

MÉTODO PARA A OBTENÇÃO DE TORQUE DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS DE FÁCIL APLICAÇÃO INDUSTRIAL.

GEORGE A. M. LACERDA*, LANE M. R. BACCARINI**, GLEISON F. V. AMARAL**

*Magneti Marelli Cofap, Rua Rosa Kasinski, 865, Lavras, Minas Gerais. CEP 37.200-000

**Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica CEFET/UFESJ, Universidade Federal de São João del Rei, Pça Frei Orlando, 170, Minas Gerais, CEP 36.307-352

E-mails: georgemarqueslacerda@yahoo.com.br, rabelo@ufesj.edu.br,
amaral@ufesj.edu.br

Abstract— This paper presents a methodology to estimate the shaft torque in three phase induction motors. The proposed method depends on the signals of the phase voltages, signals of the phase currents, stator resistance, rotation speed of the shaft and the free running losses. A technique variant is presented, utilizing only common use tools at industrial environment: a three phase wattmeter, an amperimeter, a voltmeter and a tachometer. This tool was inspired by the Airgap Torque Method, however it doesn't make integrations to find the result. The methodology is robust against variations in the voltage supply and estimations errors of the stator resistance. Computational and practical results are presented to validate, reaching an error smaller than 1% for load near the nominal and smaller than 4% within all the load range.

Keywords— Torque estimation, Induction Motor, Airgap Torque, Non-Intrusive, local measurement.

Resumo— Este artigo apresenta uma metodologia para estimação do torque no eixo dos motores de indução trifásicos. O método proposto depende dos sinais das tensões de fase, sinais das correntes de fase, resistência do estator, velocidade de rotação do eixo e perdas a vazio. Uma variante da técnica é apresentada, utilizando-se somente ferramentas comuns em ambientes industriais: um wattímetro trifásico, um amperímetro, um voltímetro e um tacômetro. A ferramenta foi inspirada no Método *Airgap Torque*, porém não utiliza de integrações para se encontrar o resultado. A metodologia é robusta frente a variações na rede de alimentação e erros de estimação da resistência no estator. Resultados computacionais e práticos são apresentados para validação, atingindo erros menores que 1% para cargas próximas da nominal e erros menores que 4% para toda a faixa de operação.

Palavras-chave— Estimação de torque, Motor de indução, *Airgap Torque*, Não intrusivo, medição local.

1 Introdução

O conhecimento do valor do torque mecânico no eixo do Motor de Indução Trifásico (MIT) é útil em diversos ramos de pesquisa e da indústria. Como exemplo, é possível citar: cálculo de rendimento, redimensionamento de motores, técnicas de controle, métodos de detecção incipiente de falhas.

Motores elétricos trifásicos são amplamente utilizados e, estima-se, que podem chegar a consumir 32% da energia elétrica do país (Garcia, 2003). Dentre estes, o motor de indução é a forma mais econômica de se converter eletricidade em energia mecânica. Diversos motivos o tornam uma escolha viável: alta eficiência, baixo custo de produção, robustez, facilidade na instalação e operação. Assim, utilizar a informação da intensidade do torque exercido pelos motores de indução pode melhorar as suas mais diversas aplicações em todos os setores produtivos.

Para que o conhecimento sobre o ponto de operação do MIT possa ser útil e conveniente em cada tipo de aplicação, são necessárias técnicas cada vez mais simples, confiáveis e que demandem instrumentos comuns em ambientes industriais. Técnicas que atendam estas premissas podem ser amplamente implementadas e suas informações mais facilmente utilizadas.

Em ambientes industriais, a medição do torque no eixo dos motores tem caráter altamente impeditivo. A

necessidade de desmontagens e instalação de instrumentos de medição, usualmente caros, tornam inviáveis tais medidas.

O uso de métodos pouco invasivos, que estimam o valor do torque tem melhor aceitação em tais setores, elevando a aplicabilidade em processos industriais. Assim, métodos não intrusivos e de aplicação contínua durante o funcionamento do motor tem chamado a atenção de pesquisadores (Lu, Habetler and Harley, 2008; Agamloh *et al.*, 2005; Rodrigues *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015).

Neste artigo propõe-se um método de estimação do torque no eixo do motor usando somente os valores instantâneos de corrente e tensão nos seus terminais de alimentação, a resistência elétrica dos enrolamentos do estator, a velocidade do rotor e as perdas a vazio. Assim, a técnica pode ser aplicada como forma de monitoração contínua durante a operação do motor. O projeto foi inspirado no método *Air-gap torque* (Hsu and Sorenson, 1996), com o diferencial de não ser necessária a resolução de uma integração para se calcular o torque no entreferro.

O artigo foi estruturado em cinco seções: Na seção 1 apresenta-se a introdução e também a motivação do desenvolvimento do trabalho; A metodologia está descrita na seção 2. Nas seções 3 e 4 tem-se os resultados de simulações e experimentais. A técnica proposta foi comparada com os valores de torque obtidos por um torquímetro, que é um sensor invasivo, e também com um equipamento comercial de estimação de

torque. As conclusões dos estudos realizados estão apresentadas na seção 5.

2 Estimação de torque

A Figura 1 apresenta um descritivo generalizado das perdas típicas em um motor de indução. Em uma máquina idealizada, o torque na saída pode ser calculado diretamente a partir do torque eletromagnético. Portanto, a precisão no cálculo das perdas influencia diretamente na exatidão do método de estimação do torque.

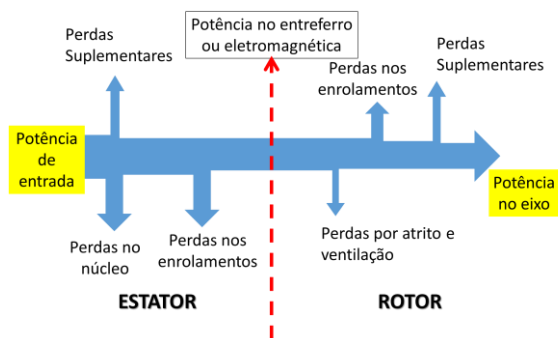


Figura 1. Perdas em um motor de indução

A Transformada de Park, ou Transformação $qd0$, possui a propriedade importante de eliminar as indutâncias variáveis no tempo do modelo dinâmico do motor. Tal efeito reduz a complexidade do sistema e o esforço computacional necessário para resolver as equações diferenciais. O equacionamento em coordenadas qd , descrito em (Krause *et al.*, 2002) define que o torque no entreferro, T_e , pode ser calculado a partir da equação (1). Onde i_{qs} e i_{ds} são as correntes de eixo quadratura e de eixo direto do estator; λ_{qs} e λ_{ds} são os respectivos fluxos concatenados do estator e P o número de polos. O sobreíndice e indica que os eixos d e q giram em velocidade síncrona com a rede, onde o eixo q é coincidente com o fasor da tensão da fase a e o eixo d está defasado 90° no sentido anti-horário.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e). \quad (1)$$

Para resolver a equação (1) é necessária a medição dos fluxos concatenados. Tal solução demanda sensores específicos e preparação mecânica do motor, sendo, portanto, uma medição altamente invasiva. Porém é possível estimar os valores dos fluxos.

As equações (2) e (3) definem as tensões do motor, de eixo em quadratura e direto, respectivamente. A resistência do estator é simbolizada por r_s e a velocidade angular dos eixos qd é ω^e .

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \omega^e \lambda_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e \quad (2)$$

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \omega^e \lambda_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e \quad (3)$$

Quando as variáveis de Park são referenciadas na velocidade angular da rede, estas resultam em sinais constantes no tempo. Esta é uma característica útil,

pois, na situação de regime permanente, as parcelas derivativas das equações de tensão são nulas.

Isolando-se o fluxo concatenado em (2) e (3) resulta nas equações (4) e (5) já eliminadas as parcelas em derivada.

$$\lambda_{ds}^e = \frac{(v_{qs}^e - r_s i_{qs}^e)}{\omega^e} \quad (4)$$

$$\lambda_{qs}^e = \frac{(v_{ds}^e - r_s i_{ds}^e)}{\omega^e} \quad (5)$$

A transformação dos fasores de tensão abc decorre na componente do eixo direto igual a zero, devido a referência utilizada. Substituindo as equações (4) e (5) em (1) resulta na nova equação (6) do torque eletromagnético.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{1}{\omega^e}\right) [v_{qs}^e i_{qs}^e - r_s (i_{qs}^{e2} + i_{ds}^{e2})] \quad (6)$$

A equação (6) está associada a algumas considerações e simplificações a saber: Primeiro, as indutâncias de dispersão dos enrolamentos das três fases do motor são consideradas idênticas e lineares; segundo, os desbalanceamentos magnéticos instantâneos nas três fases são ignorados (Kueck *et al.*, 2006).

Como não há resolução de integrais, componentes contínuas nas variáveis lidas não geram uma divergência no resultado final devido a um erro crescente somado a cada passo.

Como as equações do modelo do MIT são idealizadas, não consideram a ineficiência inerente a máquina real. Portanto, a equação (7) formula o torque no eixo do motor a partir do torque eletromagnético e das perdas.

$$T_{eixo} = T_e - \frac{P_{mag} + P_{AV}}{\omega_r} - \frac{P_{sup}}{\omega_r} \quad (7)$$

As perdas magnéticas no núcleo e perdas por atrito e ventilação, P_{mag} e P_{AV} , podem ser medidas conjuntamente em um teste a vazio do motor. Pode-se também usar dados adquiridos de equipamentos similares, valores padrões estabelecidos, dados de placa, *softwares* dedicados, entre outros métodos. Portanto, a especificação das perdas a vazio é o ponto de maior intervenção no motor para aplicação do método.

Alguns motores na indústria não possuem uma forma fácil de se realizar esta medição, sugere-se então realizá-lo em momentos de desmontagem devido à manutenção preventiva.

Para as perdas suplementares, pode ser utilizada a Tabela 1 ou outros métodos propostos nas normas vigentes.

Tabela 1. Valores assumidos da perda suplementar (NBR 5383)

Potência nominal do motor	Perda Suplementar – Porcentagem da potência nominal
1-125 cv	1,8
126-500 cv	1,5
501-2499 cv	1,2
2500 cv e acima	0,9

Para se aplicar o método, é necessária aquisição dos sinais de corrente e tensão, utilizados na transformação de Park. Como o valor do torque no eixo é dependente da velocidade do rotor, pode-se medi-la diretamente ou estimá-la. Há na literatura vários métodos de estimação com erros menores que 1% (Zhou and Jih-Sheng, 2000, Holtz, 1998, Hurst and Habetler, 1996).

Finalmente, a medição da resistência do estator pode ser realizada diretamente nos terminais do MIT, pode ser aproximada a partir dos dados de placa ou utilizar métodos das normas vigentes.

2.1 Estimação sem aquisição dos sinais das variáveis

Como o método proposto não depende de resolução de integração, é possível com instrumentos mais simples obter o torque no eixo dos motores.

A partir dos valores eficazes de corrente e tensão de fase para o sistema em variáveis abc é possível se calcular as componentes d e q da transformada de Park de forma simplificada. As equações (8) e (9) representam as componentes da corrente.

$$i_{qs}^e = \sqrt{2}i_s \cos \theta_{fp} \quad (8)$$

$$i_{ds}^e = \sqrt{2}i_s \sin \theta_{fp} \quad (9)$$

A variável i_s é o valor eficaz da corrente de fase do MIT, sendo no caso, a média das três fases e θ_{fp} corresponde ao ângulo do fator de potência (Krause, 2002). As equações (10) e (11) referem-se a transformação das tensões de alimentação:

$$v_{qs}^e = \sqrt{2}v_s \quad (10)$$

$$v_{ds}^e = 0 \quad (11)$$

A variável v_s é o valor eficaz da tensão de fase, da mesma forma que a corrente, é calculada a partir da média das três fases. O torque no eixo é obtido substituindo-se os valores das tensões e correntes de alimentação em coordenadas dq nas equações (6) e (7). Os métodos de medição dos valores de resistência do estator e perdas do MIT são os mesmos já citados.

Como as oscilações e desbalanceamentos na rede não são percebidos por estes medidores mais simples, há um erro inserido na estimação, pois as equações simplificadas de Park consideram um sistema balanceado.

Utilizando um wattímetro trifásico, um amperímetro, um voltímetro e um tacômetro é possível estimar o torque mecânico do motor. Estes instrumentos são de uso regular em plantas industriais, além de não necessitar de aquisição de dados ou interface computadorizada.

3 Resultados de simulação

A Figura 2 compara os valores do torque estimado com o torque calculado pelo modelo do MIT, desde a partida até o degrau de carga nominal. Como o método proposto é baseado em um sistema idealizado, em regime permanente, o erro da estimação do torque em simulações é nulo, pois a equação se torna exata já que as novas variáveis são contínuas no tempo. Os parâmetros do motor simulado são: Resistência do estator = $0,087\Omega$; Resistência do rotor = $0,228\Omega$; Reatância do estator = $0,302\Omega$; Reatância Mútua = $13,08\Omega$; Reatância do rotor = $0,302\Omega$; Momento de inércia do acoplamento eixo/carga = $1,662kgm^2$. (Krause et al., 2002).

Pode-se objetar sobre a negligência da parcela em derivada das equações (2) e (3) de tensão do motor, já que componentes harmônicas na tensão podem gerar uma oscilação no sinal do torque eletromagnético. Porém, em regime permanente, o resultado da equação completa (1) frente a tais oscilações também gerariam harmônicos de amplitude similar e de mesma frequência. Desta forma, o valor médio do torque estimado pela equação simplificada (6) pode ser considerado o mesmo da completa.

A Tabela 2 mostra o erro de estimação em simulação quando são inseridos ruídos, desbalanceamentos e erros na estimação da resistência do estator. Na Figura 3 são comparados os torques estimado e o calculado quando todas as fontes de erro operam conjuntamente.

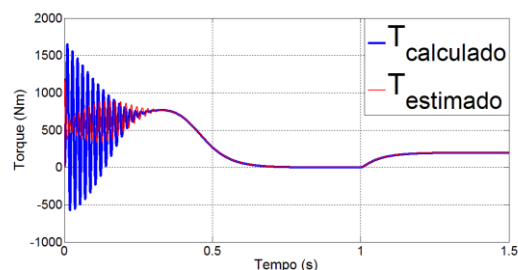


Figura 2. Torque estimado versus Torque calculado para um Motor de 50HP. Desde a partida até o degrau de torque nominal.

4 Resultados experimentais

A bancada apresentada na Figura 4 é composta por um motor de indução trifásico rotor gaiola (3 CV, 220 V, 60 Hz) e uma máquina de corrente contínua. A máquina CC funciona na operação geradora, alimentando um banco de lâmpadas, portanto, é a carga do motor de indução. Variando-se a corrente de excitação do gerador CC ou inserindo ou retirando lâmpadas, tem-se, conseqüentemente, variação de carga no eixo do motor de indução.

Para a aquisição de sinais de corrente e de tensão foi utilizada uma placa PCI-6013 da National Instruments®. A placa possui 16 canais analógicos de entrada que podem operar em até 200KS/s (200000 amostras por segundo) e 2 contadores digitais de 24

bits cada. As entradas analógicas possuem resolução de 16 bits.

Tabela 2. Erro de estimação em diversas condições de operação. Motor de 50 HP, trabalhando em regime permanente com carga nominal de 198 N.m

Condições de operação	Torque médio calculado (Nm)	Torque médio estimado (Nm)	Erro (%)
r_s 20% menor que o valor real	198	198,8	0,4
r_s 20% maior que o valor real	198	197,2	0,4
Ruído aleatório somado a todas as fases da tensão de alimentação, com média 0 e desvio padrão 10	198,02	198,05	0,02
Ruído aleatório somado a fase a da tensão de alimentação, com média 5 e desvio padrão 10	197,99	198,64	0,33
Desbalanceamento de 1% das tensões de alimentação	198	198,03	0,02
Desbalanceamento de 8% das tensões de alimentação	198	199,61	0,8

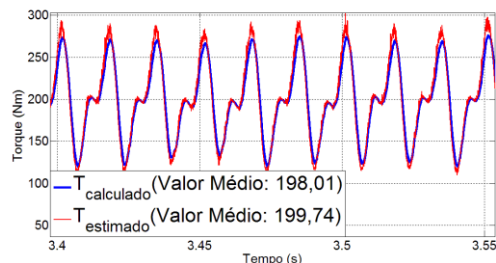


Figura 3. Torque estimado versus Torque calculado para um Motor de 50HP. Detalhe dos sinais em regime permanente. Erro do valor médio: 0,87%. Condições de operação: r_s 20% maior que o valor real; desbalanceamento de 5% da tensão de alimentação; Ruído aleatório somado a fase a da tensão de alimentação, com média 5 e desvio padrão 10.



Figura 4. Bancada de testes

Os sinais de tensão e corrente foram submetidos a um circuito condicionador, que tem as seguintes funções: • Isolar eletricamente o sistema de medição e a planta; • Normalizar os sinais de entrada a uma determinada faixa; • Filtrar as componentes de altas frequências.

Os três sensores de corrente utilizados são de efeito hall, modelo LTA 50 P. Utilizou-se três sensores LEMLV 100 – 300 para medição das tensões de linha, precisão de 0,7%.

Para avaliação da precisão do método proposto foi utilizado um transdutor de torque TM308 da Magtrol®, este fornece os valores de torque e velocidade no eixo do motor.

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade da técnica, os resultados foram comparados com os estimados por um equipamento comercial

Os parâmetros na Tabela 3 são os dados característicos do motor, necessários à aplicação do método.

Tabela 3. Dados do motor de indução

Perdas a vazio	Resistência dos enrolamentos do estator na temperatura de operação	Perdas suplementares com carga nominal
209 W	3,63 Ω	39,6W

4.1 Resultados do método através da aquisição de dados

Com o motor operando em carga nominal, os sinais de corrente e tensão de fase foram medidos. As Figuras 5 e 6 representam a transformação de Park destas variáveis.

Analisando-se o gráfico evidencia-se uma oscilação somada à componente contínua de cada variável. Os resultados computacionais com semelhante condição induzida, resultaram em erros menores que 1%. Por ser a tensão da fase A da alimentação a referência do novo sistema girante, a componente d da tensão apresenta sempre valor nulo.

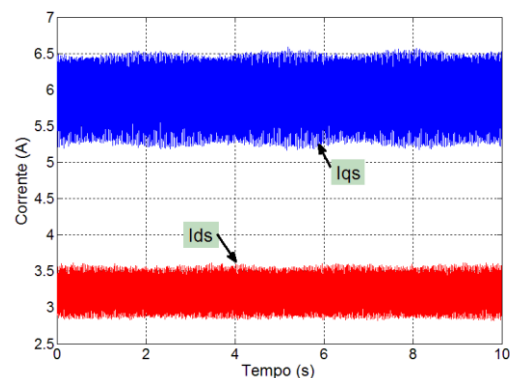


Figura 5. Sinais de corrente do estator em coordenadas dq para carga nominal

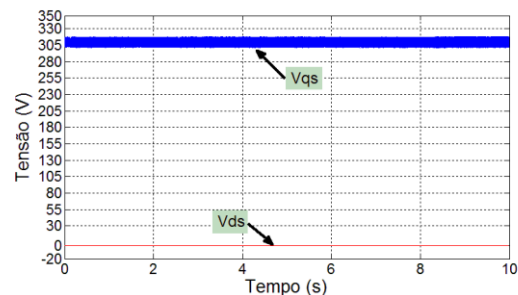


Figura 6. Sinais da tensão de alimentação em coordenadas dq

A figura 7 mostra o torque eletromagnético nominal estimado a partir das variáveis de entrada. Verifica-se a presença da oscilação também neste sinal. Como o método proposto considera a componente

contínua, é necessário calcular o valor médio do sinal para se ter o resultado estimado.

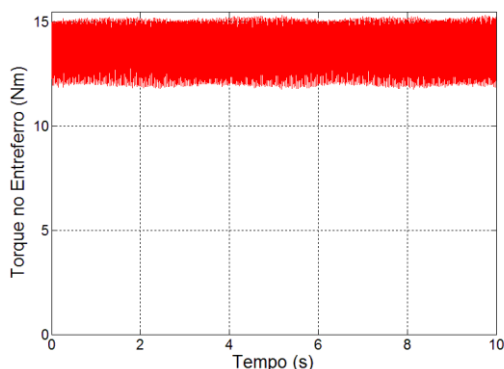


Figura 7. Torque no entreferro estimado a partir da tensão e corrente do estator, com carga nominal

Medições da corrente e tensão de alimentação do MIT foram feitas variando-se a carga no eixo desde 3% até 106 % da nominal. Com os dados coletados foi possível estimar o torque e compará-los com a medição direta do torque no eixo, bem como com o estimador comercial. A Figura 8 apresenta os valores do torque para cada ponto de operação do motor. O método proposto mostra estimações próximas do valor mensurado.

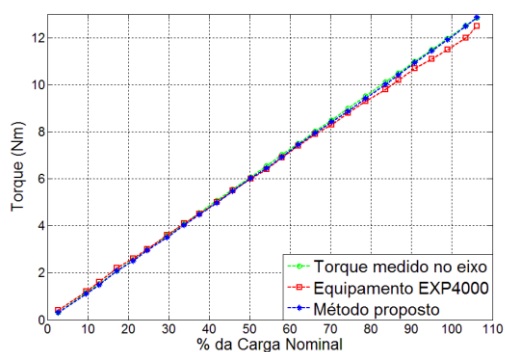


Figura 8. Comparativo do torque estimado pelo Método Proposto, torque estimado pelo equipamento EXP4000 e do torque medido pelo transdutor Magtrol.

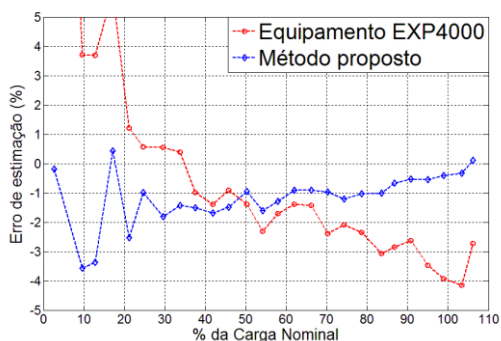


Figura 9. Erros percentuais da estimação do Método Proposto e do EXP4000.

A Figura 9 quantifica o erro da estimação. A partir de 25% da carga nominal o valor estimado apresenta erros menores que 2% dos valores lidos no transdutor. Para o motor em questão, na região próxima da carga nominal, apresenta erros de estimação menores

que os encontrados pelo estimador comercial. Percebe-se também uma variação menor do erro em torno do próprio valor médio ao longo de toda a faixa de operação.

4.2 Resultados do método sem aquisição de dados

No método apresentado, utiliza-se o valor médio do torque eletromagnético para se estimar o torque no eixo. Porém é possível utilizar-se os valores médios das variáveis de tensão e corrente do estator em coordenadas dq com o mesmo fim. Contudo, ao se utilizar instrumentos de medição mais comuns em plantas industriais, estes fornecem os valores eficazes das grandezas elétricas medidas. Caso o sinal seja perfeitamente contínuo, não há diferença entre o valor rms e o médio. Isto dificilmente ocorre em aplicações reais, devido a ruídos e desbalanceamentos. Como a diferença entre os dois valores é muito menor que a componente contínua da variável, assume-se que o impacto no erro seja limitado.

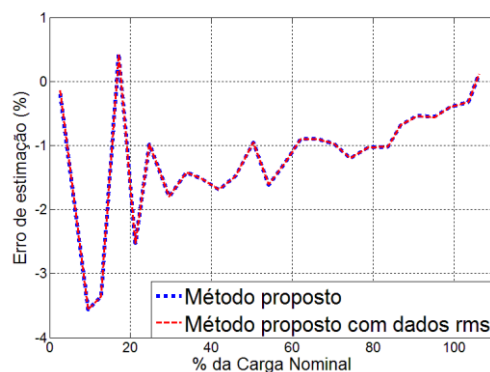


Figura 10. Comparativo entre os erros do Método Proposto usando-se o sinal no tempo e o valor RMS

A Figura 10 quantifica o erro na estimação do torque utilizando os valores rms dos sinais. Observa-se quando o motor opera próximo dos valores nominais que o erro é próximo de zero, mantendo praticamente o mesmo erro encontrado pelo método utilizando os sinais no tempo.

Para o cálculo dos valores das variáveis foi calculado o valor eficaz dos sinais de cada fase e após retirado a média dos três valores. Para o fator de potência foi utilizada a potência de entrada dividida pela potência de saída. Substituindo os valores encontrados nas equações (8) a (11), resulta nas variáveis necessárias para se estimar o torque no ponto de operação. Os parâmetros apresentados na Tabela 3 foram reutilizados para o cálculo do torque no eixo.

5 Conclusão

A estimação do torque nos eixos de motores de indução trifásicos é de ampla utilização nas mais diversas aplicações industriais, uma das mais comuns é o cálculo do rendimento do MIT em operação.

O método proposto é de simples utilização e utiliza parâmetros de fácil obtenção, sem ferramentas ou

ensaios de uso exclusivo de laboratórios. Para o motor analisado verifica-se na Figura 9 que o erro na estimação evidencia pouca variação em torno de um valor médio e, também, um erro máximo menor que 4% para toda a faixa de operação do motor. Quando este opera próximo dos valores nominais o erro é menor, sendo menor que 1% para valores de carga maiores que 85% da nominal. O resultado atingido é bom, comparando-se com a Norma Brasileira NBR 17094-1 2008, seção 24, que define que a tolerância da eficiência medida de um motor deve ser de 3% para um motor com rendimento declarado de 80%.

A variante do método, onde não se utiliza os sinais no tempo e sim os valores *RMS*, apresentou resultados praticamente iguais, simplificando ainda mais a os meios para se estimar o torque. É importante ressaltar que a fonte dos dados de ambos os métodos são os sinais da tensão e corrente. A diferença do segundo método é que os sinais foram transformados para que se assemelhassem a uma aquisição dos dados por meio de instrumentos comuns na indústria. Os resultados mostram que seu uso é possível e sua lógica coerente, porém os fatores impactantes nos erros ainda precisam ser levantados e avaliados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapemig e à Capes pelo apoio financeiro para a realização dos testes e apresentação dos resultados. A Magneti Marelli Cofap pela solicitude durante o projeto.

Referências Bibliográficas

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 17094 - 2008, “Máquinas Elétricas Girantes – Motores de Indução – Trifásicos: Especificação”.
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5383 - 2002, “Máquinas Elétricas Girantes – Máquinas de Indução: Determinação das Características”.
- Agamloh, E. et al (2005) Assessment of Nonintrusive Motor Efficiency Estimators. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 1, p. 127-133.
- Garcia, A. 2003. Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conversão de Energia para a Indústria. Mestre—[s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Holtz, J. (1998) Sensorless position control of induction motors-an emerging technology. IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol 45 (6), pp. 840 – 851.
- Hurst, D.; and Habetler, T. G. (1996). Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, no. 1, pp. 66–73.
- Hsu, J.; Sorenson, P. (1996). Field assessment of induction motor efficiency through air-gap torque. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 11, n. 3, p. 489-494, 1996.
- Krause, P. et al. Analysis of electric machinery and drive systems. Tradução . [s.l: s.n.].
- Kueck, J. D. et al. 1996. Assessment of methods for estimating motor efficiency and load under field conditions. ORNL.
- Lu, B.; Habetler, T.; Harley, R. A (2008). Nonintrusive and In-Service Motor-Efficiency Estimation Method Using Air-Gap Torque With Considerations of Condition Monitoring. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 44, n. 6, p. 1666-1674.
- Rodrigues, L. et al. (2012). Estimação de Rendimento de Motores de Indução Trifásicos Utilizando Sensores Normalmente Presentes na Planta Industrial. Congresso Brasileiro de Automática. Anais. Campina Grande.
- Silva, L. et al. Differential Evolution based Air-Gap Torque method approach for induction motor efficiency estimation. 2015 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2015.
- Zhou, R.; Jih-Sheng, L.. Low-speed performance comparison of induction motor sensorless control methods. COMPEL 2000. 7th Workshop on Computers in Power Electronics. Proceedings (Cat. No.00TH8535), 2000.