

A Comparison Between Reported Values and Measured Values of Power Factor and Efficiency for Electric Induction Motors

D. F. Souza, F. A. M. Salotti, I. L. Sauer, H. Tatizawa, *Member, IEEE*, A. G. Kanashiro *Member, IEEE*

Abstract—Two main features provided by electric motor manufacturers are power factor and efficiency. However, the values reported are often different from the measured values. Thus, this work presents the results obtained from testing 435 Three-phase Induction Electric Motors with Squirrel Cage Rotor from 38 different manufacturers tested between 2015 and 2016. The data were collected through standardized tests performed at the Laboratory of Electrical Machines of the Institute of Energy and Environment of the University of Sao Paulo. The values reported by the manufacturers were compared with the values measured in the laboratory. The results indicate that 58% of the values measured for the power factor of the motors were lower than those reported by the manufacturer. Similarly, 55% of the measured values for the performance were lower than the values reported by the manufacturer.

Index Terms—Efficiency, Power Factor, Tests on Electric Motors.

I. INTRODUÇÃO

A eletricidade no Brasil é consumida predominantemente no setor industrial. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [1], 37,56% de toda a eletricidade consumida no país é destinada ao segmento industrial. Para o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) [2], a predominância absoluta dos motores elétricos no consumo percentual industrial brasileiro, representando 68% da eletricidade consumida nas indústrias, são distribuídos entre cargas, como por exemplo: sistemas de bombeamento, ventilação, compressão, transporte, dentre outras [3].

De acordo com Garcia [4], os Motores de Indução Trifásicos com Rotor em Gaiola de Esquilo (MITRGE) são responsáveis por mais de 90% do consumo total de eletricidade em motores elétricos. Por este motivo, muitos países implantaram legislação de desempenho de motores elétricos, estabelecendo o rendimento mínimo dos MITRGE para cada potência de eixo padronizada e rotação [5]–[8]. Os motores podem ser classificados ainda por níveis de rendimento, informando ao comprador por meio de selos que definem basicamente o quão eficiente são os equipamentos [9].

D. F. Souza, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) & Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil (danilo.ferreira.souza@hotmail.com).

F. A. M. Salotti, (fsalotti@iee.usp.br), I. L. Sauer, (illsauer@iee.usp.br), H. Tatizawa, (hedio@iee.usp.br), A. G. Kanashiro, (arnaldo@iee.usp.br) são membros do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), Avenida Professor Luciano Gualberto, N 1289, Cidade Universitária CEP 05508-010 - Butantã - São Paulo SP, Brasil.

Corresponding author: Danilo Ferreira de Souza.

A simplicidade de sua construção faz com que consequentemente o custo de produção seja baixo, quando comparado a outras tecnologias motrizes [10], [11]. Os MITRGE também são conhecidos por exigir baixíssimos índices de manutenção, consistindo basicamente na lubrificação dos mancais e na limpeza do sistema de ventilação [3].

Os MITRGE, por não possuírem enrolamentos exclusivos para magnetizar o núcleo, utilizam energia reativa da rede para promover esta função. Assim, apresentam fator de potência abaixo do valor unitário, com corrente atrasada em relação à tensão [12]. O quão baixo é o fator de potência do motor elétrico depende de uma série de contribuições, por exemplo:

- 1) Carga mecânica aplicada ao eixo;
- 2) Simetria das tensões;
- 3) Número de polos;
- 4) Potência mecânica nominal;
- 5) Qualidade do material ferromagnético;
- 6) Densidade de fluxo magnético.

Para a correta medição do fator de potência, os itens 1 e 2 são contribuições controladas no laboratório de ensaio, na ocasião dos ensaios. Os itens 3, 4 e 6 são características construtivas que dependem do projeto e da especificação do usuário. O item 5 depende dos custos finais desejados e do controle de qualidade do fabricante por serem inerentes a seleção prévia da qualidade do material empregado. Cabe um esclarecimento quanto ao item 6 (densidade de fluxo) ser uma contribuição que afeta o fator de potência do motor durante a execução do ensaio e é também dependente do projeto. A densidade de fluxo magnético depende da tensão aplicada ao motor e do ponto de saturação previsto no projeto do equipamento, fato determinado pela curva de saturação do material ferromagnético empregado.

Desta forma, o fator de potência do MITRGE é um elemento importante para o dimensionamento da instalação elétrica que alimenta o referido equipamento; quanto mais próximo do valor unitário for o fator de potência, menor será a energia reativa capacitiva necessária para corrigir o fator de potência aos níveis de referência, sendo o valor mínimo regulamentado em (0,92) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) do Brasil, na Resolução Normativa nº 414 [13].

Por este motivo, é importante conhecer o valor do fator de potência do MITRGE em condições nominais, devendo ser obrigatoriamente disponibilizado pelo fabricante em seu informativo técnico.

No caso do rendimento, se o valor medido for inferior ao valor efetivamente informado, o usuário do equipamento terá maior consumo de energia elétrica com o equipamento. Também haverá maior necessidade de investimentos públicos com a geração de energia elétrica, onde os custos dos

empreendimentos são repassados aos consumidores. O rendimento dos MITRGE é ajustado na fase de projeto.

O rendimento é afetado pela seleção mais conveniente dos materiais utilizados na construção, como por exemplo, a qualidade da chapa ferromagnética selecionada que irá compor o núcleo do estator e do rotor, a moldagem dos enrolamentos com baixas perdas joule, uso de ventilador com aerodinâmica eficiente, rolamentos com baixo atrito, modelagem adequada das ranhuras onde serão alojados os enrolamentos do rotor e estator. O rendimento também tem a dependência das condições de alimentação, simetria das tensões e da potência mecânica.

Neste trabalho foi realizada a análise do fator de potência, e do rendimento em 435 MITRGE, comparando os valores fornecidos por 38 diferentes fabricantes com os valores medidos em laboratório por meio de condições controladas. Bem como, foi analisado os resultados e relacionados com as tolerâncias determinadas pelas portarias de controle do INMETRO.

II. METODOLOGIA

Todos os dados de ensaios dos motores de indução trifásicos utilizados neste trabalho foram coletados no Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP). O Laboratório de Máquinas Elétricas do IEE-USP é acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) de acordo com a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 [14] sob o nº CRL 0011. O INMETRO realiza periodicamente auditorias nos laboratórios acreditados, visando garantir a qualidade no resultado das medições. O INMETRO é signatário dos acordos de reconhecimento mútuo da *International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC)* e também da *Inter American Accreditation Cooperation (IAAC)*, seguindo, portanto, padrão mundial de qualidade e confiabilidade.

Todos os instrumentos utilizados nas medições no IEE são calibrados e aferidos com rastreabilidade à Rede Brasileira de Calibração (RBC), pertencente ao INMETRO.

O Brasil possui normativa própria para MITRGE que é a norma ABNT NBR 17094 partes 1 e 3 [15], requisitos para especificação e métodos de ensaio, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de rendimento foram obtidos por meio de procedimentos de teste amplamente reconhecidos e aceitos pela indústria, e estão em conformidade com o método 2 da ABNT NBR 17094-3 [15], que é semelhante ao método B da norma *IEEE112* publicada pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* [16], [17]. O método recomendado na norma brasileira para determinação do rendimento é o MÉTODO 2 devido a sua característica de apresentar baixa incerteza na determinação do rendimento e por apresentar repetitividade e reprodutividade dos resultados.

As incertezas de medição são calculadas conforme orientações internacionais estabelecidas nos documentos INTROGUM [18] e EA-4/02 [19]. Essas normativas são discutidas em comitês mundiais como uma tentativa de uniformizar o cálculo da incerteza de medição em diversas áreas do conhecimento.

De acordo com o MÉTODO 2 da norma NBR 17094-3:2018 [15], o rendimento é determinado pela adição de todas as parcelas de perdas, para cada solicitação de carga.

As perdas denominadas Joules, identificadas por I^2R que ocorre nos enrolamentos do estator, bem como nas barras do rotor. São corrigidas para uma temperatura igual à temperatura ambiente padronizada em (25°C), somadas à elevação da temperatura do motor, determinada pelo ensaio de aquecimento com carga nominal e calculada a partir da metodologia de variação da resistência do enrolamento.

Para determinar os valores de rendimento para diversos carregamentos, as parcelas que correspondem a cada perda são obtidas e separadas pelos seguintes ensaios:

- 1) Ensaio a vazio: Este ensaio é realizado utilizando-se fonte de tensão variável, trifásica, em frequência nominal conforme a NBR 17094-3 [15]. Na realização do ensaio, os dados são registrados para uma faixa de tensão desde 120% decrescendo até aproximadamente 20% da tensão nominal. Por meio de analisador de energia, é medido o valor da potência absorvida, composta pelas parcelas de perdas no ferro e perdas mecânicas (atrito e ventilação). Neste ensaio a NBR 17094-3 [15] considera que o motor, analisado pelo seu diagrama elétrico equivalente possua perdas no ferro (histerese e correntes parasitas), atrito e ventilação. As perdas no ferro são consideradas proporcionais à tensão da alimentação e são dissipadas essencialmente no estator. A perda no ferro do rotor é desprezível visto a baixa frequência induzida nesta parte do MITRGE e é considerada para efeito de cálculo do rendimento como perda suplementar dependente da condição de carregamento do motor. As perdas por atrito e ventilação são separadas por processo gráfico e consideradas invariáveis para qualquer condição de carregamento do motor;
- 2) Ensaio em carga: A NBR 17094-3 [15] orienta para a separação das perdas que são dependentes da condição de carga do motor estabelece que o ensaio para determinar o rendimento deva ser realizado após ter atingido a estabilidade térmica trabalhando com carga nominal. Para cada ponto de carga diferente são separadas as perdas joule no estator, joule no rotor e suplementar considerando que a temperatura do rotor tenha sido constante e igual ao valor médio entre o início e o final do ensaio. Para melhor obter a tendência da perda suplementar, o ensaio deve ser realizado preferencialmente em 6 pontos de carga, e não inferior a 5 pontos (cargas entre 25% e 150% da nominal), Após a separação das perdas suplementares, para cada ponto de carga, ela é linearizada por processo matemático utilizando método de regressão linear [15], esta etapa de cálculo faz um alinhamento dos pontos de rendimento obtido para toda a curva de carga medida.

O rendimento de um motor elétrico trifásico é a razão entre a potência de saída e a potência ativa de entrada, expressa em percentagem ou fração decimal. A ABNT NBR 17094-3 [15] regulamenta dez (10) diferentes formas de se determinar o rendimento dos MITRGE. Para o MÉTODO 2 - ensaio dinamométrico com medição indireta das perdas suplementares e medição direta das perdas joule no estator (I^2R), joule no rotor (I^2R), no núcleo e por atrito e ventilação, utilizado para execução dos ensaios desta pesquisa, a potência mecânica de saída é determinada como sendo a potência absorvida, ou de entrada, subtraindo todas as perdas já separadas nos ensaios em vazio e em carga.

Está apresentado na Fig. 1 uma das bancadas de ensaio dos MITRGE para até 25 CV. A referida bancada utiliza a metodologia de freio dinamométrico para aplicar carga mecânica no eixo do MITRGE no ensaio em carga.



Fig. 1. Foto de uma das bancadas de ensaio de MITRGE.

Este trabalho apresenta a comparação entre valores medidos e informados pelos fabricantes para o fator de potência e o rendimento de 435 MITRGE fabricados por 38 diferentes companhias brasileiras e internacionais. Os ensaios foram realizados entre 2015-2016 e os motores eram novos, sendo fabricados entre 2013 e 2016, sendo:

- 1) 129 motores de 2 polos;
- 2) 227 motores de 4 polos;
- 3) 61 motores de 6 polos;
- 4) 18 motores de 8 polos.

A análise foi realizada apenas para os motores alimentados em baixa tensão, até 600V, na frequência industrial de 60 Hz. Os motores foram divididos em 4 blocos de acordo com a velocidade determinada pelo número de polos magnéticos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Dados de Placa Versus Valores Medidos – uma Análise do Fator de Potência

A Fig. 2 apresenta 129 resultados de ensaios de MITRGE, com potência de eixo entre 1 e 200 CV, com 2 polos. Os pontos marcados em verde referem-se a medições com resultados de fator de potência, igual ou superior ao valor nominal disponibilizado pelo fabricante. A linha horizontal em vermelho representa o valor nominal do fator de potência que é apresentado pelo fabricante, em percentual. Os pontos azuis representam resultados de medições inferiores aos valores informados pelos fabricantes. No eixo das ordenadas é apresentada a magnitude do desvio absoluto que é a diferença entre o valor medido e o valor informado pelo fabricante e no eixo das abscissas a potência nominal de eixo.

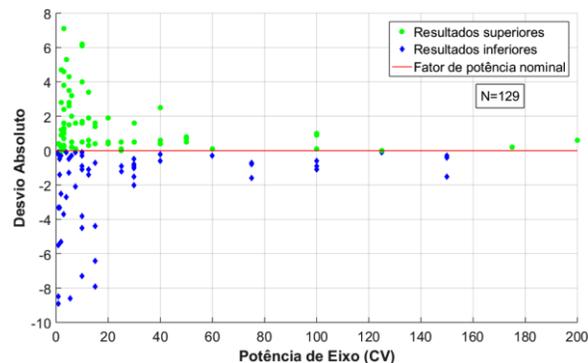


Fig. 2. Desvio absoluto dos valores de fator de potência para motores de 2 Polos.

Na Fig. 2 e nas demais que seguem, “N” representa o número de MITRGE ensaiados.

A Tabela I apresenta a avaliação estatística das medições do fator de potência dos 129 resultados de ensaio em relação ao valor disponibilizado no informativo técnico dos fabricantes. O percentual de resultados igual ou acima do registrado no informativo técnico foi de 56,59%, deixando, desta forma, 43,41% dos motores elétricos testados, com resultados de medições abaixo do valor apresentado pelo fabricante.

TABELA I
ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FATOR DE POTÊNCIA PARA MOTORES DE 2 POLOS

Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
56,59%	43,41%	7,1%	-8,9%	0,073%	2,71%

O “desvio máximo positivo” e “desvio máximo negativo” na Tabela I apresentam o desvio pontual unitário do resultado de ensaio que mais apresentou discrepância absoluta em relação ao valor nominal disponibilizado pelos fabricantes. Neste caso, o desvio máximo positivo de 7,1% e negativo de -8,9% mostram que existem diferenças entre os valores informados e os resultados das medições. Na Fig. 2 pode ser observado que os resultados apresentam maior desvio absoluto para os motores de menor potência de eixo. Este resultado é esperado, pois os motores de menor potência tem mais variabilidade no processo produtivo. Também é observado que os MITRGE com menor potência de eixo, possuem maior representação percentual no total de motores ensaiados, assim como é observado numericamente nas plantas industriais.

O desvio médio, expresso na Tabela I, trata da distância média entre os resultados dos ensaios e a média aritmética dos dados. Quanto maior for a dispersão dos dados, maior será o desvio médio. Como pode ser observado na Tabela I, (0,073%) de desvio médio é um valor baixo, indicando uma distribuição pouco dispersa.

O desvio padrão expresso na Tabela I é uma grandeza de dispersão dos valores de fator de potência medidos em torno dos valores informados pelos fabricantes nos informativos técnicos. Quanto menor o desvio padrão, significa que mais próximos os valores medidos estão dos valores informados.

Estão apresentados nas Fig. 3, 4 e 5 os desvios absolutos do fator de potência medido em relação ao informado pelo fabricante, para motores com velocidades de 4, 6 e 8 polos, respectivamente. As tabelas II, III e IV são apresentadas a análise estatística para as referidas velocidades de maneira similar à tabela I.

A Fig. 3 apresenta o desvio absoluto do fator de potência para 227 motores de 4 polos analisados. A referida análise apresenta maior quantidade de motores elétricos, como também, maior escala de potência de eixo com motores até 250 CV.

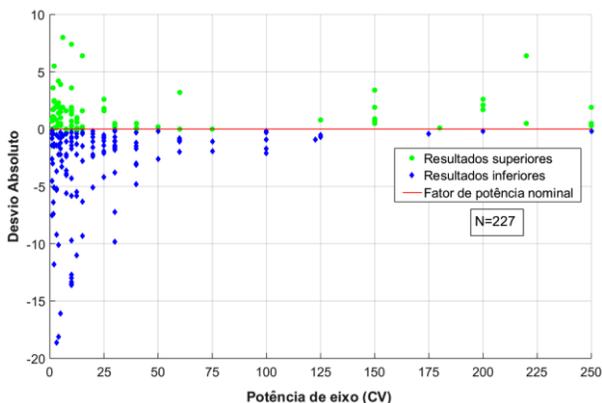


Fig. 3. Desvio absoluto dos valores de fator de potência para motores de 4 Polos.

A Tabela II apresenta o percentual de resultados igual ou acima do registrado no informativo técnico dos fabricantes em 39,21% do total de motores. Em 60,79% dos motores ensaiados foram obtidos resultados abaixo do valor apresentado pelos fabricantes, demonstrando, portanto, que uma significativa maioria dos resultados encontrados está abaixo dos valores nominais.

TABELA II
ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FATOR DE POTÊNCIA PARA MOTORES DE 4 POLOS

Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
39,21%	60,79%	8%	-18,6%	-1,28%	3,9%

O desvio máximo negativo visualizado na Tabela II, foi de um motor elétrico ensaiado, cujo resultado foi 18,6% abaixo do valor informado pelo fabricante, o que demonstra elevada dispersão entre valores medidos e valores informados. Observa-se, entretanto, que a elevada discrepância não é representativa em função da quantidade total de motores para esta velocidade.

A Fig. 4 apresenta o desvio absoluto do fator de potência para 61 motores de 6 polos analisados. A referida análise apresenta escala de potência de eixo, com potências de até 180 CV.

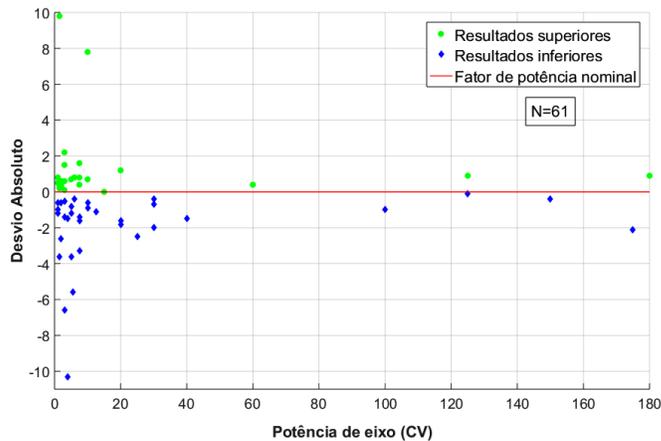


Fig. 4. Desvio absoluto dos valores de fator de potência para motores de 6 Polos.

A Tabela III apresenta o percentual de resultados igual ou acima do registrado nos informativos técnicos dos fabricantes, totalizando 40,98% dos motores com rendimento acima e 59,02% dos MITRGE com rendimento medido abaixo do valor apresentado pelos fabricantes. Os desvios máximos positivos e negativos apresentaram resultados iguais a 9,8% e -10,3%, respectivamente.

TABELA III
ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FATOR DE POTÊNCIA PARA MOTORES DE 6 POLOS

Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
40,98%	59,02%	9,8%	-10,3%	-0,61%	2,7%

A Fig. 5 apresenta o desvio absoluto do fator de potência para 18 motores de 8 polos. A referida análise apresenta escala de potência de eixo com motores até 40 CV.

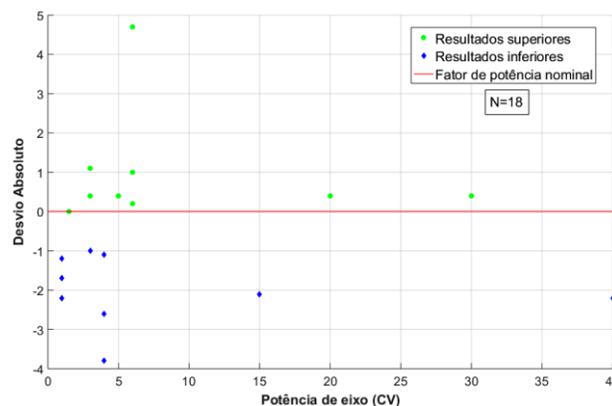


Fig. 5. Desvio absoluto dos valores de fator de potência para motores de 8 Polos.

Conforme a Tabela IV, os motores elétricos ensaiados apresentaram resultados iguais no que se refere ao percentual acima e abaixo do nominal.

TABELA IV
ANÁLISE ESTATÍSTICA DO FATOR DE POTÊNCIA PARA MOTORES DE 8 POLOS

Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
50%	50%	4,7%	-3,8%	-0,52%	1,91%

Uma análise geral dos resultados da comparação entre valores de fator de potência medidos e os valores informados é apresentada na Tabela V, onde é possível observar que 55% dos motores ensaiados apresentaram fator de potência medido abaixo do valor informado pelo fabricante.

TABELA V
COMPARAÇÃO GERAL DO FATOR DE POTÊNCIA ENTRE OS VALORES MEDIDOS E VALORES INFORMADOS

	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	Total
Medições abaixo do nominal	56	138	36	9	55%
Medições iguais ou acima do nominal	73	89	25	9	45%

Como já exposto, o fator de potência dos motores é uma grandeza de elevada importância, pois a partir dele são tomadas providências para evitar otimizar a instalação elétrica e evitar a cobrança de multas, podendo também reduzir perda nas linhas elétricas. A norma NBR 17094-1 [15] e a Portaria nº 488 do INMETRO [20], [21] estabelecem a tolerância para o fator de potência, calculada conforme Equação (1):

$$Tolerância = -(1/6) \cdot (1 - \cos \phi) \quad (1)$$

Onde: $\cos \phi$ é o fator de potência informado pelo fabricante em catálogo ou dados de placa. O valor encontrado na equação 1 deve ser subtraído do valor informado pelo fabricante (valor nominal), obtendo assim o valor mínimo que o motor sob teste deve apresentar para ser considerado em conformidade com a exigência normativa. Caso o resultado da equação 1 seja, em módulo, menor que -0,02, adota-se este valor como tolerância, caso o resultado seja, em módulo, maior que -0,07 adotar este valor como a máxima tolerância para o resultado. Não há limite a se considerar caso o fator de potência medido seja maior que o valor declarado.

Aplicando a Equação (1) ao total de 435 MITRGE analisados, 58 motores encontraram-se fora da tolerância calculada, sendo, portanto, considerados reprovados no referido quesito.

Dos motores reprovados, 15 são de 2 polos, 40 são de 4 polos e 3 são de 6 polos. Nenhum MITRGE de 8 polos foi reprovado. Todas as reprovações registradas foram por dados medidos estarem abaixo do valor informado pelos fabricantes fora da tolerância determinada pela Portaria nº 488 do INMETRO [21].

É conhecido que a diminuição da resistência elétrica num circuito tem como uma das consequências a diminuição do fator de potência desse circuito. Trazendo esta informação para o caso dos motores em estudo, denominados de motores de alto rendimento, a principal alteração em relação aos antigos modelos da linha *standard*, é o aumento da seção dos condutores utilizados na construção dos enrolamentos do estator que tem como consequência a redução da resistência dos enrolamentos, bem como, a redução da perda joule (I^2R) do estator.

Assim, a redução da resistência ôhmica dos enrolamentos do estator tem como objetivo a melhoria do rendimento, mas por outro lado diminui o fator de potência dos MITRGE operando com carga nominal.

A seguir é apresentada a análise comparativa entre o rendimento medido e o rendimento informado pelos fabricantes para os mesmos 435 MITRGE utilizados para a análise anterior.

B. Dados de placa Versus Valores Medidos – uma Análise do Rendimento

A Fig. 6 apresenta 129 MITRGE entre 1 a 200 CV, 2 polos, ensaiados entre 2015 e 2016. Os pontos em verde referem-se aos resultados de medição de rendimento, igual ou superior ao valor de rendimento nominal disponibilizado pelos fabricantes e representado na figura pela linha horizontal em vermelho. Os pontos azuis representam resultados de medições inferiores aos valores informados pelo fabricante. No eixo das ordenadas é apresentada a magnitude do desvio absoluto entre os valores medidos e informados e no eixo das abscissas a potência nominal de eixo dos motores.

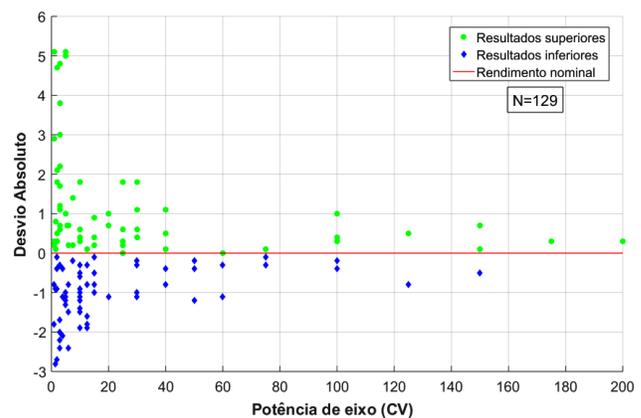


Fig. 6. Desvio absoluto dos valores de rendimento para motores de 2 Polos.

Conforme Tabela VI, os motores elétricos de 2 polos ensaiados apresentaram resultados próximos no que se refere ao Percentual acima do nominal e abaixo. Os valores de desvio máximo positivo e negativo foram iguais a 5,1% e -2,8%, respectivamente. O desvio médio resultou em 0,028%.

TABELA VI

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RENDIMENTO PARA MOTORES DE 2 POLOS					
Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
48,06%	51,94%	5,1%	-2,8%	0,028%	1,52%

A Fig. 7 apresenta o desvio Absoluto do rendimento para 227 motores de 4 polos. A referida análise apresenta maior quantidade de motores elétricos, como, também, maior escala de potência de eixo, com potências até 250 CV.

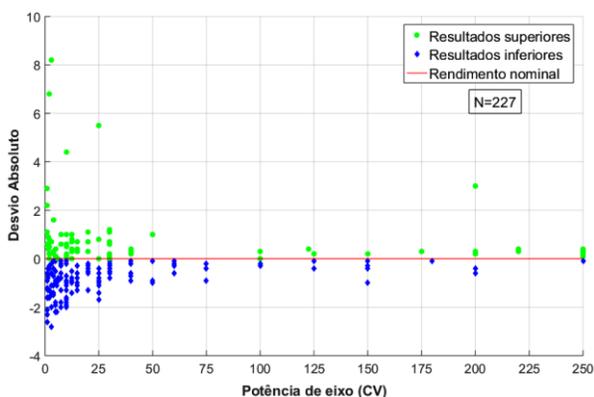


Fig. 7. Desvio absoluto dos valores de rendimento para motores de 4 Polos.

A Tabela VII apresenta percentual de resultados igual ou acima do registrado no informativo técnico do fabricante em 35,24%, do total de MITRGE de 4 polos. Em 64,76% dos MITRGE de 4 polos ensaiados, os resultados foram abaixo do valor apresentado pelo fabricante.

TABELA VII

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RENDIMENTO PARA MOTORES DE 4 POLOS					
Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
35,24%	64,76%	8,2%	-2,8%	-0,26%	1,25%

A Fig. 8 apresenta o desvio absoluto do rendimento para 61 motores de 6 polos. A referida análise apresenta potência de eixo até 180 CV.

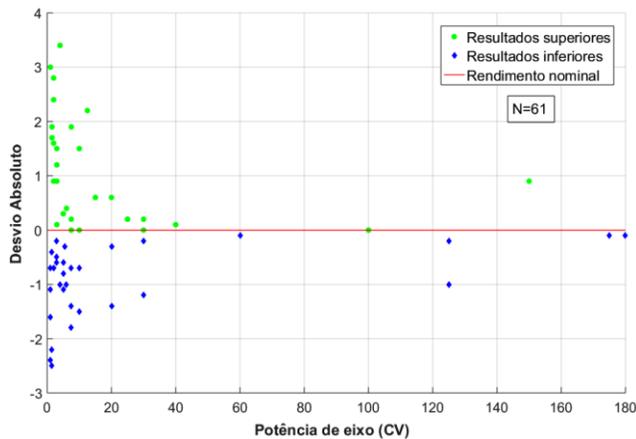


Fig. 8. Desvio absoluto dos valores de rendimento para motores de 6 Polos.

Conforme Tabela VIII, os motores elétricos de 6 polos ensaiados apresentaram resultados próximos no que se refere ao percentual acima do nominal e abaixo. Houve baixa discrepância no valor do desvio máximo positivo em 3,4% e máximo negativo em -2,5%.

TABELA VIII

ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RENDIMENTO PARA MOTORES DE 6 POLOS					
Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
49,18%	50,52%	3,4%	-2,5%	0,044%	1,3%

A Fig. 9 apresenta o desvio absoluto do rendimento para 18 motores de 8 polos. A referida análise apresenta escala de potência de eixo com potências até 40 CV.

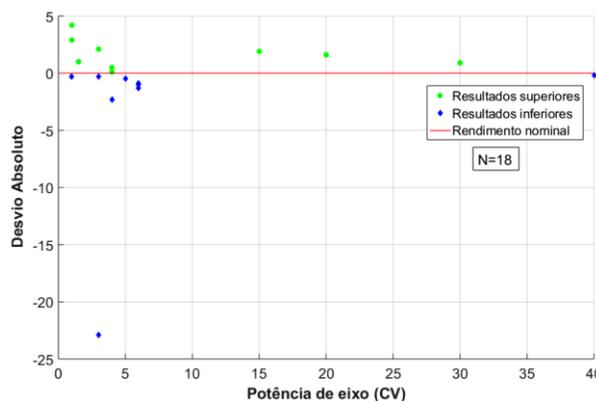


Fig. 9. Desvio absoluto dos valores de rendimento para motores de 8 Polos.

Conforme Tabela IX, os motores elétricos de 8 polos ensaiados apresentaram resultados iguais no que se refere ao percentual acima do nominal e abaixo. Houve significativa discrepância no valor do desvio máximo negativo, obtendo-se o valor 22,9% abaixo do valor informado pelo fabricante no informativo técnico.

TABELA IX
ANÁLISE ESTATÍSTICA DO RENDIMENTO PARA MOTORES DE 8 POLOS

Percentual acima do nominal	Percentual abaixo do nominal	Desvio máximo positivo	Desvio máximo negativo	Desvio médio	Desvio padrão
50%	50%	4,2%	-22,9%	-0,81%	5,74%

Uma análise geral dos resultados da comparação entre valores de rendimento medidos e informados é apresentada na Tabela X, onde é possível observar que 58% dos motores utilizados apresentam rendimento medido abaixo do valor informado pelo fabricante.

TABELA X
COMPARAÇÃO GERAL DO RENDIMENTO ENTRE OS VALORES MEDIDOS E VALORES INFORMADOS

	2 Polos	4 Polos	6 Polos	8 Polos	Total
Medições abaixo do nominal	67	147	31	9	58%
Medições iguais ou acima do nominal	62	80	30	9	42%

Diferentemente do que ocorre com o fator de potência, o rendimento tem um valor mínimo determinado em legislação. O informativo técnico do fabricante deve apresentar um valor igual ou superior ao da legislação mínima de desempenho de MITRGE de acordo com a Portaria nº 488 do Inmetro [21], vigente à época dos ensaios.

Para a determinação do rendimento do MITRGE no ensaio de desempenho, é estabelecida uma margem de tolerância para a aprovação ou não do referido motor elétrico sob ensaio. A determinação da tolerância também é estabelecida na Portaria nº 488 do Inmetro [21].

Para o rendimento (η), a tolerância é definida pelo Índice de Afastamento de Resultado (IAR). Este índice é calculado por duas diferentes equações que dependem do rendimento declarado pelo fabricante. O IAR é calculado conforme as Equações (2) e (3), conforme Portaria nº 488 do Inmetro [21]:

Se: (η) $\geq 0,851$

$$\text{IAR} = \left(\frac{(\text{valor declarado} - \text{valor obtido})}{0,20 \cdot (1 - \text{valor declarado})} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Se: (η) $< 0,851$

$$\text{IAR} = \left(\frac{(\text{valor declarado} - \text{valor obtido})}{0,15 \cdot (1 - \text{valor declarado})} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

O valor obtido (p_u) é o encontrado durante a realização do ensaio de rendimento e o valor declarado (p_d) é o informado pelo fabricante/importador do motor.

O motor é considerado aprovado no ensaio de desempenho quando o IAR não ultrapassar +100% ou -100% (cem por cento), para cada MITRGE.

IAR é o número percentual (%) que informa o quanto as perdas do motor ensaiado estão divergentes do valor nominal declarado pelos fabricantes relativamente à tolerância padronizada, que segue a seguinte regra:

- 1) para motores com rendimento até 85,1% admite-se uma tolerância nas perdas de $\pm 15\%$ do valor nominal declarado;
- 2) para motores com rendimento igual e acima de 85,1% admite-se uma tolerância nas perdas de $\pm 20\%$ do valor nominal declarado.

Por exemplo:

- i. para um motor que apresenta IAR igual a 25%, entende-se que as perdas do motor apresentam um valor que está 25% acima do valor declarado, dentro da faixa de tolerância;
- ii. um motor que apresente IAR de 100% significa que este motor atingiu o limite (máximo) da tolerância das perdas em relação ao valor declarado. Assim como há limite superior para as perdas, também há limite inferior (perdas abaixo do valor declarado), encontrar motores com valores fora da tolerância padronizada pode ser indicio de falta de controle da qualidade dos insumos ou do processo produtivo.

Desta forma, do total de 435 motores elétricos analisados, 22 se encontraram fora do espectro de tolerância, sendo 21 com rendimentos abaixo do permitido e 1 com rendimento acima do permitido, portanto, reprovados no quesito rendimento. Os motores com rendimento abaixo do permitido não poderiam ser comercializados. Entretanto, 58% do total de motores analisados, possuíam rendimento abaixo do valor de placa, totalizando 254 motores de 435.

Os baixos valores podem ser causados por uma série de elementos, entretanto, são destacadas as elevadas perdas joules, identificadas no ensaio em carga, sendo causadas principalmente pela economia de cobre na construção dos enrolamentos localizados no estator.

Como a maior parte dos motores apresentou rendimento abaixo do valor informado pelos fabricantes, mas acima do mínimo permitido pela legislação utilizando a tolerância, constata-se que muitos fabricantes trabalham com os projetos dos MITRGE próximo aos limites de tolerância admissíveis. Tal evidência ressalta a importância da legislação de desempenho de MITRGE como política pública para promoção de eficiência energética no uso final de energia elétrica.

IV. CONCLUSÃO

Do total de motores ensaiados, 52% são motores de 4 polos, 30% são motores de 2 polos, 14% de 6 polos e 8% de 8 polos, não por acaso refletem a distribuição percentual relativa ao número de polos dos MITRGE em suas aplicações industriais. Os motores ensaiados foram enviados por 38 fabricantes distintos, apresentando assim uma ampla variedade de resultados, permitindo com que os resultados possam ser generalizados.

Verifica-se que após a publicação da Portaria Interministerial nº 553 de 08/12/2005 [22], que estabeleceu os níveis mínimos de rendimento a serem atendidos pelos MITRGE novos, comercializados no país, houve uma melhoria crescente nos índices de rendimento apresentados pelos motores quando confrontados com os resultados apresentados no estudo

“Avaliação histórica do Desempenho do Motores Elétricos de Indução comercializados no Brasil entre 1980 e 2016” [23].

Ainda que 58% dos motores ensaiados apresentam rendimento abaixo do valor mínimo para motores de alto rendimento, publicado na portaria interministerial 553 [22], apenas 5% deles estão efetivamente fora da tolerância e, portanto, em desacordo com a portaria interministerial 553 e portaria INMETRO 488/2010.

Com uma proporção semelhante, 55% dos MITRGE apresentaram fator de potência abaixo do seu valor nominal, sendo que o percentual de motores fora da tolerância foi de 13%. Ficou evidenciado que há um índice elevado de imprecisão na declaração do fator de potência, seja quando se analisa o desvio padrão que para motores de 4 polos foi de 3,9%, seja quando observando o índice de motores que estão fora da tolerância normalizada.

As perdas por atrito e ventilação foram as mais dispersas entre amostras semelhantes, seguida da perda nos enrolamentos do estator. Isso pode nos indicar que os fabricantes não investem em alterações no projeto de forma significativa. O ganho no aumento do rendimento está bastante relacionado com a alteração da qualidade dos insumos, como a qualidade do material empregado na construção dos rolamentos de melhor qualidade, a compactação dos enrolamentos do estator para utilizar fios com seção maior objetivando a redução das perdas joule (I^2R) do estator e o emprego de chapas magnéticas de melhor qualidade.

Conclui-se que o valor do rendimento declarado pelo fabricante na quase totalidade dos motores é igual ao rendimento mínimo indicado na Portaria Interministerial nº 553 [22], e por apresentarem rendimento abaixo do mínimo exigido, mas dentro da tolerância padronizada, são adequações dos projetos para rendimento da linha padrão (com produção proibida desde 2009).

Os resultados apresentados em rendimento e fator de potência reiteram a importância do controle de qualidade dos fabricantes, para garantir que os dados de placa dos equipamentos sejam efetivamente próximos aos valores reais, medidos por quaisquer que sejam as metodologias de ensaios dadas as tolerâncias e margem de erros aceitáveis.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos disponibilizada ao primeiro autor.

Agradecemos aos servidores Abraão, Antônio, Sabino, Buda e Fernando Gava da Divisão de Máquinas Elétricas do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP) pela contribuição na realização dos ensaios padronizados.

Agradecemos aos revisores pelas profundas contribuições realizadas na revisão.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, “Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016,” *Epe*, 2017.
- [2] Eletrobras and Procel, “Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso,” 2005.
- [3] C. Verucchi, C. Ruschetti, and F. Bengler, “Efficiency Measurements in Induction Motors: Comparison of Standards,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, 2015.
- [4] A. G. P. Garcia, A. S. Szklo, R. Schaeffer, and M. A. McNeil, “Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry,” *Energy Policy*, 2007.
- [5] C. T. de C. Andrade and R. S. T. Pontes, “Economic analysis of Brazilian policies for energy efficient electric motors,” *Energy Policy*, vol. 106, no. April, pp. 315–325, 2017.
- [6] B. C. Mecrow and A. G. Jack, “Efficiency trends in electric machines and drives,” *Energy Policy*, vol. 36, no. 12, pp. 4336–4341, 2008.
- [7] A. T. de Almeida, J. Fong, H. Falkner, and P. Bertoldi, “Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 1275–1286, Jul. 2017.
- [8] A. T. de Almeida, P. Fonseca, H. Falkner, and P. Bertoldi, “Market transformation of energy-efficient motor technologies in the EU,” *Energy Policy*, vol. 31, no. 6, pp. 563–575, May 2003.
- [9] E. C. Bortoni *et al.*, “Assessment of the achieved savings from induction motors energy efficiency labeling in Brazil,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 75, pp. 734–740, Nov. 2013.
- [10] C. Javier Verucchi, R. Ruschetti, and G. Kazlauskas, “High efficiency electric motors: Economic and energy advantages,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 11, no. 6, pp. 1325–1331, 2013.
- [11] R. Saidur, “A review on electrical motors energy use and energy savings,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 877–898, 2010.
- [12] C. Becker, O. Ojeda, and H. Verdejo, “Labeling and efficiency of induction motors, IEC on chilean case,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 5, pp. 1383–1391, 2015.
- [13] Agência Nacional De Energia Elétrica, *Resolução Normativa Nº 414, De 9 De Setembro De 2010*. 2010.
- [14] International Organization for Standardization (ISO), “ISO/IEC 17025 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,” *International Standard*. 2017.
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR 17094-3 Motores de indução trifásicos — Métodos de ensaio,” pp. 131, 2018.
- [16] W. Cao, “Comparison of IEEE 112 and new IEC standard 60034-2-1,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2009.
- [17] A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, J. F. Busch, and P. Angers, “Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002.
- [18] W. Bich *et al.*, “Revision of the ‘guide to the expression of uncertainty in measurement,’” *Metrologia*, 2012.
- [19] BIPM, “Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement - Evaluation of measurement data,” 2008.
- [20] Inmetro, “Requisitos De Avaliação Da Conformidade Para Motores Elétricos De Indução Trifásicos Rotor Gaiola De Esquilo,” p. 36, 2009.
- [21] M. do D. I. e C. E. MDIC and I. N. de M. N. e Q. I. INMETRO, “Portaria INMETRO n.º 488 , de 08 de dezembro de 2010. Aprova a revisão dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para Motores Elétricos de Indução Trifásicos Rotor Gaiola de Esquilo.” vol. 6, 2010.
- [22] P. da R. F. do Brasil, “PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 553/2005,” no. D, pp. 2004–2006, 2005.
- [23] D. Ferreira De Souza, A. G. Kanashiro, and F. A. M. Salotti, “Historical evaluation of performance of induction motors sold in Brazil between 1980 and 2016 The energy context Global and national energy scenario,” 2017.



Danilo Ferreira de Souza possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso (2011), especialização em Energia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2015), mestrado em Energia pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (2018), tendo realizado período

sanduíche na Universidade Politécnica Estatal de São Petersburgo/Rússia (2017). Atualmente é professor Adjunto na Universidade Federal de Mato Grosso e Doutorando do Programa de Pós-graduação em Energia da USP. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica e Energia, com ênfase em instalações elétricas, proteção contra descargas atmosféricas, luminotécnica, eficiência energética, motores elétricos e usos finais de energia.



Francisco Antonio Marino Salotti possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI (1984) e mestrado em Engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1998). Foi professor da Universidade Cruzeiro do Sul de 1998 a 2009, nas cadeiras de Acionamentos elétricos, Análise de sistemas de potência, Materiais

elétricos e Máquinas elétricas. Atua desde 1986 em pesquisa, desenvolvimento e ensaios de motores elétricos, transformadores e inversores no Laboratório de Máquinas Elétricas do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.



Ildo Luis Sauer possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1977), mestrado em Engenharia Nuclear e Planejamento Energético pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1981) e doutorado em Engenharia Nuclear pelo Massachusetts Institute of

Technology (1985). Atualmente é professor titular da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Energia, com ênfase em Organização da Indústria de Energia e Organização da Produção e Apropriação Social de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: planejamento energético, modelos de demanda e recursos e oferta de energia, uso racional de energia, avaliação e desenvolvimento de recursos, produção descentralizada de energia, regulação e controle, políticas energéticas, análise econômica, histórica e social da evolução das formações sociais e apropriação da energia.



Hédio Tatizawa possui graduação em Engenharia Elétrica (1984) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), Mestrado (1992) e doutorado (2001) em Sistemas de Potência (EPUSP), e Livre Docência (2014) na especialidade Energia pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

(IEEUSP). Atualmente é Professor Associado nesse Instituto (IEEUSP). Tem experiência em pesquisa e desenvolvimento, com ênfase em técnicas de diagnóstico e monitoramento de equipamentos de transmissão e distribuição de energia elétrica, qualidade e uso racional de energia, tendo aproximadamente 150 publicações nesses assuntos, dentre artigos em periódicos

e congressos, livro e capítulos de livros, relatórios científicos, e um depósito de pedido de patente de invenção junto ao INPI. Atuação no ensino de graduação em engenharia, e no ensino e orientação de mestrado e doutorado no Programa de Pós-Graduação em Energia da USP. Exerce atualmente a chefia da Divisão Científica de Tecnologia de Sistemas Elétricos do IEE/USP.



Arnaldo Gakiya Kanashiro possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1979). Obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em 1995 e 2001, respectivamente. É docente do Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e

Ambiente da Universidade de São Paulo, área de concentração Tecnologia da Energia. É integrante do grupo de pesquisa Centro de Estudos em Descargas Atmosféricas e Alta Tensão (CENDAT/USP). É assessor científico de projetos de pesquisa junto à Fapesp e Capes. Possui várias publicações em periódicos, congressos, capítulo de livro e relatórios técnicos, decorrentes da atuação e experiência em projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de Engenharia Elétrica com ênfase em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica em temas relacionados à qualidade de energia, alta tensão e descargas atmosféricas.