

MANUTENÇÃO E DIAGNÓSTICO DE AVARIAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.

Resumo

Os motores de indução trifásicos são usados na maioria dos sistemas eletromecânicos, pelo que a sua manutenção reveste-se de enorme importância. A monitorização contínua dos equipamentos é o elemento chave dos atuais sistemas de manutenção condicionada. A análise espectral da corrente absorvida pelo motor está muito implantada na indústria, mas apresenta várias limitações. Diversos métodos de deteção e diagnóstico de avarias têm sido desenvolvidos, baseados nas múltiplas grandezas que caracterizam o funcionamento do motor. A análise no domínio das frequências, com recurso a técnicas de processamento digital de sinal, tem sido bastante explorada. Este artigo pretende focar-se nas principais causas e métodos de diagnóstico de avarias no estator e rotor dos motores de indução.

1. Introdução

Os motores elétricos são elementos centrais em qualquer processo industrial atual. Na União Europeia, a sua utilização está associada a cerca de 70% da energia consumida no sector industrial. Em Portugal, verifica-se um valor semelhante para o mesmo sector, sendo que 30% do total de energia elétrica consumida no país é da responsabilidade dos motores elétricos [1]. Neste contexto, os motores de indução trifásicos (MI3) assumem uma importância determinante: cerca de 90% dos motores de corrente alternada utilizados são deste tipo, em particular, a variante de gaiola de esquilo.

Compreende-se a importância dos níveis de fiabilidade destas máquinas, ao longo do seu tempo de vida útil, na generalidade dos processos produtivos. A variedade de ambientes (mais ou menos agressivos), associada às condições de funcionamento dos motores, são os principais fatores que estão na origem do aparecimento de avarias: para além dos inconvenientes que podem surgir em termos produtivos, estão normalmente associadas à redução do tempo de vida útil dos motores [2].

Os dispositivos de proteção convencionais dos motores elétricos atuam somente após a ocorrência de falhas [3] (e.g., relés & disjuntores magneto-térmicos: curto-circuitos entre fases ou fase-terra, sobrecargas, defeitos à terra, flutuações e desequilíbrios nas tensão; fusíveis: curto-circuitos; proteções diferenciais: contra contactos indiretos). Se forem graves, tal implicará interrupções nos processos de fabrico, podendo também provocar danos noutros componentes dos sistemas eletromecânicos onde os motores se inserem. Naturalmente, os custos associados poderão ser avultados, tanto em equipamentos como, mais grave ainda, em vidas humanas.

Deste modo, a deteção antecipada de possíveis avarias reveste-se de enorme importância: redução dos custos de manutenção e tempos de interrupção, aumentando a fiabilidade e o tempo de vida útil dos motores e respetivos acionamentos [2]. Atualmente, o diagnóstico e deteção de avarias assenta na monitorização não intrusiva dos componentes do sistema, conjugadas com técnicas de processamento digital de sinal, cuja análise permite a identificação de múltiplas avarias no motor.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: A Secção 2 apresenta alguns conceitos gerais sobre manutenção condicionada de motores elétricos. Na Secção 3 descrevem-se os principais tipos de avarias em MI3. A Secção 4 incide sobre as avarias elétricas mais frequentes: falhas nos enrolamentos do estator e quebra de barras no rotor. São também abordados alguns dos métodos mais relevantes que têm sido aplicados na sua deteção. A Secção 5 refere-se a duas técnicas aplicadas na deteção e diagnóstico de falhas, realçando as suas vantagens e limitações: a transformada rápida de Fourier (FFT) e a transformada de Park. Na Secção 6 são apresentados os resultados de algumas simulações de avarias e respetivo diagnóstico, com base nas técnicas anteriores. Finalmente, a Secção 7 contém as conclusões finais.

2. Manutenção Condicionada em Motores Elétricos

Tradicionalmente, as ações de manutenção em motores elétricos baseavam-se em métodos intrusivos (e.g., ensaios de isolamento à massa, medição da temperatura e da resistência dos isolantes & índice de polarização, ensaios de continuidade elétrica, análise de lubrificantes, etc). Estas técnicas são normalmente implementadas nos períodos de paragem das máquinas, no âmbito de operações de manutenção preventiva sistemática [4].

Nos últimos anos, os sistemas de diagnóstico e deteção de avarias têm sido alvo de consideráveis desenvolvimentos, assentes na manutenção condicionada ou preditiva: a monitorização contínua do estado da máquina durante o seu tempo de vida útil (idealmente, também dos restantes componentes do acionamento), de modo não intrusivo, permite a identificação de falhas numa fase inicial, ou mesmo a previsão do seu aparecimento.

São vários os benefícios da sua aplicação: aumento da eficiência dos processos, diminuição de paragens não planeadas, aumento da vida útil dos equipamentos e, igualmente importante, o registo detalhado das falhas ocorridas nas máquinas [3], [4].

Na Figura 1 está representada a estrutura básica destes sistemas (retângulo cinzento).

Os programas de manutenção condicionada utilizados na indústria assentam na medição e análise de múltiplas grandezas (e.g., mecânicas, elétricas, térmicas, etc.). A utilização de técnicas de processamento digital de sinal tem revelado um enorme potencial no diagnóstico de avarias (e.g., tensões, correntes, fluxos magnéticos, descargas parciais, vibrações, velocidade, binário).

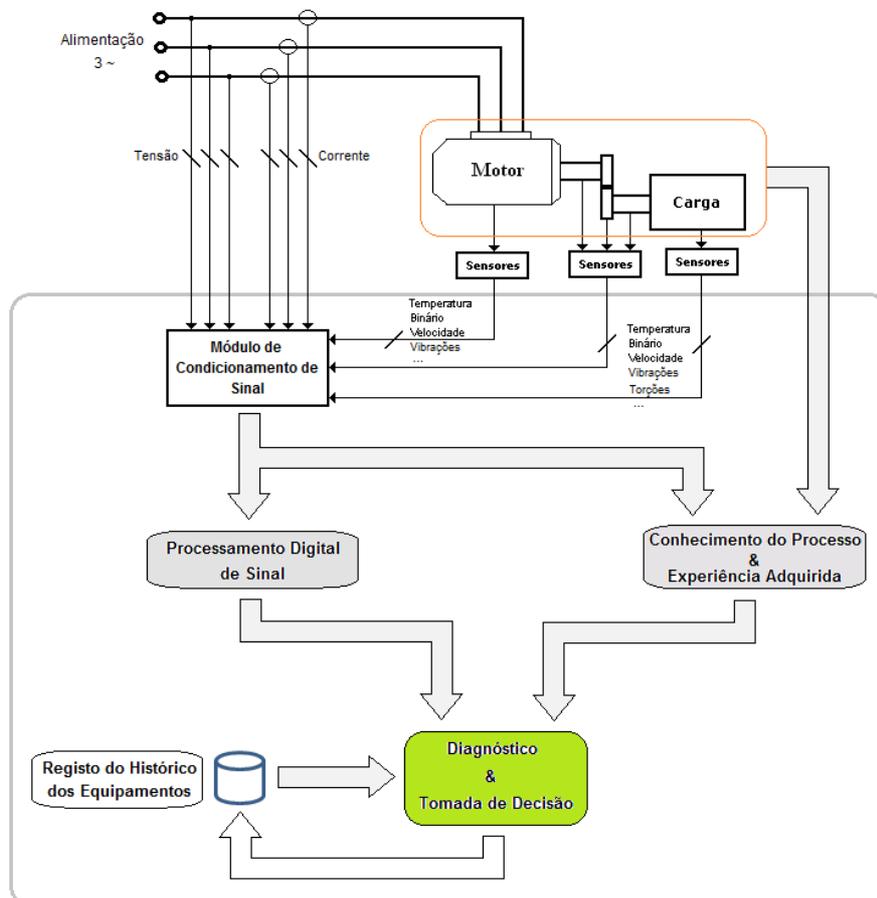


Figura 1. Deteção e diagnóstico de avarias em sistemas eletromecânicos

Atualmente, os sistemas industriais de diagnóstico de avarias de motores elétricos assentam na análise espectral das correntes absorvidas – *Motor Current Signature Analysis (MCSA)*. No entanto, há algumas limitações a considerar na sua aplicação, sendo de salientar:

- As características da máquina (e.g., assimetrias construtivas no estator e rotor, saturação magnética) podem levar a alterações no sinal da corrente, semelhantes à ocorrência de certas falhas, introduzindo erros nos diagnósticos de deteção de falhas [3];
- Em regimes transitórios de funcionamento ou se o motor é alimentado através de um conversor de frequência.

A disseminação das técnicas de análise dos sinais das grandezas do motor deve muito ao desenvolvimento e variedade de sensores atualmente disponíveis (e.g., fluxos magnéticos radiais e axiais, velocidade e posição do rotor, binário, vibrações, temperatura, etc.), bem como dos sistemas de aquisição de dados e técnicas de processamento de sinal.

Deste modo, torna-se possível a deteção de múltiplas avarias no motor, através de uma monitorização de “largo espectro” [5], [6].

Os conversores de potência utilizados no controlo dos motores fomentam o aparecimento de avarias, limitando o seu tempo de vida útil. As técnicas de deteção de avarias atualmente mais usadas foram concebidas no âmbito de alimentações sinusoidais. Deste modo, o desenvolvimento de sistemas de deteção de falhas vocacionados para alimentações não sinusoidais reveste-se de extrema importância.

3. Tipos de Avarias em Motores de Indução [7]

As principais avarias em motores elétricos estão fundamentalmente associados a falhas mecânicas e elétricas – causas internas. Existem também avarias com origens externas ao motor; a disseminação dos conversores de potência na sua alimentação contribui para o aumento das avarias. Na Tabela 2 são referidas as avarias mais frequentes.

Tabela 2. Tipos de Avarias em MI

| Avarias Eléctricas | Avarias Mecânicas | Avarias com Origem Exterior |
|--|---|--|
| Curto-circuitos entre fases ou entre espiras de enrolamentos – falhas de isolamento eléctrico. | Barras rotóricas partidas e/ou Anéis partidos das extremidades das gaiolas rotóricas. | Sobretensões, subtensões e desequilíbrios nas tensões de alimentação do motor. |
| Curto-circuitos entre fases ou entre espiras de enrolamentos – falhas de isolamento eléctrico. | Danificação do circuito magnético do motor (deteriorização das propriedades magnéticas em consequência de temperaturas elevadas, ambientes agressivos, etc) | Arranques intempestivos ou cortes na alimentação. |
| Ligações erradas entre enrolamentos. | Entreferros não uniformes. | Sobrecargas e/ou perda de uma ou mais fases. |
| Resistência elevada no contacto entre condutores de bobinas da mesma fase. | Falhas nos rolamentos. | Má selecção do motor. |
| Circulação de correntes nos rolamentos e no veio – motores alimentados através de conversores de potência. | Deslocamento do veio: axial, radial (excentricidades), desalinhamentos. | Falhas nos componentes mecânicos de transmissão de potência (e.g., correias, engrenagens). |
| Problemas na ligação à terra. | Veios torcidos. | Avarias no conversor de potência que alimenta o motor. |

A figura 2 apresenta o peso relativo das avarias nos principais constituintes do motor, com base em dois estudos, efetuados em ambiente industrial [8]: o primeiro, pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), sendo o segundo da responsabilidade do *Electric Power Research Institute* (EPRI).

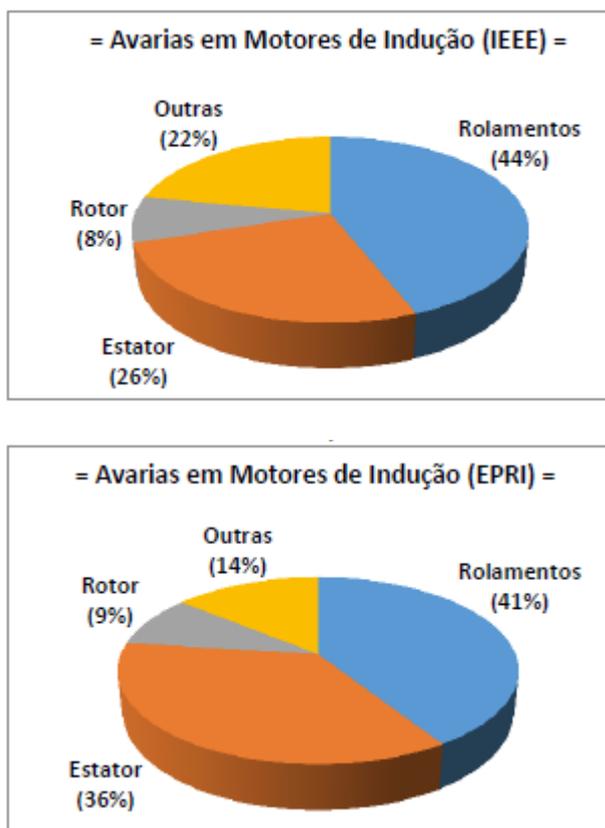


Figura 2. Distribuição das avarias pelos principais componentes do motor

Levantamentos adicionais permitiram reduzir o peso da incerteza das causas de avarias (“Outras”), evidenciando que as falhas nos rolamentos correspondem a mais de 50% do total de avarias, enquanto as do estator situam-se em cerca de 20% [9].

Não obstante algumas discrepâncias, todos os resultados evidenciam que as falhas mais frequentes ocorrem nos rolamentos e no estator, principalmente, no isolamento dos seus enrolamentos.

4. Métodos de Detecção de Avarias

Nesta secção, apresenta-se as principais causas das avarias nos enrolamentos do estator e nas barras e anéis rotóricos, seguida de uma descrição dos métodos atuais mais relevantes na sua deteção.

4.1. Avarias em enrolamentos estatóricos

As avarias no estator podem ocorrer na sua estrutura magnética (e.g., correntes de circulação entre lâminas ou entre enrolamentos e o circuito magnético), na carcaça do motor (correntes de fugas para a terra) ou nos enrolamentos estatóricos (e.g., deterioração/envelhecimento dos materiais isolantes, deslocamento de condutores, etc.). Em todos os casos, as avarias estão sempre associadas a falhas nos isolantes, em particular, entre as espiras que compõem as bobinas dos enrolamentos.

Para além de boas propriedades dielétricas (e.g., elevada rigidez dielétrica e perdas reduzidas), os materiais isolantes requerem também características complementares, tais como tolerância a temperaturas e respetivas variações, a esforços mecânicos (forças, vibrações e conseqüente desgaste por abrasão (e.g., testas das bobinas)), bem como a ambientes quimicamente agressivos (contaminação & corrosão) [10]. O próprio processo de colocação das espiras que compõem os enrolamentos de fase do motor poderá alterar as propriedades dos materiais isolantes: em certos casos, os impactos sofridos nesta fase são superiores àqueles que se verificam no funcionamento posterior do motor [11]. Todas estas solicitações afetam, em maior ou menor grau, o processo de envelhecimento dos isolantes do motor.

São bem conhecidos os efeitos das temperaturas elevadas: trata-se de um dos principais fatores responsáveis pelas avarias nos isolantes. Situações extremas poderão levar a que aqueles materiais derretam – tais avarias ocorrem em intervalos de tempo muito curtos, uma vez que as subidas de temperatura ocorrem muito rapidamente (e.g., curto-circuitos).

Funcionamentos com temperaturas elevadas (mas abaixo dos casos anteriores), durante intervalos de tempo longos, são o principal motivo do envelhecimento precoce dos isolantes: dão-se alterações químicas nos materiais, tornando-os quebradiços. Por outro lado, a expansão dos enrolamentos de cobre dá-se de um modo distinto dos materiais isolantes que os revestem, pelo que estes são também submetidos a esforços mecânicos deteriorantes [12]. As falhas daí decorrentes contam-se entre as mais frequentes, normalmente manifestando-se a médio/longo prazo. Com exceção das perdas por ventilação, as restantes perdas no interior do motor (perdas por efeito de Joule, magnéticas, mecânicas e adicionais) contribuem para o valor da temperatura máxima atingida no seu interior. Como tal, os fatores de serviço impostos ao motor, bem como as respetivas durações temporais, são determinantes na ocorrência destas avarias.

Um outro fenómeno igualmente responsável pelo envelhecimento dos materiais isolantes são as descargas parciais (arcos elétricos que surgem no interior do próprio isolante ou entre condutores e isolantes, devido a distribuições não uniformes do campo elétrico que excedem a sua rigidez dielétrica). Tipicamente, ocorrem em motores de alta tensão (>2300 V) ou quando alimentados através de inversores [10]. As descargas parciais são responsáveis pela deterioração progressiva dos materiais isolantes; a sua deteção é difícil, uma vez que são caracterizadas por amplitudes baixas com períodos muito curtos [10]. No entanto, a sua monitorização é de extrema importância, uma vez que é um meio eficaz de verificar o nível de envelhecimento dos isolantes [10], [12].

4.1.1. Deteção de Avarias

As falhas de isolamento podem ter consequências muito nefastas, tanto ao nível do processo em curso e impactos económicos, como, principalmente, na segurança dos operadores. Várias técnicas de diagnóstico têm sido desenvolvidas, baseadas em diferentes abordagens. A sua aplicação depende de vários fatores: potência nominal e custo do motor, impacto da avaria, etc.

Alguns dos métodos mais usuais são descritos em [13], [14], sendo de destacar: utilização da matriz de impedâncias do motor, análise da potência elétrica instantânea e análises espectrais (tensões, correntes, binário eletromagnético, fluxo magnético axial). Esta última referência apresenta uma descrição bastante exaustiva das causas de avarias em enrolamentos estatóricos de motores de indução e respetivos métodos de diagnóstico.

Há a distinguir os métodos intrusivos – que requerem a paragem do motor (Off-line) –, dos métodos não intrusivos (On-line):

- **Off-Line**

Com vista a identificar o estado dos materiais isolantes, os ensaios mais comuns são os seguintes: medição da resistência óhmica, rigidez dielétrica, capacidade entre condutores estatóricos e o circuito magnético do estator ligado à terra e o fator de perdas do dielétrico ($\tan(\delta)$). Podem ser também realizados ensaios de impulsos (e.g., ondas de choque) e ensaios de descargas parciais. Os diferentes ensaios permitem efetuar análises complementares aos isolantes; o maior inconveniente da sua realização é o facto de serem intrusivos e de colocar o motor fora de serviço [10]. Por estes motivos, os ensaios on-line, não intrusivos, têm merecido um maior interesse.

- **On-Line**

A monitorização da temperatura dos enrolamentos estatóricos é a forma mais evidente de analisar o estado e/ou risco de deterioração dos seus isolantes. Tal poderá ser conseguido através da inclusão de termopares nos próprios enrolamentos (em motores de grande potência), ou através de câmaras termográficas. Complementarmente, é possível detetar avarias em partes específicas do motor, através de aumentos anormais da temperatura (locais ou globais) – e.g., avarias no sistema de ventilação, pontos mais quentes da máquina, etc. Como tal, o recurso à termografia tem-se revelado um instrumento valioso na deteção de avarias (não apenas no estator).

A monitorização on-line das descargas parciais é uma forma bastante eficaz de antecipação de avarias resultantes do envelhecimento dos isolantes estatóricos [10], [15]. Uma das consequências das descargas parciais nos enrolamentos estatóricos é a produção de ozono, pelo que a monitorização da sua concentração indicia o aparecimento destas avarias. No entanto, este fenómeno tende a ocorrer pouco antes de surgir a avaria, por isso deve ser usado de forma complementar [7], [10]. Sendo necessária a instalação de sensores e equipamentos específicos, somente em motores de grande potência (tensões nominais elevadas) será justificável esta monitorização.

4.2. Barras rotóricas partidas

Este tipo de falhas estão normalmente associadas a barras rotóricas partidas ou anéis de extremidade danificados. As principais causas devem-se aos seguintes fenómenos [13]:

- Sobrecargas térmicas e/ou distribuições não uniformes de temperatura na gaiola;
- Ruído e vibrações, forças eletromagnéticas excessivas sobre as barras e anéis (e.g., esforços de torção);
- Imperfeições de construção (e.g., assimetrias na distribuição das barras);
- Perturbações dinâmicas causadas pelas cargas acionadas e/ou pelos ciclos de funcionamento;
- Causas ambientais (e.g., corrosão);
- Falhas mecânicas (e.g., problemas nos rolamentos, separação de lâminas do circuito magnético do rotor, etc.).

Quando ocorrem, o motor poderá funcionar ainda por algum tempo, sem que se manifestem consequências extremas sobre a máquina.

A quebra de uma barra impede a circulação de corrente nesse trajeto; se existirem correntes entre barras, a deteção desta avaria torna-se muito mais difícil, uma vez que tais correntes atenuam o desequilíbrio provocado pelas barras partidas [7].

4.2.1. Deteção de Avarias

A deteção destas avarias implica que o motor esteja a funcionar em carga (em vazio, as correntes rotóricas são praticamente nulas).

A análise espectral da corrente absorvida pelo motor tem-se revelado como uma ferramenta eficaz de deteção deste tipo de avarias, contrariamente ao que sucede no caso das falhas estatóricas.

A quebra de uma barra rotórica implica uma alteração na distribuição das correntes nas restantes barras – aumenta a corrente nas barras adjacentes [7].

Surgem interações entre campos e correntes rotóricas que originam componentes alternadas no binário desenvolvido, provocando oscilações na velocidade (dependentes da inércia da carga acionada). Em consequência, surgem componentes das correntes no estator, cujas frequências (f_b) se situam em torno da frequência fundamental [16]:

$$f_b = f_s(1 \pm k2s), \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Normalmente, atendendo à atenuação provocada pela inércia da carga sobre estes fenómenos, as frequências laterais ($\pm 2sf_s$) são as mais significativas. Por outro lado, a relação entre as amplitudes destas componentes e a amplitude da componente fundamental da corrente, reflete a gravidade da falha ocorrida [5], [17].

5. Técnicas de Deteção e Diagnóstico de Avarias

5.1. Técnicas de Processamento de Sinal

Atualmente, as técnicas de manutenção condicionada, com

vista ao diagnóstico de avarias em máquinas elétricas, assentam na combinação de sistemas de aquisição de dados a diversos algoritmos de processamento digital de sinal. A análise no domínio das frequências está muito disseminada, em particular, através da Transformada Rápida de Fourier – Fast Fourier Transform (FFT) – e respetivas variantes. É no entanto de referir que a eficácia da FFT está associada a sinais estacionários (regimes permanentes de funcionamento), exigindo um número elevado de amostras do sinal a analisar, o que implica amostrar um amplo intervalo de tempo. Um outro aspeto fundamental são as dificuldades trazidas pela presença de ruído nos sinais amostrados, incontornável em ambientes industriais.

Assim, para regimes dinâmicos de funcionamento e/ou para eliminar a influência do ruído, outros algoritmos de processamento de sinal mais elaborados têm vindo a ser considerados. Não se pretende tratar aqui este assunto de forma exaustiva. Com vista a aprofundar este tema, sugerem-se as referências [18] e [19].

5.2. Transformada de Park

O vetor de Park da corrente elétrica de alimentação do motor constitui também uma ferramenta de diagnóstico de avarias em máquinas elétricas de corrente alternada convencionais [14].

Esta transformada permite representar uma máquina polifásica convencional (iguais parâmetros nas diferentes fases, simetria de eixos magnéticos, distribuições de campos magnéticos no espaço do entreferro do tipo sinusoidal), através de um sistema bifásico equivalente, representado por um sistema de eixos ortogonais (ângulos elétricos), d-q, animado com velocidade genérica ω . É também possível considerar a existência de assimetrias no sistema com componentes homopolares da corrente não nulas, através da inclusão de um terceiro eixo, perpendicular ao plano d-q. Para uma máquina trifásica, no referencial estatórico ($\omega=0$), a relação invariante entre as correntes definidas do domínio d-q-0 e as correntes nas fases (a,b,c) é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sendo vulgar a ausência do condutor neutro nos motores de indução, a componente homopolar (i_0) é nula, o que implica, em qualquer instante:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3)$$

Assim, as componentes do vetor de Park da corrente (i_d e i_q) são obtidas do seguinte modo:

$$i_d = \frac{\sqrt{6}}{2} i_a \quad (4)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_b - i_c) \quad (5)$$

A representação das componentes do vetor de Park da corrente elétrica (i_d e i_q) no referencial mencionado, tem sido aplicada na deteção de curto-circuitos entre espiras dos enrolamentos estatóricos.

Em condições de simetria das correntes em cada fase, a representação no plano $[i_d, i_q]$ corresponde a uma circunferência. Havendo curto-circuitos entre espiras, surgem elipses cujas orientações podem ajudar a identificar a fase do motor onde ocorreu a avaria. Esta representação apresenta algumas limitações quando aplicado à deteção de outras avarias. Por exemplo, no caso da quebra de barras rotóricas, surgem componentes com frequências $f_s(1 \pm 2s)$ em i_d e i_q que não são representadas no plano definido por estas correntes. Deste modo, foi proposta em [20] uma nova metodologia de diagnóstico, baseada na análise espectral do módulo do vetor de Park, designada por EPVA (*Extended Park Vector Approach*).

Atendendo a (3), (4) e (5), o módulo do vetor (P) é dado por:

$$P = (i_d^2 + i_q^2)^{\frac{1}{2}} = [i_a^2 + i_b^2 + (i_a + i_b)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Com efeito, havendo quebra de barras no rotor, o espectro de P contém uma componente contínua – resultante da componente associada à frequência de alimentação das correntes nas fases estatóricas do motor –, bem como duas componentes associadas às frequências $2s$ e $4s$. Assim, torna-se mais evidente a deteção deste tipo de avarias. Mais, sendo estas frequências reduzidas, é também mais simples a eliminação do ruído que os sinais amostrados possam conter.

O EPVA foi também aplicado no diagnóstico de outras assimetrias (e.g., desequilíbrios no sistema de tensões de alimentação e a ocorrência de excentricidade estática e/ou desalinhamentos entre o motor e a carga mecânica a ele acoplada) [21].

De referir ainda a aplicação deste método na deteção de curto-circuitos entre espiras nos enrolamentos estatóricos de motores síncronos e assíncronos [22]. Se o motor for alimentado por um sistema de tensões equilibrado, não havendo qualquer avaria, o conteúdo espectral do módulo do vetor de Park não contém nenhuma componente. No caso de ocorrência de curto-circuitos entre espiras, surge uma componente espectral com o dobro da frequência de alimentação do motor (se não houver outras avarias). No entanto, desequilíbrios no sistema de tensões de alimentação, bem como assimetrias construtivas no motor, podem igualmente originar o aparecimento dessa componente espectral, pelo que não é possível concluir se existe realmente uma avaria deste tipo.

6. Simulações de Avarias

Nesta secção são apresentados alguns resultados de simulações de avarias.

Na Figura 3 está representado o modelo de simulação utilizado (MATLAB/SIMULINK): o bloco *Motor_Indução* consiste no modelo dinâmico do MI3 (espaço de estados), definido no sistema de eixos d-q. A opção por um motor de rotor bobinado permitiu simular avarias no rotor.

Dado que a análise efetuada incide sobre grandezas do estator, o modelo está definido no referencial estático, estando as fases estatóricas ligadas em estrela.

Começa-se por salientar as principais restrições e limitações do modelo:

- As perdas no ferro não são incluídas;
- As indutâncias parciais de fugas (estator e rotor) são assumidas como constantes, pelo que a influência da saturação nos trajectos dos fluxos magnéticos de fugas é desprezada;
- A influência da saturação no trajecto do fluxo útil principal é considerada somente em termos estáticos, i.e., a inclusão da característica em vazio do motor permite ajustar no modelo os valores da indutância de magnetização da máquina, em função do valor eficaz da corrente de magnetização: o ciclo histerético do circuito ferromagnético não é considerado;
- Trata-se de um modelo de parâmetros concentrados, assente no pressuposto da existência de simetria na disposição dos enrolamentos e homogeneidade das propriedades do circuito magnético da máquina, bem como na igualdade dos parâmetros eléctricos em cada fase. Na ocorrência de avarias, estas características deixam de ser válidas, pelo que a inclusão no modelo de tais alterações apresenta diversas dificuldades e limitações. Não obstante, pretendeu-se evidenciar as potencialidades de algumas das técnicas de diagnóstico, em certos tipos de avarias e circunstâncias concretas: os resultados obtidos enquadram-se no que foi exposto nas secções anteriores, sublinhando também a necessidade de utilização de modelos mais elaborados, que possam incluir com maior profundidade os impactos das avarias sobre a máquina.

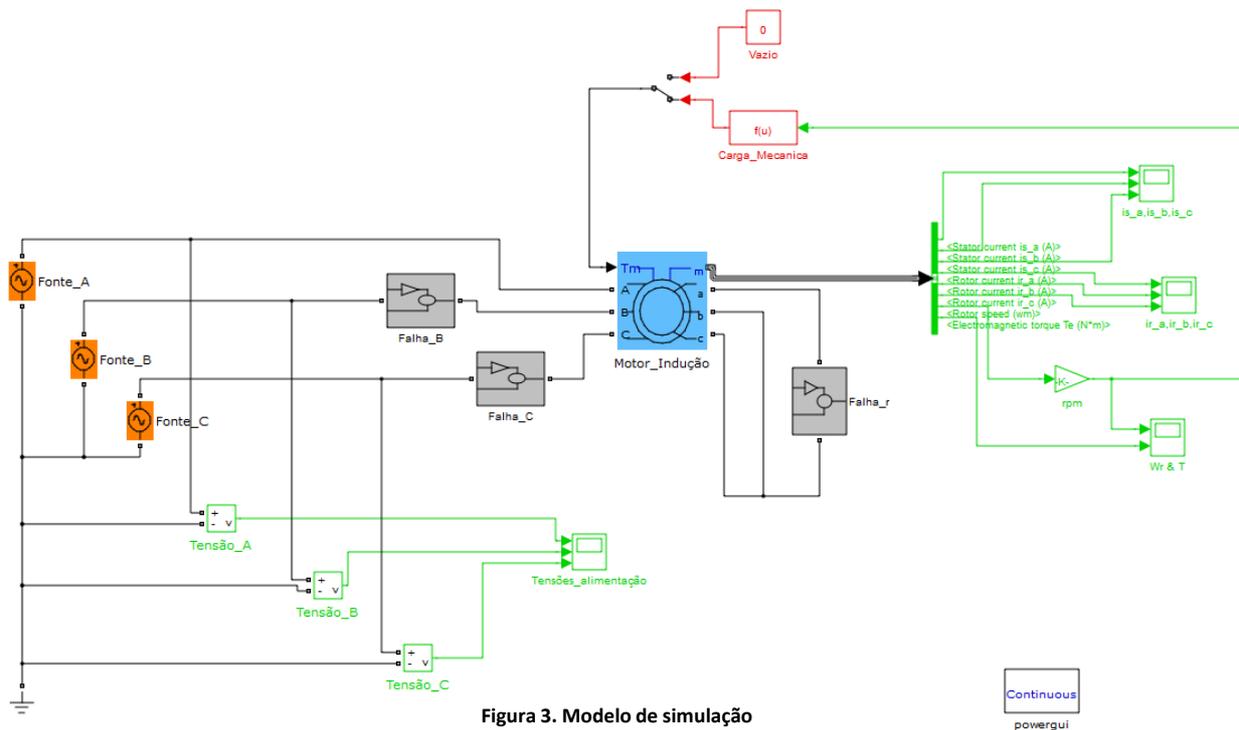


Figura 3. Modelo de simulação

Características do motor considerado:

$P_n=3$ kW; $U=400$ V; $f=50$ Hz; $n=1450$ rpm, 2 pares de pólos

Os respetivos parâmetros estão incluídos na tabela seguinte:

Tabela 2 . Parâmetros do motor (referidos ao estator)

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| $[R_s; R_r]$ (Ω) | [1,115; 1,083] |
| $[l_s; l_r]$ (H) | [5,974; 5,974]* 10^{-3} |
| L_m (H) | (substituída pela caract. vazio) |
| J ($kg \cdot m^2$) | 0,096 |

$R_s; R_r$ – resistências ôhmica por fase, respetivamente, do estator e do rotor;

$l_s; l_r$ – indutâncias parciais de fugas por fase, respetivamente, do estator e do rotor;

L_m – indutância de magnetização.

No cenário inicial, o motor é alimentado à tensão e frequência nominais, acionando uma carga do tipo parabólica (T_c), definida como:

$$T_c = 4,87 \times 10^{-6} n^2 + 8 \quad [Nm; rpm] ; J_c = 1 \text{ kg} \cdot m^2 \quad (7)$$

As avarias consideradas foram as seguintes:

- Curto-circuitos entre espiras de uma fase estatórica;
- Quebra de barras rotóricas.

Posteriormente, analisou-se a eficácia do diagnóstico das avarias no rotor para os seguintes casos:

- Influência do momento de inércia do sistema mecânico;
- Motor em vazio.

O diagnóstico implementado baseia-se na FFT das correntes absorvidas e na aplicação da transformada de Park – componentes (i_q, i_d) e EPVA. Como tal, somente os regimes permanentes de funcionamento serão alvo de análise, não sendo considerados para este efeito os períodos de arranque. Finalmente, importa referir que os dados apresentados foram obtidos com uma frequência de amostragem de 10 kHz.

6.1. Funcionamento Normal

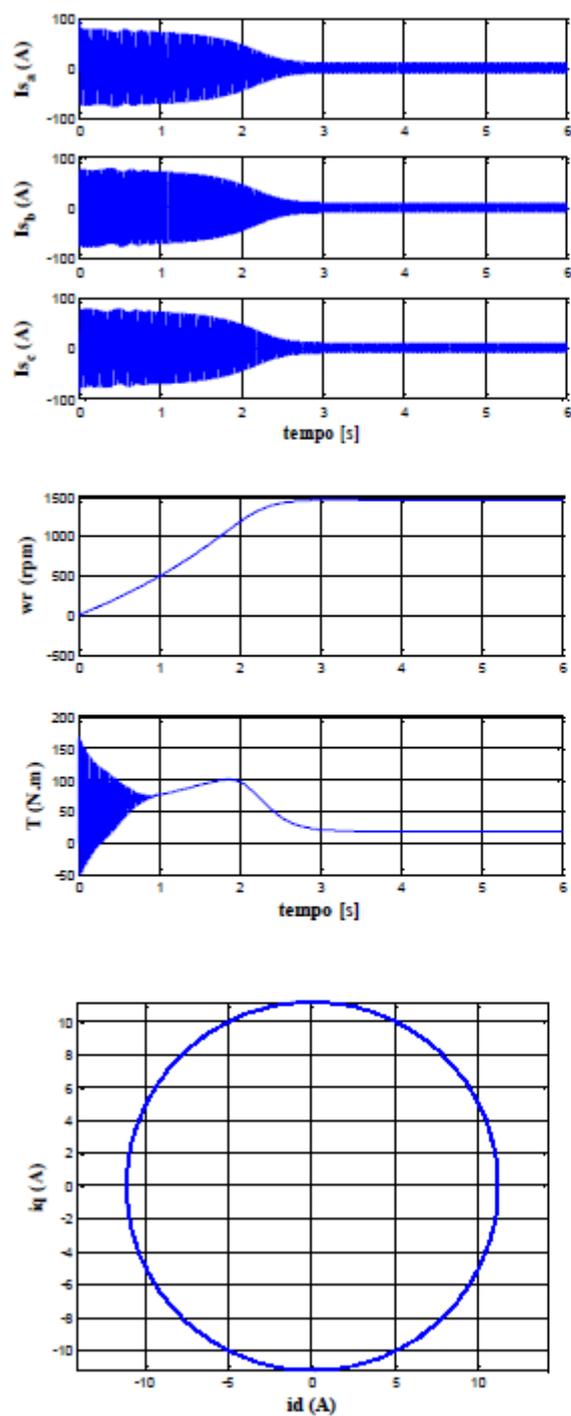


Figura 4. [correntes_estator]; [binário & velocidade]; [componentes_Park]

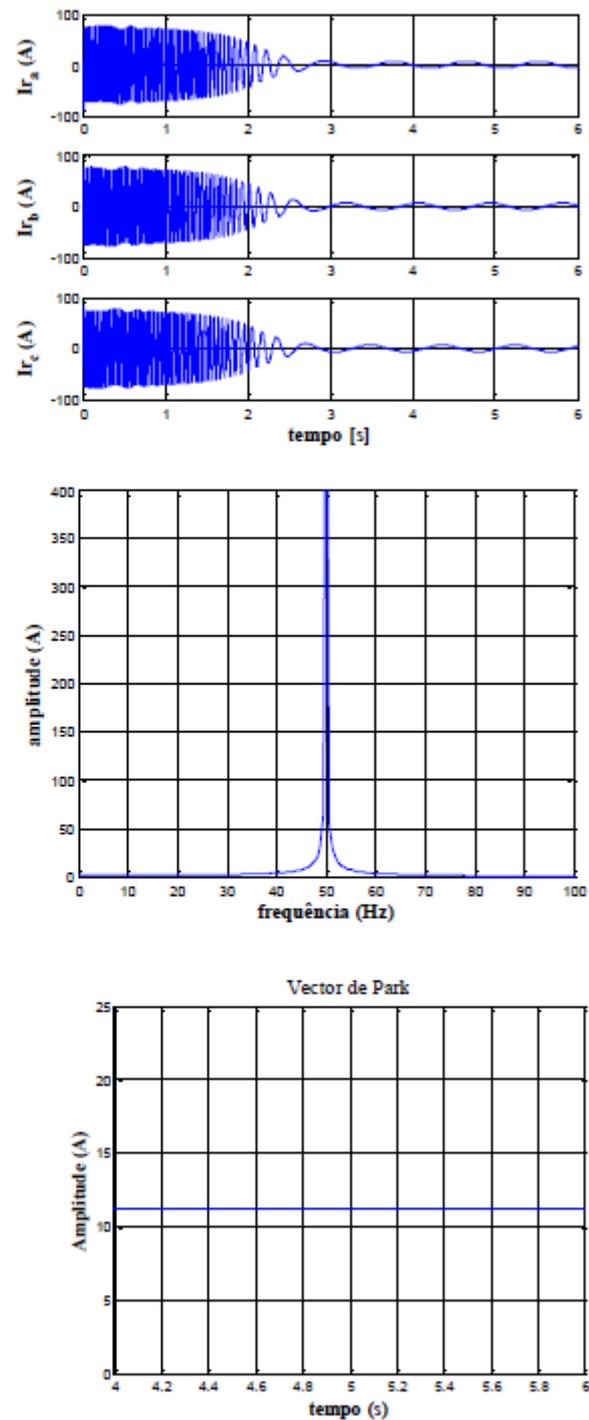


Figura 5. [correntes_rotor]; [FFT($I_{s_estator}$),N=16384]; [amplitude_Park]

O regime permanente corresponde a $T=18$ N.m; $\omega_r=1450$ rpm. Como espectável, sendo uma sinóide pura, a FFT da corrente absorvida apenas contém a frequência de alimentação. O módulo do vetor de Park é constante, pelo que a característica no plano $[iq, id]$ é uma circunferência, cujo raio é igual ao módulo referido.

6.2. Curto-Circuito numa Fase do Estator

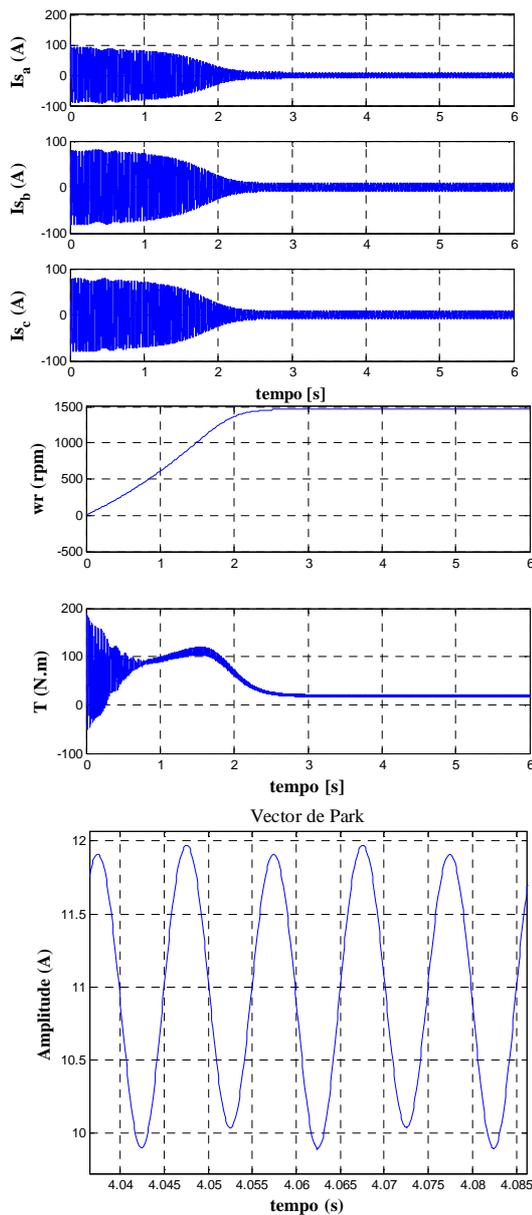


Figura 6. [correntes_estator];[binário & velocidade]; [amplitude_Park]

A transformada de Park permite representar simbolicamente os campos girantes desenvolvidos na máquina, no plano anterior. Neste caso, é nítida a presença de um campo girante perfeito: a sua amplitude máxima é constante e proporcional ao módulo de Park; os raios da circunferência representam as posições instantâneas do eixo magnético do campo girante no sistema de coordenadas $[iq, id]$.

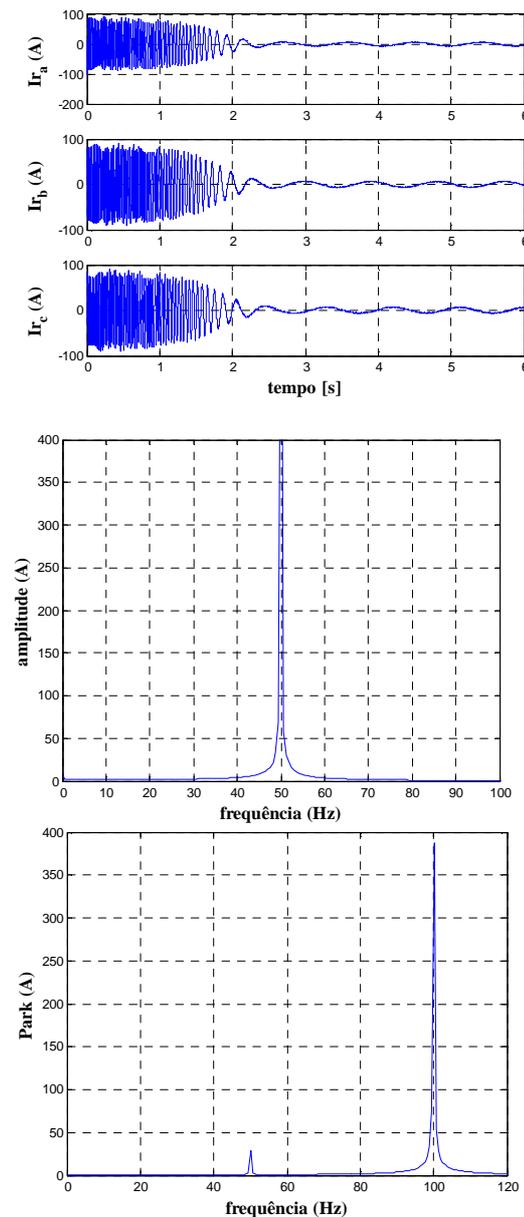


Figura 7. [correntes_rotor];[FFT($I_{s_estator}$),N=16384]; [FFT(comp_altern_Park),N=16384]

A implementação deste tipo de falhas foi feita através dos blocos “Falha_” – Figura 6. Estes consistem na série de uma resistência óhmica com uma indutância. Deste modo, os parâmetros R_s e l_s foram previamente alterados, simulando um curto-circuito entre espiras de uma fase; A inclusão dos blocos anteriores nas outras fases permite assumir, do lado das fontes de alimentação, a constância daqueles parâmetros. Os resultados apresentados a seguir, assumem uma diminuição em 30% do número de espiras do enrolamento. O valor de l_s foi alterado com base apenas na diminuição do número de espiras, não considerando possíveis alterações ao nível da saturação do trajeto do fluxo de fugas do estator. Deste modo, os novos valores assumidos para aqueles parâmetros foram os seguintes:

$$R_s = 0,7 \times 1,115 = 0,7805 \Omega \quad (8)$$

$$l_s = N_e^2 \left(\frac{l_{fe}}{\mu_{fe} A} + \frac{l_0}{\mu_0 A} \right)^{-1} = 0,7^2 \times 5,974 \times 10^{-3} = 2,93 \times 10^{-3} H \quad (9)$$

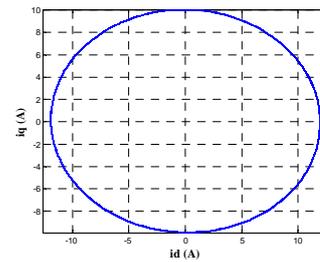
N_e – número efetivo de espiras do enrolamento de uma fase do estator;

μ_{fe} , μ_{f0} – permeabilidades magnéticas associadas ao trajeto do fluxo de fugas de uma fase do estator (respetivamente, trajetos no material ferromagnético (fe) e no ar (0));

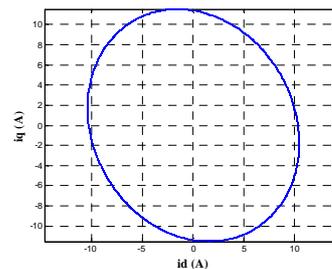
A – secção reta associada ao trajeto do fluxo de fugas de uma fase do estator;

l_{fe} , l_0 – Comprimentos associados ao trajeto do fluxo de fugas de uma fase do estator, respetivamente, no material ferromagnético (fe) e no ar (0)).

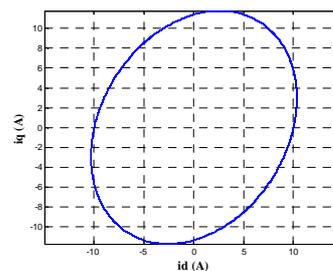
Sendo a componente alternada do vetor de Park (100 Hz) francamente menor do que nos casos anteriores, também o são as oscilações nas correntes rotóricas e no binário desenvolvido. A sua FFT apresenta uma componente associada à frequência de alimentação, visível na modulação da sua amplitude máxima. Este facto poderá estar associado à influência da redução considerada do número de espiras sobre o valor de l_s , de acordo com (8). No entanto, é prematura uma conclusão definitiva sem confirmação experimental.



(a)



(b)



(c)

Figura 8. a) c.c. (fase_a); b) c.c. (fase_b); c) c.c. (fase_c)

6.3. Quebra de Barras Rotóricas

A opção pelo modelo de um motor de rotor bobinado, permite efetuar algumas alterações nos parâmetros rotóricos. No entanto, a simulação de barras partidas é feita com várias limitações. Por um lado, não será possível quantificar o número de barras afetadas; por outro lado, é inviável associar uma determinada barra com uma fase equivalente rotórica. Inevitavelmente, tal foi feito no modelo em questão: incluiu-se um bloco “Falha_” ($R=4\Omega$) em série com a fase rotórica onde se pretendeu simular a avaria (fase_a). Atendendo à maior dificuldade em estimar o impacto que uma avaria deste tipo terá no valor de I_r , e tendo presente que a análise efetuada corresponde a um regime de funcionamento com baixo deslizamento

(R_r/s assume uma maior relevância), apenas se efetuaram alterações no valor destes parâmetros.

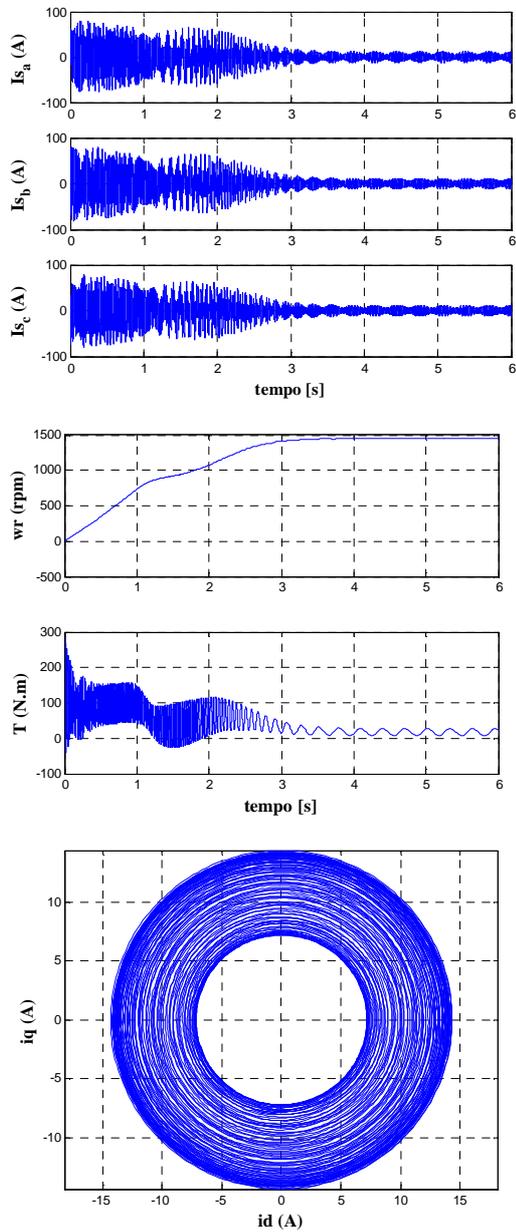


Figura 9. [correntes_estator];[binário & velocidade];
componentes_Park]

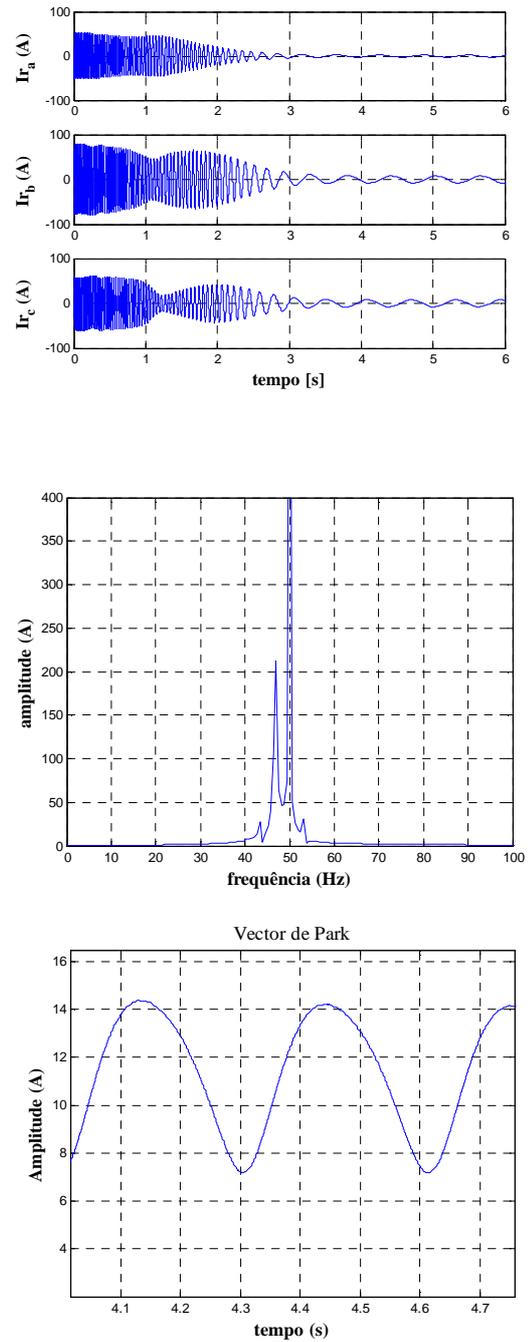


Figura 10. [correntes_rotor];[FFT(I_a estator),N=16384];
[amplitude_Park]

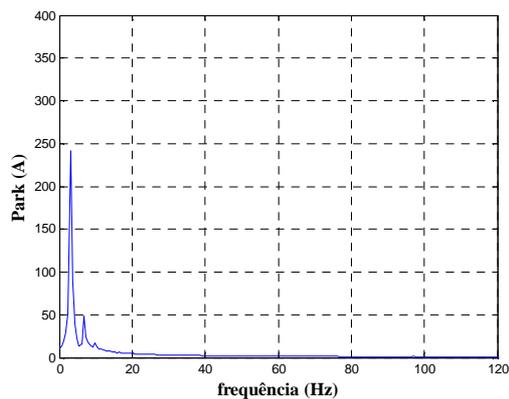


Figura 11. FFT(comp_altern_Park), N=16384

É bem visível o impacto da modulação da amplitude máxima da corrente do estator na sua FFT. O deslizamento associado ao regime de carga imposto ao motor é igual a 3,33 %, verificando-se que as componentes principais estão associadas a f_s (1 ± 2), principalmente a que é inferior à frequência de alimentação – é bem patente o efeito da inércia do sistema, tal como referido em 4.2.1. As características no plano $[iq, id]$ evidenciam a ocorrência e intensidade da avaria: a frequência de modulação da amplitude máxima (3 Hz), provoca alterações periódicas na amplitude máxima do campo girante estático (de notar que o campo girante é praticamente perfeito, uma vez que: $50 \text{ Hz} \gg 3 \text{ Hz}$). É nítida a correlação entre o valor desta última frequência e as bandas laterais do espectro da corrente estática.

A diferença entre os valores máximo e mínimo do raio das circunferências traduz a intensidade da avaria.

A análise da FFT da componente alternada do módulo do vector de Park é complementar às anteriores, verificando-se que as componentes principais são dadas por $[2sf]_s$ e $[4sf]_s$ (aprox.), o que confirma o exposto na secção 5.2. A frequência de modulação da amplitude máxima da corrente absorvida reflete-se na principal componente do módulo de Park, bem como na componente oscilatória do binário desenvolvido.

6.3.1. Influência do Momento de Inércia

Com vista à análise do efeito da inércia do sistema, apresentam-se os resultados seguintes. Para o cenário inicial de avaria na fase_a do rotor, fixou-se o momento de inércia em $0,1 \text{ Kg.m}^2$.

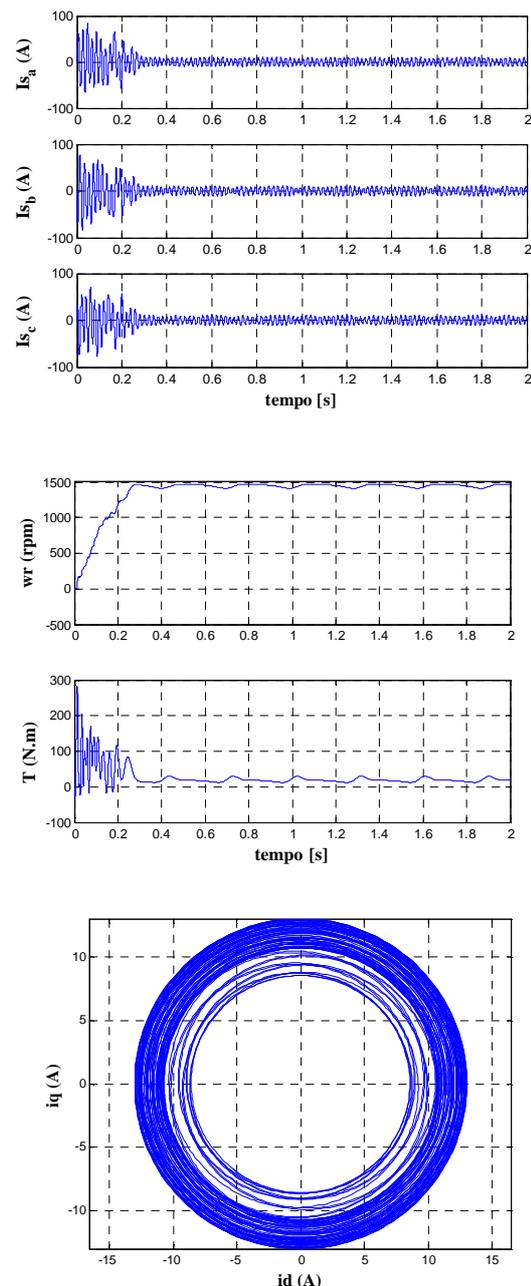


Figura 12. [correntes_estator]; [binário & velocidade]; [componentes_Park]

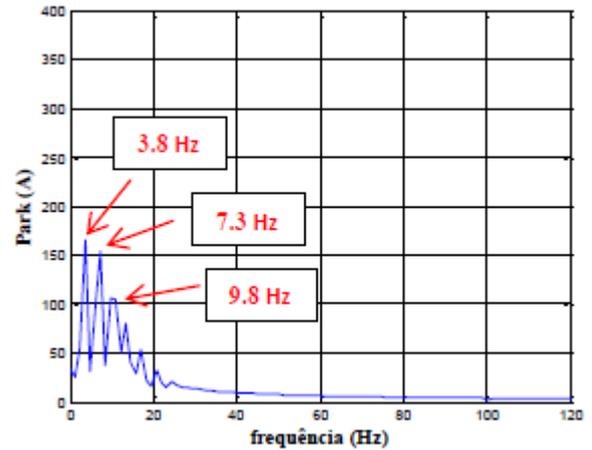
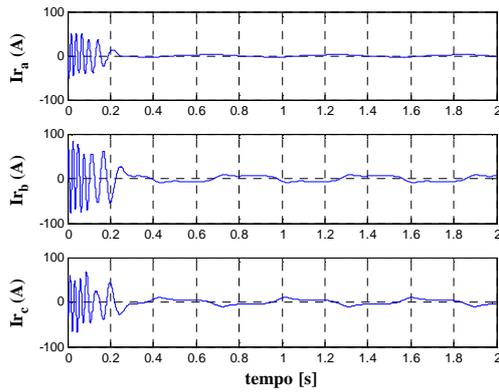


Figura 14. FFT(comp_altern_Park), N=16384

Também na FFT da componente alternada de Park se verifica que as principais componentes são as seguintes (aprox.):

$$2s f_s = 3,33 \text{ Hz} \quad (12)$$

$$4s f_s = 6,7 \text{ Hz} \quad (13)$$

$$6s f_s = 10 \text{ Hz} \quad (14)$$

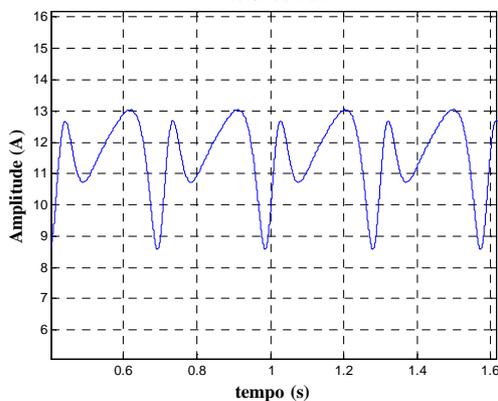
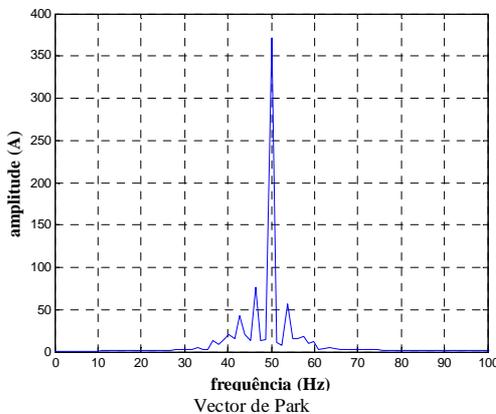


Figura 13. [correntes_rotor];[FFT(I_a_estator),N=16384]
[amplitude_Park]

São claramente visíveis as oscilações rotóricas, que se refletem em FFT's com conteúdos mais ricos. Com efeito, as principais componentes do espectro da corrente absorvida são dadas aproximadamente por (ver 4.2.1):

$$f_s(1 \pm k2s), \quad k = 1 \quad \rightarrow \quad [46,7; 53,3] \text{ Hz} \quad (10)$$

$$f_s(1 - k2s), \quad k = 2 \quad \rightarrow \quad [43,3; 56,7] \text{ Hz} \quad (11)$$

6.3.2. Funcionamento em Vazio

De modo a analisar a influência do regime de carga imposto ao motor, considerou-se a mesma avaria anterior, estando agora o motor em vazio. Naturalmente, tem-se agora $J=0,096 \text{ Kg.m}^2$. Os resultados obtidos são os seguintes:

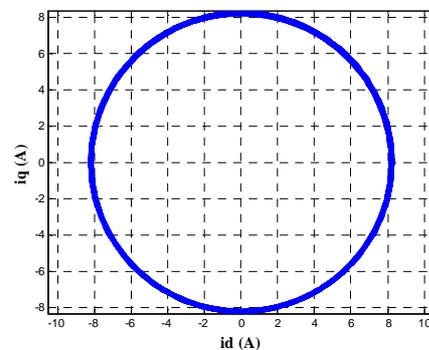


Figura 15. [componentes_Park] & [FFT(I_a_estator),N=8192]
[amplitude_Park]

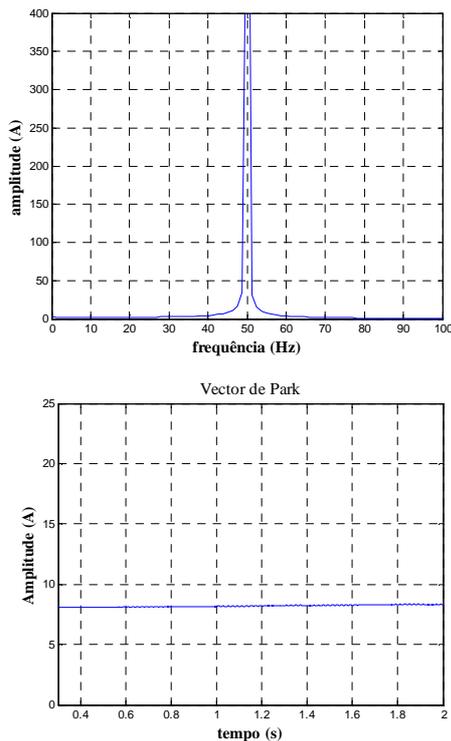


Figura 15. [componentes_Park] & [FFT(I_{3_estator}),N=8192] (9)
[amplitude_Park]

Não há alterações significativas relativamente ao funcionamento sem avarias, o que está de acordo com o exposto em 4.2.1. Não sendo conclusivo o diagnóstico, são realçadas as limitações destas técnicas na deteção de avarias, quando o motor funciona com baixas frações de carga. O desenvolvimento de técnicas cuja eficácia não dependa da fração de carga revela-se de grande importância.

Não obstante as limitações do modelo considerado, a aplicação da FFT e da Transformada de Park das correntes permitiu diagnosticar as avarias simuladas, realçando em simultâneo algumas das limitações destas técnicas.

7. Conclusões

A monitorização não intrusiva do estado dos equipamentos, permitindo a deteção precoce de avarias, sem perturbação dos processos, constitui a base dos atuais planos de manutenção dos sistemas eletromecânicos (conversor de potência + motor + transmissão + carga).

A análise através da FFT da corrente absorvida pelo motor

continua a ser o método mais disseminado na indústria. No entanto, apresenta várias limitações em certos tipos de avarias, pelo que a complementariedade com outras grandezas monitorizadas revela-se fundamental, no sentido de obter sistemas de diagnóstico mais eficazes. Por outro lado, a restrição a sinais estacionários, a necessidade de um número elevado de amostras, bem como a procura de técnicas com maior imunidade ao ruído, tem levado à aplicação de técnicas de processamento de sinal mais elaboradas. No entanto, a maior complexidade em implementá-las e interpretação de resultados, tem colocado alguns entraves à sua aplicação na indústria.

A disseminação dos conversores de potência na grande maioria dos sistemas eletromecânicos industriais, ou mesmo outras aplicações dinamicamente exigentes, como os veículos elétricos, tornam urgente o desenvolvimento de sistemas de diagnóstico de avarias que contemplem estas condições. A capacidade de processamento dos controladores já instalados, fornece uma plataforma para a integração de sistemas de diagnóstico de avarias; o tipo de controlo do motor terá uma influência relevante naqueles sistemas. A evolução dos sistemas de diagnóstico de avarias deverá assentar nos seguintes tópicos [18]:

- 1) Desenvolvimento de modelos mais detalhados do motor, que permitam a inclusão e diagnóstico de avarias;
- 2) Sensores e técnicas de monitorização vocacionados para a deteção de avarias;
- 3) Técnicas de diagnóstico com maior sensibilidade à ocorrência de falhas, simultaneamente mais robustas à influência da carga e inércia;
- 4) Maior integração dos procedimentos convencionais de diagnóstico e as técnicas de inteligência artificial.

O aumento da fiabilidade é um objetivo sempre presente. Os sistemas de deteção de avarias serão fundamentais na obtenção de sistemas eletromecânicos com maior tolerância a falhas. Em complemento, o dimensionamento de motores com múltiplas fases (e respetivos conversores) será também um importante contributo na aproximação daquele objetivo.

Referências

- [1] “Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto”, ADENE – Agência para a Energia, 2010.
- [2] Kalpesh J. Chudasama, Vipul Shah, “Induction Motor Noninvasive Fault Diagnostic techniques: A Review”, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol.1, Issue 5, July 2012.
- [3] R. Fišer et al., “Diagnostic System for On-line Detection of Rotor Faults in Induction Motor Drives”, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011.
- [4] Erik L. Bonaldi, Levy E. L. de Oliveira, Jonas G. B. da Silva, Germano L.-Torres, Luiz E. B. da Silva, “Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors”, Induction Motors - Modelling and Control, Prof. Rui Esteves Araújo (Ed.), ISBN: 978-953-51-0843-6, InTech, 2012.
- [5] M. El Hachemi Benbouzid, “A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, Oct. 2000.
- [6] Abdesselam Lebaroud, Amar Bentounsi, “Detection Improvement of the Broken Rotor Bars of IM After Supply Disconnection”, Journal of Electrical Engineering, Vol. 56, No. 11-12, pp. 322–326, 2005.
- [7] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, and H. Meshgin-Kelk, “Electric Machines – Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis”. CRC Press, ISBN 13: 978-1-4200-0628-5 (eBook - PDF), 2013.
- [8] “Troubleshooting of Electric Motors - Technical Report”, Electric Power Research Institute, 2000.
- [9] A. H. Bonnett and C. Yung, “Increased efficiency versus increased reliability”, IEEE Industry Applications Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 29–36, 2008.
- [10] S. Lee and G.B. Kliman, “An online technique for monitoring the insulation condition of ac machine stator windings”, IEEE Transactions on Energy Conversions, vol. 20, no. 4, pp. 737–745, 2005.
- [11] E.L. Brancato, “Insulation aging”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. EI-13, no. 4, 1978.
- [12] G. Stone and J. Kapler, “Stator winding monitoring”, IEEE Industry Applications Magazine, 1998.
- [13] S. Nandi, H. Toliyat, and X. Li, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – a Review”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, Dec. 2005.
- [14] Sérgio M. A. Cruz, “Diagnóstico e Análise de Avarias nos Enrolamentos Estatóricos de Motores de Indução Trifásicos Através da Aplicação do Método dos Referenciais Múltiplos”, Dissertação de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal, 2004.
- [15] Neelam Mehala, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis”, Dissertação de Doutoramento, National Institute of Technology Kurukshetra, India, 2010.
- [16] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, “AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect”, in Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Conf., pp. 655–662, 1996.
- [17] Ian Culbert P., Wendell Rhodes, “Using Current Signature Analysis Technology to Reliably Detect Cage Winding Defects in Squirrel-Cage Induction Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 2, pp. 422–428, 2007.
- [18] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, G.-A. Capolino, “Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, nº 12, pp. 4109–4126, 2008.
- [19] Shahin H. Kia, Humberto H., Gérard-A. Capolino, “Some Digital Signal Processing Techniques for Induction Machines Diagnosis”, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011.
- [20] Cruz, S. M. A. and Cardoso, A. J. M., “Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by Extended Park’s Vector Approach”, Electric Machines and Power Systems, vol. 28, nº 4, pp. 289–299, 2000.
- [21] Cruz, S. M. A. and Cardoso, A. J. M., “Diagnosis of the multiple induction motor faults using Extended Park’s Vector Approach”, International Journal of Comadem, vol. 4, nº 1, pp. 19–25, 2001.
- [22] Cruz, S. M. A., Cardoso, A. J. M., “Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the Extended Park’s Vector Approach”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, nº 5, pp. 1227–1233, 2001.