



ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS: ACIONAMENTO, OPERAÇÃO E MONITORAMENTO COM AUXÍLIO DE FONTE PROGRAMÁVEL

Cássio Alves de Oliveira^{*1}, Josemar Alves dos Santos Junior², Marcos José de Moraes Filho^{1,3}, Vinícius Marcos Pinheiro¹, Augusto W. Fleury Veloso da Silveira¹, Luciano Coutinho Gomes¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

²IFG – Instituto Federal de Goiás (Campus Itumbiara)

³SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Resumo - Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo fundamentado em normas técnicas para avaliar o rendimento de motores de indução trifásicos. Os ensaios foram efetuados em uma plataforma experimental, que permite a análise de motores de até 5 cv. Os valores de monitoramento e aquisição foram obtidos com precisão e confiabilidade utilizando uma fonte programável, o que possibilitou a realização de ensaios reproduzindo diversas situações operacionais.

Palavras-Chave – Motores de indução trifásicos, rendimento, normas técnicas, ensaios.

TESTING FOR THE EFFICIENCY EVALUATION OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS: DRIVE, OPERATION AND MONITORING WITH PROGRAMMABLE POWER ASSISTANCE

Abstract – This paper presents a study based on technical standards to evaluate the efficiency of three-phase induction motors. The tests were carried out in an experimental platform that allows the analysis of motor until 5 hp. The values of monitoring and acquisition were obtained with precision and reliability using a programmable power supply, which made possible the realization of tests reproducing diverse operational situations.

Keywords – Three-phase induction motors, efficiency, technical standards, tests.

I. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são essenciais nos processos industriais, uma vez que movimentam todo tipo de máquinas e equipamentos. Estima-se que, no mundo, existam mais de 300 milhões de motores, que consomem cerca de 7400 Terawatt-hora (TWh), o equivalente a aproximadamente 40%

*kass-07@hotmail.com

da produção mundial de energia elétrica [1]. O motor de indução trifásico (MIT) é considerado o principal equipamento de transformação de energia elétrica em energia mecânica motriz [2] e diversos motivos o tornam uma escolha viável: é uma máquina robusta, de baixo custo, fácil manutenção, elevada eficiência e adaptável a variadas situações de carga.

Os motores de indução trifásicos adotam um simples, mas inteligente e eficiente sistema de conversão eletromecânica de energia. No MIT com rotor em gaiola de esquilo, o qual constitui a vasta maioria das máquinas de indução, o rotor é inacessível. Contatos móveis, tais como o comutador e as escovas das máquinas de corrente contínua ou anéis deslizantes e as escovas nos motores e geradores síncronos não são necessários. Este arranjo eleva consideravelmente a confiabilidade dos motores de indução e elimina o risco de centelhas, permitindo que motores desse tipo sejam utilizados com segurança em ambientes agressivos, como em áreas contendo atmosfera potencialmente explosiva. Este robusto rotor pode girar em elevadas rotações e suportar grandes sobrecargas mecânicas e elétricas [3].

Os motores elétricos de indução possuem o rendimento influenciado por vários fatores. O superdimensionamento provoca aumento no percentual de perdas em relação ao valor nominal, o que determina uma queda no rendimento [4]. Alinhamento inadequado de eixo e reparos executados de forma incorreta também podem alterar o valor do rendimento dessas máquinas [4].

Motores que já foram rebobinados pelo menos uma vez não possuem mais as características elétricas e mecânicas originais. Tais máquinas podem ter sua eficiência comprometida, vida útil menor e gasto energético excessivo. A realização de ensaios laboratoriais é recomendada para que suas grandezas elétricas e mecânicas sejam verificadas [5].

A necessidade crescente de busca por processos mais econômicos, com utilização racional e eficiente da energia elétrica, tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização dos processos industriais [6]. As indústrias têm se esforçado para otimizar o tempo de operação dos processos produtivos. Dessa forma, a identificação e correção de problemas elétricos e mecânicos associados às máquinas de

indução são fundamentais para a elevação dos níveis de confiabilidade do sistema e para o aumento da capacidade operacional.

O uso de motores eficientes pode reduzir as perdas de carga, já que menor eficiência leva a custos operacionais mais elevados. Dessa forma, testes precisos e confiáveis de motores são essenciais. Para medir com precisão a eficiência do motor, é necessário calcular as perdas e verificar parâmetros de projeto como, por exemplo, corrente, tensão, potência etc. [7].

Visando contribuir com a análise do funcionamento do MIT em situações que se aproximam daquelas encontradas em aplicações reais, a proposta do presente trabalho é avaliar o desempenho do motor em uma plataforma que utiliza uma fonte programável, permitindo a aquisição de dados e o monitoramento do funcionamento, objetivando a realização de ensaios estabelecidos em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

II. NORMAS TÉCNICAS

Segundo a definição internacional, uma norma é um “documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece, para uso comum e repetitivo, regras, diretrizes ou características para atividades ou seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto”. A esta definição pode-se acrescentar a recomendação de que “convém que as normas sejam baseadas em resultados consolidados da ciência, tecnologia e da experiência acumulada, visando à otimização de benefícios para a comunidade”.

Em outras palavras as normas técnicas fornecem especificações de classe mundial para produtos, serviços e sistemas com o propósito de garantir qualidade, segurança e eficiência. Uma norma é, por princípio, de uso voluntário, mas quase sempre é utilizada por representar o consenso sobre o estado da arte de determinado assunto, obtido entre especialistas das partes interessadas.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas é responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (ABNT NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE).

A norma que prescreve ensaios aplicáveis para a determinação das características de desempenho de motores de indução é a NBR 17094, que é dividida em quatro partes:

- Parte 1: Motores de indução trifásicos – Requisitos;
- Parte 2: Motores de indução monofásicos – Requisitos;
- Parte 3: Motores de indução trifásicos – Métodos de ensaio;
- Parte 4: Motores de indução monofásicos – Métodos de ensaios.

Procedimentos e normas devem ser seguidos para garantir o bom funcionamento dos motores e a segurança do pessoal envolvido na operação, evitando possíveis danos pessoais e/ou materiais.

III. O MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

A. Aspectos construtivos

O funcionamento dos motores elétricos está associado à interação de forças de origem eletromagnética entre uma parte

fixa, o estator da máquina, e uma parte móvel, chamada de rotor.

O estator de um MIT é estruturado utilizando-se um material ferromagnético laminado e com ranhuras para armazenar o enrolamento. As lâminas são isoladas para minimizar os efeitos das correntes parasitas e o enrolamento é trifásico, formado por três bobinas defasadas, entre si, de 120°.

A parte móvel do motor de indução pode ser do tipo rotor bobinado ou do tipo gaiola de esquilo.

Um rotor bobinado possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. As terminações das três fases dos enrolamentos são conectadas a anéis deslizantes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. As correntes que circulam no rotor podem ser acessadas por meio das escovas e resistências externas podem ser inseridas no circuito para modificar a característica de conjugado *versus* velocidade do motor [8]. Os motores de indução de rotor bobinado são utilizados apenas em aplicações específicas, pois exigem mais manutenção devido ao desgaste associado às escovas e aos anéis deslizantes, além do fato de serem mais caros.

O rotor em gaiola de esquilo contém uma série de barras condutoras que estão encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e colocadas em curto-circuito por anéis condutores em ambas as extremidades. É o tipo de rotor mais utilizado na fabricação de máquinas de indução por possuir vantagens notáveis, como a simplicidade e a robustez na sua construção.

B. Circuito equivalente

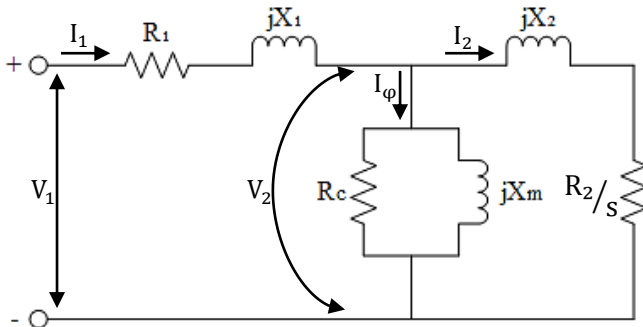
O motor de indução é chamado de máquina de excitação simples, uma vez que a potência é fornecida apenas ao circuito de estator. Portanto, o circuito equivalente de um MIT pode ser obtido empregando-se a teoria de transformadores e introduzindo as modificações necessárias para considerar o fato de que o circuito do rotor opera em frequência diferente daquela do estator em função da diferença de velocidade entre o rotor e o campo magnético produzido no estator.

Todos os parâmetros do circuito equivalente são expressos por fase, independentemente do tipo de ligação (estrela ou delta), partindo do pressuposto de que o enrolamento é simétrico e a máquina é alimentada com tensões trifásicas equilibradas. A determinação dos valores dos parâmetros do circuito equivalente pode ser feita através de um ensaio em vazio, de um ensaio com rotor bloqueado e das medições das resistências CC dos enrolamentos do estator. O circuito equivalente monofásico de um MIT é mostrado na Figura 1.

Os parâmetros do circuito da Figura 1 são definidos da seguinte forma:

- R_1 : Resistência efetiva do estator
- X_1 : Reatância de dispersão do estator
- R_c : Resistência de perdas no núcleo
- X_m : Reatância de magnetização
- R_2 : Resistência do rotor
- X_2 : Reatância de dispersão do rotor
- s : escorregamento

Figura 1: Circuito equivalente monofásico de um motor de indução trifásico.



C. Fluxo de potência e perdas

O estator do MIT recebe da rede elétrica a potência de entrada, que será convertida em potência mecânica de saída, que é a potência fornecida no eixo da máquina. Caso toda a potência de entrada fosse transferida ao eixo, a eficiência da transformação seria de 100%. Entretanto, em qualquer sistema de transformação, parte da energia é dissipada, o que implica em perda de potência. As perdas definem o rendimento da máquina e influenciam de forma significativa no seu funcionamento.

O rendimento de um motor de indução trifásico pode ser definido como sendo a relação entre a potência de saída e a potência de entrada. A potência de saída é obtida subtraindo-se a potência de entrada das perdas internas. Consequentemente, se duas dessas três variáveis (potência de saída, potência de entrada ou perdas) forem conhecidas, o rendimento poderá ser determinado da seguinte forma:

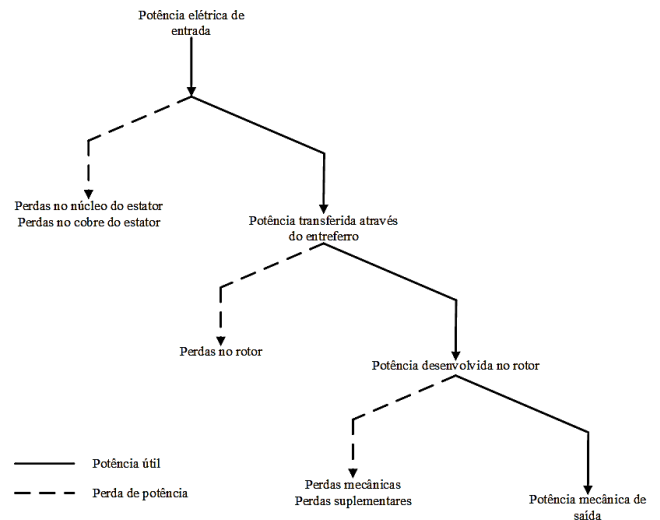
$$\eta_{\%} = \frac{P_{entrada} - P_{perdas}}{P_{entrada}} \quad (1)$$

$$\eta_{\%} = \frac{P_{saida}}{P_{saida} + P_{perdas}} \quad (2)$$

Em um motor de indução, as perdas são separadas em fixas e variáveis, sendo que estas últimas dependem do percentual de carga no eixo da máquina. As primeiras perdas encontradas são as perdas nos enrolamentos do estator. Ainda no estator, certa quantidade de potência é perdida no ciclo de histerese e em função de correntes parasitas. A potência remanescente é transferida ao rotor da máquina através do entreferro. Após a transferência, parte da potência é eliminada nos condutores do rotor e o restante é convertido da forma elétrica para a forma mecânica. Por fim, as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares são subtraídas e a potência restante é a potência de saída do motor. A Figura 2 mostra o fluxo de potência através do MIT.

As perdas no núcleo de um MIT são parcialmente provenientes do circuito do estator e parcialmente do circuito do rotor. Como o motor de indução funciona normalmente com uma velocidade próxima da velocidade síncrona, o movimento relativo dos campos magnéticos sobre a superfície do rotor é muito lento e as perdas no núcleo do rotor são muito pequenas se comparadas com as perdas no núcleo do estator [8].

Figura 2: Diagrama de fluxo de potência através do MIT.



Atualmente, motores de indução de alto rendimento são produzidos e diversas técnicas são utilizadas para aumentar a eficiência desses motores em comparação com os motores tradicionais. A colocação de maior quantidade de aço e de cobre na construção do estator, o aumento do comprimento dos núcleos do estator e do rotor e o cuidado para a formação de um entreferro uniforme são algumas das estratégias que permitem a redução das perdas e, conseqüentemente, a elevação da eficiência.

IV. METODOLOGIA UTILIZADA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

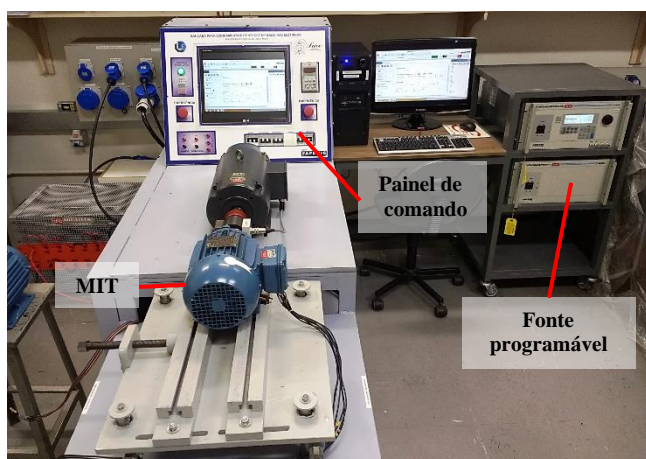
A. A plataforma de ensaios

A plataforma experimental, apresentada na Figura 3, foi desenvolvida de forma a viabilizar a análise do desempenho de motores de indução trifásicos por meio de ensaios diversos. Com a finalidade de facilitar a manipulação de todos os equipamentos necessários à realização dos trabalhos, toda a planta foi acomodada em uma bancada que conta com os principais dispositivos de proteção contra eventuais falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios.

A plataforma conta com uma fonte programável, desenvolvida pela AMETEK Programmable Power, indústria localizada em San Diego, Califórnia. É um equipamento de alta eficiência que fornece uma saída precisa, com baixa distorção. O modelo CSW5550 da marca California Instruments permite conexão em paralelo com até oito módulos do mesmo modelo para aumentar a potência de saída. O dispositivo possui ainda as interfaces remotas GPIB, RS232 e USB.

A programação da fonte pode ser feita através do teclado do painel frontal ou por meio de um *software* específico. Neste último caso, o fabricante fornece duas opções de interface para sistema operacional Windows. A programação via *software* oferece as vantagens do armazenamento das configurações para utilização futura.

Figura 3: A plataforma de ensaios.



A leitura de dados é mostrada no *display* do painel frontal da fonte programável ou por meio da tela do *software*. Além disso, a fonte dispõe também de opções para armazenar os dados de leitura em arquivo de texto com possibilidade de configuração do intervalo de tempo para atualização desses dados, à medida em que os ensaios vão sendo realizados. A Figura 4 apresenta uma das telas de leitura de dados do *software* da fonte programável.

Figura 4: Interface de leitura de dados do *software* da fonte programável.

<input checked="" type="checkbox"/> VOLTAGE (VRMS)	<input checked="" type="checkbox"/> CURRENT (ARMS)												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>127</td> <td>127</td> <td>127</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	127	127	127	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4.31</td> <td>4.43</td> <td>4.31</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	4.31	4.43	4.31
ØA	ØB	ØC											
127	127	127											
ØA	ØB	ØC											
4.31	4.43	4.31											
<input checked="" type="checkbox"/> PHASE (Ø)	<input checked="" type="checkbox"/> POWER (KW)												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>240.3</td> <td>120.5</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	0	240.3	120.5	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.08</td> <td>0.08</td> <td>0.07</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	0.08	0.08	0.07
ØA	ØB	ØC											
0	240.3	120.5											
ØA	ØB	ØC											
0.08	0.08	0.07											
<input checked="" type="checkbox"/> APPT.POWER (KVA)	<input checked="" type="checkbox"/> POWER FACTOR												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.547</td> <td>0.563</td> <td>0.547</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	0.547	0.563	0.547	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.15</td> <td>0.14</td> <td>0.13</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	0.15	0.14	0.13
ØA	ØB	ØC											
0.547	0.563	0.547											
ØA	ØB	ØC											
0.15	0.14	0.13											
<input checked="" type="checkbox"/> PEAK CURRENT (A)	<input checked="" type="checkbox"/> CREST FACTOR												
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6.1</td> <td>6.35</td> <td>6.12</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	6.1	6.35	6.12	<table border="1"> <thead> <tr> <th>ØA</th> <th>ØB</th> <th>ØC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.41</td> <td>1.43</td> <td>1.42</td> </tr> </tbody> </table>	ØA	ØB	ØC	1.41	1.43	1.42
ØA	ØB	ØC											
6.1	6.35	6.12											
ØA	ØB	ØC											
1.41	1.43	1.42											
<input checked="" type="checkbox"/> FREQUENCY	LINE TO LINE VOLTAGES												
60	<table border="1"> <thead> <tr> <th>VAC(L-L)</th> <th>VAB(L-L)</th> <th>VBC(L-L)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>219,97</td> <td>219,97</td> <td>219,97</td> </tr> </tbody> </table>	VAC(L-L)	VAB(L-L)	VBC(L-L)	219,97	219,97	219,97						
VAC(L-L)	VAB(L-L)	VBC(L-L)											
219,97	219,97	219,97											

Na plataforma de ensaios, o motor de indução trifásico será acionado através da fonte programável. As principais características do MIT sob ensaio são apresentadas na Tabela I.

Para evidenciar os recursos da plataforma experimental, foram realizados ensaios para determinar o rendimento do MIT, com este funcionando em condições que podem ocorrer em ambientes industriais, sendo que o não monitoramento de determinadas situações pode trazer avarias severas aos sistemas.

Tabela I: Características do MIT sob ensaio.

Motor de indução trifásico – Rotor em gaiola	
Fabricante	WEG
Potência de saída	2,2 (3,0) kW (cv)
Tensão (Δ/Y)	220 / 380 V
Corrente (Δ/Y)	8,39 / 4,86 A
Frequência	60 Hz
Velocidade mecânica	3450 rpm – 2 polos
Rendimento	81,9%
Fator de potência	0,84
Categoria	N

B. Ensaio para determinação do rendimento

De acordo com a NBR 17094-3:2018, o rendimento deve ser determinado para tensão e frequência nominais, a não ser quando especificado de forma diferente. A norma lista dez métodos que podem ser utilizados para a realização do ensaio, sendo que, para este trabalho, o método 5 foi escolhido por ser o que mais se adequa à plataforma experimental.

O método 5 consiste na medição da potência de entrada, sendo que a potência de saída é obtida subtraindo-se as perdas totais da potência de entrada. As perdas totais representam o somatório das perdas I^2R no estator e no rotor corrigidas para uma temperatura especificada para a correção da resistência, das perdas no núcleo, das perdas por atrito e ventilação e das perdas suplementares.

Quando se utiliza o método 5, a perda suplementar é determinada de acordo com a Tabela II para carga nominal. Para outro ponto que não seja o de carga nominal, deve-se admitir que a perda suplementar é proporcional à corrente do rotor ao quadrado:

$$P_{sup} = P'_{sup} \cdot \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 \quad (3)$$

Onde:

P_{sup} – Valor da perda suplementar para um ponto de carga diferente do nominal.

P'_{sup} – Valor da perda suplementar correspondente ao valor da corrente I'_2 .

I_2 – Corrente do rotor apropriada ao ponto de carga para o qual a perda suplementar é para ser determinada.

I'_2 – Valor da corrente do rotor correspondente à carga nominal.

Tabela II: Valores assumidos de perda suplementar.

Potência nominal do motor kW	Perda suplementar (porcentagem da potência de saída nominal)
0,75 – 90	1,8
91 – 375	1,5
376 – 1839	1,2
1840 e acima	0,9

Os procedimentos para a realização do ensaio para a determinação do rendimento são os seguintes:

- Fazer um ensaio em vazio;
- Fazer um ensaio em carga. Para obter os dados necessários é preciso acoplar o motor a um sistema de carga variável. Para cada um dos pontos de carga, medir a potência de entrada, a corrente de linha, a tensão aplicada, a velocidade, a temperatura ambiente

e a resistência ou a temperatura do enrolamento do estator;

- Determinar a perda I^2R no estator;
- Determinar a perda I^2R no rotor;
- Determinar a perda no núcleo;
- Determinar a perda por atrito e ventilação;
- Calcular a corrente do rotor correspondente a cada ponto de carga;
- Calcular a perda suplementar para cada ponto de carga;
- Determinar o rendimento para cada ponto de carga.

A realização do ensaio em vazio permite que sejam estabelecidas a perda no núcleo e a perda por atrito e ventilação, perdas essas que são as únicas classificadas como perdas fixas.

O ensaio com carga deve ser efetuado para pontos de carga aproximadamente igualmente espaçados e em ordem decrescente, conforme recomenda a NBR 17094-3:2018. Foram escolhidos os pontos em 140%, 125%, 100%, 75% e 50%. A Tabela III apresenta os resultados do ensaio com carga.

As perdas I^2R no estator são calculadas para cada ponto de carga, utilizando os valores de corrente de linha e da resistência do estator que constam na Tabela III.

Tabela III: Resultados do ensaio com carga variável.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de entrada (kW)	3,803	3,442	2,732	1,803	0,853
Corrente de linha (A)	11,356	10,530	8,738	6,613	4,908
Tensão de linha (V)	219,95	219,95	219,95	219,95	219,95
Velocidade (rpm)	3275	3340	3432	3508	3564
Temperatura ambiente (°C)	25	25	25	25	25
Resistência do estator (Ω)	3,75	3,45	3,15	2,85	2,55

Para determinar as perdas I^2R no rotor é necessário inicialmente calcular o escorregamento para cada ponto de carga, empregando os valores de velocidade da Tabela III na equação:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (4)$$

Onde:

- s – Escorregamento.
- n_s – Velocidade síncrona (rpm).
- n – Velocidade de rotação do rotor ou velocidade mecânica.

Uma vez calculado o escorregamento, as perdas no rotor são definidas da seguinte forma:

$$P_{rotor} = (P_{entrada} - P_{estator} - P_{núcleo}) \cdot s \quad (5)$$

Onde:

- P_{rotor} – Perda I^2R no rotor.
- $P_{estator}$ – Perda I^2R no estator.
- $P_{núcleo}$ – Perda no núcleo.

Para efetuar o cálculo da perda suplementar, é preciso antes conhecer o valor da corrente do rotor para cada ponto de carga, o que pode ser determinado pela equação:

$$I_2 = \sqrt{I^2 - I_0^2} \quad (6)$$

Onde:

- I_2 – Corrente do rotor.
- I – Corrente de linha do estator apropriada para a qual a perda suplementar está sendo determinada.
- I_0 – Corrente do estator em vazio.

Utilizando a Tabela II é possível encontrar o valor da perda suplementar à carga nominal. Para os demais pontos de carga, basta aplicar as equações (6) e (3).

Após a realização dos ensaios, os valores de todas as perdas internas do motor ensaiado foram calculados para cada ponto de carga e são apresentados na Tabela IV.

Tabela IV: Relação das perdas internas para cada ponto de carga.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Perda I^2R no estator (W)	483,595	382,539	240,511	124,636	61,426
Perda no núcleo (W)	95,196	95,196	95,196	95,196	95,196
Perda I^2R no rotor (W)	291,074	214,086	111,827	40,459	6,964
Perda por atrito e ventilação (W)	90	90	90	90	90
Perda suplementar (W)	84,654	70,749	44,186	19,09	3,975
Total (W)	1044,519	852,57	581,72	369,381	257,561

Com os valores das perdas disponíveis, pode-se utilizar a equação (1) para o cálculo do rendimento. O resultado é apresentado na Tabela V.

Tabela V: Determinação do rendimento percentual.

	Carga percentual				
	140%	125%	100%	75%	50%
Potência de entrada (W)	3803	3442	2732	1803	853
Perdas totais (W)	1044,519	852,57	581,72	369,381	257,561
Potência de saída (W)	2758,481	2589,43	2150,28	1433,619	595,439
Rendimento (η %)	75,53%	75,23%	78,70%	79,51%	69,80%

Analisando os resultados das Tabelas IV e V, é possível verificar a influência significativa das perdas I^2R do estator e do rotor e das perdas suplementares no valor do rendimento.

C. Avaliação do rendimento com distorção harmônica

A caracterização da presença de harmônicos pode ser feita através do tratamento individual ou total. A distorção harmônica total representa a ação conjunta de todas as frequências harmônicas presentes nos sinais de tensão e/ou de corrente, expressa por uma composição quadrática das distorções individuais. Em se tratando de tensões, a distorção harmônica pode ser determinada da seguinte forma:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_f} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde:

- DHT_V – Distorção harmônica total de tensão.

V_h – Tensão harmônica individual de ordem h .
 V_f – Tensão na frequência fundamental.

Em motores de indução trifásicos, a presença de conteúdo harmônico na tensão de alimentação provoca a elevação das perdas no cobre e no ferro. A elevação das perdas no ferro é consequência de maiores níveis de correntes parasitas nas chapas do rotor e do estator e da geração de calor adicional no ferro da máquina [9]. As perdas no cobre também são consideráveis, por conta de variações na resistência do enrolamento e do aumento da corrente eficaz total. O acréscimo de perdas é refletido na diminuição do rendimento e da vida útil da máquina.

Os ensaios efetuados na plataforma experimental com inserção de harmônicos de tensão tiveram como objetivo principal a verificação experimental das perdas totais no MIT. A fonte programável foi configurada para inserir uma DHT_V de 10% e o motor foi acionado com carga nominal. A Tabela VI mostra os valores eficazes dos harmônicos inseridos na forma de onda da tensão e a Tabela VII apresenta as medições efetuadas durante a realização do ensaio.

Tabela VI: Valores eficazes de harmônicos de tensão.

Ordem harmônica	Percentual	Valor eficaz
Fundamental	100%	220 V
5	8%	17,6 V
7	5%	11 V
11	3%	6,6 V
13	1%	2,2 V
17	1%	2,2 V

Tabela VII: Medições efetuadas durante o ensaio com distorção harmônica de tensão.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão (V)	220	220	220
Corrente (A)	8,004	8,211	8,318
Potência de entrada (kW)	0,804	0,815	0,844
Fator de potência	0,79	0,78	0,80
DHT_V (%)	9,91	9,91	9,91
DHT_I (%)	15,62	15,39	15,23

Para esse ensaio, o valor do rendimento encontrado foi de 59,62%, calculado conforme [10] e [11]. Se comparado com o valor encontrado para carga nominal (Tabela I), é possível constatar que houve redução de mais de 25%, o que comprova que a presença de harmônicos eleva significativamente as perdas internas.

V. CONCLUSÕES

O estudo do rendimento dos motores de indução trifásicos para vários pontos de carga permite avaliar o funcionamento da máquina sob a perspectiva das perdas internas, além de reproduzir e investigar situações operacionais diversas, como a presença de harmônicos, que podem ocorrer em ambientes industriais.

O cumprimento das recomendações contidas nas normas técnicas do segmento de máquinas elétricas garante qualidade, segurança e eficiência para os diversos sistemas. O consenso sobre a utilização das normas assegura o bom funcionamento dos motores e a segurança de pessoas e equipamentos, buscando minimizar ou evitar possíveis avarias.

A plataforma experimental desenvolvida pode ser utilizada para ensaios de motores novos, rebobinados ou ainda os que já estão sendo utilizados por algum tempo nas instalações industriais. A garantia de motores eficientes em processos industriais reduz significativamente as perdas de carga e contribui para minimizar os custos operacionais, uma vez que a correta seleção do motor elétrico para determinada aplicação é fator determinante no custo de sua operação.

REFERÊNCIAS

- [1] Cartilha WEG (2017). *Gestão Eficiente da Energia Elétrica: Motores Elétricos, Inversores de Frequência e Geração Solar*. Acedido em 07 de Abril de 2018, em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-weg-uso-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-catalogo-portugues-br.pdf>.
- [2] W. F. Godoy, I. N. Silva, A. Goedel, R. H. C. Palácios and T. D. Lopes, “Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter”, *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 430-439, June 2016.
- [3] R. Bulgarelli, *Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- [4] V. P. Silva, *Análise Comparativa do Desempenho do Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento e Linha Padrão em Condições de Alimentação Ideal e não Ideal*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [5] P. H. O. Rezende e D. Bispo, “Análise Econômica em Motores de Indução Trifásicos”, *Revista Horizonte Científico*, vol. 9, no. 1, Maio 2015.
- [6] S. F. Silva, *Identificação de Torque de Carga em Motores de Indução usando Abordagem Baseada em Sistemas Fuzzy*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2007.
- [7] T. Izhar, M. Ali and A. Nazir, “Development of a Motor Test Bench to Measure Electrical/Mechanical Parameters”, *2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, November 2017.
- [8] S. J. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Elétricas*, AMGH Editora Ltda., 5ª Edição, Porto Alegre, 2013.
- [9] M. Isoni (n.d.), *A moderna eficientização energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas: Distorções harmônicas – Uma revisão de conceitos gerais*. Acedido em 25 de Maio de 2018, em: http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf.
- [10] C. A. Oliveira, *Plataforma para Ensaio de Motores de Indução Trifásicos e Simulação de Cargas Mecânicas: Aacionamento, Operação e Monitoramento com Auxílio de Fonte Programável*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). *Máquinas Elétricas Girantes – Parte 3: Motores de Indução Trifásicos – Métodos de Ensaio*.