

Comparison of Three-Phase Induction Motors Testing Methods using ABNT 17094-3:2018 and IEC 60034-2-1:2014

L.B.Sousa, F.Sass, and M.Z. Fortes, *Senior Member, IEEE*

Abstract— Electric motors are considered the most important equipment among those that consume final electric energy in Brazil. It is estimated that the induction motors and the systems driven by them are responsible for approximately 70% of the Brazilian industrial sector's energy consumption. Therefore, obtain its losses is a relevant challenge for energy efficiency. Any initiative developed to increase these devices' performance brings environmental benefits, energy benefits, and cost reduction for the industrial, commercial, and other sectors. Nowadays, several standards can be used to determine the performance characteristics of induction motors. However, their application results in variations in the performance calculations. Thus, this paper evaluated two tests on three-phase induction motors comparing the different methods applied between the standards ABNT 17094-3:2018 and IEC 60034-2-1:2014. These standards present different normalized equations. Thus, this paper seeks to obtain engine performance variation when testing it using different standards, comparing and discussing the results. The results obtained confirm that the methods have different results and the parameters can be compared.

Index Terms – Energy Efficiency, Energy Measurement, Induction Motors.

I. INTRODUÇÃO

O motor elétrico é considerado o equipamento mais importante para o consumidor industrial e possui grande participação neste setor. Estima-se que os motores elétricos e os sistemas acionados por eles sejam responsáveis por aproximadamente 70% do consumo de toda a energia do setor industrial [1-2]. Há mais de duas décadas que os pesquisadores da área de motores de indução buscam desenvolver estudos e aplicações para assim reduzir as perdas destes equipamentos [3-7].

As principais economias no mundo possuem mecanismos de regime regulatório ou obrigatório que estabelecem requisitos mínimos e níveis de eficiência para motores comercializados em seus países, e projetos que incentivem a produção de motores de alto rendimento [8]. Existem diversas normas de ensaios de motores elétricos que determinam as características de desempenho do motor de indução, tendo como objetivo final obter o rendimento das máquinas ensaiadas. Como exemplo: no Brasil, o ensaio de motores é regulamentado pela norma ABNT

NBR 17094-3:2018 [9] e devem seguir os valores mínimos de rendimento determinados da norma ABNT NBR 17094-1:2018 [10]; na China os métodos de ensaios são determinados pela norma GB/T 1032:2012 [11] seguindo os valores mínimos de rendimento da norma GB 18613-2012 [12]; na Austrália, os métodos de ensaios são estabelecidos pela norma AS/NZS 1359.102.3:2004 [13] e seguem as exigências de eficiência energética da norma AS/NZS 1359.5:2004 [14]; na Europa, os métodos de ensaios são determinados pela norma IEC 60034-2-1:2014 [15] se orientando pelos valores mínimos de rendimento da norma IEC 60034-30-1:2014 [16]. Nos casos da Índia, México e Coréia do Sul, os métodos de ensaios e os valores mínimos de rendimento estão presentes em apenas uma norma de cada país, apresentados, respectivamente, pelas IS 15999-2-1:2011 [17], NOM-016-ENER-2016 [18] e KS C IEC 60034-1:2008 [19]. Essas, entre outras normas, regulamentam os ensaios de motores de indução em todo o mundo. Estas normas utilizam metodologias diferentes, de modo que se um mesmo motor for ensaiado por normas distintas, serão obtidos diferentes valores de rendimentos. Essa diferença motiva grandes discussões entre os comitês internacionais sobre qual norma e/ou método garante o resultado mais próximo do real para o motor de indução. Nos últimos anos, muitos esforços foram realizados para harmonizar essas normas de eficiência energética, mas mesmo com as revisões mais recentes ainda existem algumas diferenças. Alguns estudos e comparações entre métodos de ensaios que expressam as diferenças entre normas de ensaio de motores de indução podem ser vistos em [20-22].

A fim de analisar essas diferenças este artigo aplicou-se dois ensaios em um motor de indução trifásico (MIT), um utilizando a ABNT 17094-3:2018 [9], que substituiu a ABNT 5383-1:2002 [23] em julho de 2019. Com essa norma, além de se obter as características de desempenho dos motores ensaiados, os resultados de rendimentos apresentados devem atender aos valores mínimos exigidos pela ABNT 17094-1:2018 [10]. Dentre os diversos métodos apresentados pela ABNT NBR 17094-3:2018 [9] utilizou-se o método 2, pois é método mais aplicado entre os Laboratórios acreditados no Brasil para obter o rendimento do motor de indução. Este ensaio utiliza o freio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator, rotor, núcleo, por atrito e ventilação [9]. Na sequência utilizou-se a norma IEC 60034-2-1:2014 [15], que tem como objetivo estabelecer métodos de ensaio para determinar a eficiência e também obter perdas específicas não só de MIT's, mas também de máquinas de corrente contínua e máquinas síncronas. Os valores mínimos de rendimento encontrados no ensaio devem atender aos requisitos da IEC 60034-30-1:2014 [16]. Dentre os métodos apresentados por esta norma, utilizou-se o método 2-1-1B, somatório das

Este trabalho foi apoiado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica; L.B.Sousa, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Brasil (e-mail: leandrobraz.sousa@hotmail.com).

F.Sass, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Brasil (email: felipesass@id.uff.br)

M.Z.Fortes, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Brasil (email: mzmamboti@id.uff.br)

perdas, perdas em carga adicional de acordo com o método das perdas residuais. Esse método é aplicado ao artigo por ser um dos mais utilizados pelos Laboratórios do continente europeu para determinar o rendimento do MIT. O objetivo principal deste trabalho é determinar a variação do rendimento de um motor quando o mesmo é submetido a ensaios por metodologias distintas.

II. MÉTODOS DE ENSAIO

Um MIT com potência de 3 CV foi utilizado como referência nos ensaios. Ao finalizar os ensaios a partir dos dados coletados é possível realizar uma comparação dos procedimentos de ensaio e resultados obtidos entre o método da ABNT 17094-3:2018 [9] e da IEC 60034-2-1:2014 [15]. O arranjo da bancada experimental para as duas normas está ilustrado na Fig. 1. Detalhes da conexão deste ensaio podem ser encontrados em [24].

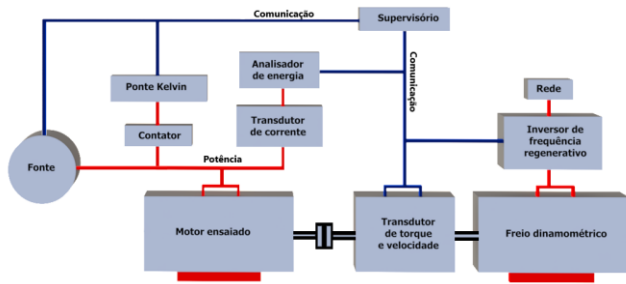


Fig. 1. Arranjo dos ensaios [21].

Nesta pesquisa, para obter o rendimento da máquina, ambos os métodos [9, 15] realizam quatro tipos de ensaios, sendo eles: medição da resistência a frio; ensaio de elevação de temperatura; ensaio em carga; ensaio a vazio. Entretanto, esses métodos possuem divergências entre algumas equações normalizadas, pontos de aquisição de dados e procedimentos de ensaios que são determinantes para possíveis variações no rendimento da máquina. A seguir são apresentados os procedimentos de ensaio da ABNT 17094-3:2018 [9] e suas diferenças em relação a IEC 60034-2-1:2014 [15]. Sabendo que as duas normas seguem a mesma sequência operacional conforme ilustrado pelo fluxograma da Fig. 2.

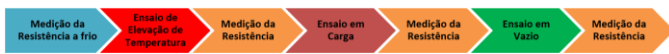


Fig. 2. Fluxograma dos ensaios [24].

II.1 ABNT 17094-3:2018

Este é um método no qual a eficiência e o fator de potência são determinados aplicando o método 2 da referida norma. O método 2 é aplicado utilizando um dinamômetro com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas no estator, rotor, núcleo, por atrito e ventilação. A seguir serão apresentados os ensaios e seus procedimentos.

A. Medição da Resistência a Frio

Inicialmente, com o MIT desligado e posicionado no setor de ensaio, o mesmo deve ficar exposto a temperatura ambiente local até o momento em que a diferença entre a temperatura

ambiente e a temperatura da carcaça do motor não seja maior que 1 K, devendo estar localizado distante de fontes externas de calor para não haver alterações nas grandezas medidas. O K é uma constante que representa a variação entre a temperatura ambiente e a carcaça do motor. É necessário fixar os terminais do medidor junto com os terminais do motor para efetuar a medição da resistência por fase. Quando a carcaça do motor estiver em equilíbrio térmico é medida a resistência média de linha e a própria temperatura ambiente utilizando uma ponte de Kelvin e termopares.

B. Ensaio de Elevação de Temperatura

Neste ensaio o motor é acionado com carga nominal em regime contínuo até que atinja a estabilidade térmica, conforme ilustrado na Fig. 3. Sabendo que o motor branco é o freio dinâmico e o motor verde o motor a ser ensaiado.

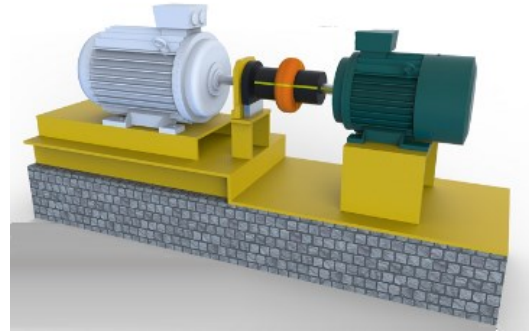


Fig. 3. Ensaio de elevação de temperatura [24].

Para o motor atingir o equilíbrio térmico é necessário que no período de uma hora a variação da temperatura na carcaça lateral direita e lateral esquerda seja menor que 1 K, sabendo que a medição da temperatura é coletada através de termopares. As grandezas de temperatura, conjugado, potência de entrada, corrente eficaz, tensão eficaz, velocidade e frequência são coletadas em intervalos de 30 minutos. Depois de finalizado o ensaio, a fonte de alimentação do MIT é desligada, o motor é parado através do freio dinâmico e é medida a resistência de linha do estator com o motor quente dentro do intervalo estipulado na Tabela I para cada faixa de potência.

TABELA I
INTERVALO PARA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA.

Potência (cv)	Intervalo de Tempo (s)
≤ 50	0 – 30
50 < P ≤ 200	0 – 90
> 200	0 – 120

Sendo assim se torna possível determinar a temperatura t_2 conforme apresentado pela equação (1), utilizando o método da variação de resistência.

$$t_2 = \frac{R_2 \cdot (t_1 + k)}{R_1} - k \quad (1)$$

onde:

t_2 é a temperatura final do enrolamento (°C);

t_1 é a temperatura inicial do (°C);

R_2 é a resistência final do enrolamento (Ω);

R_1 é a resistência inicial do enrolamento (Ω);

k é uma constante de valor igual a 234,5.

C. Ensaio em Carga

Aplica-se seis pontos percentuais do conjugado do motor de forma decrescente, sendo eles: 150, 125, 100, 75, 50, 25%. Para realizar este ensaio o motor deve ser alimentado com tensão e frequência nominais. As grandezas medidas são: conjugado; potência de entrada; corrente eficaz de linha; velocidade do motor; e tensão eficaz de linha. É necessário mensurar no ensaio em carga as grandezas listadas em um ponto em que o dinamômetro esteja desligado, ou seja, o ponto de 0% de carga, para que seja possível determinar a correção do freio dinamométrico. No ensaio em carga também é calculada a potência de saída do MIT em cada ponto do ensaio, de acordo com a equação (2).

$$P_s = \frac{C_{(corrigido)} \cdot n_m}{k_1} \quad (2)$$

onde:

P_s é a potência de saída (W);

$C_{(corrigido)}$ é o conjugado corrigido da máquina (N.m);

n_m é a velocidade medida do motor (rpm);

k_1 é uma constante de valor igual a 9,549.

Antes do primeiro e depois do último ponto é necessário medir a temperatura ambiente e a resistência do enrolamento. Para que o ensaio seja validado a relação da resistência do enrolamento deve ter valor de até 3,5% para motores até 15 kW e 3% para motores com potências acima de 15 kW.

D. Ensaio a Vazio

Este ensaio deve ser iniciado após o ensaio em carga, desacoplando o motor que está sendo ensaiado do freio dinamométrico. É necessário medir a resistência do enrolamento do estator antes e após o término do ensaio de forma que a relação desta resistência obedeça ao mesmo critério do ensaio em carga para a sua validação. O motor é acionado com tensão e frequência nominais. Logo após, aplicam-se seis valores de tensões na máquina de forma decrescente, sendo eles 110, 100, 80, 60, 40 e 20% da tensão nominal. Para cada valor são mensuradas as seguintes grandezas: tensão de linha; corrente de linha; e potência de entrada. É necessário que este ensaio seja realizado o mais rápido possível para minimizar os erros de medição de resistência. Após os ensaios realizados são iniciados os procedimentos para determinar as perdas do MIT. Sabendo que o enrolamento do motor em teste é composto de fios de cobre.

E. Perda de Atrito e Ventilação

As perdas por atrito e ventilação são consideradas independente da carga, e os seus valores calculados para a condição em que o MIT está desacoplado, podendo ser usadas nos outros seis pontos de carga ensaiados. Para determinar a perda por atrito e ventilação, primeiramente é calculada a perda joule no estator, conforme dado por a equação (3) [9], para cada ponto de tensão do ensaio a vazio.

$$P_{estv} = 1,5 \cdot R \cdot I^2 \quad (3)$$

onde:

P_{estv} é a perda joule do estator a vazio (W);

R é a resistência média do ensaio a vazio (Ω);

I é a corrente em cada ponto do ensaio a vazio (A).

Subtraindo a perda joule do estator do valor da potência de entrada medida no ensaio a vazio, obtém-se o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro através da equação (4).

$$\sum P_{AV} + P_{fe} = P_e - P_{estv} \quad (4)$$

onde:

$\sum P_{AV} + P_{fe}$ é igual ao somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro (W);

P_e é igual a potência de entrada do ensaio a vazio (W);

Para determinar a perda de atrito e ventilação é utilizado o método de regressão linear extrapolando linearmente os valores de tensão ao quadrado, entre 60 e 20% da tensão nominal, versus o somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas no ferro, para a tensão zero utilizando a equação (5).

$$Y = A \cdot X + B \quad (5)$$

onde:

Y é uma variável dependente;

A é a inclinação da reta;

B é o ponto de interseção do eixo Y com a reta;

X é uma variável independente.

F. Perdas no Ferro

As perdas no ferro, assim como as perdas por atrito e ventilação são consideradas independentes da carga. As perdas no ferro são calculadas no ensaio a vazio, quando a máquina está com tensão nominal, de acordo com a equação (6).

$$P_{fe} = \sum P_{AV} + P_{fe} - P_{AV} \quad (6)$$

onde:

P_{fe} é a perda no ferro do MIT (W);

P_{AV} é a perda de atrito e ventilação (W).

G. Perda do Estator Ensaio em Carga

Para obter as perdas no enrolamento do estator em cada ponto do ensaio em carga é necessário utilizar a equação (7), onde o valor da resistência R_3 é expresso através da média aritmética da medição da resistência antes de iniciar e depois de terminar o ensaio em carga.

$$P_{estc} = 1,5 \cdot R_3 \cdot I^2 \quad (7)$$

onde:

P_{estc} é a perda do estator calculada no ensaio em carga (W);

R_3 média da Resistência no ensaio em carga.

H. Perdas do Rotor Ensaio em Carga

Para calcular as perdas rotóricas do motor em cada ponto de carga é preciso obter o valor do escorregamento. Quando obtido o valor do escorregamento calcula-se as perdas do rotor no ensaio em carga, conforme dado por a equação (8).

$$P_{rot} = (P_e - P_{estc} - P_{fe}) \cdot S \quad (8)$$

onde:

S é o escorregamento do motor (p.u);

P_{rot} é a perda do rotor em cada ponto do ensaio em carga (W).

I. Perda Suplementar Corrigida

A perda suplementar corrigida é calculada aplicando a regressão linear as perdas residuais calculadas para os pontos de 150 a 25% do conjugado nominal no ensaio em carga. Primeiramente são calculadas as perdas residuais conforme apresentado pela equação (9). Em seguida as perdas suplementares corrigidas podem ser calculadas conforme dado por a equação (10) aplicando o método dos mínimos quadrados.

$$P_{res} = P_e - P_s - P_{estc} - \sum P_{AV} + P_{fe} - P_{rot} \quad (9)$$

$$P_{sup (corrigida)} = A \cdot C^2 \quad (10)$$

onde:

P_{res} é a perda residual (W);

$P_{sup (corrigida)}$ é a perda suplementar corrigida (W);

C é variável independente, conjugado (N.m).

Segundo [9], se o fator de correlação apresentar valor menor que 0,95 ou se a inclinação for negativa, o pior ponto deve ser excluído e em seguida é aplicada uma nova regressão linear. Se o novo coeficiente de correlação aumentar para um valor igual ou superior a 0,95 e a inclinação for positiva, o ensaio é validado. Caso contrário é possível que haja erros de leitura das grandezas elétricas ou erros na instrumentação, sendo recomendado que se refaça o ensaio completo.

J. Correção das Perdas

Para realizar o cálculo do rendimento do MIT se torna necessário que algumas grandezas já calculadas tenham que ser corrigidas como as perdas do enrolamento do estator, do rotor, o escorregamento e a potência de saída. Desta forma, é calculado um novo valor para a resistência R_{2c} , corrigindo a temperatura t_2 para 25° C de acordo com a equação (11).

$$R_{2c} = \frac{R_1(t_2 - t_1 + t_a + k)}{(t_2 + k)} \quad (11)$$

onde:

R_{2c} é a resistência corrigida (Ω);

t_a é a temperatura de 25°C.

K. Rendimento

E por fim, após aplicar a correção das perdas corrigindo R_2 para uma temperatura de 25° C o rendimento do motor em cada ponto de carga pode ser determinado pela equação (12), utilizando a potência de saída corrigida.

$$\eta = \frac{P_{s (corrigida)}}{P_e} \cdot 100 \quad (12)$$

onde:

η é o rendimento do motor (%);

$P_{s (corrigida)}$ é a potência de saída corrigida (W).

II.2 IEC 60034-2-1:2014

Os procedimentos para determinar a eficiência e o fator de potência do motor de indução se baseiam no método 2-1-1B, conhecido como somatório das perdas. As perdas adicionais em carga serão determinadas de acordo com o método das perdas residuais. Este é um método no qual a eficiência é determinada através do somatório das perdas no ferro, perdas de atrito e ventilação, perdas do enrolamento do estator, perdas do enrolamento do rotor e perdas em carga adicional. Diante desta metodologia serão abordadas as principais diferenças entre os procedimentos de ensaios da ABNT e IEC.

A. Medição da Resistência a frio

Os procedimentos são idênticos aos ensaios da ABNT 17094-3:2018 [9].

B. Ensaio de Elevação de Temperatura.

O que difere deste ensaio para o ensaio da ABNT é o período de estabilização do motor. Neste caso, para o MIT atingir sua estabilidade térmica é necessário que a temperatura em cada lado da carcaça do motor tenha variação no máximo de 1 K durante um intervalo de 30 minutos. Este ensaio também determina a temperatura t_2 para qual serão corrigidas as perdas do enrolamento estator e do rotor, utilizando o método da variação da resistência, de modo que t_2 é calculado conforme dado por a equação (1). Diferente da ABNT, esta norma não especifica um período para efetuar a medição de R_2 no final do ensaio.

C. Ensaio em Carga

Neste ensaio, o diferencial em relação a ABNT é que a IEC é mais conservadora, aplicando níveis de cargas menores em relação a ABNT, sendo os pontos variando de 125, 115, 100, 75, 50 e 25% do conjugado nominal. Neste caso, não é necessário efetuar medições das grandezas para o ponto 0% de carga, pois não é aplicada a correção do freio dinamométrico. Esta norma também não especifica nenhuma relação entre a resistência medida no início e no final do ensaio, para a sua validação.

D. Perda do Estator Corrigida

A perda do estator não corrigida é calculada para cada ponto do ensaio em carga, conforme dado por a equação (7). E neste caso é corrigida conforme dado por a equação (13) utilizando

um fator de correção K_θ apresentado na equação (14), corrigindo t_2 para uma temperatura de 25° C.

$$P_{est(corrigida)} = P_{est} \cdot K_\theta \quad (13)$$

$$K_\theta = \frac{k_3 + t_2 + 25 - t_1}{k_3 + t_2} \quad (14)$$

onde:

K_θ é o fator de correção da temperatura para 25°C;
 k_3 é uma constante de valor igual a 235, enrolamento de cobre;
 $P_{est(corrigida)}$ é a perda do estator corrigida (W).

E. Perda do Rotor Corrigida

A perda do rotor pode ser calculada utilizando a equação (8). Ela depende do escorregamento, que é corrigido através da equação (15). Desta forma, a potência do rotor corrigida pode ser calculada pela equação (16).

$$S_{(corrigido)} = S \cdot K_\theta \quad (15)$$

$$P_{rot(corrigida)} = (P_e - P_{est(corrigida)} - P_{fe(carga)}) \cdot S_{(corrigido)} \quad (16)$$

onde:

$S_{(corrigido)}$ é o escorregamento corrigido (p.u);
 $P_{rot(corrigida)}$ é a perda do rotor corrigida (W);
 $P_{est(corrigida)}$ é a perda do estator corrigida (W);
 $P_{fe(carga)}$ é a perda do ferro (W).

F. Potência de Entrada Corrigida

Para ensaios dos motores utilizando a IEC, a potência de entrada medida é corrigida utilizando as perdas do estator e do rotor também corrigidas, podendo ser calculada conforme dado por a equação (17).

$$P_{e(corrigida)} = P_e - (P_{est} - P_{est(corrigida)} + P_{rot} - P_{rot(corrigida)}) \quad (17)$$

onde:

$P_{e(corrigida)}$ é a potência de entrada corrigida (W).

G. Ensaio a Vazio

A principal diferença do ensaio a vazio da IEC é que nesse caso são aplicados oito pontos em porcentagem da tensão nominal, de forma decrescente, variando entre 110, 100, 95, 90, 60, 50, 40 e 30%.

H. Perda Constante

Finalizado o ensaio a vazio se torna possível determinar a perda constante. Ela é calculada utilizando a equação (18), considerando a potência e a perda do estator, ambas calculadas no ensaio a vazio.

$$P_C = P_{e(vazio)} - P_{estv} \quad (18)$$

onde:

P_C é a perda constante para cada ponto do ensaio a vazio (W).

I. Perda de Atrito e Ventilação zero

Após determinar a perda constante (P_C) do MIT, utiliza-se da regressão linear aplicando o método dos mínimos quadrados para obter a perda de atrito e ventilação zero ($P_{AV(zero)}$). É extrapolada linearmente uma curva entre a tensão ao quadrado (V^2) encontrada no ensaio a vazio para os pontos de 60 a 30% da tensão nominal versus as próprias perdas constantes (P_C). Este procedimento é semelhante ao exemplo da ABNT 17094-3:2018 [9], para determinar a perda de atrito e ventilação, mudando apenas os pontos percentuais da tensão nominal e substituindo os pontos do somatório das perdas de atrito e ventilação mais as perdas do ferro pelas perdas constantes.

J. Perda de Atrito e Ventilação

Como a perda de atrito e ventilação zero e o escorregamento já foram calculados, se torna possível determinar a perda de atrito e ventilação (P_{AV}) e a sua correção conforme as equações (19) e (20), respectivamente.

$$P_{AV} = P_{AV(zero)} \cdot (1 - S)^{2,5} \quad (19)$$

$$P_{AV(corrigida)} = P_{AV(constante)} \cdot (1 - S_{(corrigido)})^{2,5} \quad (20)$$

onde:

$P_{AV(corrigida)}$ é a perda de atrito e ventilação corrigida (W);
 $P_{AV(zero)}$ é a perda de atrito e ventilação zero (W).

K. Perda do Ferro

Para obter a perda do ferro interpolada para os pontos do ensaio em carga é necessário utilizar os dados de tensão e perda do ferro em cada ponto do ensaio a vazio. Para encontrar as perdas do ferro no ensaio a vazio utiliza-se a equação (21).

$$P_{fe(vazio)} = P_C - P_{AV(zero)} \quad (21)$$

onde:

$P_{fe(vazio)}$ é a perda do ferro (W).

Em seguida é calculada a queda de tensão do enrolamento primário para o ensaio a vazio e para o ensaio em carga, se atentando para os diferentes valores de tensão e potência de entrada medidos em cada ensaio, conforme dado por a equação (22), utilizando-se as equações (23) e (24).

$$U_{i(vazio)} = U_{i(carga)} = \sqrt{\left(V - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sen \phi\right)^2} \quad (22)$$

$$\cos \phi = \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I} \quad (23)$$

$$\sen \phi = \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \quad (24)$$

onde:

$\cos \phi$ é o fator de potência;

V é a tensão em cada ponto do ensaio (V); $U_{i(vazio)}$ é a queda de tensão do enrolamento primário no ponto de 110 e 90% da tensão nominal no ensaio a vazio (V);

$U_{i(carga)}$ é a queda de tensão do enrolamento primário em cada ponto do ensaio em carga (V).

Obtidos os valores de $U_{i(vazio)}$ e $U_{i(carga)}$ deve-se realizar uma interpolação do $U_{i(vazio)}$ e do $P_{fe(vazio)}$ utilizando $U_{i(carga)}$ para determinar a perda do ferro para cada ponto do ensaio em carga, conforme exemplo da Tabela II.

TABELA II
EXEMPLO DE INTERPOLAÇÃO.

Conjugado (%)	Tensão (%)	U _i (vazio)	P _{fe} (Vazio)	U _i (carga)	P _{fe} (carga) interpolada
125	110	476,5	48,7	374,4	23,8
115	100	432,6	33,3	376,3	24,0
100	95	395,5	26,6	379,6	24,5
75	90	356,1	21,4	385,4	25,3
50				390,0	25,9
25				394,4	26,5

L. Perda Suplementar Corrigida

A perda suplementar do MIT também é encontrada utilizando a análise de regressão linear pelo método dos mínimos quadrados, semelhante a ABNT 17094-3:2018 [9] método 2, utilizando da perda residual em cada ponto do ensaio em carga, calculada conforme apresentado pela equação (25).

$$P_{res} = P_e - P_s - P_{est} - P_{rot} - P_{fe(carga)} - P_{AV} \quad (25)$$

Após determinar as perdas residuais em cada ponto do ensaio em carga, as mesmas são suavizadas utilizando a análise de regressão linear também aplicando o método dos mínimos quadrados. Atentando que, para o ensaio ser validado o fator de correlação obtido deve seguir o mesmo critério estabelecido pela ABNT.

M. Somatório das Perdas

As perdas totais em cada ponto do ensaio em carga são calculadas a fim de determinar a eficiência da máquina, sendo o somatório das perdas do ferro, perdas de atrito e ventilação corrigidas, as perdas do estator e rotor corrigidas e as perdas suplementares corrigidas. As perdas totais podem ser obtidas através da equação (26).

$$P_T = P_{fe(carga)} + P_{AV(corrigida)} + P_{est(corrigida)} + P_{rot(corrigida)} + P_{sup(corrigida)} \quad (26)$$

N. Rendimento

Para determinar o rendimento do MIT é necessário corrigir a potência de saída utilizando a equação (27). E por fim, após determinar todas as variáveis que auxiliam a obter o valor da eficiência do MIT, a mesma pode ser encontrada em cada ponto do ensaio em carga, conforme dado por a equação (28).

$$P_{s(corrigida)} = P_e - P_T \quad (27)$$

$$\eta = \frac{P_{s(corrigida)} - P_T}{P_{s(corrigida)}} \quad (28)$$

III. COMPARAÇÃO DAS PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE A ABNT 17094-3:2018 E IEC 60034-2-1:2014

Os ensaios foram realizados no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) do grupo ELETROBRAS, no Laboratório de Ensaio de Eficiência em Máquinas Elétricas e em Transformadores junto dos seus dispositivos existentes. Os dados de placa do motor e os instrumentos utilizados estão expressos nas Tabelas III e IV, respectivamente.

TABELA III
DADOS DE PLACA DO MOTOR.

Potência (CV)	3	Fator de serviço	1,25
Corrente (A)	7,82	Categoria	N
Tensão (V)	220	Regime	S1
Velocidade (Rpm)	3470	Classe de isolamento	F
Frequência (Hz)	60	Ano de fabricação	2011
Fator de potência	0,85	Rendimento (%)	86,5

TABELA IV
INSTRUMENTOS UTILIZADOS.

Instrumento	Fator de abrangência	Incerteza (%)	Desvio (%)
Ponte kelvin	2,00	0,33	0,00
Multímetro digital	2,01	0,01	0,03
Transdutor de torque	2,00	0,28	0,25
Eixo de torção	2,00	0,12	-0,01
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,8	0,00
Transdutor de torque	4,53	0,69	0,40
Eixo de torção	2,00	0,12	0,03
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,81	0,00
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,80	0,00
Wattímetro digital trifásico	2,00	0,07	-0,21
Transdutor de corrente	2,01	0,12	0,06
Transdutor de corrente	2,37	0,24	0,14
Transdutor de corrente	2,00	0,12	0,16
Termômetro digital	2,00	0,0043	-0,13
Termômetro digital	2,00	0,0043	-0,15
Termômetro digital	2,00	0,0043	-0,15

Antes de iniciar os testes, o motor foi alinhado e acoplado a um freio dinamométrico conforme a Fig. 4. O freio dinamométrico é responsável por gerar a carga necessária para atender o motor que está sendo ensaiado. Ele é controlado por um inversor de frequência regenerativo de forma que, quando o freio está trabalhando como gerador, a energia gerada é retornada para o inversor, podendo ser entregue a rede ou dissipada em um banco de carga.

Este artigo busca analisar de forma comparativa o resultado das principais perdas calculadas utilizando as divergentes equações normalizadas expressas na ABNT e na IEC. Inicialmente são comparadas as perdas de atrito e ventilação, quando utilizando os procedimentos da ABNT: é aplicada uma regressão linear extrapolando linearmente para a tensão zero a curva entre o somatório das perdas de atrito e ventilação mais perdas no ferro versus a tensão ao quadrado medida no ensaio a vazio, aplicando o método dos mínimos quadrados. O valor

encontrado é considerado o mesmo para todos os pontos de carga, a Tabela V expressa a aplicação da regressão linear e o resultado obtido. Sendo Y o somatório da perda de atrito e ventilação mais ferro e B a perda de atrito e ventilação, ambos dados em kW.



Fig. 4. Bancada de ensaio.

TABELA V
PERDA DE ATRITO E VENTILAÇÃO ABNT.

V (%)	X	Y	X ²	Y ²	X*Y	A	B
132,41	17532,41	0,076	3,07E+8	0,0058	1329		
88,01	7745,76	0,066	6,00E+7	0,0043	509	7,2E-6	-
44,33	1965,15	0,051	3,86E+6	0,0026	100		
Σ	27243,32	0,192	3,71E+8	0,0126			

Já para a IEC, além de se utilizar uma regressão linear para calcular a perda de atrito e ventilação zero, também se utiliza do escorregamento da máquina para determinar as perdas de atrito e ventilação para cada ponto do ensaio em carga. Seus valores estão expressos conforme Tabela VI.

TABELA VI
PERDA DE ATRITO E VENTILAÇÃO IEC.

Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25
P_{AV} (W)	50,49	51,16	52,26	53,58	54,98	56,39

A perda no ferro obtida pela equação da ABNT é calculada utilizando do somatório da perda de atrito e ventilação mais perda no ferro para o ponto de 100% no ensaio a vazio e da própria perda de atrito e ventilação. A perda no ferro é considerada a mesma para todos os pontos de carga. O valor calculado foi de 0,140 kW.

Na IEC a perda no ferro é calculada para todos os pontos no ensaio a vazio utilizando da perda constante e da perda de atrito e ventilação zero. Seus valores estão expressos na Tabela VII para o motor analisado. A perda no ferro em carga também é obtida para todos os pontos do ensaio utilizando de uma interpolação. Os resultados obtidos estão expressos conforme Tabela VIII.

TABELA VII -
PERDA NO FERRO NO ENSAIO A VAZIO IEC.

V (%)	110	100	95	90	60	50	40	30
P_{fe} (W)	77,12	54,83	47,92	42,06	18,03	12,40	7,94	4,59

Diferente da ABNT, a IEC não aplica a correção do freio dinâmico. Desta forma, o conjugado medido não é corrigido para determinar as perdas suplementares do MIT, podendo acarretar em diferenças nos resultados do fator de correlação. A última observação e não menos importante é no processamento do rendimento do motor. Para a ABNT as perdas são corrigidas utilizando diretamente da correção de R_2 para uma temperatura de 25°C. As perdas calculadas estão expressas conforme Tabela IX. Já a IEC utiliza um fator de correção da temperatura do enrolamento K_θ para corrigir todas as perdas no processamento do rendimento. Seus resultados estão expressos conforme Tabela X.

TABELA VIII
PERDA NO FERRO, ENSAIO EM CARGA IEC.

Conjugado (%)	V (%)	U_i (vazio) (V)	P_{ferro} (vazio) (W)	U_i (carga) (V)	P_{ferro} (carga)
125	110	241,70	77,12	209,80	48,25
115	100	220,09	54,83	210,93	48,88
100	95	209,22	47,92	212,73	49,92
75	90	198,39	42,06	214,43	50,94
50				215,66	51,71
25				217,75	53,12

TABELA IX
PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO ABNT.

Resistência do estator corrigida para 25 °C (Ω)						1,3837
Conjugado (%)	150	125	100	75	50	25
Conjugado corrigido (N.m)	9,200	7,700	6,080	4,640	3,160	1,540
Perda estator corrigida (kW)	0,284	0,202	0,133	0,088	0,054	0,031
Escorregamento corrigido (pu)	0,065	0,054	0,041	0,031	0,020	0,010
Perda do rotor corrigida (kW)	0,227	0,157	0,093	0,053	0,024	0,006
Potência de saída corrigida (kW)	3,238	2,732	2,198	1,694	1,160	0,575
Perdas totais corrigidas (W)	671,7	504,8	359,6	265,7	196,1	151,1
Rendimento (%)	82,7	84,3	85,9	86,4	85,5	79,2
Fator de potência	0,88	0,86	0,84	0,79	0,70	0,49

TABELA X
PROCESSAMENTO DO RENDIMENTO IEC.

Fator de correção da temperatura para enrolamentos de cobre (K_θ)							1,006
Conjugado (%)	125	115	100	75	50	25	
Perda estator corrigida (W)	198,1	171,4	130,7	86,1	53,0	30,8	
Escorregamento corrigido (pu)	0,053	0,048	0,039	0,030	0,020	0,010	
Perda do rotor corrigida (W)	158,8	132,7	94,7	54,9	25,1	6,4	
Potência de saída corrigida (W)	2.749	2.551	2.210	1.702	1.165	577	
Perdas totais (W)	491,1	434,3	349,7	258,3	190,6	148,1	
Fator de potência	0,86	0,85	0,84	0,79	0,70	0,49	
Rendimento (%)	84,8	85,5	86,3	86,8	85,9	79,6	

Consequentemente essas diferenças resultam em variações na eficiência do MIT entre as duas normas. Para o motor

ensaiado nesse artigo o método da IEC 60034-2-1:2014 [15] obteve rendimento maior do que a ABNT 17094-3:2018 [9].

A Fig. 5 ilustra as curvas do rendimento e do fator de potência para todos os pontos dos ensaios em carga. Nela é possível observar que a eficiência calculada utilizando o método da IEC 60034-2-1:2014 [15] obteve valor de 86,3% com um fator de potência de 84% e para a ABNT 17094-3:2018 [9] a eficiência calculada foi de 85,9% também com um fator de potência de 84%. A variação da eficiência da máquina foi de 0,4 pontos percentuais quando a mesma é submetida a ensaios por diferentes normas. Essas variações se dão devido as diferenças nas equações normalizadas entre as normas.

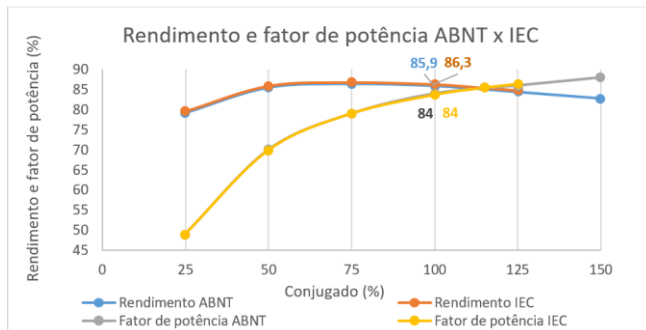


Fig. 5. Curva de rendimento x Fator de potência

IV. CONCLUSÃO

Após a obtenção das análises experimentais, foi possível comparar os procedimentos e os resultados obtidos de cada norma considerada neste trabalho. Os métodos utilizados para calcular as perdas de atrito e ventilação e as perdas no ferro são os que mais se destacam, pois apresentam diferenças significativas em suas metodologias.

Foi observado que ao se aplicar o método de ensaio, utilizando a IEC 60034-2-1:2014 [15], a eficiência do motor foi ligeiramente maior do que quando aplicando o método de ensaio da ABNT NBR 17094-3:2018 [9], apresentando uma variação de 0,4 pontos percentuais. Assim, conclui-se que as diferenças nos procedimentos e divergências entre as equações normalizadas resultaram em variações nos valores das perdas calculadas. Dessa forma, os valores das eficiências do motor ensaiado apresentaram variações quando comparados os resultados. Para questões de eficiência energética, sabe-se que a IEC 60034-30-1:2014 [16] possui classes de rendimentos maiores que a ABNT 17094-1:2018 [10].

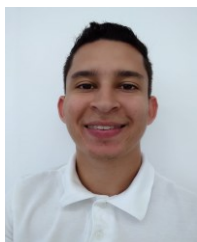
Desta forma, não se pode desconsiderar o fato que o mesmo motor pode apresentar resultados de rendimentos diferentes quando submetidos a ensaios com a ABNT 17094-3:2018 [9] e com a IEC 60034-2-1:2014 [15]. As variações nos valores dos rendimentos poderiam resultar em diferenças ainda maiores caso fossem utilizados instrumentos com desvios maiores nos ensaios. A utilização de diferentes métodos resulta em variações nos cálculos do rendimento para um mesmo motor, e essas diferenças geram grandes discussões entre os comitês internacionais sobre qual norma e/ou método garante o resultado mais próximo do real. Este artigo destaca a importância de se unificar as equações normalizadas e os procedimentos de ensaio utilizados por diferentes normas para que os motores possam ser analisados com maior

confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] EMSA, Policy Guidelines for Electric Motor Systems - Part 2: Toolkit for Policy Makers, Canada: 4E Energy efficient End-use Equipment, 2014.
- [2] C. A. Ferreira, Motor Elétrico Premium, Rio de Janeiro : Eletrobras; International Copper Association Brazil, 2016.
- [3] R. A. Yamachita, Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha, Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2013.
- [4] R. T. Richard Phillips, Improvement of Electric Motor Systems in Industry (IEMSI), Ispra: Swiss Federal Office of Energy, SFOE ;Impact Energy, Switzerland EEMODS, 2017.
- [5] M. Jibrán, S. Zuberi and K. P. Martin, "The importance of additionality in evaluating the economic viability of motor-related energy efficiency measures", *Proceedings of Energy Efficiency in Motor Driven Systems – EEMODS'17*, 2017.
- [6] U. B. Conrad, R. Werle, M. V. Werkhoven, J. Fong and A. T. d. Almeida, New technology needs new policy - From component to systems, Coimbra: EEMODS, 2017.
- [7] R. R. Jacques, S. L. Nau and A. Nied, Performance evaluation of induction motors fed by PWM voltage with magnetic equivalent circuits., Santa Catarina: EEMODS, 2017.
- [8] A. T. Almeida, J. Fong, H. Falkner and P. Bertoldi, "Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1275–1286, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.112.
- [9] ABNT, NBR 17094-3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio, Rio de Janeiro: associação brasileira de normas técnicas , 2018.
- [10] ABNT, NBR 17094-1 Máquinas Elétricas Girantes Parte 1 Motores de indução trifásicos - Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.
- [11] GB/T, 1032 Test procedures for three-phase induction motors (IEC 60034-2-1:2007, Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), NEQ), 2012.
- [12] GB, 18613 - National Standard of the People's Republic of China Minimum Allowable Values of Energy Efficiency and Energy Efficiency Grades for Small and Medium Three-Phase Asynchronous Motors, 2012.
- [13] AS/NZS, 1359.102.3, Rotating Electrical Machines - General requirements - Methods for determining losses and efficiency, 2004.
- [14] AS/NZS, 1359.5 - Rotating Electrical Machines -General requirements Part 5: Three-phase cage induction motors-High efficiency and minimum energy performance standards requirements, 2004.
- [15] IEC, 60034-2-1 Rotating Electrical Machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), Geneva, Switzerland, 2014.
- [16] IEC, 60034-30-1 Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code), Geneva, Switzerland, 2014.
- [17] IS, 15999-2-1: Índia Standard – Rotating Electrical Machines part 2 - method of test section 1 standard methods for determining losses e efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles), 2011.
- [18] NOM, -016-ENER- Eficiencia energética de motores de corriente alterna trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW a 373 kW Límites método de prueba y marcado, 2016.
- [19] C. I. KS, 60034-1 – Máquinas electricas rotativas parte 2-1 metodos padrão para determinar as perdas e a eficiência dos ensaios (excluindo maquinas para veiculos de tracção), 2008.
- [20] W.Cao, "Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.24, no.3, pp.802-808, 2009. doi: 10.1109/TEC.2009.2025321.
- [21] W.Cao, "Assessment of induction machine efficiency with comments on new standard IEC 60034-2-1", *Proceedings of 18th International Conference on Electrical Machines*, 2008. doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800180.
- [22] S.Deda, J.A.Kock, "Induction motor efficiency test methods: A comparison of standards", *Proceedings of 2017 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy – ICUE*, 2017. doi: 10.23919/ICUE.2017.8067991.

- [23] ABNT, NBR 5383-1 - Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos - Ensaio, Rio de Janeiro, 2002.
- [24] L.B.Sousa; "Comparação dos Métodos de Ensaio de Motores de Indução Trifásicos Utilizando as Normas ABNT 17094-3:2018, IEC 60034-2-1 e IEC/TS 60034-2-3:2013 " Niterói, Universidade Federal Fluminense, 2020.



Leandro Braz de Sousa graduou-se em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) em 2017 e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica e Telecomunicações no campo de Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2020. Ele

possui experiência no setor industrial nas áreas de Processos automobilísticos, acionamento de máquinas elétricas e ensaios de máquinas elétricas. Atualmente é pesquisador/bolsista no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).



Felipe Sass graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2008, recebeu o título de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2011 e 2015, respectivamente. Atualmente é professor da Universidade Federal Fluminense

(UFF) e desenvolve estudos nas áreas de: máquinas elétricas, circuitos elétricos, magnéticos e eletrônicos.



Márcio Zamboti Fortes (M'2010; SM'2017) recebeu o título de Mestre em Engenharia da Energia pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2000 e de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP) em 2007. Sua experiência profissional inclui atividades de gestão, projetos,

manutenção, implantação e comissionamento. Atualmente é professor da Universidade Federal Fluminense (UFF) e desenvolve estudos nas áreas de: conservação e qualidade de energia, manutenção industrial, máquinas elétricas e acionamentos.