



## Monitoramento do Desgaste em Engrenagens Utilizando Variáveis Elétricas de um Motor Trifásico Acoplado

### *Monitoring of Surface Wear in Gear Using Electrical Variables a Three-phase Motor Coupled*

Submetido em 18.04.15 | Aceito em 19.11.15 | Disponível on-line em 12.01.16



Artigo

**Alexander Patrick Chaves de Sena\***

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – *Campus* Caruaru Estrada para o Alto do Moura Km 3,8 CEP 55040-120, Caruaru – PE | \* alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

#### RESUMO

*Este trabalho propõe uma investigação sobre a utilização de variáveis elétricas de motores de indução, para a detecção do desgaste superficial em engrenagens, buscando uma solução alternativa para os sinais de vibração. Especificamente, a partir da aquisição de tensão, corrente elétrica e velocidade do rotor, pretende-se examinar a expressividade da Análise por Assinatura da Corrente do Motor (MCSA), Abordagem Estendida do Vetor de Park (EPVA), Análise por Assinatura do Torque (TSA) e Análise por Assinatura da Potência Instantânea (IPSA), na presença de uma avaria. Resultados experimentais são apresentados comparando os sinais de vibração e elétricos do motor, avaliando-se a eficiência da detecção da avaria em ampla faixa de velocidade e carga da máquina.*

**Palavras-chaves:** Engrenagens, Manutenção, Monitoramento, Fourier.

#### ABSTRACT

*This paper proposes an investigation into the use of electric variable induction motors, for the detection of surface wear on gears, seeking an alternative solution to the vibration signals. Specifically, from the acquisition of voltage, electric current and rotor speed, we intend to examine the expressiveness of Motor Current Signature Analysis (MCSA), Extend Vector Approach Park (EPVA), Torque Signature Analysis (TSA) and instant Signature Power analysis (IPSA) in the presence of a fault. Experimental results are presented comparing the signals from vibration and electric motor, evaluating the fault detection efficiency in a wide range of speed and machine load.*

**Keywords:** Gears, Maintenance, Monitoring, Fourier..

#### 1.Introdução

Um sistema redutor por engrenagens é amplamente utilizado na transmissão do movimento, como elemento de ligação entre máquinas motrizes e operatrizes, principalmente para adequar a rotação de saída das motrizes à faixa requerida para entrada das operatrizes. Neste tipo de aplicação, falhas ou paradas para manutenção dos redutores acarretam em interrupções da produção e consequente prejuízo financeiro para o estabelecimento (AQUINO, 2004).

Uma atual estratégia que está sendo investigada para detecção de avarias em mecanismos acoplados a motores elétricos é a análise de assinatura corrente do motor, a qual é aplicada com êxito para monitoramento do estado de motores elétricos e em rolamentos (KAR & MOHANTY, 2006). Segundo Benghozzi et al. (2012), como não é necessário chegar ao mecanismo que está sendo diagnosticado fixando sensores mecânicos para a coleta de dados, esta estratégia é particularmente útil em lugares onde os métodos usuais como a implementação de acelerômetros para monitoramento de sinais de vibração são

inadequados ou inviáveis, como equipamentos em poços profundos na indústria do petróleo, ou onde possa existir risco de contaminação e/ou alterações da sensibilidade devido a exposição prolongada a certas condições de trabalho. A hipótese é que uma determinada avaria em um mecanismo acoplado a um motor elétrico se apresenta como um componente harmônico nas correntes estatóricas.

Kia *et al.* (2007) apresentaram uma descrição matemática baseada na observação do espectro da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês Fast Fourier Transform) da corrente para avarias distribuídas em uma caixa de engrenagens, observando o desgaste do engrenamento por meio de simulações e resultados experimentais. Em Kia *et al.* (2008) os autores apresentaram uma extensão do modelo para trens de engrenagens, aplicando-se a Transformada de Hilbert.

Kia *et al.* (2012) simulam um modelo dinâmico para o conjunto eletromecânico criado a fim de comparar diferentes estratégias para o diagnóstico de desgaste da superfície dos dentes. As capacidades de diagnóstico de pressão acústica e vibrações são analisadas pela técnica de envelope, e sinais de corrente do estator do motor de indução acoplado são analisados pela densidade do espectro de potência de corrente, a qual realiza a distribuição de energia do sinal em relação à frequência, utilizando um sistema de aquisição de alta resolução e técnica Welch.

Em Feki *et al.* (2012) resultados simulados a partir de modelo analítico são apresentados, ilustrando a possibilidade de detecção de avarias distribuídas (spalling) em dentes de uma caixa de engrenagens (engrenagens helicoidais, eixos e rolamentos) acoplada a um motor de indução (modelo  $dq$  – direto e em quadratura), por medições de corrente do estator. Em Feki *et al.* (2013) os

pesquisadores aplicam por meio de simulações, a técnica do vetor de Park ao modelo analítico. Kia *et al.* (2013) apresentaram resultados experimentais do desgaste em uma caixa de engrenagens utilizando a análise do Conjugado eletromagnético e SCSVIF (Stator Current Space Vector Instantaneous Frequency) do motor de indução. Em Kia *et al.* (2015) um novo modelo teórico de desgaste é simulado e validado por meio de resultados experimentais por meio de SCSVIF.

A maioria dos estudos sobre a detecção de desgaste em caixa de engrenagens foram realizadas por meio de resultados simulados, pois almejam solucionar o embasamento teórico sobre os efeitos vibracionais na corrente do motor elétrico. Apesar do modelamento matemático do conjunto eletromecânico ter sido um importante salto em relação ao conhecimento dos efeitos vibracionais, uma coerente estimação dos parâmetros mecânicos que refletem principalmente na rigidez dos dentes, tais como as variações devido à formação de trincas, limitam os resultados.

Esta pesquisa tem como objetivo a detecção experimental do desgaste superficial devido à falta de lubrificação, em uma transmissão por engrenagens cilíndricas de dentes retos, por meio da investigação de variáveis elétricas que semelhantemente a corrente estatórica, podem ser sensíveis aos efeitos vibracionais, tais como o vetor de Park, a potência instantânea e o conjugado eletromagnético, como fontes de informação alternativas a análise por sinais de vibração.

## **2. Análise de Avarias em Sistemas Engrenados**

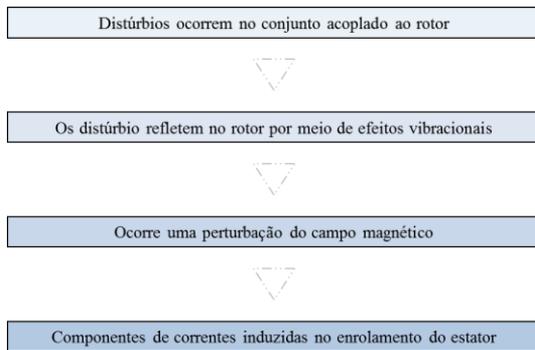
A Associação Americana dos Fabricantes de Engrenagens (AGMA) classifica 20 modalidades de avarias em engrenagens em diversas categorias. Porém, as categorias

básicas seriam: sobrecarga, fadiga por flexão na raiz do dente, fadiga de contato (ou hertziana), desgaste (abrasão, adesão, cavitação, etc.) e engripamento (“scuffing”) (KODA, 2009).

Kato e Adashi (2001) identificam quatro formas principais de desgaste: adesivo, abrasivo, corrosivo e por fadiga, além de processos marginais que são frequentemente classificados como formas de desgaste. Especificamente, o mecanismo de adesão ocorre em casos em que a película de filme lubrificante não é capaz de manter afastadas as superfícies em contato, permitindo assim a ocorrência de fusão localizada dos materiais e consequente arrancamento nestes pontos.

O processo de como uma avaria no mecanismo acoplado a um motor elétrico podem ser monitorados por meio da análise das assinaturas dos sinais de corrente pode ser representado na Figura (1).

**Figura 1.** O processo pelo qual um distúrbio mecânico na carga reflete nas componentes de corrente de um motor elétrico.



Fonte: Adaptado de Bonaldi (2005).

Kia et al. (2007) sugerem o conjunto de frequências que podem surgir devido a uma avaria no engrenamento na análise da corrente elétrica estatórica na Equação (1).

$$f_{BL_{pin,cor/eng}} = f_{alim} \pm m.f_{pin} \pm n.f_{cor} \pm q.f_{eng} \quad (1)$$

Onde  $f_{alim}$  é a frequência de alimentação do motor em Hz;  $m$ ,  $n$  e  $q$  são as ordens dos harmônicos ( $m$ ,  $n$  e  $q=1,2,3,\dots$ );  $f_{pin}$  é a velocidade rotórica da roda dentada motora em Hz;  $f_{cor}$  é a velocidade rotórica da roda dentada movida em Hz e  $f_{eng}$  é a frequência de engrenamento obtida pela frequência rotórica de uma dada engrenagem multiplicada pelo seu número de dentes ( $Z$ ), ou seja,  $f_{eng}=f_{pin} \times Z_{pin}=f_{cor} \times Z_{cor}$ .

### 2.1 Extend Park's Vector Approach (EPVA)

Na técnica denominada Extend Park's Vector Approach (EPVA) é realizada a observação espectral do módulo do vetor de Park no referencial estatórico, com a vantagem da componente fundamental da alimentação do motor ser automaticamente subtraída do espectro pela transformação de Park, fazendo com que as componentes características de avarias apareçam demoduladas (translação de um sinal de banda passante para uma banda básica) e com destaque (SILVA, 2008). Uma transformação  $odq$  (Park) representa cada armadura trifásica original do estator e do rotor por uma armadura bifásica  $dq$  (eixo direto e em quadratura), mais uma bobina isolada de índice  $o$ , eliminando o acoplamento magnético mútuo entre os bobinados de fase, tornando o fluxo concatenado num eixo independente do outro. Em geral, as informações na corrente de sequência zero ( $i_{s0}$ ) não são utilizadas. Uma apresentação mais detalhada da transformação  $odq$  pode ser encontrada em Jacobina (2005).

As componentes do Vetor de Park da corrente elétrica, em função da corrente de alimentação são dadas pelas Equações (2) e (3):

$$i_{sd}^s = \sqrt{2/3}i_{s1}^s - 1/\sqrt{6}i_{s2}^s - 1/\sqrt{6}i_{s3}^s \quad (2)$$

$$i_{sq}^s = 1/\sqrt{2} i_{s2}^s - 1/\sqrt{2} i_{s3}^s \quad (3)$$

Onde  $i_{s1}^s, i_{s2}^s$  e  $i_{s3}^s$  são as correntes trifásicas;  $i_{sd}^s$  e  $i_{sq}^s$  as correntes da máquina bifásica ( $dq$ ).

O módulo do vetor de Park será dado pela Equação (4):

$$EPVA = \sqrt{(i_{sd}^s)^2 + (i_{sq}^s)^2} \quad (4)$$

## 2.2 Análise da Potência Instantânea Total (IPSA)

A potência carrega mais informação com a corrente e a tensão do que a corrente sozinha, isso é devido ao fato da condição normal de operação do motor ser afetada tanto pela forma de onda da corrente quanto pela diferença de fase entre a corrente e a tensão de alimentação. A potência instantânea total de um motor de indução pode ser calculada pela Equação (5) utilizando medição das três tensões e correntes.

$$P_{tot} = v_{s1}^s i_{s1}^s + v_{s2}^s i_{s2}^s + v_{s3}^s i_{s3}^s \quad (5)$$

Onde  $v_{s1}^s, v_{s2}^s$  e  $v_{s3}^s$  são as tensões trifásicas.

## 2.3 Análise do Conjugado Eletromagnético (TSA)

O fluxo estatórico é calculado por meio da integração da força contra eletromotriz pelo método apresentado por Freitas et. al. (2011), que é a tensão medida nos terminais da máquina subtraída da queda de tensão na resistência do estator.

$$\lambda_{sd}^s = \int (v_{sd}^s - R_s i_{sd}^s) dt \quad (6)$$

$$\lambda_{sq}^s = \int (v_{sq}^s - R_s i_{sq}^s) dt \quad (7)$$

Onde  $\lambda_{sd}^s$  e  $\lambda_{sq}^s$  são as componentes bifásicas do fluxo estatórico da máquina bifásica e  $R_s$  é a resistência estatórica medida diretamente nos terminais do motor.

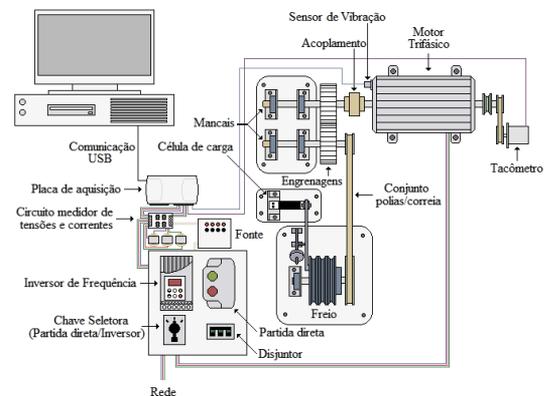
O fluxo estimado é utilizado, juntamente com a medição das correntes estatóricas para calcular o conjugado eletromagnético conforme Equação (8).

$$c_e = P(i_{sq}^g \lambda_{sd}^g - i_{sd}^g \lambda_{sq}^g) \quad (8)$$

## 3. Metodologia

A bancada da Figura (2) foi desenvolvida em laboratório e projetada para validação e testes de rendimento do motor, torque no eixo e para simulação de avarias mecânicas, tanto na carga como no próprio motor de indução. É composta por um Motor de Indução Trifásico Siemens de 2 CV (1,5kW), 8,6 N.m, 4 pólos, 3,64A/380V, podendo ser acionado por inversor de frequência (velocidade variável) ou partida direta (com velocidade variável com a carga por escorregamento).

Figura 2. Esquemático da bancada de testes.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A medição da velocidade rotórica foi realizada por meio do tacho gerador TH20R1800 da Hohner. As medições de vibração foram obtidas pelo acelerômetro industrial HS-1001000202 da Hansford Sensors. As correntes são obtidas a partir de sensores lineares de efeito Hall Allegro ACS712ELC-30A. O conversor A/D utilizado é o módulo de aquisição de dados (DAQ), NI USB-6211e possui 16 bits de resolução e pode trabalhar com uma taxa de amostragem de até 250 ks/s (amostras por segundo). A partir dos sinais obtidos do conversor A/D são realizadas as análises de avarias por um código em LabView™. Os sinais foram amostrados com 30 kHz, e armazenados com 60.000 pontos. O freio eletromagnético pode ser regulado impondo uma carga ao motor, e o conjugado de carga é medido multiplicando-se o comprimento do braço de alavanca (23cm), com a massa medida por balança eletrônica de precisão WeiHeng WH-A08.

As avarias distribuídas foram obtidas por desgaste natural em aproximadamente 6 horas de funcionamento sem lubrificação e em alta velocidade, sendo o intervalo de medições escolhidos pela significância das alterações nos espectros. Os ensaios foram aplicados para se observar o comportamento dos sinais de vibração e algumas variáveis elétricas em estágios significativos da formação de desgaste com acionamento direto da rede e com inversor de frequência em 20Hz, 40Hz e 60Hz, nas condições em vazio e com carga.

Um sistema de análise espectral é composto pelas seguintes etapas (SILVA, 2008):

- a) Amostragem: ocorre por meio de sensores e um sistema de aquisição de dados. A forma de onda da variável a ser analisada é medida por certo período e armazenada.
- b) Processamento: o sinal da variável no tempo é convertido para o domínio da

frequência por meio de técnicas e algoritmos de processamento digitais de sinais, tais como a Transformada Discreta de Fourier (DFT).

- c) Detecção: os padrões de avarias, que são compostos por frequências específicas, são identificados no espectro por algoritmos de busca, e as amplitudes das frequências podem representar uma medida de severidade. Em muitos casos uma escala logarítmica (em geral dB) é utilizada devido ao caráter exponencial de evolução apresentado pela maioria das avarias conhecidas.
- d) Diagnóstico: a partir de níveis pré-estabelecidos de alarmes e características de crescimento, as amplitudes dos padrões de avarias são verificados para apresentar uma medida de severidade, podendo ser realizadas estimativas de tempo de vida do equipamento (prognóstico).

Considerando-se  $N$  amostras do sinal no domínio do tempo, denotadas  $x(k)$ , com  $k=0,1,2,\dots,N-1$ , a DFT é dada por um conjunto de  $N$  amostras do sinal no domínio da frequência, denotadas por  $X(n)$ ,  $n=0,1,2,\dots,N-1$  e definidas pela Equação (9).

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (9)$$

A implementação da DFT passou a ser amplamente utilizada no processamento digital de sinais quando em 1965 os matemáticos Cooley e Tukey apresentaram um algoritmo rápido, que permite acelerar o processamento da interpolação de uma grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos, proporcionando uma aplicação com menor esforço computacional, de forma mais rápida e

econômica, que se popularizou como Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês Fast Fourier Transform), também mencionada na literatura como Transformada Discreta Rápida de Fourier.

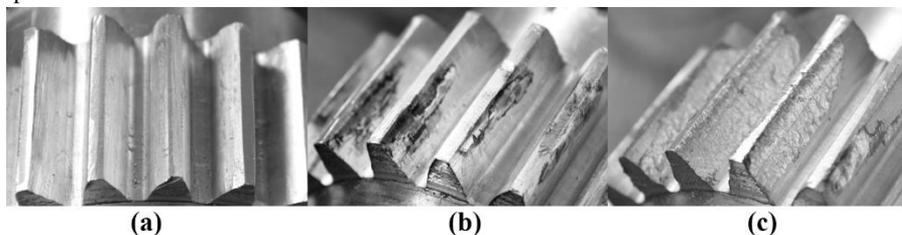
### 3. Resultados Experimentais

Na região do engrenamento foi possível observar um aumento gradativo do ruído durante o processo de formação da avaria (ganho em todo conjunto de frequências), sendo mais severo nos acionamentos com carga. Foram evidenciados alguns picos relacionados à frequência do próprio engrenamento ( $q=1$  na

Eq.1) e suas bandas ( $m=1$  e  $n=1$  na Eq.1) ou à frequência do engrenamento em relação à alimentação e suas bandas ( $qf_{eng} + f_{alim}$  na Eq.1). Em alguns casos surgiram picos expressivos em frequências relacionadas às harmônicas da alimentação na região do engrenamento (11ª e 12ª harmônicas). Nos ensaios com inversor de frequência, apenas o acionamento com 60Hz apresentou o surgimento expressivo do ruído, sugerindo que nas velocidades mais baixas o efeito vibracional é menor, bem como este efeito é mais evidente no estado com carga.

A Figura (3) apresenta os estágios de formação da avaria no caso com carga.

Figura 3. Estágios de formação de desgaste com carga: (a) sem avaria, (b) avaria após 3 horas de funcionamento e (c) avaria após 6 horas de funcionamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No acionamento direto da rede, todas as variáveis foram sensíveis ao desgaste apresentando picos expressivos com e sem carga. No acionamento com inversor, nas alimentações em 20Hz e 40Hz apenas os sinais de corrente e módulo do vetor de Park apresentaram picos representativos da avaria na condição com carga. Na condição sem carga todos os sinais apresentaram algumas alterações com 3 horas de funcionamento, mas em níveis baixos, acarretando na não confiabilidade para um diagnóstico. Nos ensaios com 6 horas de funcionamento os níveis das alterações foram mais altos, demonstrando-se confiáveis.

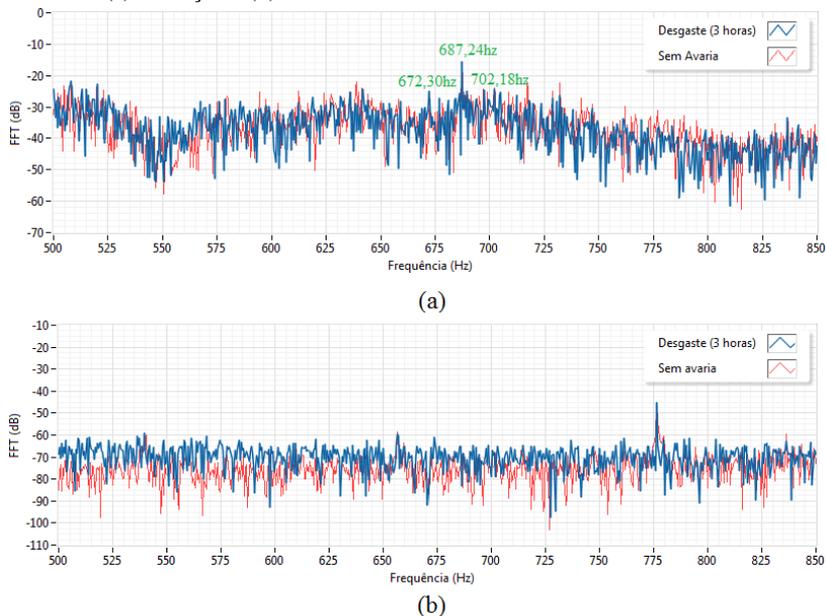
A formação do desgaste ocorreu com o conjunto acionado direto da rede com carga estimada em 5N.m. O ensaio de formação de desgaste durou 6 horas com aquisições dos sinais nos estados do sistema engrenado sem avaria, com desgaste após 3 horas e com desgaste após 6 horas. Inicialmente, a velocidade medida por meio do tacômetro indicou 1791,89RPM. Portanto, a análise sem avaria proporcionou as frequências características:  $f_{pin}=29,88$  Hz,  $f_{cor}=14,94$ Hz e  $f_{eng}= 687,24$ Hz. O conjunto de frequências da Equação (1) após 3 horas de funcionamento não apresentou alterações, contudo observou-se um aumento do efeito (ruído) devido à vibração

torcional em toda distribuição de frequências (ganho em todas as frequências entre 500 e 850Hz). Na Figura (4) são apresentados os espectros de vibração e corrente na região do engrenamento, comparando-se o estado sem avaria e com desgaste após 3 horas de funcionamento, no acionamento direto da rede e com carga. O espectro de vibração apresentou o surgimento da frequência de engrenamento (687,24Hz). O espectro de corrente apresenta apenas um aumento do ruído.

No desgaste avaliado entre 3 e 6 horas de operação, a velocidade medida por meio do tacômetro indicou 1792,82RPM. A análise

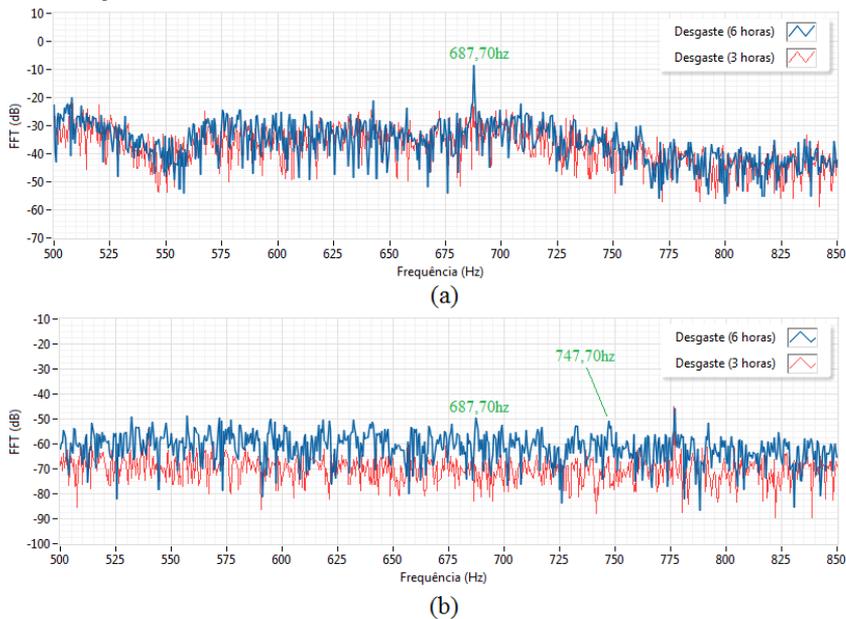
proporcionou o conjunto de frequências:  $f_{pin}=29,90\text{Hz}$ ,  $f_{cor}=14,95\text{Hz}$  e  $f_{eng}=687,70\text{Hz}$ . Na Figura (5) são apresentados os espectros de vibração e corrente comparando-se o estado com desgaste após 3 e 6 horas de operação com acionamento direto da rede e com carga. Os espectros de vibração apresentam a frequência de engrenamento. Os espectros de corrente apresentam um aumento do ruído e das frequências características relativas em  $747,70\text{Hz}$  ( $1x f_{eng} + f_{alim}$  na Eq.1), bem como se observa o surgimento da frequência de engrenamento.

**Figura 4.** Espectros sem avaria e com desgaste após 3 horas de funcionamento com alimentação direto da rede e com carga dos sinais de: (a) Vibração e (b) Corrente  $i_{s1}$ .



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 5.** Espectros com desgaste após 3 e 6 horas de funcionamento com alimentação direto da rede e com carga dos sinais de: (a) Vibração e (b) Corrente ia.



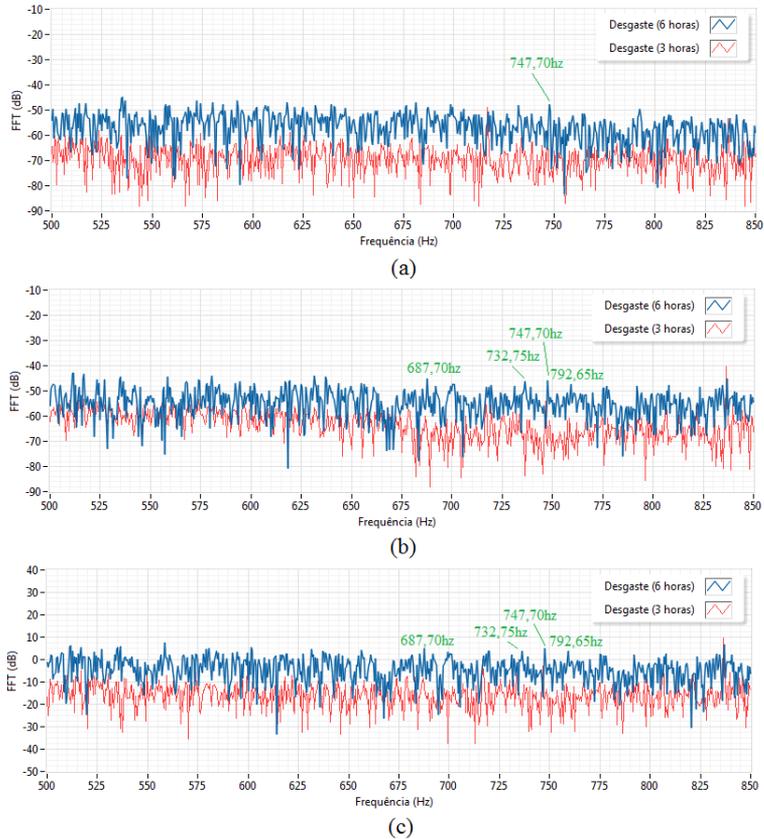
Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura (6) apresenta os espectros do vetor de Park, do conjugado eletromagnético e da potência instantânea com desgaste após 3 e 6 horas de funcionamento com acionamento direto da rede e com carga. Os espectros apresentam um aumento significativo do ruído, e o surgimento da frequência de engrenamento e relativa à alimentação em 747,70Hz ( $1x f_{eng} + f_{alim}$  na Eq.1)

A observação do desgaste com carga (3,5 N.m.) e acionamento por inversor em 60Hz a velocidade medida por meio do tacômetro indicou 1766,10RPM e com a avaria foi de

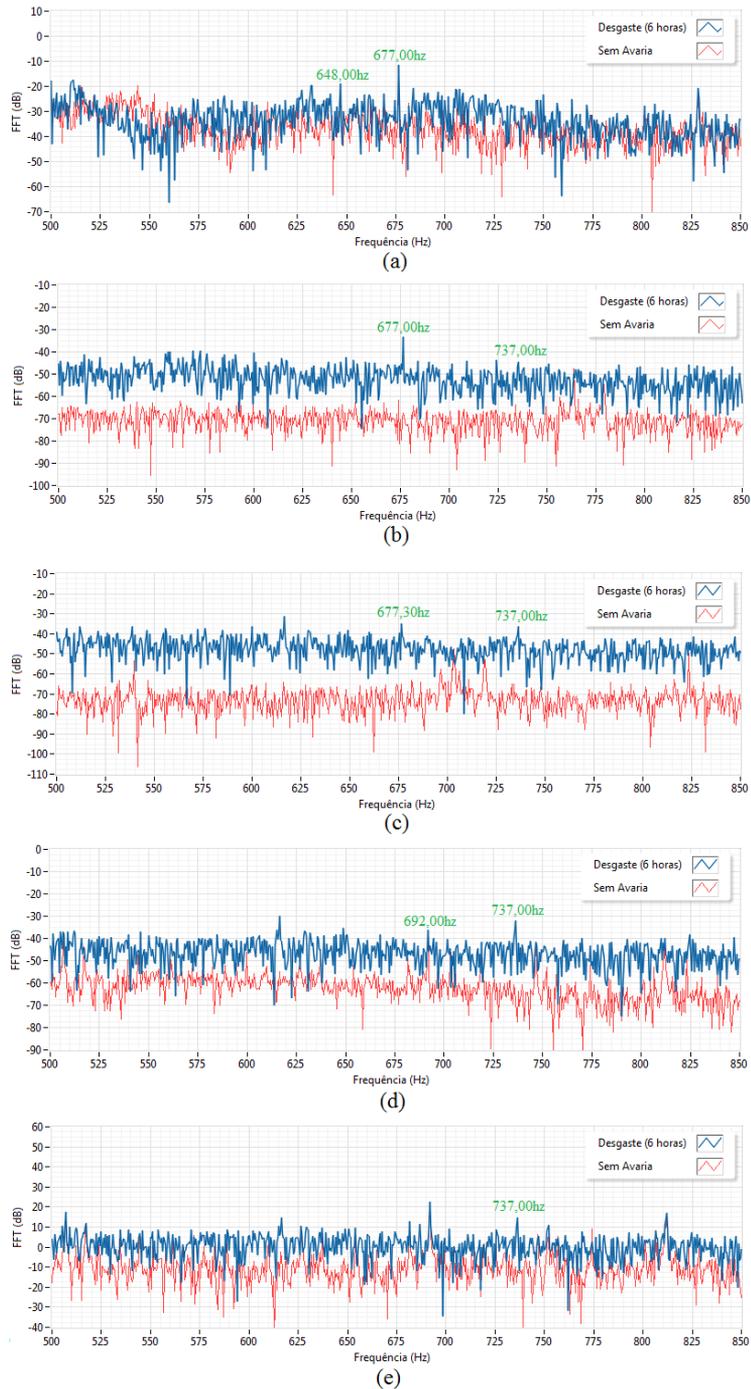
1768,20RPM. A análise proporcionou o conjunto de frequências sem avaria:  $f_{pin}= 29,41\text{Hz}$ ,  $f_{cor}=14,70\text{Hz}$  e  $f_{eng}= 676,45\text{Hz}$ ; e com avaria:  $f_{pin}= 29,45\text{Hz}$ ,  $f_{cor}=14,73\text{Hz}$  e  $f_{eng}= 677,30\text{Hz}$ . A Figura 7 apresenta os espectros de vibração, corrente, módulo do vetor de Park, conjugado e potência respectivamente. O ensaio para 60Hz apresentou um aumento ainda maior do ruído (devido ao inversor) e o surgimento da frequência de engrenamento e desta frequência relacionada à alimentação em 737,0Hz ( $1x f_{eng} + f_{alim}$  na Eq.1).

**Figura 6.** Espectros com desgaste após 3 e 6 horas de funcionamento com carga dos sinais de: (a) EPVA, (b) TSA e (c) IPSA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 7.** Espectros nas regiões de engrenamento sem avaria e desgaste após 6 horas com carga e acionamento em 60Hz dos sinais de: (a) Vibração (b) Corrente, (c) EPVA, (d) TSA e (e) IPSA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

#### 4. Conclusões

Esta pesquisa investigou o comportamento de sinais elétricos de um motor de indução na presença do desgaste superficial em um engrenamento. As técnicas associadas à análise de sinais de vibração e variáveis elétricas foram verificadas em experimentos onde o desgaste nas faces dos dentes foi induzido e seu agravamento obtido naturalmente.

O desgaste é relativamente fácil de ser observado na FFT devido ao efeito vibracional ocasionar ruído nos espectros proporcionando o surgimento de frequências significativas. O aumento do ruído é observado pelo deslocamento de todo conjunto de frequências da região do engrenamento, como um ganho. As magnitudes das componentes de interesse aumentam com a severidade do desgaste.

As variáveis elétricas foram sensíveis às avarias no engrenamento nas velocidades de acionamento aplicadas. O acionamento por meio de inversor aumentou o nível dos ruídos já existentes da vibração torcional apenas nos acionamentos em 60Hz, proporcionando pouca influência em 20Hz e 40Hz. Todas as variáveis elétricas do motor testadas tiveram alterações mediante as avarias, sendo aparentemente o conjugado pouco menos sensível e a potência afetada por maior quantidade de ruído nos acionamentos por inversor.

Os resultados obtidos representam um bom avanço no sentido de se obter um sistema remoto e automático de detecção de avarias no conjunto engrenado acoplado a motores de indução, que seja uma alternativa confiável a análise de vibração. Como trabalho futuro, será investigada a aplicação combinada entre decomposições wavelet, medidas de informação para identificar padrões e sistemas inteligentes para classificação do desgaste.

#### 5. Referências Bibliográficas

AQUINO, M.B. Aplicação da Função Densidade de Probabilidade Beta no Diagnóstico de Defeitos de Montagem em Redutores de Engrenagens. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2004. 100p. Dissertação Mestrado.

BENGHOZZI, A. et al. (2012). The Diagnosis of a Gearbox Transmission System Using Electrical Control Parameters. In: *18th International Conference on Automation and Computing*, Loughborough: ICAC, pp.1-6.

BONALDI, E.L. Diagnóstico Preditivo de Avarias em motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de conjuntos Aproximados. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2005. 165p. Tese Doutorado.

FEKI, et al. (2012). An integrated electro-mechanical model of motor-gear units- Applications to tooth fault detection by electric measurements. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 29, pp. 377-390.

FEKI, et al. (2013). Gear and motor fault modeling and detection based on motor current analysis. *Electric Power Systems Research*, Vol. 95, pp. 28-37.

FREITAS, I.S. et al. (2011). An Integration Algorithm For Induction Motor Stator Flux Estimation With Dc Offset Compensation. In: *Brazilian Power Electronics Conference*, Natal: COBEP 2011.

JACOBINA, C.B. Sistemas de Acionamento Estático de Máquina Elétrica. Campina Grande, PB. pp. 44-53, 2005.

KAR, C. e MOHANTY, A.R. (2006). Multistage Gearbox Condition Monitoring Using Motor Current Signature Analysis and Kolmogorov–Smirnov Test. In: *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, no. 1–2, pp. 337-368.

KATO, K. e ADASHI, K. Wear Mechanisms. In: BHUSHAN, B. (Ed.). *Modern tribology handbook: principles of tribology*. Boca Raton: CRC Press, 2001.

KIA, S.H. et al. (2007). Gearbox Monitoring Using Induction Machine Stator Current Analysis, Diagnostics for Electric Machines. In: *IEEE International Symposium*, pp.149-154.

KIA, S.H. et al. (2008). A Modeling Approach for Gearbox Monitoring Using Stator Current Signature in Induction Machines. In: *Industry Applications Society Annual Meeting*, pp.1-6.

KIA, S.H. et al. (2012). A comparative study of acoustic, vibration and stator current signatures for gear tooth fault diagnosis. In: *XXth International Conference on Electrical Machines*, pp.1514-1519.

KIA, S.H. et al. (2013). Gear tooth surface damage fault detection using induction machine electrical signature analysis. In: *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, pp. 358-364.

KIA, S.H. et al. (2015). Gear Tooth Surface Damage Fault Detection Using Induction Machine Stator Current Space Vector Analysis.

In: *IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1866-1878.

KODA, F. Estudo da Fadiga de Contato em Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009. 187p. Dissertação Mestrado.

SILVA, J.G.B. Aplicação da Análise de Componentes Principais no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos Através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2008. Dissertação Mestrado.