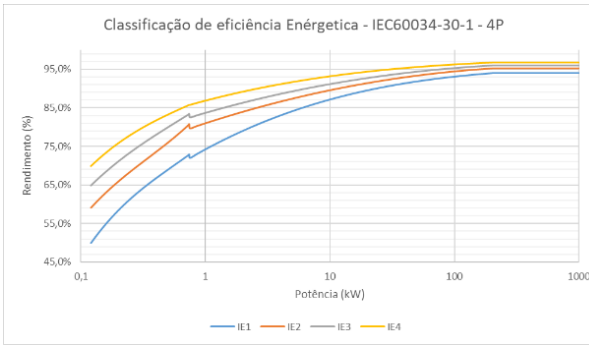
A norma IEC 60043-30-1 indica que motores operados com inversor de frequência podem possuir perdas maiores devido às perdas harmônicas, e que os níveis de eficiência para esta condição serão abordados na parte dois desta norma.

Na Figura 15 é apresentado o nível de eficiência necessário para motores em 50 Hz com o nível IE1 sendo nível de menor rendimento e o nível IE4 o nível com o rendimento mais elevado. A norma determina que a tolerância deve ser de acordo com a IEC 60034-1.

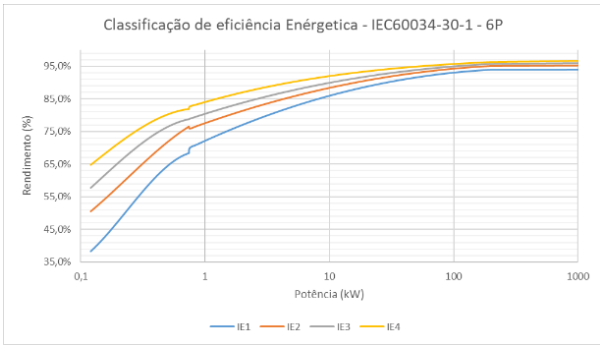
Figura 15 - Classificação de eficiência de acordo com a IEC 60034-30-1 - 50 Hz



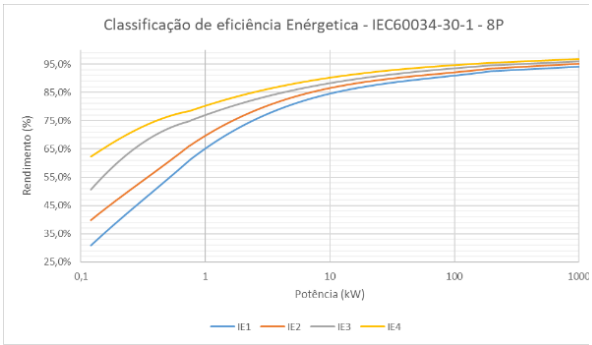
(a) 2 Polos



(b) 4 Polos



(c) 6 Polos



(d) 8 Polos

Fonte: (Autor, 2022) – Adaptado da IEC 60034-30-1.

Nem toda tecnologia de motor elétrico será capaz de alcançar os níveis de eficiência determinados pela norma ou serem economicamente viáveis. Portanto, a

IEC 60034-30-1 apresenta a Tabela 07 que indica o potencial que cada tecnologia pode alcançar em relação ao nível de eficiência determinado. O nível de eficiência IE5 está previsto para ser incorporado na próxima edição da norma, e a meta é uma redução de 20% das perdas em relação ao IE4. A tecnologia de motores IE5 ainda não está totalmente desenvolvida e ainda não está comercialmente disponível.

Tabela 07 - Tecnologia de motores elétricos e seu potencial de classificação de eficiência

Tecnologia		IE1	IE2	IE3	IE4	IE5
Trifásico Rotor de gaiola de esquilo	Bobinagem Randômica (todos graus de proteção e potência)	Sim	Sim	Sim	Difícil	Não
	Bobinagem Pré-Formada (Motores Abertos) IP2X	Sim	Sim	Difícil	Não	Não
	Bobinagem Pré-Formada IP4X e superiores	Sim	Sim	Sim	Difícil	Não
Trifásico - Rotor Bobinado		Sim	Sim	Sim	Difícil	Não
Monofásicos Rotor de Gaiola	Capacitor de partida	Difícil	Não	Não	Não	Não
	Capacitor Permanente	Sim	Difícil	Não	Não	Não
	Capacitor de partida + Capacitor Permanente	Sim	Difícil	Não	Não	Não
	Fase dividida	Difícil	Não	Não	Não	Não
Síncronos	Line Start permanent Magnet	Sim	Sim	Sim	Difícil	Não

Fonte: (Autor, 2022) – Adaptado da IEC 60034-2-1.

3.2. IEC 60034-30-2

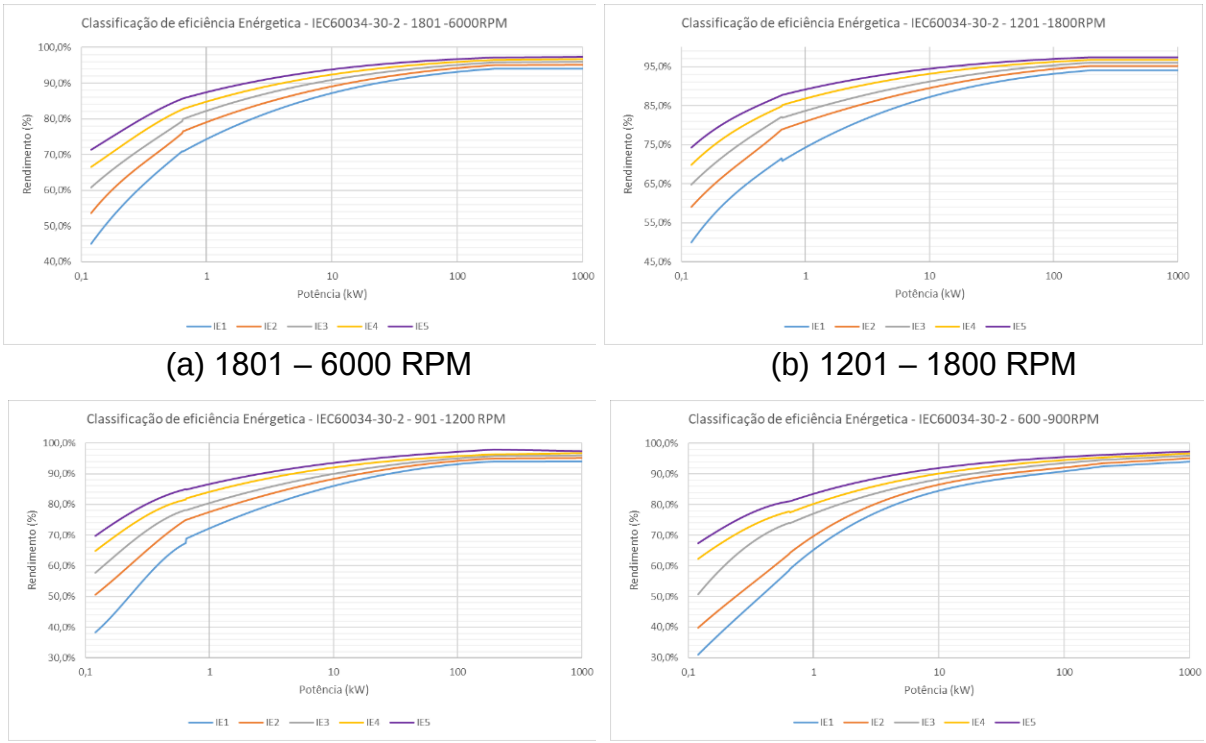
Em 2016, a IEC emitiu a norma 60034-30-2. Essa norma determina as classes de eficiência de motores acionados com tensão e frequência variável, denominados de indução ou síncronos, que não são cobertos pela norma IEC 60034-30-1 e ela está em harmonia com a norma IEC 61800-9-2, que define a classificação energética IE que é aplicada em conversores de frequências e PDS (*Power Driver System*). Essa norma é aplicada somente a motores elétricos com potência de 0,12kW a 1000kW, tensão nominal de 50V até 1000V, velocidade de 600 RPM até 6000 RPM, independentemente da quantidade de polos magnéticos, método de refrigeração IC410, IC411, IC416 ou IC418 de acordo com a norma IEC 60034-6, capaz de operar

de maneira contínua no seu ponto de operação com elevação de temperatura dentro dos limites da classe térmica do motor, e projetado para operar dentro da faixa de temperatura de -20ºC até 60ºC e altitude até 4000m.

A norma indica as classes de eficiência baseadas em uma temperatura ambiente de 25ºC e altitude de 1000m. A norma não apresenta distinção entre tecnologias de motores elétricos, tensão ou motores com nível de isolamento superior, ainda que essas tecnologias não possam alcançar níveis elevados de eficiência. Isto permite que diferentes tecnologias possam ser comparadas em relação ao seu potencial de eficiência energética. A norma determina que a tolerância deve ser de acordo com a IEC 60034-1.

A norma também apresenta os valores de rendimento IE5, que não são indicados na 60034-30-1. Na Figura 16 é apresentado o nível de eficiência necessário para atendimento das classificações indicadas, sendo o IE1 o nível de menor rendimento e o nível IE5 o nível com o rendimento mais elevado.

Figura 16 - Classificação de eficiência de acordo com a IEC 60034-30-2



(a) 1801 – 6000 RPM (b) 1201 – 1800 RPM

(c) 901 – 1200 RPM (d) 600 – 900 RPM

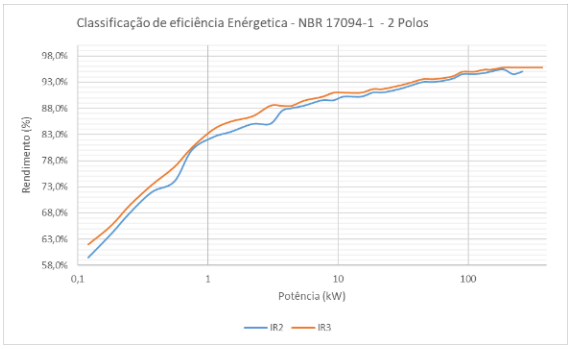
Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da IEC 60034-30-2.

3.3. ABNT NBR 17094-1

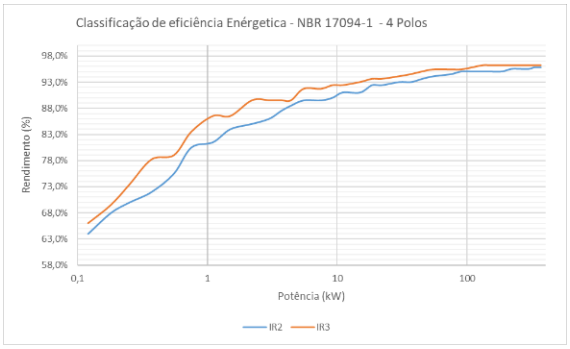
Em 2018, a ABNT emitiu a terceira edição da norma 17094-1, sob o título geral de “Máquinas elétricas girantes”. A norma estabelece o nível de rendimento mínimo necessário para as classes de rendimento IR2 e IR3. A norma foi utilizada como parâmetro na Portaria Interministerial nº 01 de 2017 para estabelecer os níveis de eficiências nominais mínimos para comercialização de motores elétricos no Brasil.

A classificação de eficiência é aplicada a motores de indução de gaiola, trifásicos, com frequência de 60Hz ou 50Hz operando em 60Hz, tensão nominal igual ou inferior a 1000V, qualquer forma construtiva e polaridade 2, 4, 6 e 8 polos. A Figura 17 apresenta os níveis de eficiência estabelecidos pela norma NBR 17094-1.

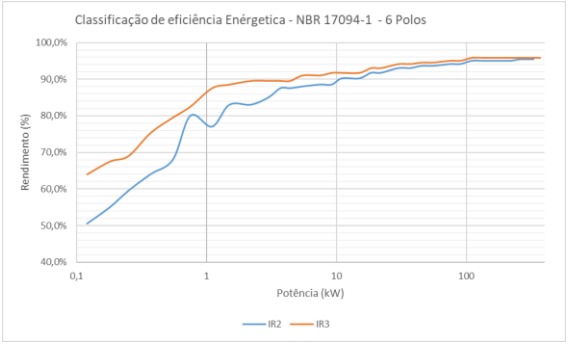
Figura 17 - Classificação de eficiência de acordo com a NBR 17094-1



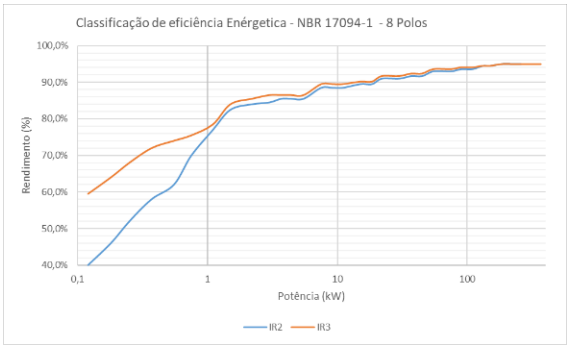
(a) 2 Polos



(b) 4 Polos



(c) 6 Polos



(d) 8 Polos

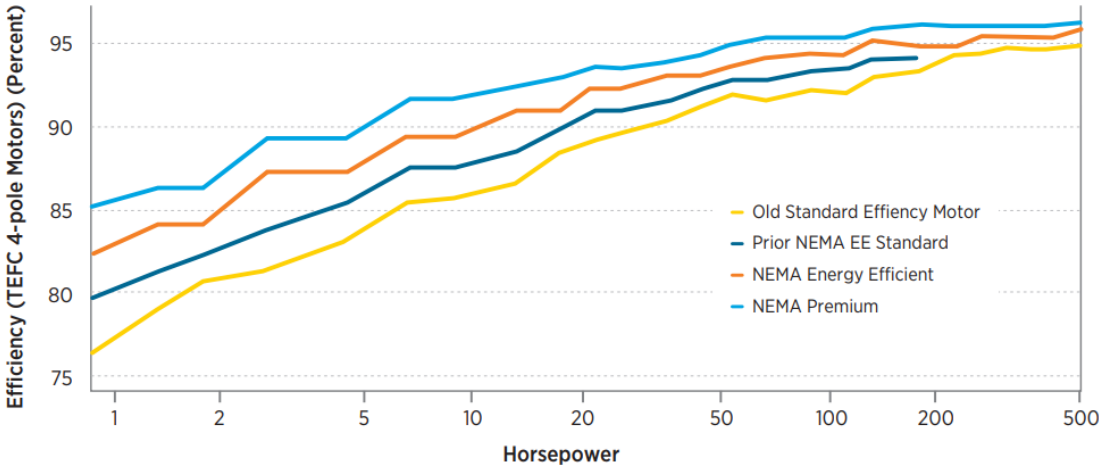
Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da ABNT 17094-1.

3.4. NEMA MG 1

Em agosto de 2001, a NEMA adotou o nível de eficiência NEMA PREMIUM como o padrão do nível de eficiência para motores elétricos. Esse nível de eficiência

é maior que o valor mínimo de eficiência anteriormente aplicado desde 1992. A Figura 18 apresenta o nível de eficiência mínimo e premium para motores 4 polos e frequência de 60 Hz. A Figura 18 indica que a eficiência aumenta com o aumento da potência nominal do motor. Também indica que o potencial para melhoria da eficiência é maior nos motores de menor potência. A Tabela 08 apresenta um comparativo entre as classes de eficiência da NEMA, ABNT e IEC.

Figura 18 - Classificação de Eficiência de acordo com a NEMA MG 1



Fonte: (US Department of Energy, 2014).

Tabela 08 – Comparativo entre as classes de eficiência da NEMA, ABNT e IEC

NEMA	ABNT	IEC
Premium Efficiency	IR3	IE3
Energy Efficient	IR2	IE2
Standard Efficiency		IE1

Fonte: (Autor, 2022)

4. IEC 60034-203 - NORMA PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM MOTORES ELÉTRICOS QUANDO ACIONADOS POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Há diversas normas nacionais e internacionais para 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. Isto causa uma dificuldade aos usuários visto que é difícil comparar as características e resultados. Esse obstáculo é ainda maior quando os motores são alimentados por inversores de frequência, visto a ausência de normas para essa condição. Portanto, a norma IEC 60034-2-3 foi emitida para harmonizar e simplificar os procedimentos de testes para determinação da eficiência e sua respectiva tolerância na condição de alimentação não senoidal. Neste capítulo será realizada uma análise técnica destes procedimentos.

O objetivo da norma é definir o método de ensaio para determinar as perdas totais, incluindo as perdas devido à componente harmônica, e consequentemente, a eficiência de motores alimentados por inversores de frequência. A norma apresenta os sete pontos normalizados para determinação das perdas e eficiência. A norma também apresenta um procedimento para interpolação para calcular as perdas e eficiência em cada ponto de operação. A norma é aplicável a qualquer motor elétrico de corrente alternada, síncrono ou assíncrono enquadrados na norma IEC 60034-1 que são alimentados com variação de frequência e tensão. A norma cita que a experiência tem demonstrado que as perdas devidas às componentes harmônicas do inversor são praticamente constantes em todo faixa de operação desde que a frequência de chaveamento se mantenha constante.

4.1. INSTRUMENTAÇÃO

A norma indica que o motor elétrico, quando em carga, apresenta pequenas flutuações na potência de saída e em outras variáveis podem ocorrer e devem ser evitadas. Portanto, para cada ponto de medição, recomenda-se que a aquisição dos valores de rotação, torque e potência consumida devem ser automaticamente adquiridos por pelo menos 15 segundos e no máximo 60 segundos e a média deve ser utilizada para determinação da eficiência. Para a aquisição da corrente e tensão devem ser consideradas a média aritmética da corrente e tensão de linha. Para a medição de temperatura, um sensor de temperatura instalado no ponto mais quente

do estator pode ser utilizado como descrito na norma IEC 60034-2-1. Equipamentos digitais devem ser utilizados sempre que possível.

A instrumentação para medição da potência e corrente do motor deve basicamente atender os requerimentos da norma 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% da potência nominal ou melhor. 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 melhor ou igual 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.

A instrumentação para medição da frequência de alimentação deve ter precisão de ±0,1% de fundo de escala. Para medição da velocidade deve ter precisão de 0,1 rotação por minuto para velocidades até 3000 RPM e 0,03% para velocidades superiores.

4.2. SETUP

Para os testes utilizando inversores de frequência, o inversor deve ser parametrizado de acordo com os requerimentos normativos, ou se o teste será 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.

As seguintes condições devem ser utilizadas para verificação do atendimento das regulações de eficiências governamentais, particularmente em 90% da velocidade e 100% do torque. Para outros propósitos, incluindo o procedimento de interpolação, a configuração original do sistema deve ser utilizada.

- ✓ 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, 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 significante no ponto nominal.

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

4.3. MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA EM MOTORES ALIMENTADOS POR INVERSORES DE FREQUÊNCIA

A Tabela 09 apresenta os métodos normalizados para verificação das perdas e eficiência. O método 2-3-A é o mandatório para verificação da eficiência nominal declarada pelo fabricante e poderá ser solicitada pelos usuários e órgãos reguladores.

Tabela 09 - Métodos de ensaios conforme norma IEC 60034-2-3

Ref.	Método	Cláusula	Equipamentos
2-3-A	Direto	6.2	Dinamômetro ou conversor de torque
2-3-B	Somatório das perdas	6.3	Alimentação senoidal e inversor na condição sem carga
2-3-C	AEDM	6.4	Modelo analítico e ferramentas de cálculos
2-3-D	Determinação da eficiência por cálculo	6.5	Padrões e ferramentas de cálculos

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da IEC 60034-2-3.

4.3.1. Método 2-3-A - Direto

Neste método a potência mecânica P_{2c} do motor elétrico é determinada pela medição do torque e da velocidade, e a potência elétrica P_{1c} do estator é medida no mesmo teste.

Os testes devem ser conduzidos com o inversor e os motores com os seus componentes montados visando obter as condições de testes as mais próximas possíveis das condições nominais de operação. Conforme descrito na norma IEC 60034-2-1, o dispositivo para medição do torque deve estar com *offset* zerado. Os motores elétricos devem operar até o equilíbrio térmico. O equilíbrio térmico é atingido quando a variação de temperatura é menor que 1°C por meia hora. Ao atingir o equilíbrio térmico deve-se anotar os valores de:

T_c Torque na ponta de eixo (Nm).

n Velocidade (RPM).

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

Quando realizar a medição em diferentes pontos, o dispositivo para medição de torque deve ter o seu *offset* checado somente após a medição do último ponto.

Para o cálculo da potência de saída deve utilizar a equação:

$$P_{2c} = \frac{2.\pi}{60}.T_c.n \tag{13}$$

Para o cálculo da eficiência deve-se utilizar a equação:

$$\eta = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} \tag{14}$$

4.3.2. Método 2-3-B - Somatório das Perdas

As perdas adicionais devidas as componentes harmônicas causadas pelo inversor de frequência podem ser determinadas através do ensaio em vazio na frequência fundamental da rede e o teste a vazio com alimentação através do inversor

de frequência. As perdas devidas as componentes harmônicas são a diferença entre as perdas determinadas em ambos os testes. A fonte senoidal deve estar de acordo com a norma IEC 61000-2-4, classe 1. O inversor usado neste método deve ser o inversor específico para a aplicação final.

A sequência para realização do ensaio é:

- ✓ Realizar o ensaio a vazio com alimentação senoidal com tensão e frequência nominal para o ponto de operação de acordo com a norma IEC 60034-2-1 para apuração da constante de perdas $P_{c_{sin}}$.
- ✓ Realizar o ensaio a vazio com alimentação através do inversor com tensão e frequência designada para o ponto de operação para apuração da constante de perdas $P_{c_{con}}$.

As medições devem ser executadas imediatamente uma após a outra. A diferença entre as perdas na operação com inversor de frequência $P_{c_{con}}$ e as perdas com alimentação senoidal $P_{c_{sin}}$ é assumida como as perdas adicionais devido às componentes harmônicas, dada pela equação:

$$P_{LHL} = P_{C_{con}} - P_{C_{sin}} \tag{15}$$

As perdas adicionais devidas às componentes harmônicas P_{LHL} devem ser adicionadas às perdas fundamentais do motor determinadas com alimentação senoidal em acordo com a norma IEC 60034-2-1, de maneira a obter a eficiência quando alimentado por inversor de frequência. A eficiência quando operando com inversor de frequência é determinada pela equação:

$$\eta = \frac{\mathrm{P}_{2_{60034-2-1}}}{\mathrm{P}_{1_{60034-2-1}} + P_{LHL}} \tag{16}$$

4.3.3. Método 2-3-C - AEDM

Este método determina a eficiência através do uso de ferramentas algumas vezes referidas como modelo analítico. Diversos procedimentos são necessários para

qualificar este modelo, visto que os cálculos são influenciados pelas técnicas de fabricação que cada fabricante utiliza para qualificar o seu próprio modelo analítico. Para qualificação do modelo analítico as seguintes condições devem ser alcançadas:

- ✓ Uso do procedimento de teste de acordo com o método direto;
- ✓ O laboratório deve estar qualificado e ser confiável para realizar os ensaios com a acuracidade necessária;
- ✓ Diferentes tipos e modelos suficientes para serem testados e avaliados para provar que a ferramenta é confiável em todos os produtos;
- ✓ Uma amostra idêntica de cada modelo analítico deve ser testada para avaliar que a ferramenta é confiável para determinação da eficiência nominal;
- ✓ Todos os resultados devem ser baseados em uma análise estatística para garantir seu nível de confiança.

O modelo escolhido deve incluir a potência nominal, grau de proteção, velocidade, características elétricas e outras características físicas ou funcionais que afetem o consumo de energia ou eficiência.

4.3.4. Método 2-3-D - determinação da eficiência por cálculo

Em caso de motores elétricos com potência nominal maior que 2 MW, ou se a potência nominal do motor excede a capacidade de ensaio do laboratório, a determinação das perdas adicionais devido às componentes harmônicas causadas pelo inversor de frequência com base em cálculo pode ser um método alternativo para determinar a magnitude das perdas adicionais. Esse cálculo deve ser baseado nos padrões do inversor, nos parâmetros do circuito do motor elétrico dependentes da frequência e deve usar modelos capazes de determinar os efeitos em frequências elevadas.

4.3.5. Os sete pontos padronizados de operação

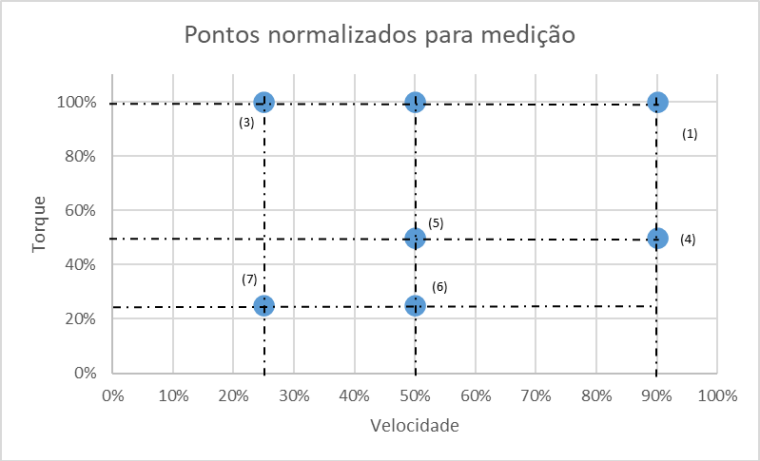
Deve-se realizar as medições nos sete pontos padronizados apresentados na Tabela 10, sendo a representação gráfica apresentada na Figura 19. As medições devem ser realizadas de modo subsequente e o mais rapidamente possível para mitigar variações de temperatura do motor elétrico durante o teste. Alternativamente, os pontos de medições podem ser medidos na seguinte ordem 1,4,2,5,6,3 e 7. Cada um dos sete pontos deve ser obtido com exatidão de ± 1 % da velocidade nominal e do torque.

Tabela 10 – Os pontos normalizados para medição

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

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da IEC 60034-2-3.

Figura 19 - Pontos Normalizados Para Medição



Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da IEC 60034-2-3.

As medidas P_{L1} a P_{L7} são as perdas medidas nos pontos de operação 1 ao 7 em relação à potência nominal.

As seguintes fórmulas devem ser utilizadas para determinar os coeficientes de interpolação:

$$C_{L1} = -\frac{25}{156}P_{L1} + \frac{529}{780}P_{L2} - \frac{12}{65}P_{L3} + \frac{25}{39}P_{L4} - \frac{103}{39}P_{L5} - \frac{56}{195}P_{L6} + \frac{192}{65}P_{L7} \quad (17)$$

$$C_{L2} = \frac{25}{26}P_{L1} - \frac{599}{390}P_{L2} + \frac{112}{195}P_{L3} - \frac{50}{13}P_{L4} + \frac{50}{13}P_{L5} + \frac{1792}{195}P_{L6} - \frac{1792}{195}P_{L7} \quad (18)$$

$$C_{L3} = -\frac{50}{39}P_{L1} + \frac{22}{13}P_{L2} - \frac{16}{39}P_{L3} + \frac{200}{39}P_{L4} - \frac{200}{39}P_{L5} - \frac{256}{39}P_{L6} + \frac{256}{39}P_{L7} \quad (19)$$

$$C_{L4} = -\frac{50}{13}P_{L1} + \frac{2542}{195}P_{L2} - \frac{1792}{195}P_{L3} + \frac{50}{13}P_{L4} - \frac{50}{13}P_{L5} - \frac{1792}{195}P_{L6} + \frac{1792}{195}P_{L7} \quad (20)$$

$$C_{L5} = \frac{200}{39}P_{L1} - \frac{152}{13}P_{L2} + \frac{256}{39}P_{L3} - \frac{200}{39}P_{L4} + \frac{200}{39}P_{L5} + \frac{256}{39}P_{L6} - \frac{256}{39}P_{L7} \quad (21)$$

$$C_{L6} = -2P_{L2} + 10P_{L5} - 8P_{L6} \quad (22)$$

$$C_{L7} = \frac{25}{39}P_{L1} - \frac{181}{195}P_{L2} + \frac{192}{65}P_{L3} - \frac{25}{39}P_{L4} - \frac{287}{39}P_{L5} + \frac{1616}{195}P_{L6} - \frac{192}{65}P_{L7} \quad (23)$$

A norma também indica que pode ser utilizada a Tabela 11 como uma alternativa para uma determinação analítica das constantes de interpolação. A representação gráfica dos pontos alternativos de medição é apresentada na Figura 20. Comparando-se com a Tabela 10, somente os pontos 1 e 4 são diferentes.

Tabela 11 - Os pontos alternativos para medição

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

Fonte: (Autor, 2022) Adaptado da IEC 60034-2-3.

As medidas P_{L1} a P_{L7} são as perdas medidas nos pontos de operação 1 ao 7 em relação a potência nominal.

Para os pontos de operação alternativa, as seguintes fórmulas devem ser utilizadas para determinar os coeficientes de interpolação:

$$C_{L1} = -\frac{1}{9}P_{L1} + \frac{28}{45}P_{L2} - \frac{8}{45}P_{L3} + \frac{4}{9}P_{L4} - \frac{22}{9}P_{L5} - \frac{8}{45}P_{L6} + \frac{128}{45}P_{L7} \quad (24)$$

$$C_{L2} = \frac{2}{3}P_{L1} - \frac{6}{5}P_{L2} + \frac{8}{15}P_{L3} - \frac{8}{3}P_{L4} + \frac{8}{3}P_{L5} + \frac{128}{15}P_{L6} - \frac{128}{15}P_{L7} \quad (25)$$

$$C_{L3} = -\frac{8}{9}P_{L1} + \frac{56}{45}P_{L2} - \frac{16}{45}P_{L3} + \frac{32}{9}P_{L4} - \frac{32}{9}P_{L5} - \frac{256}{45}P_{L6} + \frac{256}{45}P_{L7} \quad (26)$$

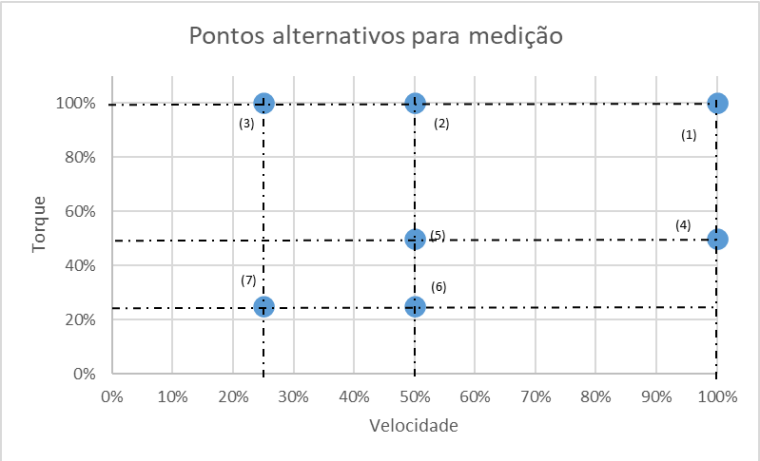
$$C_{L4} = -\frac{8}{3}P_{L1} + \frac{56}{5}P_{L2} - \frac{128}{15}P_{L3} + \frac{8}{3}P_{L4} - \frac{8}{3}P_{L5} - \frac{128}{15}P_{L6} + \frac{128}{15}P_{L7} \quad (27)$$

$$C_{L5} = \frac{32}{9}P_{L1} - \frac{416}{45}P_{L2} + \frac{256}{45}P_{L3} - \frac{32}{9}P_{L4} + \frac{32}{9}P_{L5} + \frac{256}{45}P_{L6} - \frac{256}{45}P_{L7} \quad (28)$$

$$C_{L6} = -2P_{L2} + 10P_{L5} - 8P_{L6} \quad (29)$$

$$C_{L7} = \frac{4}{9}P_{L1} - \frac{28}{45}P_{L2} + \frac{128}{45}P_{L3} - \frac{4}{9}P_{L4} - \frac{68}{9}P_{L5} + \frac{368}{45}P_{L6} - \frac{128}{45}P_{L7} \quad (30)$$

Figura 20 - Pontos Alternativos Para Medição



Fonte: (Autor, 2022)

4.3.6. Determinação analítica das perdas relativas em qualquer ponto de operação

Para determinação das perdas em qualquer ponto de operação, utiliza-se a Equação (31) definida na norma IEC 60034-2-3 com os coeficientes definidos na seção 4.3.5. Para a velocidade n, torque T e potência P deve ser utilizado em pu. A seguinte equação deve ser utilizada para o cálculo da interpolação:

$$P_{L(n,T)} = C_{L1} + C_{L2}n + C_{L3}n^2 + C_{L4}nT^2 + C_{L5}n^2T^2 + C_{L6}T + C_{L7}T^2 \quad (31)$$

A fórmula de interpolação é focada no controle U/f, portanto, as perdas podem ser imprecisas para velocidades < 0,25 e torques < 0,25. Nestes casos são indicados os valores de 0,25 da velocidade e do torque.

4.3.7. Determinação opcional do erro de interpolação

O erro de interpolação pode ser determinado pelo desvio padrão das perdas medidas e das perdas interpoladas para um determinado número de medições. É recomendado pela norma a medição de 16 pontos nas velocidades relativas n = 0,25, 0,5, 0,75 e 0,9 da rotação nominal e nos torques relativos T= 0,25, 0,5, 0,75 e 1 do torque nominal do motor. A equação de interpolação do erro é determinada pela Equação (32):

$$Q_{ISI} = \sqrt{\frac{1}{16}\sum_{n}\sum_{T}\left(\frac{P_{L(n,T)}^{medido} - P_{L(n,T)}^{interpolado}}{P_{L(n,T)}^{medido}}\right)^2} \quad (32)$$

Também é possível determinar os coeficientes de interpolação baseados nos dezesseis pontos de medição realizando uma otimização numérica para o menor erro de interpolação. Isso pode ser realizado usando um algoritmo apropriado e baseado no método *Newton-Raphson*, que já está incluso em diversos softwares comercializados. De acordo com a IEC 60034-2-3, os coeficientes baseados em otimizações numéricas geralmente apresentam um melhor resultado para interpolação que os coeficientes baseados no modelo analítico apresentado na Seção 4.3.5.

5. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo 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 quando realizado o ensaio com alimentação senoidal, sem as componentes harmônicas oriundas do inversor de frequência, e com alimentação através do inversor de frequência, com o objetivo de avaliar o comportamento das perdas harmônicas no modelo analítico proposto pela norma.

Para a realização dos ensaios, foi escolhido o método direto que é o método recomendado pela norma para determinação das perdas pelo fabricante.

5.1. MOTOR ENSAIADO

Para a realização do ensaio foi utilizado um motor de indução de rotor de gaiola de esquilo, com nível de eficiência IE3, e que é amplamente comercializado em diversos mercados. A Tabela 12 apresenta os dados de placa do motor ensaiado, e a Figura 21 apresenta o motor montado na bancada de ensaio.

Tabela 12 - Dados de placa do motor ensaiado

Potência	110 kW
Carcaça	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 ℃
Classe de Isolamento	F
Elevação de Temperatura	80 K

Grau de proteção	IP 55W
Regime de Serviço	S1
Altitude	1000 m

Fonte: (Autor, 2022)

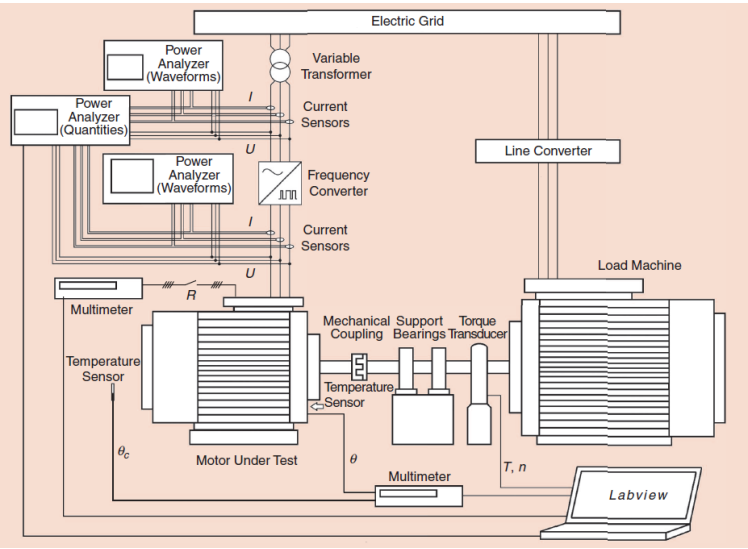
Figura 21 - Motor Ensaiado

Fonte: (Autor, 2022)

5.2. BANCADA DE ENSAIO

A bancada de ensaio consiste em um dinamômetro para simular uma carga mecânica, fonte de alimentação e instrumentação para medição e registro dos dados. A Figura 22 apresenta a um esquemático da bancada utilizada para as medições com alimentação não senoidal. A bancada para medição com alimentação senoidal é similar, entretanto, sem a utilização do inversor de frequência.

Figura 22 - Esquemático da bancada de ensaios para alimentação não senoidal



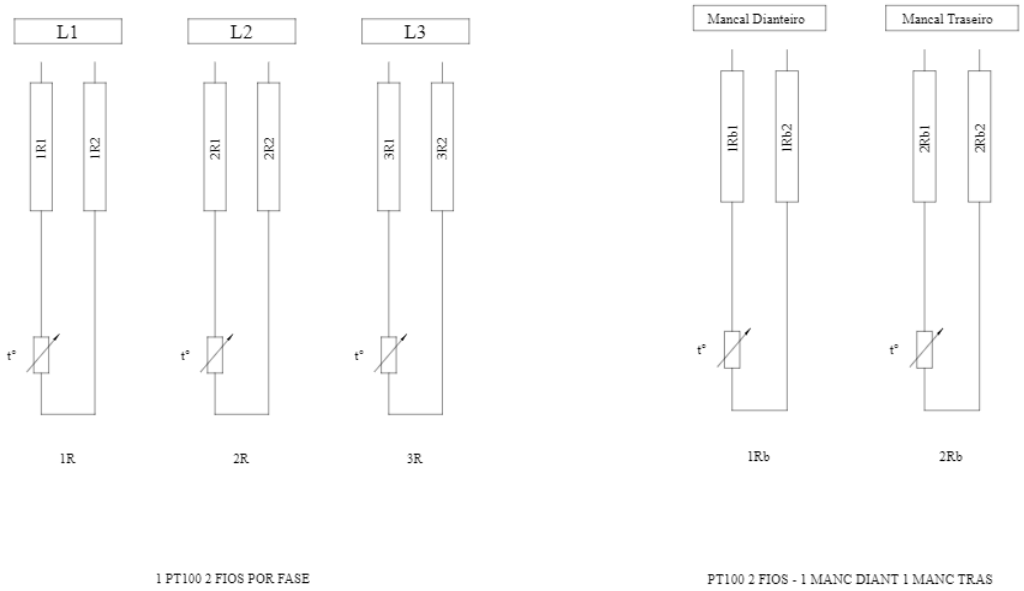
Fonte: (KÄRKKÄINEN, 2017)

5.3. PROCEDIMENTO DE TESTES

Para realização dos ensaios, foi elaborado o seguinte procedimento para garantir a segurança dos operadores e evitar possíveis variações ou ruídos nos ensaios quando com alimentação senoidal ou não senoidal:

- ✓ Deve-se utilizar os equipamentos de proteção individual: calçado de segurança, protetor auricular, luva de proteção contra agentes mecânicos e óculos de segurança;
- ✓ Verificar se os selos de calibração dos equipamentos se encontram dentro do prazo de validade da calibração periódica;
- ✓ Acoplar o motor no dinamômetro, verificando se os eixos estão alinhados e motor bem fixado;
- ✓ Posicionar o PT-100 (sensor de temperatura) na carcaça para medição da temperatura de carcaça;
- ✓ Conectar os PT-100 das bobinas e dos mancais nos conectores ao lado da bancada para medição da temperatura durante o ensaio. A Figura 23 (a) apresenta o diagrama de conexão dos PT-100 dos enrolamentos e a Figura 23 (b) apresenta o diagrama de conexão dos PT-100 dos mancais;
- ✓ Efetuar as ligações no motor conforme tensão de ensaio e esquema de ligação da placa de identificação;
- ✓ Efetuar a ligação dos terminais para medição da resistência elétrica de cada uma das fases do motor, junto com os cabos de alimentação do motor a ser ensaiado;
- ✓ Garantir que o motor esteja ligado na sequência correta, conforme indicado nos cabos de alimentação do motor;
- ✓ Isolar os cabos de alimentação com a manta de borracha;
- ✓ Aterrar o motor antes de iniciar os ensaios;
- ✓ Realizar os ensaios conforme indicado na Tabela 13.

Figura 23 - Diagrama de ligação dos sensores de temperatura



(a) Diagrama de ligação dos PT-100 dos enrolamentos

(b) Diagrama de ligação dos PT-100 dos mancais

Fonte: (Autor, 2022)

Tabela 13 - Lista de ensaios a ser realizados

Ensaio	Norma
Resistência a frio	IEC 60034-1 Item 8
Tensão Aplicada	IEC 60034-1 Item 9.2
Resistência de Isolamento	IEC 60034-27-4
Rotor Bloqueado	NBR17094-3 item 9
Ensaio em carga 7 pontos	IEC 60034-30-2

Fonte: (Autor, 2022)

5.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Nesta seção serão avaliados os resultados obtidos na realização dos ensaios. A seção está dividida em três tópicos, com os ensaios dos aspectos gerais do motor elétrico, os dados adquiridos para os ensaios com alimentação não senoidal e o ensaio com alimentação senoidal.

5.4.1. Ensaios gerais

O primeiro ensaio realizado foi o ensaio de medição de resistência a frio. A medição da resistência a frio consiste na medição da resistência entre os terminais dos enrolamentos do estator, nas três fases. Foram seguidos os procedimentos da norma IEC 60034-1, item 8, e foi utilizado o método da tensão e corrente, isto é, foi aplicado nos terminais do motor uma corrente contínua com valor máximo de 10% da corrente nominal do motor, medindo a queda de tensão. A resistência é calculada como o valor medido da tensão dividido pela corrente.

Como o motor ensaiado possui detectores de temperatura instalados nos enrolamentos, a temperatura ambiente do ensaio de resistência a frio foi a média das temperaturas nos detectores. Conforme IEC 60034-1, o critério de aceitação para o motor ensaiado é que a diferença da resistência de fase não pode exceder ±1,5% entre o maior e menor valor. A Tabela 14 apresenta os dados adquiridos no ensaio.

Tabela 14 - Resultado ensaios de resistência a frio

Fase	Corrente (A)	Tensão(V)	Resistência (Ω)
R-S	6,749234	0,2092	0,030996
S-T	6,749212	0,2086	0,030907
T-R	6,749165	0,2081	0,030833
Temperatura Ambiente: 30,2 ℃			

Fonte: (Autor, 2022)

O segundo ensaio realizado foi o ensaio de tensão aplicada. O ensaio de tensão aplicada é realizado para confirmar a integridade do sistema de isolamento do motor elétrico. Na realização do ensaio foram seguidos os procedimentos da norma IEC 60034-1 item 9.2, e foi aplicado durante 60 segundos uma tensão alternada, com magnitude de duas vezes a tensão mais 1000V, entre os enrolamentos do motor e a carcaça, com os acessórios curto-circuitados na carcaça. A Tabela 15 apresenta dados aplicados e obtidos no ensaio de tensão aplicada.

Tabela 15 - Ensaios de tensão aplicada

Tipo	Tensão (kV)	Corrente (mA)	Tempo (s)
Bobina	1,88	19,7	60

Fonte: (Autor, 2022)

O terceiro ensaio realizado foi o ensaio de resistência de isolamento. O ensaio de resistência de isolamento tem como objetivo medir a capacidade da isolação elétrica do enrolamento em resistir a fuga da corrente. O teste seguiu as diretrizes da norma IEC 60034-27-4, com a utilização de um megômetro, aplicando-se uma tensão CC durante 60 segundos. O critério de aceitação mínimo para resistência de isolamento dos enrolamentos do motor é 100 MΩ. A Tabela 16 apresenta os dados adquiridos neste ensaio.

Tabela 16 - Ensaios de resistência de isolamento

Tipo	Tensão (V)	Tempo (s)	Resistência de Isolamento (MΩ)
Bobina	500	60	13900
Temperatura Ambiente : 21,5 ℃			

Fonte: (Autor, 2022)

O último ensaio geral realizado foi o ensaio de rotor bloqueado. Este ensaio é realizado com o objetivo de verificar a qualidade de fabricação do rotor. O motor foi energizado, seguindo os procedimentos da norma NBR17094-3 item 9, com o rotor travado em frequência e corrente nominal, e foram registrados os valores de tensão, corrente, potência absorvida e torque. A Tabela 17 apresenta os resultados adquiridos durante o ensaio.

Tabela 17 - Ensaios de rotor bloqueado

Tensão (V)	Corrente(A)				Potência Absorvida (W)	Torque (Nm)
	I1	I2	I3	I média		
402,22	1247,4	1217	1229,9	1231,4	302100	1111

Fonte: (Autor, 2022)

5.4.2. Ensaios em carga dos 7 pontos normalizados com alimentação senoidal

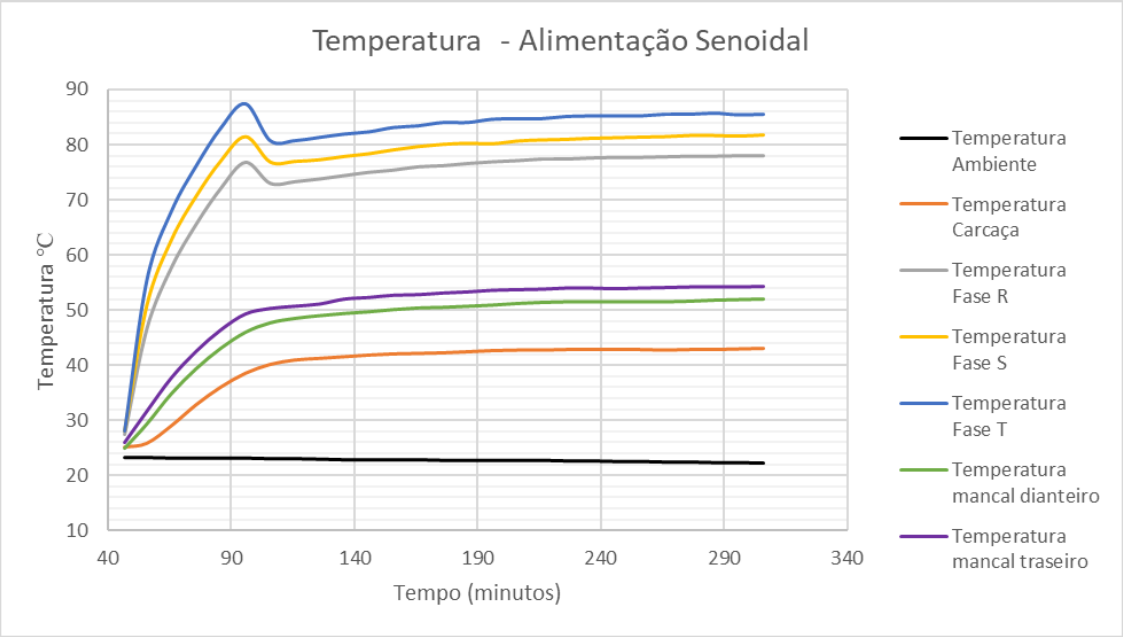
Foi realizado o ensaio de elevação de temperatura para aquisição dos dados em operação nos sete pontos padronizados pela norma IEC 60034-2-3. O motor permaneceu energizado até a estabilização térmica, variação menor ou igual a 1 K no intervalo de 30 minutos. A elevação de temperatura da bobina foi monitorada pelo PT-100 instalado na bobina do motor elétrico. A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de elevação de temperatura do motor com alimentação senoidal. A Figura 24 apresenta graficamente a temperatura medida durante os ensaios. O Apêndice C – Elevação de Temperatura com alimentação senoidalapresenta os dados de elevação de temperatura da bobina, carcaça e mancal traseiro e dianteiro até o equilíbrio térmico.

Tabela 18 – Resultado do ensaio de elevação de temperatura com alimentação senoidal

Temperatura Ambiente (°C)	Potência absorvida (W)	Rotação (RPM)	Torque (Nm)	Perdas (W)	Δ T Fase R (°C)	Δ T Fase S (°C)	Δ T Fase T (°C)
22,3	116900	1784,7	597,55	5225	55,6	59,4	63,3

Fonte: (Autor, 2022)

Figura 24 - Temperatura do bobinado, mancal e carcaça com alimentação senoidal



Fonte: (Autor, 2022)

Após o motor atingir o equilíbrio térmico foi realizada a coleta dos dados, seguindo a sequência determinada pela norma. A Tabela 19 apresenta os dados coletados nos pontos de operação.

Tabela 19 - Dados adquiridos nos sete pontos de operação determinados com 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	110,4
	Corrente (A)	177,6	178,4	181,3	100,4	100,1	68,7	68,7
	Potência (W)	103565	58089	29848	52140	29026	14680	7507
	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,

Fonte: (Autor, 2022)

O Apêndice A apresenta o memorial de cálculo para determinação dos coeficientes de interpolação do modelo analítico da norma. A Tabela 20 apresenta os coeficientes de interpolação na condição de alimentação senoidal.

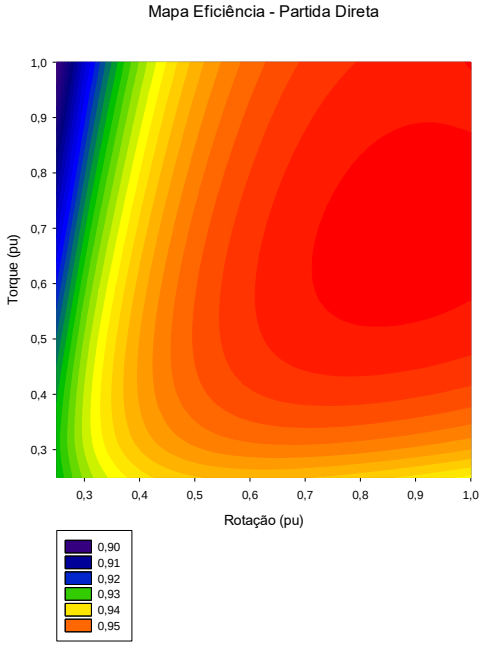
Tabela 20 - Coeficientes de interpolação na condição de alimentação senoidal

CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7
-0,000146	0,005594	0,007494	-0,025217	0,028320	0,008443	0,022928

Fonte: (Autor, 2022)

A Figura 25 apresenta o mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação senoidal. O mapa foi elaborado através dos coeficientes de interpolação do modelo analítico da norma 60034-2-4 e aplicando a Equação (31). A Tabela 21 apresenta os rendimentos em determinados pontos de operação obtidos através do modelo analítico.

Figura 25 - Mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação senoidal



Fonte: (Autor, 2022)

Tabela 21 - Rendimento nos principais pontos de operação quando alimentação senoidal obtidos através do modelo analítico da norma 60034-2-3

Torque (%)	100	75	50	25
Rendimento do motor [%] em 60 [Hz]	95,47%	95,67%	95,48%	93,74%
Rendimento do motor [%] em 54 [Hz]	95,48%	95,70%	95,54%	93,94%
Rendimento do motor [%] em 45 [Hz]	95,34%	95,61%	95,55%	94,16%
Rendimento do motor [%] em 30 [Hz]	94,27%	94,78%	95,02%	94,18%
Rendimento do motor [%] em 15 [Hz]	89,74%	91,06%	92,22%	92,62%

Fonte: (Autor, 2022)

5.4.3. Ensaios em carga dos 7 pontos normalizados com alimentação através do inversor de frequência

Foi realizado o ensaio de elevação de temperatura para aquisição dos dados em operação nos sete pontos padronizados pela norma IEC 60034-2-3. O motor permaneceu energizado através do inversor de frequência até a estabilização térmica, variação menor ou igual a 1 K no intervalo de 30 minutos. A elevação de temperatura

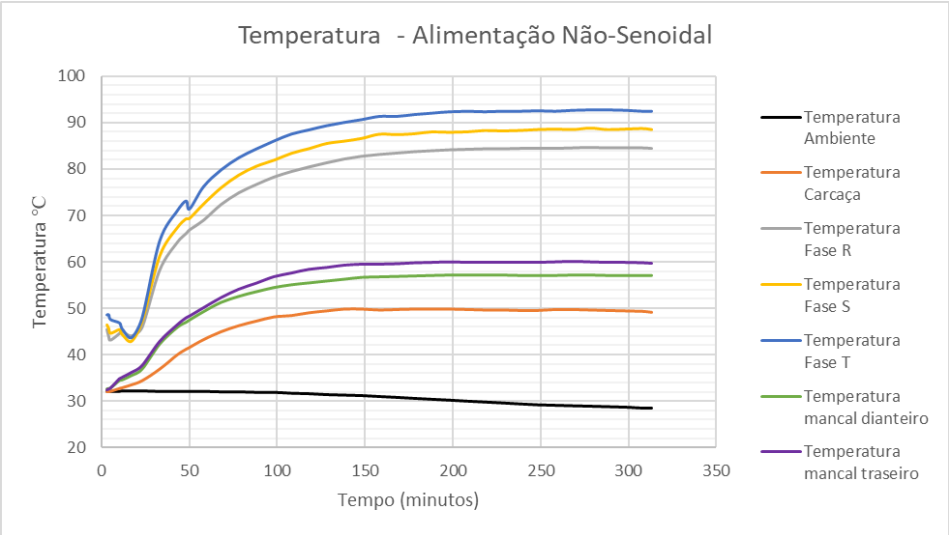
da bobina foi monitorada pelo PT-100 instalado na bobina do motor elétrico. A Tabela 22 apresenta os dados de elevação de temperatura da bobina, carcaça e mancal traseiro e dianteiro até o equilíbrio térmico. O inversor utilizado foi o modelo CFW11 de fabricação WEG com frequência de chaveamento de 2 kHz e tensão do *link* de corrente contínua de 600 V. A Figura 26 apresenta graficamente a temperatura medida durante os ensaios. O Apêndice C – Elevação de Temperatura com alimentação senoidalapresenta os dados de elevação de temperatura da bobina, carcaça e mancal traseiro e dianteiro até o equilíbrio térmico.

Tabela 22 - Resultado do ensaio de elevação de temperatura com alimentação não senoidal

Temperatura Ambiente (°C)	Potência absorvida (W)	Rotação (RPM)	Torque (Nm)	Perdas (W)	Δ T Fase R (°C)	Δ T Fase S (°C)	Δ T Fase T (°C)
28,5	117010	1784,2	597,85	5310	56	60	63,9

Fonte: (Autor, 2022)

Figura 26 - Temperatura do bobinado, mancal e carcaça com alimentação não senoidal



Fonte: (Autor, 2022)

Após o motor atingir o equilíbrio térmico foi realizado a coleta dos dados, seguindo a sequência determinada pela norma. A Tabela 23 apresenta os dados coletados nos pontos de operação.

Tabela 23 - Dados adquiridos nos sete pontos de operação determinados com alimentação não senoidal

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	436,8
	Corrente (A)	145,6	85,1	48,8	76,6	47,3	29,2	18,3
	Potência (W)	106360	60593	31991	53498	30341	15803	8404
	Freq. (Hz)	60	60	60	60	60	60	60
Inversor - Saída	Tensão (V)	475,6	390,5	326,8	475,1	389,6	387,6	322,2
	Corrente (A)	178,1	179,1	182,1	101,3	100.9	70,3	69,9
	Potência (W)	103980	58820	30370	52500	29340	15350	7880
	Freq. (Hz)	53,9	30	15	53,9	30	30	15
Motor	Rotação (rpm)	1603	884	434	1611	892	896	446
	Torque (Nm)	590,1	590,3	590,3	293,9	295,8	149,9	148,7

Fonte: (Autor, 2022)

O Apêndice B apresenta o memorial de cálculo para determinação dos coeficientes de interpolação do modelo analítico da norma. A Tabela 24 apresenta os coeficientes de interpolação na condição de alimentação não senoidal.

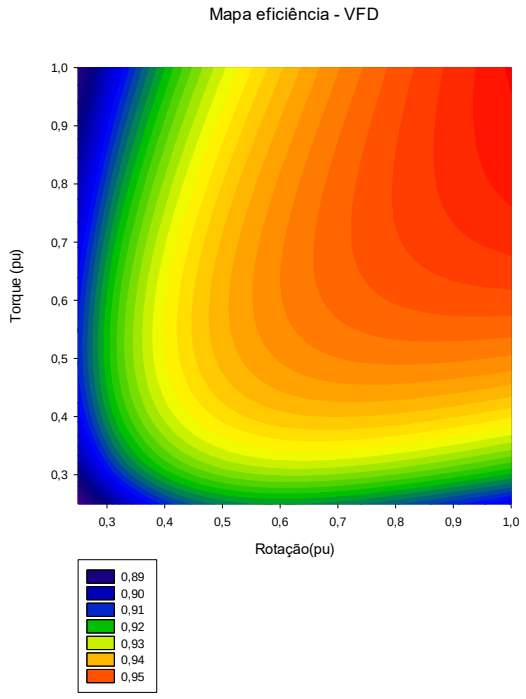
Tabela 24 - Coeficientes de interpolação na condição de alimentação não senoidal

CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7
0,008143	-0,006418	0,024617	0,036366	-0,033869	-0,005786	0,022932

Fonte: (Autor, 2022)

A Figura 27 apresenta o mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação não senoidal. O mapa foi elaborado através dos coeficientes de interpolação do modelo analítico da norma 60034-2-4 e aplicando a Equação (31). A Tabela 25 apresenta os rendimentos em determinados pontos de operação obtidos através do modelo analítico.

Figura 27 - Mapa de eficiência do motor ensaiado na condição de alimentação não senoidal



Fonte: (Autor, 2022)

Tabela 25 - Rendimento nos principais pontos de operação quando alimentação não senoidal obtidos através do modelo analítico da norma 60034-2-3

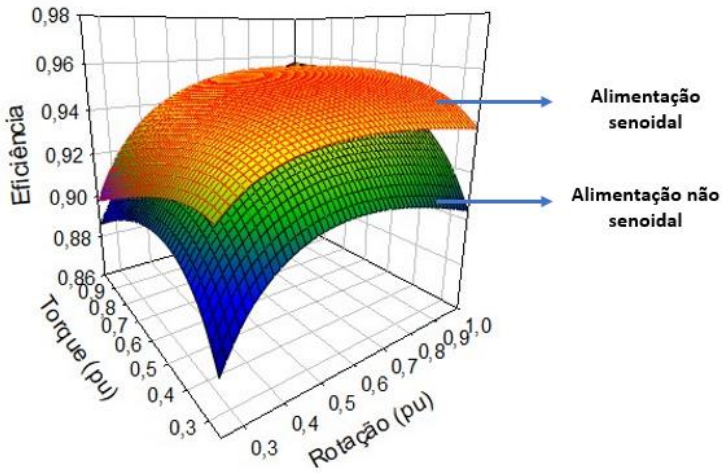
Torque (%)	100	75	50	25
Rendimento do motor [%] em 60 [Hz]	95,60%	95,38%	94,37%	90,42%
Rendimento do motor [%] em 54 [Hz]	95,26%	95,23%	94,44%	90,86%
Rendimento do motor [%] em 45 [Hz]	94,63%	94,88%	94,44%	91,38%
Rendimento do motor [%] em 30 [Hz]	92,95%	93,72%	93,86%	91,45%
Rendimento do motor [%] em 15 [Hz]	88,59%	90,12%	90,80%	88,03%

Fonte: (Autor, 2022)

5.5. COMPARATIVO DE RESULTADOS

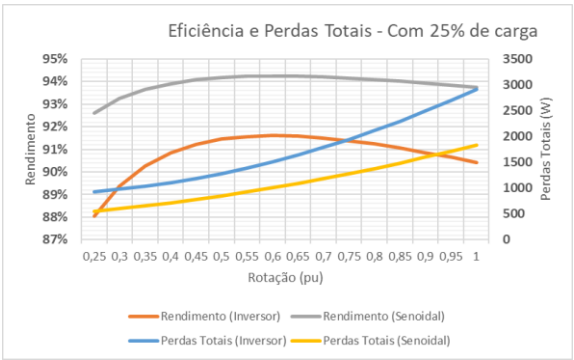
Nesta seção é realizada uma comparação entre os resultados em carga quando em alimentação senoidal e não senoidal. A Figura 28 apresenta uma sobreposição entre os mapas de eficiência do motor ensaiado. Para melhor visualização foi elaborada a Figura 29 com o nível de eficiência e as perdas totais para as operações com 25%, 50%, 75% e 100% de carga em relação a velocidade do motor, e a Figura 30 com o nível de eficiência e as perdas totais para as operações com 25%, 50%, 75% e 100% da velocidade em relação a carga. Para cálculo da eficiência foi utilizada a metodologia apresentada pela norma IEC 60034-2-3.

Figura 28 - Mapa 3D da eficiência com alimentação não senoidal e senoidal

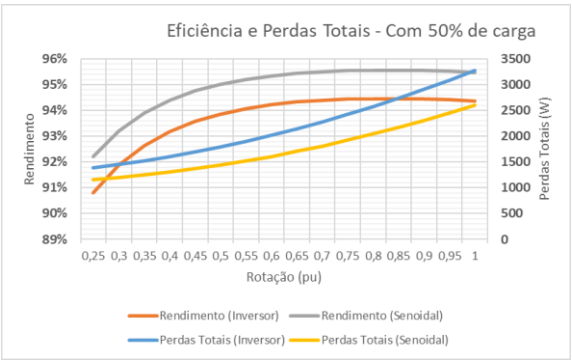


Fonte: (Autor, 2022)

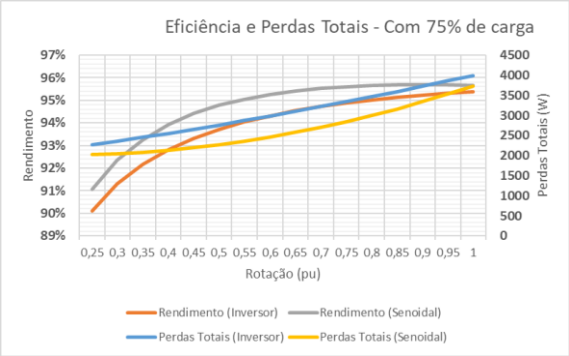
Figura 29 - Eficiência e Perdas Totais com 25, 50, 75 e 100 % de carga com alimentação através do inversor e senoidal



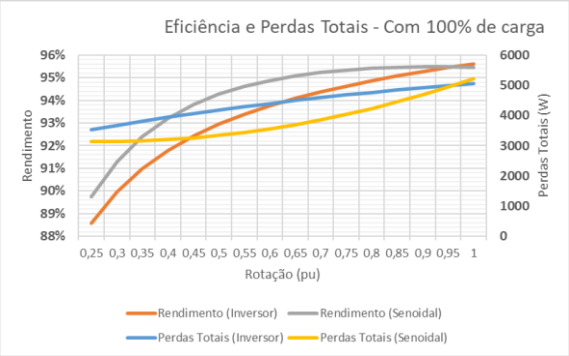
(a) Eficiência e Perdas totais com 25% de carga



(b) Eficiência e Perdas totais com 50% de carga



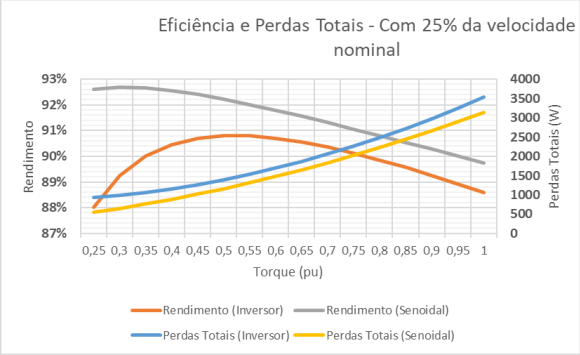
(c) Eficiência e Perdas totais com 75% de carga



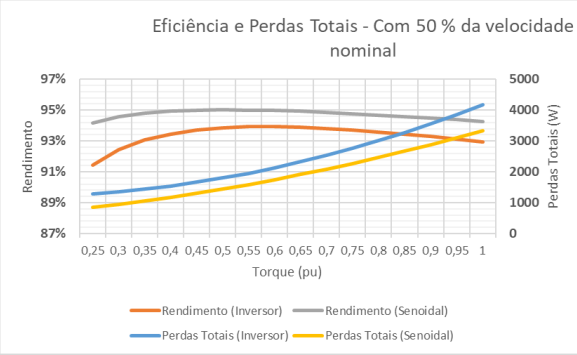
(d) Eficiência e Perda totais com 100% de carga

Fonte: (Autor, 2022)

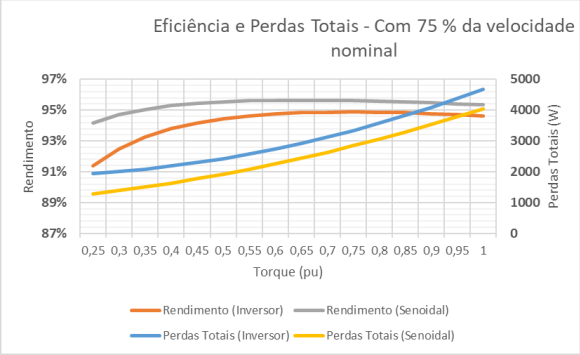
Figura 30 - Eficiência com 25, 50, 75 e 100 % da velocidade nominal com alimentação senoidal e não senoidal



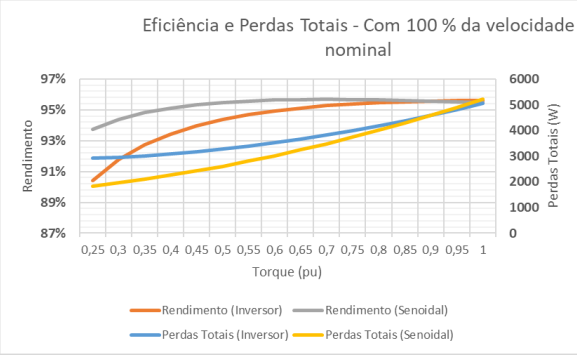
(a) Eficiência e Perdas Totais com 25% da velocidade nominal



(b) Eficiência e Perdas Totais com 50% da velocidade nominal



(c) Eficiência e Perdas Totais com 75% da velocidade nominal



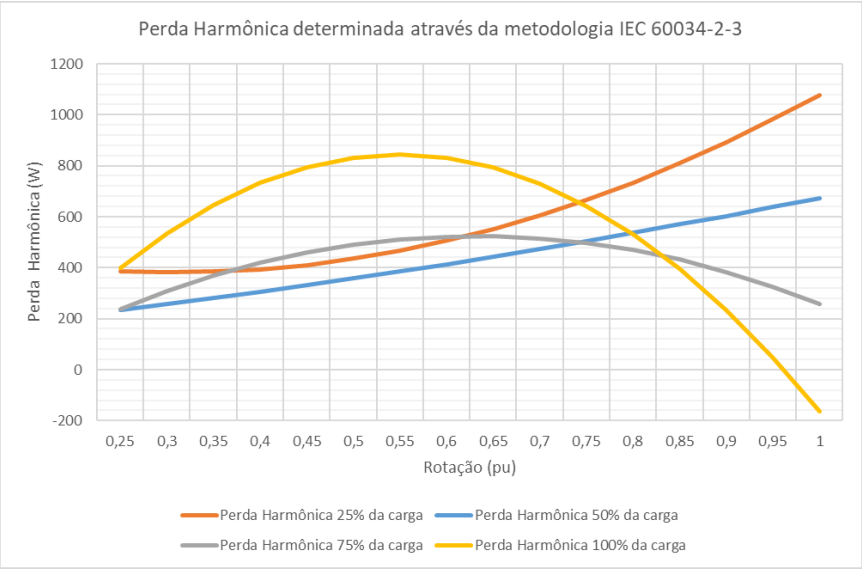
(d) Eficiência e Perdas totais com 100% da velocidade nominal

Fonte: (Autor, 2022)

Para uma melhor compreensão dos resultados foi elaborada a Figura 31 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 componente harmônica do inversor, logo a perda harmônica.

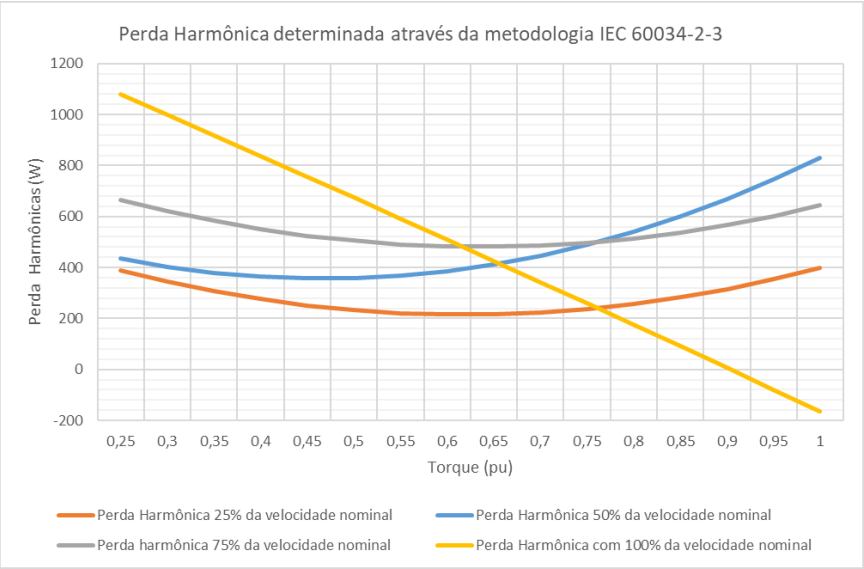
Figura 31 – Perdas Harmônicas com 25, 50, 75 e 100 % de carga



Fonte: (Autor, 2022)

A Figura 32 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 velocidade. A diferença entre as perdas nos ensaios foi assumida como a perda devida componente harmônica do inversor, logo a perda harmônica.

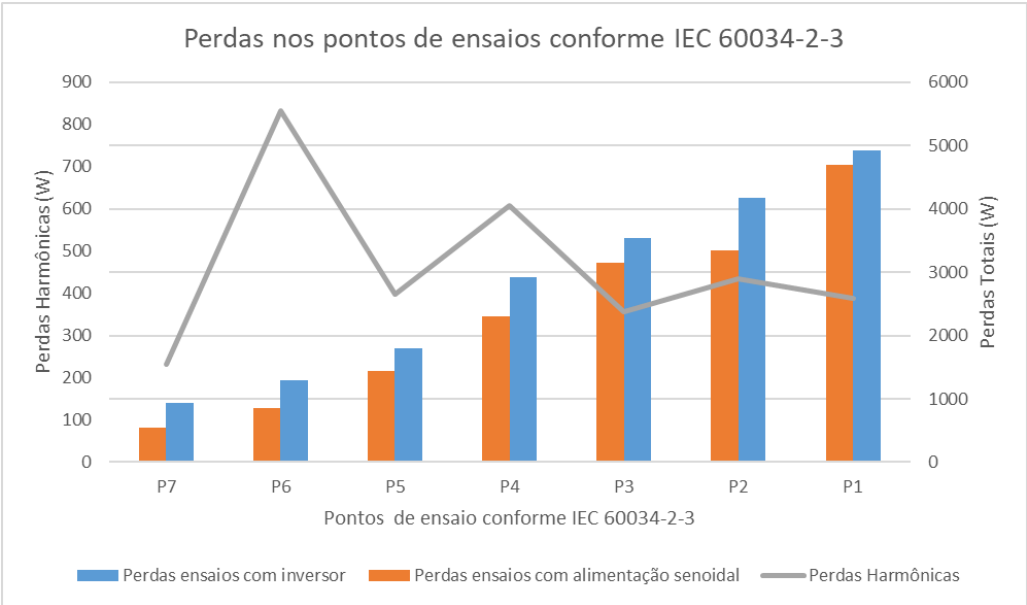
Figura 32 - Perdas Harmônicas com 25, 50, 75 e 100 % da velocidade nominal



Fonte: (Autor, 2022)

Para uma comparação mais fidedigna foi analisado o resultado nos sete pontos de operação sugeridos pela norma. A Figura 33 apresenta as perdas totais obtidas através dos ensaios com alimentação senoidal e não senoidal. Com os resultados dos ensaios é possível calcular a componente das perdas harmônicas nos sete pontos.

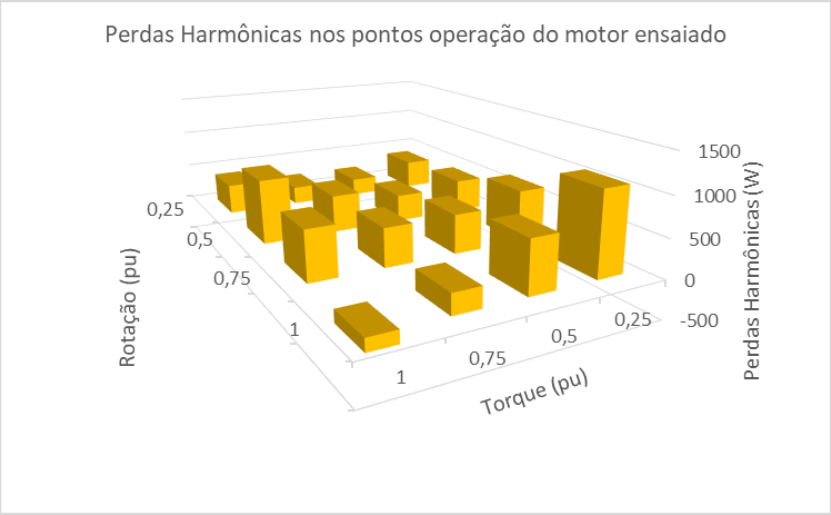
Figura 33 - Perdas totais nos sete pontos normalizados e suas perdas harmônicas



Fonte: (Autor, 2022)

A Figura 34 apresenta as perdas harmônicas absolutas calculadas pelo método de interpolação da norma IEC 60034-2-3 nos pontos de operação de 25%, 50%, 75% e 100% da velocidade e do torque. Para uma melhor compreensão do comportamento das perdas harmônicas absolutas em relação a carga e a velocidade foi elaborada a Figura 35. A Figura 35 apresenta as perdas harmônicas absolutas calculadas pelo método de interpolação da norma IEC 60034-2-3 para distintos pontos de operação do motor ensaiado, onde os valores em vermelhos são os valores de maiores perdas harmônicas absolutas calculadas.

Figura 34 - Perdas Harmônicas absolutas nos pontos de 25, 50, 75 e 100% da velocidade e torque nominal



Fonte: (Autor, 2022)

Figura 35 - Perdas Harmônicas absolutas calculadas pelo método da interpolação da norma IEC 60034-2-3 para distintos pontos de operação

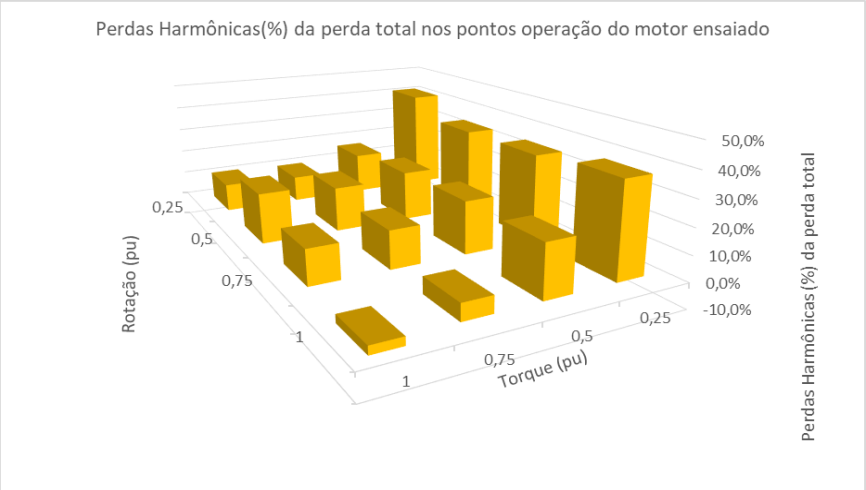
Rotação (pu)	Torque (pu)															
	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
0,25	386,9	343,4	306,3	275,4	250,9	232,8	220,9	215,4	216,2	223,3	236,7	256,5	282,6	315,0	353,7	398,8
0,3	382,0	342,7	310,4	285,2	267,1	256,0	252,1	255,2	265,4	282,6	307,0	338,4	376,9	422,4	475,0	534,8
0,35	384,4	348,3	319,8	298,9	285,7	280,2	282,3	292,1	309,6	334,6	367,4	407,8	455,8	511,6	574,9	646,0
0,4	394,1	360,2	334,4	316,6	306,9	305,2	311,7	326,1	348,7	379,3	418,0	464,7	519,6	582,4	653,4	732,4
0,45	411,1	378,5	354,2	338,2	330,5	331,1	340,1	357,3	382,8	416,6	458,8	509,2	568,0	635,0	710,4	794,0
0,5	435,3	403,1	379,2	363,8	356,6	357,9	367,5	385,5	411,9	446,6	489,7	541,2	601,1	669,3	745,9	830,8
0,55	466,8	434,0	409,5	393,2	385,3	385,5	394,1	410,9	435,9	469,3	510,9	560,8	618,9	685,3	760,0	842,9
0,6	505,6	471,3	445,0	426,7	416,4	414,0	419,7	433,3	455,0	484,6	522,2	567,8	621,4	683,0	752,6	830,2
0,65	551,7	515,0	485,7	464,1	450,0	443,4	444,4	452,9	468,9	492,6	523,7	562,4	608,7	662,4	723,8	792,7
0,7	605,1	564,9	531,7	505,4	486,1	473,6	468,1	469,5	477,9	493,2	515,4	544,5	580,6	623,6	673,5	730,4
0,75	665,7	621,2	582,9	550,7	524,6	504,7	490,9	483,3	481,8	486,5	497,2	514,2	537,2	566,4	601,8	643,3
0,8	733,6	683,9	639,3	599,9	565,7	536,7	512,8	494,2	480,7	472,4	469,3	471,3	478,6	491,0	508,6	531,4
0,85	808,8	752,9	701,0	653,1	609,3	569,5	533,8	502,1	474,5	451,0	431,5	416,0	404,6	397,3	394,0	394,8
0,9	891,3	828,2	767,8	710,2	655,3	603,2	553,8	507,2	463,4	422,2	383,9	348,3	315,4	285,3	257,9	233,3
0,95	981,1	909,9	839,9	771,3	703,9	637,8	572,9	509,4	447,1	386,1	326,4	268,0	210,9	155,0	100,4	47,1
1	1078,1	997,9	917,2	836,3	754,9	673,2	591,1	508,7	425,9	342,7	259,2	175,3	91,0	6,4	-78,6	-163,9

Perdas harmônicas (W)

Fonte: (Autor, 2022)

Para um melhor entendimento dos impactos das perdas harmônicas calculadas pelo método da interpolação da IEC 60034-2-3 na determinação do rendimento do motor elétrico, foi elaborada a Figura 36 que apresenta em percentual a fatia das perdas totais oriundas da componente harmônica. A Figura 37 apresenta o percentual na perda total que a perda harmônica calculadas pelo método de interpolação da norma IEC 60034-2-3 representa para distintos pontos de operação do motor ensaiado, onde os valores em vermelhos são os valores de maiores variações.

Figura 36 - Perdas Harmônicas (%) das perdas totais calculadas pelo método da interpolação da norma IEC 60034-2-3 para distintos pontos de operação



Fonte: (Autor, 2022)

Figura 37 - Perdas harmônicas (%) que representam sobre as perdas totais calculadas através do método de interpolação da IEC 60034-2-3

Rotação (pu)	Torque (pu)															
	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
0,25	41,4%	34,6%	28,7%	23,7%	19,8%	16,7%	14,4%	12,7%	11,6%	10,9%	10,5%	10,3%	10,4%	10,6%	10,9%	11,3%
0,3	39,0%	32,9%	27,7%	23,5%	20,1%	17,6%	15,7%	14,5%	13,6%	13,2%	13,0%	13,1%	13,3%	13,6%	14,1%	14,5%
0,35	37,0%	31,6%	27,0%	23,3%	20,5%	18,3%	16,8%	15,8%	15,2%	15,0%	15,0%	15,2%	15,5%	15,9%	16,4%	17,0%
0,4	35,6%	30,7%	26,6%	23,3%	20,8%	19,0%	17,7%	16,9%	16,4%	16,3%	16,4%	16,6%	17,0%	17,5%	18,0%	18,6%
0,45	34,5%	30,1%	26,4%	23,4%	21,2%	19,5%	18,3%	17,6%	17,2%	17,2%	17,3%	17,6%	18,0%	18,4%	19,0%	19,6%
0,5	33,9%	29,8%	26,4%	23,6%	21,5%	19,9%	18,8%	18,1%	17,7%	17,6%	17,7%	18,0%	18,4%	18,8%	19,3%	19,9%
0,55	33,5%	29,7%	26,5%	23,9%	21,8%	20,2%	19,1%	18,3%	17,9%	17,8%	17,8%	18,0%	18,3%	18,7%	19,2%	19,7%
0,6	33,4%	29,9%	26,8%	24,2%	22,1%	20,5%	19,2%	18,4%	17,9%	17,6%	17,5%	17,6%	17,8%	18,1%	18,5%	18,9%
0,65	33,6%	30,1%	27,1%	24,5%	22,4%	20,6%	19,3%	18,3%	17,6%	17,1%	16,9%	16,8%	16,9%	17,1%	17,3%	17,6%
0,7	33,8%	30,5%	27,5%	24,9%	22,6%	20,7%	19,2%	18,0%	17,1%	16,5%	16,0%	15,7%	15,6%	15,6%	15,7%	15,9%
0,75	34,2%	31,0%	27,9%	25,2%	22,8%	20,8%	19,1%	17,6%	16,5%	15,6%	14,9%	14,4%	14,0%	13,8%	13,7%	13,7%
0,8	34,7%	31,5%	28,4%	25,6%	23,1%	20,8%	18,8%	17,1%	15,7%	14,5%	13,5%	12,8%	12,2%	11,7%	11,4%	11,2%
0,85	35,2%	32,0%	28,9%	26,0%	23,3%	20,8%	18,5%	16,6%	14,8%	13,3%	12,0%	10,9%	10,0%	9,2%	8,6%	8,1%
0,9	35,8%	32,6%	29,4%	26,3%	23,4%	20,7%	18,2%	15,9%	13,8%	12,0%	10,3%	8,9%	7,6%	6,5%	5,5%	4,7%
0,95	36,4%	33,2%	29,9%	26,7%	23,6%	20,6%	17,8%	15,2%	12,8%	10,5%	8,5%	6,6%	4,9%	3,4%	2,1%	0,9%
1	37,0%	33,7%	30,4%	27,1%	23,8%	20,5%	17,4%	14,4%	11,6%	9,0%	6,5%	4,2%	2,1%	0,1%	-1,6%	-3,2%

Perdas harmônicas (%) da perda total

Fonte: (Autor, 2022)

Para o entendimento do comportamento das perdas harmônicas em relação a potência do motor, foi elaborado a Tabela 26 que apresenta as perdas calculadas

pelo método de interpolação da norma IEC 60034-2-3 para os pontos com potência constante de 25%, 50% e 75% da potência nominal quando alimentado pelo inversor e quando com alimentação senoidal.

Tabela 26 - Perdas Totais e Harmônicas calculadas pelo método da interpolação da norma IEC 60034-2-3 para os pontos com 25%, 50% e 75% da potência nominal do motor ensaiado

Potência (W)	Rotação (pu)	Torque (pu)	Alimentação Senoidal		Alimentação Não Senoidal			
			Perdas Totais (W)	Eficiência	Perdas Totais (W)	Eficiência	Perdas Harmônicas (W)	Perdas harmônicas (%) Perda total
27500	0,25	1,00	3143,1	89,7%	3541,8	88,6%	398,8	11,3%
27500	0,3	0,83	2386,4	92,0%	2749,6	90,9%	363,2	13,2%
27500	0,35	0,71	1951,0	93,4%	2294,3	92,3%	343,2	15,0%
27500	0,4	0,63	1690,0	94,2%	2026,4	93,1%	336,4	16,6%
27500	0,45	0,56	1532,6	94,7%	1874,1	93,6%	341,6	18,2%
27500	0,5	0,50	1441,4	95,0%	1799,3	93,9%	357,9	19,9%
27500	0,55	0,45	1395,3	95,2%	1780,2	93,9%	384,9	21,6%
27500	0,6	0,42	1381,2	95,2%	1803,6	93,8%	422,4	23,4%
27500	0,65	0,38	1391,1	95,2%	1861,1	93,7%	469,9	25,3%
27500	0,7	0,36	1419,6	95,1%	1947,2	93,4%	527,5	27,1%
27500	0,75	0,33	1463,1	94,9%	2058,1	93,0%	595,0	28,9%
27500	0,8	0,31	1518,9	94,8%	2191,1	92,6%	672,3	30,7%
27500	0,85	0,29	1585,2	94,5%	2344,4	92,1%	759,2	32,4%
27500	0,9	0,28	1660,6	94,3%	2516,5	91,6%	855,9	34,0%
27500	0,95	0,26	1744,2	94,0%	2706,4	91,0%	962,2	35,6%
55000	0,5	1,00	3343,7	94,3%	4174,6	92,9%	830,8	19,9%
55000	0,55	0,91	3021,4	94,8%	3719,7	93,7%	698,3	18,8%
55000	0,6	0,83	2801,1	95,2%	3403,8	94,2%	602,7	17,7%
55000	0,65	0,77	2653,5	95,4%	3191,2	94,5%	537,7	16,8%
55000	0,7	0,71	2559,3	95,6%	3058,1	94,7%	498,8	16,3%
55000	0,75	0,67	2505,6	95,6%	2988,3	94,8%	482,7	16,2%
55000	0,8	0,63	2483,5	95,7%	2970,3	94,9%	486,8	16,4%
55000	0,85	0,59	2486,5	95,7%	2995,7	94,8%	509,2	17,0%
55000	0,9	0,56	2510,0	95,6%	3058,5	94,7%	548,5	17,9%
55000	0,95	0,53	2550,5	95,6%	3154,0	94,6%	603,5	19,1%
55000	1	0,50	2605,5	95,5%	3278,7	94,4%	673,2	20,5%
82500	0,75	1,00	4036,9	95,3%	4680,1	94,6%	643,3	13,7%
82500	0,8	0,94	3897,8	95,5%	4401,5	94,9%	503,7	11,4%
82500	0,85	0,88	3806,7	95,6%	4206,1	95,1%	399,4	9,5%
82500	0,9	0,83	3753,7	95,6%	4079,7	95,3%	326,0	8,0%
82500	0,95	0,79	3731,5	95,7%	4011,7	95,4%	280,2	7,0%
82500	1	0,75	3734,6	95,7%	3993,8	95,4%	259,2	6,5%

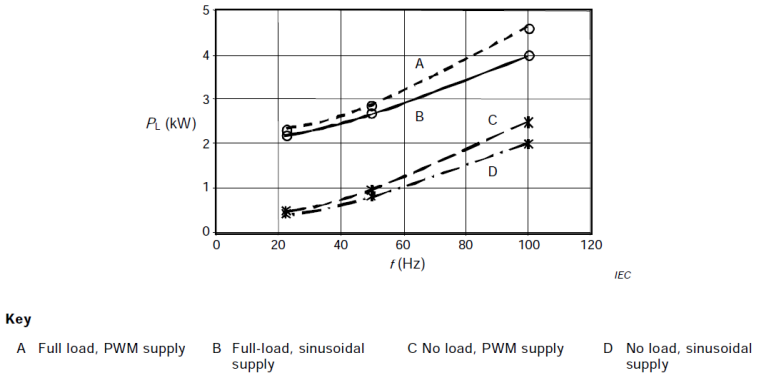
Fonte: (Autor, 2022)

O resultado obtido através da Figura 33 é muito importante pois apresenta os pontos ensaiados e as perdas harmônicas para cada um dos sete pontos sugeridos pela norma. Através da Figura 33 é possível identificar que as perdas adicionais devido às componentes harmônicas oriundas do inversor de frequência variaram com a carga e com a rotação e não apresentaram um comportamento constante como sugerido pela IEC 60034-2-3.

A própria IEC através da norma 60034-25 indica que adicionalmente às conhecidas perdas devido à tensão e corrente fundamentais, a alimentação não senoidal fornecida pelo inversor de frequência produz perdas adicionais na máquina elétrica e que 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 Figura 38. No exemplo apresentado pela IEC 60034-25, trata-se de um motor de 37kW e 50Hz, alimentado por inversor de frequência com frequência de comutação igual a 5,5kHz. Nota-se que o comportamento das perdas está de encontro com os testes realizados neste trabalho. Verifica-se que, comparando-se as perdas do motor originadas quando alimentada por uma tensão senoidal com aquelas originadas sob regime não senoidal, o incremento relativo de perda não ocorre de maneira constante e que ocorre de modo mais acentuado quanto mais elevada a frequência.

Figura 38 - Exemplo de perdas medidas, em função da frequência e da alimentação



Fonte: (IEC, 2014)

A magnitude e comportamento das perdas adicionais devido ao conversor de frequência dependem do projeto da máquina elétrica, tipo e parâmetro do inversor de frequência e o uso de filtros (IEC, 2014).

Através da Figura 29 (d), Figura 30 (d), Figura 31, Figura 32, Figura 34, Figura 35, Figura 36 e Figura 37 foi possível identificar que o modelo proposto pela norma apresentou uma inconsistência nos valores de rendimento e perdas totais nos pontos próximos ao ponto nominal do motor testado. Foi identificado que o rendimento interpolado na condição nominal quando em alimentação senoidal foi inferior ou rendimento interpolado quando alimentado pelo inversor de frequência. Essa inconsistência também é verificada pela Tabela 21 e pela Tabela 25 quando comparado o valor de rendimento para o ponto nominal do motor. Como apresentado na Tabela 05 e apresentado pela norma IEC 60034-2-3, era esperado que com a adição da componente de perdas harmônicas o rendimento quando operado com inversor de frequência fosse inferior ao rendimento quando operando com alimentação senoidal. A norma IEC 60034-25, através da Figura 07 desta dissertação, apresenta um exemplo do aumento das perdas em um motor, carcaça 315 M e design N, devido às componentes harmônicas oriundas do inversor de frequência com o motor operando em condições nominais de velocidade e torque nominais. Também na Seção 2.3 desta dissertação são apresentados diversos exemplos na literatura que indicam que é esperado um aumento nas perdas quando operado com inversor de frequência em toda faixa de operação do motor elétrico.

Ao observar a Figura 31, Figura 32, Figura 34 e a Figura 35 foi verificado que as perdas harmônicas calculadas através do método de interpolação da norma IEC60034-2-3 apresentaram um comportamento variado e que as perdas harmônicas foram maiores nos pontos de menor torque e maior velocidade. As perdas harmônicas calculadas pelo método da interpolação também apresentaram um comportamento relevante na faixa de operação entre 35-75% da velocidade e 90-100% do torque, conforme pode ser observado nos resultados mostrados na Figura 35.

Apesar das perdas harmônicas possuírem um maior valor absoluto nos pontos de operação como apresentado no parágrafo anterior, o impacto das perdas harmônicas na determinação do rendimento do motor ensaiado foi diferente, como verificado na Figura 29, Figura 30, Figura 36 e Figura 37. Nos pontos de operação com torque inferiores a 50% do torque nominal do motor, independentemente da

rotação, as perdas harmônicas calculadas pelo método da interpolação representaram em torno de 20% das perdas totais do motor, e em pontos extremos de operação, a representatividade das perdas harmônicas foi superior a 40% das perdas totais. WAIDE e BRUNER (2011) indica que as perdas adicionais devido à componente harmônica normalmente variam entre 10-30% no ponto de operação de 25% do torque e velocidade nominal.

Através dos resultados obtidos na Tabela 26, também foi possível identificar que nos pontos de operação onde a potência mecânica é igual, o comportamento das perdas harmônicas também não ocorreu de maneira constante e que as perdas harmônicas ocorreram de modo mais acentuado quanto mais elevada a frequência de operação do motor ensaiado.

6. CONCLUSÃO

Durante o trabalho foi identificado que há uma crescente preocupação em relação às perdas dos motores elétricos quando operados por inversores de frequência. Diversos países estão emitindo regulamentações que exigem um nível mínimo de eficiência dos motores elétricos quando aptos também a operação por inversor de frequência, entretanto, esses regulamentos são baseados em níveis de operação de motores elétricos quando operados com alimentação senoidal. Ainda há muita discussão na literatura dos efeitos do inversor de frequência na eficiência dos motores elétricos.

O entendimento e determinação das perdas harmônicas em motores elétricos de indução alimentados por inversores de frequência ainda representa um grande desafio para os fabricantes e pesquisadores, apesar deste tema estar sendo estudado há alguns anos. Dentre os motivos que dificultam a evolução do assunto estão a inexistência de uma teoria definitiva para o desempenho das perdas do motor elétrico com alimentação não senoidal e a carência de normas de referências que orientem quanto aos procedimentos experimentais a serem adotados para determinação das perdas no motor quando submetido a este tipo de alimentação. Ainda que alguns organismos como a IEC já terem iniciado o desenvolvimento de documentos abordando as questões relacionadas a ensaios e determinação das perdas e eficiência quando alimentado por inversor de frequência, a elaboração e emissão dessas normas ainda está em fase inicial e devido às inúmeras discussões que envolvem o tema. Seguramente ainda haverá muita discussão para que essas normas sejam definitivamente aceitas e que possam ser amplamente utilizadas pela indústria. Apesar das discussões existentes sobre a parcela adicional das perdas harmônicas ocasionadas pela alimentação com formas de ondas de tensão não senoidal, não há dúvidas quanto ao fato de que as perdas no motor elétrico diferem das perdas quando alimentado por uma tensão puramente senoidal.

A norma IEC 60034-2-3, através do método direto com alimentação não senoidal, é viável para determinação das perdas e apuração da eficiência do motor elétrico de indução trifásico. Os resultados, porém, não determinam as perdas na aplicação final, e, portanto, para determinar a eficiência na aplicação final seria necessário a realização do ensaio com a configuração motor e inversor que será

utilizado. O método direto é o método recomendado pela norma para apuração das perdas totais do motor quando operado por inversor de frequência.

O método de interpolação para determinação do mapa de eficiência proposto pela norma apresentou-se satisfatório e foi capaz de determinar a eficiência em rotações maiores do que 25% da rotação nominal. Em velocidades menores do que 25% devem ser avaliadas de outra maneira, visto que o método possui um grande nível de incerteza para essa faixa de operação. Apesar da inconsistência apresentada nos pontos próximos ao ponto nominal do motor ensaiado, na seção 7.6 da norma IEC 60034-2-3 e na seção 4.3.7 deste trabalho é apresentado um procedimento opcional para correção dos erros de interpolação da norma. É recomendado pela norma 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 o autor sugere que esses pontos sejam incluídos no plano de ensaio para 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 sugerido pela norma. Foi identificado que nos pontos com menor torque e maior rotação as perdas devido à componente harmônica foram mais acentuadas e que as perdas harmônicas foram dependentes do torque requerido pela carga e pela rotação da máquina elétrica.

Em relação ao rendimento do motor elétrico foi identificado que a componente da perda harmônica possui grande relevância na determinação do rendimento 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 menor que 50% do torque nominal, independentemente da rotação. Apesar das regulamentações vigentes estarem baseadas em níveis mínimos de eficiência no ponto nominal de operação do motor, não se pode ignorar o fato que grande parte dos motores elétricos são dimensionados para operação no ponto máximo da carga acionada, mas operam grande parte do tempo com carga parcial. Portanto, os benefícios do aumento do nível de rendimento de motores elétricos propostos pelos órgãos reguladores podem não ser tão eficientes quanto o correto dimensionamento do motor elétrico para a carga acionada.

Para trabalho futuros, o autor também sugere a realização de uma avaliação experimental para o método de somatório das perdas da norma 60034-2-3 para avaliar o comportamento das perdas harmônicas e avaliar a variação das perdas harmônicas nos resultados do ensaio em vazio e o ensaio em carga. Sugere-se ainda a realização de um estudo comparativo do aumento das perdas nos pontos indicados pela IEC 60034-2-3 com diferentes níveis de distorções harmônicas, frequência de chaveamento e controle. Repetir os ensaios com outros motores averiguando se outros motores apresentam comportamento semelhante ao apresentado nesta dissertação também deve ser objeto de investigação futura.

REFERÊNCIAS

L. AARNIOVUORI, P. RASILO, M. NIEMELÄ and J. J. PYRHÖNEN, "Analysis of 37-kW Converter-Fed Induction Motor Losses," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 9, pp. 5357-5365, Sept. 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2555278.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (2012) “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.” Revisão 4, data de vigência: fevereiro de 2012 a dezembro de 2014.

ALMEIDA, A. de; FERREIRA, F.; DUARTE, A. Q. *Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014. v. 50, n. 2, p. 1274–1285, 2014.

BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; ET ALLI.; Eficiência Energética: Teoria e Prática. Fupai, Unifei, PROCEL/Eletrobras, 2007

BRITO, C. M. C. e Leão, R. P. S. (2006) “Desempenho de um Motor de Indução Trifásico Submetido a Distorções Harmônicas na Tensão de Alimentação” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.

DECKMANN, S.M. e POMILIO, J. A. “Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica”, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Unicamp

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC 60034-1 – *Rotating electrical machines – Part 1 : Rating and Performance*, Geneva, Switzerland, Edition 13, 2017

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC 60034-2-1 – Part 2-1:*Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*, Geneva, Switzerland, Edition 2, 2014

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC 60034-25 – Part 25: *AC electrical machines used in power drive systems – Application guide*, Geneva, Switzerland, Edition 3, 2014

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC 60034-30-1 – Part 30-1: *Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*, Geneva, Switzerland, Edition 1, 2014

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC TS 60034-30-2 – Part 30-2: *Efficiency classes of variable speed AC motors (IE code)*, Geneva, Switzerland, Edition 1, 2016

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC 61800-9-1 – Part 9-1: *Ecodesign for power drive system, motor starters, power electronics and their driven application – General requirements for setting energy efficiency standards for driven equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM)*, Geneva, Switzerland, Edition 1, 2017

International Electrotechnical Comission (IEC) – IEC 61800-9-1 – Part 9-2: *Ecodesign for power drive system, motor starters, power electronics and their driven application – Energy efficiency indicator for power drive systems and motor starters*, Geneva, Switzerland, Edition 1, 2017

IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519, 2014

LIPO, T. A.; *Introduction to AC Machine Design*, vol. 1,University of Wisconsin – Madson, WisPERC, 1996.

KARAVASILIS, G. R, Estudo de motores acionados por conversores de frequência e influência no sistema isolante, 2008, Florianopolis, UFSC P.148

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.

KIM, Y. H. JUN, H. D. MOON, J. W., JUNG, S. Y., “Comparison on the IM Efficiency Measurement Results According to IEC Standards,” presented at 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece, Sep. 3-7, 2018

KLINGSHIRN, 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.

NEMA. *Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems*. [S.l.]: National Electrical Manufacturers Association, 2021. Application Guide.

NEVES, A. B. F. (2014). Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorção Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um MIT. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM – 579/2014, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 153 p.

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. NEMA MG1 – *Motors and Generators* . Rosslyn, Virginia, 2006.

N. Shah "Harmonics in power systems — Causes, effects and control", Siemens, 2013

PEÇAS LOPES, J. A., “Instalações Elétricas Industriais – Pertubações na Tensão e seus Impactos na Exploração de Redes Elétricas Industriais”,Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,

LEE, C. Y., Lee W. J. (1999) “Effects of Nonsinusoidal Voltage on the Operation Performance of a Three-phase Induction Motor.” Publicado em: IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, nº 2.

PIRES, L. W, Estudo do comportamento das perdas ferro em motores de indução alimentados por conversores de frequência- 2008.166 p.

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.

RUTHES, J. R. Análise do Motor de Indução Trifásico Alimentado por Conversor Estático / Jacques Roberth Ruthes. -- 2019.187 p.

SILVA, V. P., Bispo, D., Silva, S. F. De P. E Delaiba, A. C. (2010) “Estudo do Comportamento de Motores de Indução Quando Submetidos à Alimentação Não Ideal.” Publicado em: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.

US Department of Energy - DOE/GO-102014-4107 – *Premium efficiency motor selection and application guide* – A handbook for industry – February, 2014

YAMACHITA, A. R. - Determinação das perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha – 2013 – P. 158

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. Paris, France: International Energy Agency, 2011.

WEG - *Induction motors fed by PWM frequency inverters* – Technical guide Rev.30 – 11/2018

WEG - Regulamentação Globais de Eficiência para eficiência motores elétricos de baixa tensão. Cód 50065222 – Rev. 13 – 07/2022

APÊNDICE A - MEMORIAL DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES QUANDO ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

O apêndice A apresenta o memorial de cálculo para determinação dos coeficientes de interpolação para determinação da eficiência em qualquer ponto de operação quando alimentação senoidal.

Dados de Placa do Motor:

Rotação Nominal	n_n	1786 rpm
Potência Nominal	P_n	110 kW

Torque Nominal Motor:

$$T_n = \frac{P_n}{\frac{2 * \pi * n_n}{60}} = 588{,}1Nm \tag{33}$$

As perdas nos 7 pontos de operação

Pontos	Rotação (RPM)	Torque (Nm)	Potência na ponta de eixo (W)	Potência nos terminais motor (W)	Perdas (W)
P_1	1604,5	588,46	98876	103565	4689
P_2	887,5	589,05	54746	58089	3343
P_3	433,8	587,86	26705	29848	3143
P_4	1612,8	295,05	49831	52140	2309
P_5	892,8	295,05	27585	29026	1442
P_6	896,5	147,32	13831	14680	850
P_7	446,5	148,83	6959	7507	548

Perdas relativas para fórmula de interpolação:

$$P_x = \frac{Perdas}{Potência\ Nominal} \tag{34}$$

Perdas Relativas	Perdas (W)	Potência Nominal (W)	Coeficiente
P_1	4689	110000	0,042628
P_2	3343	110000	0,030398
P_3	3143	110000	0,028573
P_4	2309	110000	0,020987
P_5	1442	110000	0,013104
P_6	850	110000	0,007725
P_7	548	110000	0,004982

Os coeficientes de interpolação podem ser calculados aplicando diretamente as perdas relativas da tabela acima pelas fórmulas (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23) e (24).

CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7
-0,000146	0,005594	0,007494	-0,025217	0,028320	0,008443	0,022928

APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES QUANDO ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL

O apêndice B apresenta o memorial de cálculo para determinação dos coeficientes de interpolação para determinação da eficiência em qualquer ponto de operação quando alimentação não senoidal.

Dados de Placa do Motor:

Rotação Nominal	n_n	1786 rpm
Potência Nominal	P_n	110 kW

Torque Nominal Motor:

$$T_n = \frac{P_n}{\frac{2 * \pi * n_n}{60}} = 588{,}1Nm \tag{35}$$

As perdas nos 7 pontos de operação

Pontos	Rotação (RPM)	Torque (Nm)	Potência na ponta de eixo (W)	Potência nos terminais motor (W)	Perdas (W)
P_1	1603	590,1	99058	103980	4922
P_2	884	590,3	54645	58820	4175
P_3	434	590,3	26828	30370	3542
P_4	1611	293,9	49582	52500	2918
P_5	892	295,8	27631	29430	1799
P_6	896	149,9	14065	15350	1285
P_7	446	148,7	6945	7880	935

Perdas relativas para fórmula de interpolação:

$$P_x = \frac{Perdas}{Potência\ Nominal} \tag{36}$$

Perdas Relativas	Perdas (W)	Potência Nominal (W)	Coeficiente
P_1	4922	110000	0,044749
P_2	4175	110000	0,037951
P_3	3542	110000	0,032198
P_4	2918	110000	0,026471
P_5	1799	110000	0,016357
P_6	1285	110000	0,011682
P_7	935	110000	0,008500

Os coeficientes de interpolação podem ser calculados aplicando diretamente as perdas relativas da tabela acima pelas fórmulas (17), (18), (19), (20), (21), (22), (23) e (24).

CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6	CL7
0,008143	-0,006418	0,024617	0,036366	-0,033869	-0,005786	0,022932

APÊNDICE C – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

Tempo Minutos	Temp Ambiente (°C)	Temp Carcaça (°C)	Temp Fase R (°C)	Temp Fase S (°C)	Temp Fase T (°C)	Temp mancal dianteiro (°C)	Temp mancal traseiro (°C)
47	23,3	25,2	27,5	28	28	25	25,9
56	23,3	25,9	46,6	50,8	55,4	29,4	31,6
66	23,2	29,1	57,7	62,7	68	34,9	37,7
76	23,2	32,9	65,5	70,6	76,2	39,4	42,5
86	23,2	36,1	72	77	83,1	43,1	46,4
96	23,2	38,6	76,7	81,4	87,5	46	49,3
106	23,1	40,2	72,9	76,8	80,8	47,7	50,3
116	23,1	41	73,2	76,9	80,8	48,5	50,7
126	23	41,3	73,7	77,2	81,4	49	51,1
136	22,9	41,6	74,3	77,8	82	49,4	52
146	22,9	41,9	74,9	78,3	82,4	49,7	52,3
156	22,9	42,1	75,3	79	83,2	50,1	52,7
166	22,9	42,2	75,9	79,6	83,5	50,4	52,8
176	22,8	42,3	76,1	80	84,1	50,5	53,1
186	22,8	42,5	76,5	80,2	84,1	50,7	53,3
196	22,8	42,7	76,8	80,1	84,7	50,9	53,6
206	22,8	42,8	77	80,6	84,8	51,2	53,7
216	22,8	42,8	77,3	80,8	84,8	51,4	53,8
226	22,7	42,9	77,3	80,9	85,2	51,5	54
236	22,7	42,9	77,5	81,1	85,3	51,5	54
246	22,6	42,9	77,6	81,2	85,3	51,5	53,9
256	22,6	42,9	77,6	81,3	85,3	51,5	54
266	22,5	42,8	77,7	81,4	85,6	51,5	54,1
276	22,5	42,9	77,8	81,6	85,6	51,6	54,2
286	22,4	42,9	77,8	81,6	85,8	51,8	54,2
296	22,4	43	77,9	81,5	85,5	51,9	54,2
306	22,3	43,1	77,9	81,7	85,6	52	54,3

APÊNDICE D – ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA COM ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL

Tempo Minutos	Temp Ambiente (°C)	Temp Carcaça (°C)	Temp Fase R (°C)	Temp Fase S (°C)	Temp Fase T (°C)	Temp mancal dianteiro (°C)	Temp mancal traseiro (°C)
3	32,1	32	45,4	46,5	48,6	32,6	32,4
4	32,1	32	43,8	45,7	48,6	32,7	32,6
5	32,1	32,1	43,1	44,7	47,6	32,8	32,8
10	32,1	32,7	44,5	45,5	46,9	34,4	34,8
11	32,2	32,8	45	44,8	46,1	34,5	35
12	32,2	32,9	45	44,3	45,4	34,6	35,2
17	32,2	33,5	44	43	43,7	35,5	36,2
23	32,2	34,4	45,9	47,3	48	36,9	37,7
33	32,1	36,9	58,2	61,3	64,5	42,3	42,9
43	32,1	40	64,2	67,4	71	45,9	46,5
48	32,1	41,2	66,1	69,3	73,1	47	48
50	32,1	41,6	66,9	69,4	71,4	47,5	48,4
58	32,1	43,3	69	72,5	76,2	49,3	50,2
68	32	45	72,4	76	79,8	51,3	52,4
78	32	46,3	74,9	78,7	82,4	52,6	54,2
88	31,9	47,3	76,7	80,6	84,3	53,6	55,5
98	31,9	48,2	78,3	81,9	86	54,5	56,9
108	31,7	48,5	79,5	83,4	87,5	55,1	57,7
118	31,6	49,1	80,5	84,4	88,4	55,5	58,5
128	31,4	49,5	81,4	85,5	89,3	55,9	58,9
138	31,3	49,9	82,2	86	90	56,3	59,4
148	31,2	49,9	82,8	86,6	90,6	56,7	59,6
158	31	49,7	83,2	87,5	91,3	56,8	59,6
168	30,8	49,8	83,5	87,4	91,3	56,9	59,7
178	30,6	49,9	83,8	87,6	91,7	57	59,9
188	30,4	49,9	84	88	92	57,1	60
198	30,2	49,9	84,2	87,9	92,3	57,2	60,1
208	30	49,8	84,3	88	92,4	57,2	60
218	29,8	49,7	84,4	88,3	92,3	57,2	60
228	29,6	49,7	84,4	88,2	92,4	57,2	60
238	29,4	49,6	84,5	88,3	92,4	57,1	60
248	29,2	49,6	84,5	88,5	92,5	57,1	60
258	29,1	49,8	84,5	88,6	92,4	57,1	60,1
268	29	49,8	84,6	88,5	92,6	57,2	60,2
278	28,9	49,7	84,7	88,8	92,7	57,2	60,1
288	28,8	49,6	84,6	88,5	92,7	57,1	60
298	28,7	49,5	84,6	88,6	92,6	57,1	60
308	28,5	49,4	84,6	88,7	92,4	57,1	59,9
313	28,5	49,2	84,5	88,5	92,4	57,1	59,8