

MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHA EM BARRAS DO ROTOR BASEADO NA METODOLOGIA HILBERT-PARK

DAIANE A. ALVES, LANE R. BACARRINI, PAULO C. M. LAMIM FILHO, FABIANO B. BATISTA

Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei

Caixa Postal 110, 36307-352, São João del Rei, Minas Gerais, Brasil

E-mails: daianeengenharia.alves@gmail.com, rabelolane@gmail.com,

plamim@yahoo.com, fabianchini@ufsj.edu.br

Abstract—In this paper is proposes a fault detection method based on Park's Vector Approach and Hilbert transform. The advantages of the method are ease of implementation, the non-dependence of charge level for implementation of the diagnosis of broken bars and, reducing computational effort by not requiring long acquisition time. The effectiveness of the technique and its computational validation has been proven using a three-phase induction motor 5HP under different conditions of load and fault levels.

Keywords—Broken Rotor Bar, Induction Motor, Hilbert Transform, Park's Vector Approach.

Resumo—Neste trabalho é proposto um método de detecção de falha baseado na Abordagem do Vetor de Park e na Transformada de Hilbert. As vantagens do método são: a facilidade de implementação, a não dependência do nível de carga para a execução do diagnóstico de barras quebradas e, a redução de esforço computacional por não exigir longo tempo de aquisição. A eficácia da técnica e sua validação computacional foram comprovadas utilizando um motor de indução trifásico de 5-HP, sob diferentes condições de carga e níveis de falha.

Palavras-chave—Barras quebradas, Motor de indução, Transformada de Hilbert, Abordagem do Vetor.

1 Introdução

Os motores de indução trifásicos, do tipo rotor gaiola são amplamente utilizados no setor industrial. Porém, são máquinas que necessitam de um programa eficiente de manutenção preditiva para evitar paradas não programadas e, conseqüentemente, reduzir prejuízos para a indústria.

Apesar de apresentar características que demonstram a sua confiabilidade e robustez, os motores de indução estão sujeitos as falhas elétricas e mecânicas oriundas do tempo e modo de operação, das condições ambientais, do sistema de alimentação, de falhas inerentes da fabricação, dentre outros fatores (Ying Xie, 2012). Recentemente, a questão do monitoramento da condição da máquina e o diagnóstico de falhas tornaram-se parte importante do sistema de manutenção (Widodo and Yang, 2007).

De um modo geral, as falhas podem ser classificadas em: 1) falhas no enrolamento do estator: curto circuito entre espiras e curto circuito entre bobinas; 2) falhas no rotor; barras ou anéis quebrados ou trincados; 3) falhas mecânicas: desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica; 4) falhas nos rolamentos (Zhanget al 2011).

As quebras ou trincas de barras do rotor são motivadas por uma combinação de tensões internas e externas causados por: esforços térmicos e mecânicos; cargas pulsantes; imperfeições no processo de fabricação; envelhecimento natural e partidas sucessivas (Drif and Cardoso 2008). Para motores de indução de

média tensão, os problemas nas gaiolas do rotor são ainda mais frequentes devido ao esforço térmico causado durante o processo de partida (Ying Xie *et al* 2013).

A análise da corrente do estator (*Motor Current Signal Analysis-MCSA*) consiste em um método clássico de diagnóstico de falhas, não invasivo e que necessita apenas da medição da corrente em uma das fases da alimentação (Gaeid *et al* 2011, Messaoudi and Sbata, 2010). O MCSA faz o uso da ferramenta matemática denominada Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform-FFT*) para a realização da análise espectral da corrente do estator.

A presença de falhas por barras quebradas no rotor induz ao aparecimento de componentes espectrais de bandas laterais com frequência: $f_{br} = (1 \pm 2s)f$, em que f é a frequência fundamental de alimentação e s consiste no escorregamento do motor de indução (MIT). A amplitude da banda lateral esquerda é proporcional ao número de barras quebradas, e, as frequências associadas, são funções da velocidade do motor. Portanto, para a operação com carga reduzida, o escorregamento é muito pequeno, e as frequências de modulação estarão sobrepostas à componente de frequência fundamental da corrente do estator. O que pode acarretar uma leitura errônea da falha.

De acordo com (Panadero,2015); ao se aplicar o método MCSA para o diagnóstico de falhas no rotor na condição de baixo escorregamento, é necessário um tempo mínimo de aquisição de 100 segundos para se obter a resolução em frequência que possibilite a

realização do diagnóstico correto da falha. Dessa forma, torna-se necessário um tempo de aquisição elevado para que haja a redução da resolução em frequência, e, com isso, ocorra uma melhor visualização dos componentes espectrais de falha. Têm-se, porém, como consequência do tempo de aquisição elevado, um aumento da capacidade de memória para a alocação de dados e a exigência de um tempo de processamento maior na análise dos resultados. Características estas que prejudicam a performance da técnica MCSA, para a execução do diagnóstico de falhas em barras quebradas quando o MIT se encontra em condição de baixo escorregamento.

Várias técnicas têm sido propostas na literatura para o diagnóstico de barras quebradas, dentre elas, pode-se destacar: Abordagem do Vetor de Park (PVA), Extensão da Abordagem de Park (EPVA), Rede Neurais (NN), análise do fluxo axial. Estes métodos de detecção fazem o uso de ferramentas de processamento de sinais para realizar a extração do sinal relacionado à falha. Dentre tais ferramentas de processamento de sinais utilizadas, pode-se destacar: a Transformada de Wavelet (Keskes *et al* 2013, Achmad *et al* 2009), Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT), e a Transformada de Hilbert (Aydin *et al.* 2011), entre outras.

Uma abordagem alternativa ao método clássico MCSA é apresentada no presente trabalho para a detecção de barras quebradas, o intuito é superar as dificuldades apresentadas por este na condição de baixo escorregamento, e propor uma técnica que seja totalmente independente da condição de carga do motor. Sua metodologia se baseia na técnica do Vetor de Park (*Park's Vector Approach*-PVA), e, após isso, um novo método foi proposto, utilizando a metodologia do Vetor de Park juntamente com a aplicação da ferramenta de processamento de sinais denominada Transformada de Hilbert (*Hilbert Transform*-HT).

Este artigo é organizado da seguinte maneira: a seção 1 apresenta a introdução e os objetivos do trabalho proposto. Na seção 2 têm-se uma descrição do modelo assimétrico de barras quebradas; a seção 3 aborda as metodologias utilizadas para a construção do presente trabalho; na seção 4 são exibidos os resultados simulados obtidos usando-se a nova técnica proposta; finalmente, na seção 5 são apresentadas as conclusões do estudo.

2 Modelo de Barras Quebradas

Nos últimos anos, diversos autores apresentaram modelos matemáticos para o motor de rotor gaiola para análise de barras quebradas. Nestes modelos, o rotor é descrito por múltiplos circuitos magneticamente acoplados. Além disso, a matriz de indutâncias próprias e mútuas que representa as n barras depende da posição do rotor. Em alguns modelos, o número de equações pode ser reduzido se o número de barras for múltiplo do número de polos. Ainda assim, os modelos propostos são complexos, resultando em grande esforço computacional.

Em Cunha *et al.* (2005) assimetrias no rotor foram analisadas usando o modelo tradicional de eixos $dq0$. Neste modelo, as quebras de barras do rotor gaiola são introduzidas por meio da transformação linear do vetor de correntes do rotor em n correntes espaciais de malha. A matriz de transformação é simples e necessita somente do conhecimento do número de barras.

No caso da existência de barras quebradas, cada barra do rotor e segmentos dos anéis são representados por um circuito R-L em série. Para o cálculo das correntes em cada malha, as correntes do rotor de eixo $dq0$ devem ser referidas para eixos fixos no rotor, ou seja, eixo $dq0$ girando na velocidade do motor ω_r . As n correntes de malhas do rotor representadas por $(i_{r1}, i_{r2}, \dots, i_{rn})$ são obtidas pela Eq. (1) utilizando a matriz de transformação, T_{dq} , dada pela Eq. (2).

$$\begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{bmatrix} = T_{dq}^{-1} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ \vdots \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[T_{dq}] = [K_b][M] \quad (2)$$

Sendo que, $(K_b$ e $M)$ são representados pelas Eq.(3) e (4).

$$K_b = \frac{n-1}{n} \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{p}{2}\frac{2\pi}{n}\right) & \cos\left(\theta - \frac{p}{2}\frac{4\pi}{n}\right) & \cos\left(\theta - \frac{p}{2}\frac{n-1}{n}2\pi\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{p}{2}\frac{2\pi}{n}\right) & \sin\left(\theta - \frac{p}{2}\frac{4\pi}{n}\right) & \sin\left(\theta - \frac{p}{2}\frac{n-1}{n}2\pi\right) \\ f_{31} & f_{32} & 1 & 0 \\ f_{41} & f_{42} & 0 & 0 \\ f_{n1} & f_{n2} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

O próximo passo é introduzir assimetrias nas barras. Considerando a barra k quebrada, a corrente zero nesta barra é obtida alterando as correntes nas duas malhas que contêm a barra k , conforme Eq. (5).

$$\begin{bmatrix} i_{r1}^{new} \\ i_{r2}^{new} \\ \vdots \\ i_{r(k+1)}^{new} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ \frac{i_{rk} + i_{r(k+1)}}{2} \\ \vdots \\ \frac{i_{rk} + i_{r(k+1)}}{2} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Como as correntes nas duas malhas que contêm a barra k são iguais, a corrente na barra quebrada será igual a zero. As novas correntes de eixo $dq0$ são calculadas novamente, por meio do sistema:

$$\begin{bmatrix} i_r^{new} \\ i_{rq}^{new} \\ i_{o1} \\ i_{ok} \\ i_{o(k+1)} \\ \vdots \\ i_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{r1}^{new} \\ i_{r2}^{new} \\ \vdots \\ i_{rk}^{new} \\ i_{r(k+1)}^{new} \\ \vdots \\ i_{rn}^{new} \end{bmatrix} \quad (6)$$

As correntes corrigidas de rotor são transformadas para o sistema de eixo $dq0$ fixo no estator (velocidade do eixo igual à zero). No passo subsequente, os cálculos dos estados do motor serão dependentes das novas correntes. O processo continua até que seja alcançado

o número de interações desejado ou o tempo máximo de simulação.

3 Metodologia

3.1 Abordagem pelo Vetor de Park (Park's Vetor Approach)

O método PVA é baseado na inspeção visual sobre a geometria do Vetor de Park, que pode ser obtido por meio da aplicação da transformada de Clark-Park; às correntes de alimentação do MIT. O Vetor de Park é composto por dois componentes que são calculados pela Eq (7).

$$\begin{bmatrix} i_s^d \\ i_s^q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Onde:

(i_s^d) ou (IDS) corresponde à corrente de eixo direto, no referencial estatórico (eixo x).

(i_s^q) ou (IQS) corresponde à corrente de eixo em quadratura, no referencial estatórico (eixo y);

(i_a, i_b, i_c) correspondem, respectivamente, às correntes de fase (abc).

Para o caso sem falha (SF), considerando o rotor simétrico e tensões de alimentação equilibradas, o Vetor de Park assume a geometria de um círculo de raio igual à amplitude da corrente com o centro na origem como mostrado na Figura 1(a).

Quando o sistema está sob condição sem falha e, com desequilíbrio em fase (DF), ou ainda com a presença de harmônicos de amplitudes significativas, nota-se a ocorrência de uma distorção bastante visível na geometria do Vetor de Park. Como pode ser visualizado na Figura 1(b), em que o Vetor de Park assume uma forma elíptica, para tais condições assumidas.

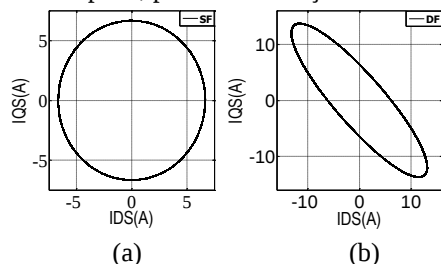


Figura 1. Geometria do Vetor de Park, (a) sem falha (SF) e alimentação equilibrada, b) SF e DF.

Dessa forma, é possível analisar a variação ocorrida na geometria do Vetor Park, para descrever alguns fenômenos ocorridos nos motores de indução, tais como falhas por barras quebradas, falhas por curto-circuito entre espiras.

No presente trabalho, foi proposta inicialmente a aplicação do método PVA para a realização do diagnóstico de falha. O modelo dinâmico foi validado computacionalmente e os dados simulados foram utilizados para a análise e avaliação da eficiência do método frente à detecção de falhas em barras quebradas. Para a execução das simulações computacionais, ado-

tou-se um sistema de alimentação direta, motor de indução trifásico com rotor gaiola. Os dados do motor encontram-se no Apêndice. Este motor apresenta na sua estrutura rotórica um total de 28 barras, das quais adotou-se as barras 12 e 13 como barras rompidas. O nível de carga foi variado para a execução das devidas análises. Assumiu-se uma frequência de amostragem de 2kHz e um tempo total de aquisição de dados de 20 segundos, para a execução da simulação.

As Figuras 2-6 apresentamos resultados obtidos pela validação computacional do método PVA. Os parâmetros assumidos para a execução da validação em ambas as metodologias apresentadas no presente artigo encontram-se expostos na Tabela 1.

Tabela 1. Carga desenvolvida em relação à carga nominal (C_n), velocidade do motor, escorregamento e frequência de modulação para a condição.

Carga (N.m)	Velocidade (rpm)	Escorregamento (%)	2sf (Hz)
2% C_n	1799	0,055	0,060
10% C_n	1794	0,333	0,400
20% C_n	1788	0,666	0,800
50% C_n	1769	1,722	2,060
100% C_n	1738	3,444	4,280

Os ensaios foram executados, respectivamente, para a condição sem falha (SF), uma barra quebrada (1BQ) e duas barras quebradas (2BQ).

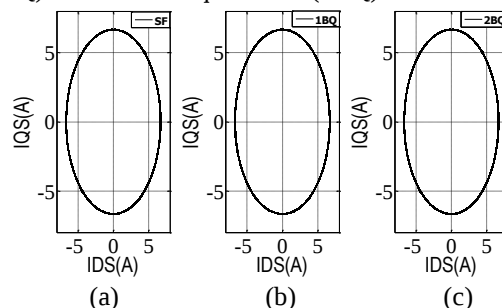


Figura 2. Vetor de Park sob de 2% C_n (a) SF, b) 1BQ, c) 2BQ.

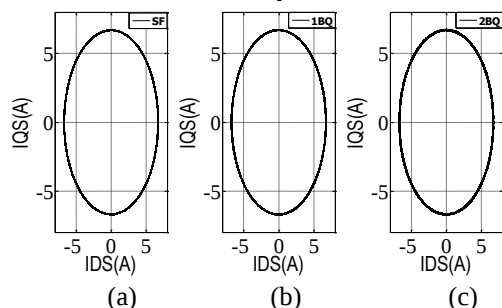


Figura 3. Vetor de Park sob de 10% C_n (a) SF, (b) 1BQ, c) 2BQ.

Para as condições de baixa carga, exibidas nas Figuras 2-4, nota-se que não ocorre variações significativas na geometria do Vetor de Park, à medida que ocorre a inserção de barras quebradas no sistema. Já para as condições de 50% e 100% de C_n , mostrado nas Figuras 5-6, observa-se de forma nítida que ocorre um aumento significativo na espessura do traçado do Vetor de Park à medida que se insere uma barra quebrada

no sistema. Pode-se afirmar que, para estas condições de carga, quanto maior a severidade da falha maior a espessura apresentada pela geometria do Vetor de Park.

Para uma análise mais detalhada do comportamento do método nas condições de baixo escorregamento, são exibidas pelas Figuras 7 e 8, a geometria do Vetor de Park. Percebe-se de forma mais nítida, que para as condições de operações assumidas, não ocorre variações significativas na geometria do Vetor frente à inserção de barras quebradas no sistema.

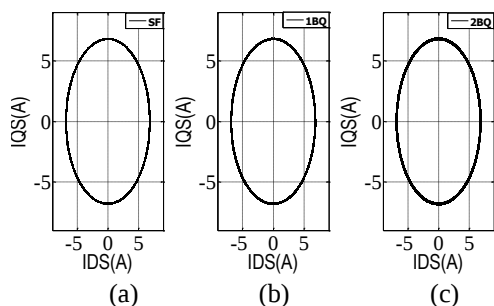


Figura 4. Vetor de Park sob de 20% C_n (a)SF, b) 1BQ, c) 2BQ.

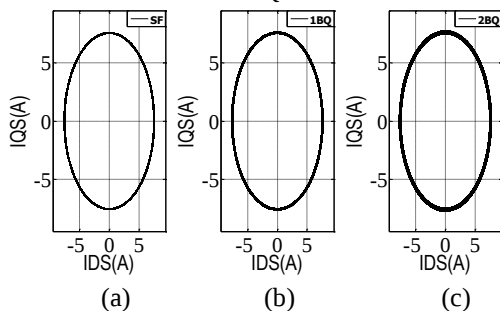


Figura 5. Vetor de Park sob de 50% C_n (a) SF, b) 1BQ, c) 2BQ.

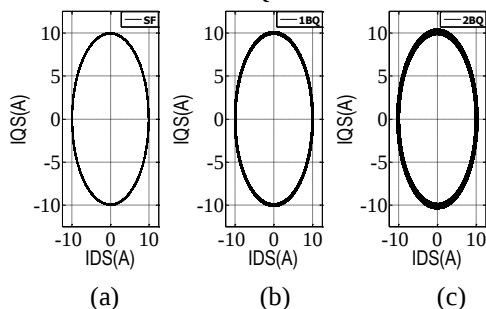


Figura 6. Vetor de Park sob 100% C_n (a) SF, b) 1BQ, c) 2BQ.

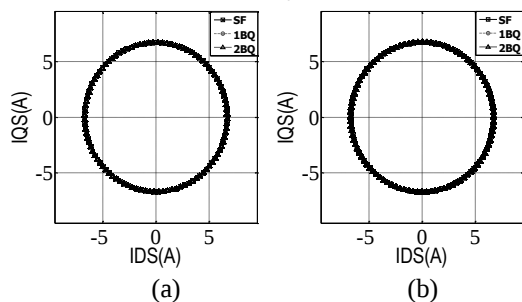


Figura 7. Vetor de Park (a) 2% C_n , b) 10% C_n .

Os vetores de Park, obtidos para a condição de 2%, 10% e 20% de C_n , se sobrepõem, e não apresentam variações em suas amplitudes ou espessuras. Para fins

comparativos, foi exibido em 8(b), o Vetor de Park para a condição de 100% de carga nominal.

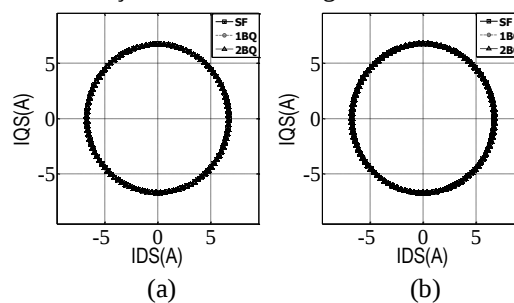


Figura 8. Vetor de Park (a) 20% C_n b) 100% C_n .

Dessa forma, conclui-se que o método PVA torna-se falho para executar o diagnóstico de falhas quando o motor está operando na condição de baixo carregamento.

Portanto, um novo método é proposto com o intuito de realizar o diagnóstico destas falhas, de forma independente da condição de carga. Esta técnica proposta baseia-se na metodologia PVA e no uso da ferramenta de demodulação clássica denominada Transformada de Hilbert (HT).

3.2 Transformada de Hilbert

A transformada de Hilbert consiste em uma técnica de processamento de sinais bastante empregada na detecção de envelopes de amplitudes e demodulação de sinais (Panadero,2009). Esta ferramenta possibilita extrair dos sinais, suas funções de fase e amplitude de modulação. Dessa forma, à aplicação da HT permite a extração da componente fundamental do sinal (onda portadora) e a análise das demais componentes (onda modulante), sem que haja a influência da componente de maior intensidade. Seja um sinal modulado representado pela Eq. (8), sua frequência e amplitude de modulação podem ser escritas como:

$$x(t) = A(t) \sin(\phi(t)). \quad (8)$$

Em que $A(t)$, $\phi(t)$ e t correspondem, respectivamente; a amplitude de modulação, fase instantânea e ao instante de tempo. Pode-se ainda, representar a fase instantânea por:

$$\phi(t) = \omega t + \Phi(t). \quad (9)$$

Dessa forma, o sinal modulado será representado na Eq. (10).

$$x(t) = A(t) \sin(\omega t + \Phi(t)). \quad (10)$$

Aplicando-se à HT ao sinal obtido na Eq. (10), têm-se a conversão deste em um sinal analítico representado na Eq. (11).

$$y(t) = x(t) + j \left(H(x(t)) \right). \quad (11)$$

Em que:

$x(t)$ e $y(t)$ representam, respectivamente, o sinal analítico de entrada e saída; $H(x(t))$ corresponde ao sinal $x(t)$ transformado por Hilbert e a representação dos números imaginários é dada por j . A Transformada de Hilbert é expressa como:

$$H(x(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \frac{1}{t - \tau} d\tau. \quad (12)$$

O sinal obtido $y(t)$ permite calcular a amplitude instantânea (envelope) e sua fase (Eqs(13) e (14)). Sendo que $B(t)$ e $\theta(t)$ são o módulo e a fase de $y(t)$.

$$B(t) = \sqrt{x(t) + jH(x(t))}. \quad (13)$$

$$\theta(t) = \arctg\left(\frac{H(x(t))}{x(t)}\right). \quad (14)$$

A HT, portanto, consiste em uma poderosa ferramenta de demodulação, uma vez que possibilita separar sinais modulados dos seus sinais portadores. A Figura 9 mostra o sinal de saída obtido pela aplicação da HT, denominado como sinal modulante ou envelope (sinal que contém a informação relacionada a condição da máquina) em sinal portador (sinal de corrente de alimentação da fase *a* do MIT).

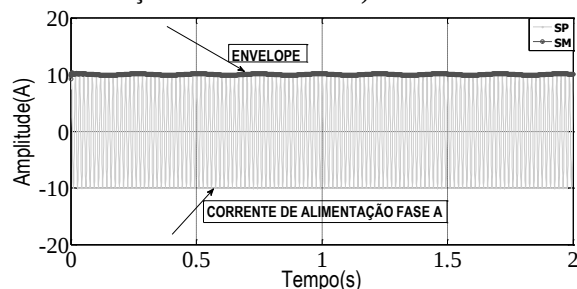


Figura 9. Comparação entre o sinal original e a saída do Hilbert (envelope).

3.3 Desenvolvimento da Técnica Proposta

O processo para o desenvolvimento da técnica Hilbert-Park para a execução do diagnóstico em barras quebradas pode ser visualizado na Figura 10.

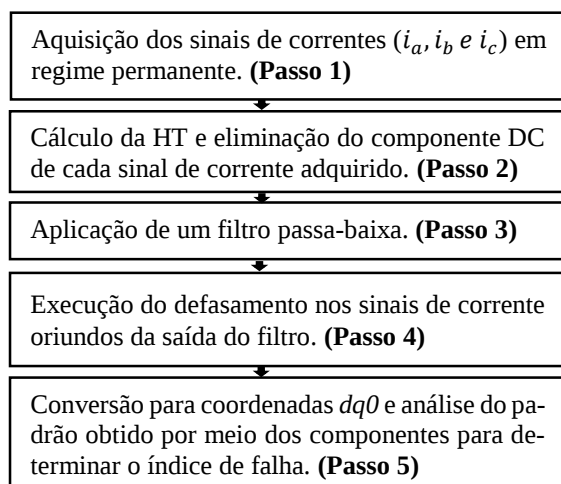


Figura 10. Diagrama para aplicação da metodologia Hilbert Park.

No passo 1, os sinais de correntes de alimentação trifásicas, defasadas de 120°, foram adquiridos pela simulação computacional do modelo dinâmico do MIT. No passo subsequente, é aplicada a HT à esses sinais em regime permanente, e em seguida, realiza a eliminação dos componentes DC dos mesmos. É realizada a filtragem destes sinais, executada no passo 3, a fim

de delimitar a faixa de frequência de interesse, região a qual se encontram as frequências de falhas requeridas. Utilizou-se, portanto um filtro *butterworth*, passa-baixa, ordem 6 e com frequência de corte em 20Hz.

Como já citado, a aplicação da HT possibilita a extração das modulações da frequência portadora dos sinais, que no caso dos ensaios realizados consiste na frequência de 60Hz. Estes sinais modulantes são extremamente ricos em informações relacionadas às condições de falha da máquina. Então, após a aplicação da HT têm-se sinais modulantes com a mesma fase. Tornando-se necessário a realização do defasamento para conversão de coordenadas e em seguida, o cálculo dos componentes do Vetor de Park, como mostrado no passo 4. Após a execução do passo subsequente, é possível detectar de forma bem clara e precisa a presença de falhas em barras quebradas no sistema; independente do nível da carga, como pode ser verificado na próxima seção.

4 Simulações e Análises

Para a validação computacional da metodologia proposta adotou-se os mesmos parâmetros exibidos na Tabela 1. Assumiu-se também a frequência de amostragem de 2kHz e foi necessário um tempo de 15 segundos para detectar o sinal de falha.

As Figuras 11-15, respectivamente, apresentam os resultados simulados com a técnica proposta: 2%, 10%, 20%, 50% e 100% de C_n . Percebe-se, de forma bem nítida, o aumento significativo nas amplitudes do Vetor de Park com a inserção do número de barras quebradas no sistema.

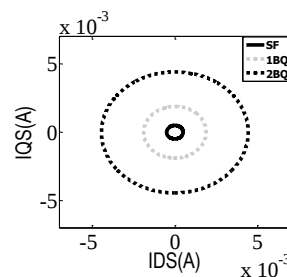


Figura 11. Vetor de Park para a condição de 2% C_n .

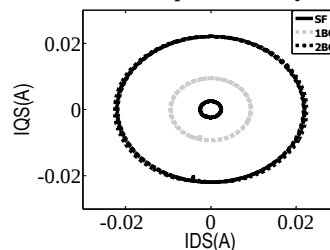


Figura 12. Vetor de Park para a condição de 10% C_n .

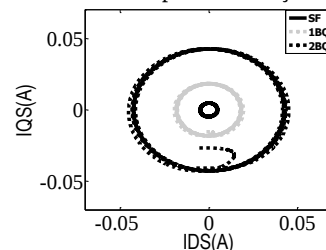


Figura 13. Vetor de Park para a condição de 20% C_n .

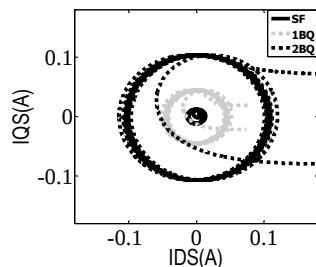


Figura 14. Vetor de Park para a condição de 50% C_n .

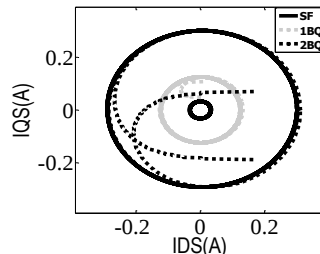


Figura 15. Vetor de Park para a condição de 100% C_n .

Tabela 2. Percentual de aumento na geometria do Vetor de Park em relação à condição sem falha, para os níveis de carga adotado, na situação de uma e duas barras quebradas.

Carga (N.m)	Caso1 (1BQ/SF)	Caso 2 (2BQ/SF)
2% C_n	380,00%	891,20%
10% C_n	380,81%	895,51%
20% C_n	385,74%	902,36%
50% C_n	382,35%	901,68%
100% C_n	382,48%	900,37%

Analisou-se ainda, o percentual de aumento do Vetor de Park à medida em que barras quebradas eram inseridas no sistema. Os percentuais obtidos são exibidos na Tabela 2, e, para o Caso 1 o cálculo do percentual de aumento da amplitude do Vector foi executado para a condição de uma barra quebrada em relação à condição sem falha. Já no Caso 2, o percentual é calculado para duas barras quebradas presentes no sistema em relação à condição sem falha.

Foi analisado ainda, o tempo gasto para a realização da simulação computacional do método proposto, e notou-se que houve uma redução de 82% no tempo computacional gasto em relação ao obtido pela metodologia Park.

Dessa forma, mostrou-se que a técnica proposta Hilbert-Park possibilita uma maior facilidade para a execução do diagnóstico de falha nas condições de baixo escorregamento, em relação ao método PVA. E ainda, o método investigado necessitou de um menor tempo de aquisição de dados para a realização correta do diagnóstico, o que acarreta um menor tempo de processamento e uma diminuição da quantidade de memória exigida para o armazenamento dos dados. Pode-se observar também, que a técnica necessitou de um menor tempo computacional para a execuções das simulações.

5 Conclusão

No presente trabalho, um método baseado na técnica PVA juntamente com a utilização da Transformada de Hilbert foi desenvolvido com o intuito de diagnosticar barras quebradas. Essa técnica foi validada computacionalmente e se mostrou eficiente ao realizar a detecção de falhas em barras do rotor.

Uma das contribuições mais significativas deste trabalho é a não dependência da condição de carga do motor elétrico para o diagnóstico da falha de barras quebradas. Consequentemente, se torna uma ferramenta com um forte potencial para a aplicação em condições de baixo escorregamento e cargas variáveis.

Destaca-se, a partir dos resultados apresentados, a não necessidade de um tempo mínimo de 100 segundos no processo de aquisição dos dados, o que caracteriza um menor custo computacional em relação as demais técnicas e mais agilidade na realização do diagnóstico.

Dessa forma, vislumbra-se que a metodologia proposta torna-se uma iminente técnica na detecção e diagnóstico de falhas em barras do rotor, sendo de fácil interpretação e aplicabilidade no ambiente industrial.

Apêndice

Parâmetros da máquina: Motor de indução trifásico de 5HP, 60 Hz, 220V, 1738 rpm.

Agradecimentos

Os autores agradecem à UFSJ, à Fapemig e a Capes pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

Referências Bibliográficas

- Achmad, W. Yang, B. S., Gu, D. S. and Choi, B. K. (2009). Intelligent fault diagnosis system of induction motor based on transient current signal. *Mechatronics*, Vol.19, pp: 680–689.
- Aydin, I., Karakose M. and Akin, E. (2011). A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No 4, pp:1790–1799.
- Cunha, C.C.M, Lyra R. O.C and Cardoso Filho, B. J. (2005), "Simulation and Analysis of Induction Machine with Rotor Asymmetries," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No 1, pp 18-24.
- Drif, M. and Cardoso, A. J. M. (2008); The Instantaneous Reactive Power Approach for Rotor Cage Faults Diagnosis in Induction Motor Drives, *Proc IEEE Power Electronics Specialists Conf. - PESC*, Rhodes, Vol. 21, No. 6; 2560–2574.
- Widodo, A. and Yang, Bo-Suk (2007). Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, No. 6; 2560–2574.
- Ying Xie, 2012., *Investigation of Broken Rotor Bar Faults in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors*, INTECH Open Access Publisher, ISBN 9535104748, 9789535104742.
- Panadero, R.P.; Sanchez, M. P.; Guasp, M.R (2015). Improved Resolution of the MCSA Method Via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor at Very Slow Slip. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol 24, No.1.