DOI: 10.48011/asba.v2i1.1489

Análise do Envelope da Corrente para Diagnóstico de Falhas em MITs

Isabela Oliveira Zaparoli [*] **Lane Maria Rabelo Baccarini** [**]
Paulo Cezar Monteiro Lamim [**] **Josemar de Souza Moreira** [**]
Fabiano Bianchini Batista [***]

[*] *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia,MG, (e-mail: oliveirazaparoli@gmail.com)*
[**] *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João Del Rei, MG, (e-mail: rabelo@ufsj.edu.br, lamim@ufsj.edu.br, js_moreira99@yahoo.com.br)*
[***] *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del Rei, MG, (e-mail: fabianchini@ufsj.edu.br)*

Abstract: Fault diagnosis is essential for avoiding unscheduled interruptions, as well as to guarantee the continuity and reliability of production processes. However, the detection of an incipient fault (inter-turn short circuit) in the stator is not trivial and is recognized as one of the most crucial and difficult to diagnosis. The analysis of the motor supply current envelope has been widely used in diagnostic methods, but only the envelope without adequate signal processing is unable to detect failure. This article proposes a new technique for the diagnosis of initial short circuit between stator turns in induction motors, considering a spectral analysis of the residue obtained from the current envelope. The methodology consists of separating the high and low amplitude oscillations of the current envelope using the Robust Extreme Envelope Average (REEA) technique. The signal formed by the largest oscillations, called residue, which carries the desired information arises from the initial short circuit asymmetry. This residue is analyzed using the Fast Fourier Transform (FFT), and the harmonic components excited by the incipient fault are used to monitor its evolution. The experimental results show that the method is robust and effective in the diagnosis of the initial short circuit between stator turns. The tool is versatile and it is easy application in an industrial plant setting.

Resumo: O diagnóstico de falhas é essencial para evitar interrupções não programadas e garantir a continuidade e confiabilidade dos processos de produção. Entretanto a detecção da falha incipiente no estator (curto-circuito entre espiras) não é trivial e é reconhecida como uma das falhas mais cruciais e difíceis de se identificar. A análise do envelope da corrente de alimentação do motor tem sido amplamente utilizada nos métodos de diagnósticos, porém apenas o envelope sem um processamento de sinais adequado não é capaz de detectar a falha. O presente artigo propõe uma nova técnica para o diagnóstico de curto-circuito inicial entre espiras do estator em motores de indução, considerando uma análise espectral do resíduo obtido do envelope da corrente. A metodologia consiste em separar as oscilações de alta e baixa amplitude do envelope da corrente utilizando a técnica *Robust Extreme Envelope Average* (REEA). O sinal formado pelas maiores oscilações, denominado resíduo, carregam as informações desejadas causadas pela falha incipiente, é analisado utilizando a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transformer* - FFT), e os componentes harmônicos excitados pela falha são utilizados para monitorar sua evolução. Os resultados experimentais mostram que o método é robusto e eficaz no diagnóstico do curto-circuito inicial entre espiras do estator. A ferramenta é versátil e de fácil aplicação em uma planta industrial.

Keywords: Fault Detection; Inter-turn Short Circuit; Robust Extreme Envelope Average; Envelope; Residue.

Palavras-chaves: Detecção de Falha; Curto-Circuito Entre Espiras; Média dos Envelopes Extremos Robusta; Envelope; Resíduo.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de Indução Trifásicos (MITs), de rotor gaiola, representam cerca de 90% dos motores elétricos instalados na indústria (Ferreira and De Almeida, 2016). Estima-se que esses equipamentos são responsáveis por aproximadamente 75% do consumo de energia das plantas industriais (Ferreira and De Almeida, 2016) e por cerca de 40% a 50% do consumo de toda a capacidade gerada em um país (Imoru et al., 2017). Estes motores são empregados em diversos tipos de ambiente onde as condições de operação às quais são expostos podem ser hostis, contribuindo para a degradação do isolamento, podendo resultar em diversos tipos de falha, levando à interrupção do processo de produção, desperdício de material, má qualidade do produto, acidentes, manutenções corretivas não programadas ou, em última análise, a substituição da máquina (Choi et al., 2018). Portanto, métodos eficazes de diagnóstico devem ser implementados e aplicados às estratégias de manutenção baseadas no monitoramento de condições, para garantir e melhorar a confiabilidade e a disponibilidade do MIT e do sistema em que ele está inserido.

As falhas mais comuns nos MITs podem ser categorizadas em elétricas e mecânicas. As elétricas são aquelas relacionadas a curto-circuito nos enrolamentos do estator, anéis e barras do rotor quebradas e ou trincadas. As falhas de natureza mecânicas são os desgastes do acoplamento, desalinhamento, excentricidade e relacionadas aos rolamentos (Godoy et al., 2015).

De acordo com o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), as falhas do estator representam 28% do total de falhas que podem ocorrer em máquinas de indução (Karmakar and Al., 2016). Levantamentos realizados pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) indicam que este percentual é de 38% (Karmakar and Al., 2016). As principais falhas que podem ocorrer no enrolamento do estator dos MITs são: Curto-Circuito Entre Espiras (CCEE), curto-circuito entre bobinas, curto-circuito entre fases e curto-circuito entre uma fase e o terra. O curto-circuito se inicia com a degradação do isolamento resultando em correntes desequilibradas, flutuações de torque, redução do rendimento e, consequentemente, provocando superaquecimento, vibrações mecânicas excessivas e até mesmo, em casos mais graves, na perda do motor (Su et al., 2011).

Entre as falhas que podem ocorrer no estator, o CCEE de uma mesma fase foi escolhida como foco deste trabalho pelas seguintes razões (Karmakar and Al., 2016; Bonnett and Soukup, 1992; Joksimovic and Penman, 2000):

- Na maioria dos MITs disponíveis comercialmente, as bobinas são isoladas umas das outras nas ranhuras, bem como na região da extremidade do enrolamento. Portanto, falhas de curto-circuito envolvendo poucas espiras da mesma fase são geralmente as mais comuns e prováveis de ocorrer.
- A corrente de curto-circuito que circula na parte do enrolamento afetada pela falha pode atingir o dobro da corrente de rotor bloqueado, causando aquecimento localizado. O calor excessivo, caso a falha entre espiras não seja detectada em seu estado inicial, acelera a gravidade da falha para um nível destrutivo, progredindo rapidamente para outras falhas, tais como curto-circuito entre bobinas, entre fases ou fase e terra.
- A detecção incipiente do CCEE não é trivial pois o impacto nas características do motor é quantitativamente pequeno, podendo ser mascarado por desequilíbrios na tensão de alimentação do motor, ruído durante a aquisição de sinais, vibrações mecânicas e assimetrias entre fases inerentes ao processo de construção de máquinas elétricas

A detecção dessas falhas em seu estágio inicial é fundamental para evitar danos irreversíveis ao motor. De acordo com Nandi and Toliyat (2002), o tempo entre o início da falha e a perda total da máquina pode variar de um terço de segundo a alguns minutos dependendo de vários fatores: severidade inicial da falha, tipo de enrolamento, potência, tensão de alimentação, condição ambiental, etc. A questão sobre o tempo de atraso entre uma falha entre espiras e outras falhas mais graves ainda precisa ser respondida (Siddiqui et al., 2017). O que se sabe, segundo Frosini et al. (2016), é que o curto-circuito entre espiras evolui mais rapidamente em motores de baixa tensão. Nesse sentido, a detecção de um CCEE na fase inicial, ou seja, envolvendo poucas espiras de uma mesma fase, é de fundamental importância para a manutenção preditiva, justificando o monitoramento contínuo do motor para a detecção de falha.

Segundo Zhang et al. (2011), nos últimos anos, a detecção de falhas entre espiras do estator em seu estágio inicial começou a chamar muita atenção dos pesquisadores. Desde então, várias técnicas foram criadas para monitorar essas falhas usando diferentes parâmetros, por exemplo: fluxo magnético (Frosini et al., 2016; Ramirez-Nunez et al., 2018; Filho et al., 2020), correntes estacionária e transitória de estator (Frosini et al., 2016; Imoru et al., 2017; Zaparoli et al., 2020), vibração (Su et al., 2011; Lamim Filho et al., 2014) e temperatura (Singh et al., 2016; Choudhary, 2018). Um levantamento dos vários métodos de detecção é apresentado em Zhang et al. (2011); Siddique et al. (2005); Grubic et al. (2008).

Dentre os diversos métodos que são usados para detecção de falhas, alguns são extremamente invasivos e, em casos mais específicos, são necessários até que a máquina seja retirada de operação. Por esse motivo, metodologias de detecção de falhas que não afetam a linha de produção e não colocam o operador em contato direto com o equipamento são extremamente importantes. Devido ao baixo custo e sua natureza não invasiva, as técnicas baseadas na análise da assinatura da corrente (*Motor Current Signature Analysis* - MCSA) geralmente são mais utilizadas.

As modulações no espectro da corrente de alimentação causadas pela falha são utilizadas no diagnóstico por meio do uso da análise espectral. Em muitas situações, essa análise é realizada a partir do envelope de sinal (sinal modulador), uma vez que as modulações presentes nesses sinais possuem frequências relacionadas à falha (Puche-Panadero et al., 2013). No entanto, a análise puramente do envelope não é suficiente para detectar o defeito em um

estágio inicial porque as frequências são quantitativamente pouco excitadas nessa condição.

Nesse contexto, com base no pressuposto de que a falha é a principal causa das variações de dados no sinal da corrente de alimentação, a principal contribuição deste trabalho é propor um método de diagnóstico de um CCEE inicial analisando os resíduos do envelope da corrente. A partir da suavização do envelope por meio da técnica *Robust Extreme Envelope Average* (REEA), o resíduo é obtido pela diferença entre o envelope original e o suavizado. O processo de suavização é comumente usado para atenuar (e/ou eliminar) sinais como amplitudes de componentes em frequências mais altas, características gerais de ruído. O resíduo é formado pelas oscilações de maior amplitude do envelope, que são, neste artigo, onde estão as informações de frequência necessárias para a identificação de falhas. Aplicando a Transformada Rápida de *Fourier* (*Fast Fourier Transform* - FFT) é possível realizar o diagnóstico e monitoramento da evolução da falha.

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

As etapas necessárias para implementar a técnica proposta são ilustradas na Figura 1. O sinal de corrente de alimentação do motor (X) é coletado e o envelope (sinal do modulador) é obtido da Transformação de *Hilbert* (X_e). A REEA é aplicada e, a partir do envelope suavizado (X_{es}), é obtido o resíduo ($r = X_e - X_{es}$) (sinal com os componentes "oscilação de maior amplitude "). Finalmente, o monitoramento da falha é realizado com base na FFT.

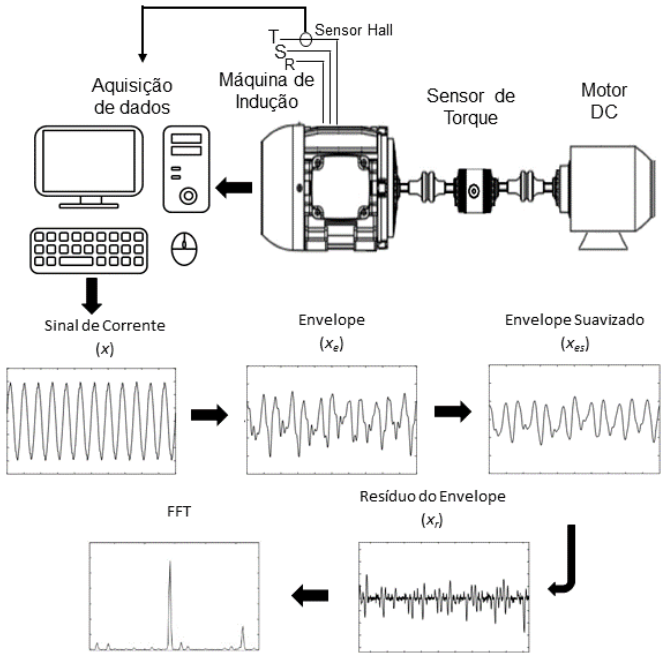

Figura 1. Fluxograma da metodologia.

2.1 Aquisição de Dados

A metodologia foi validada através de testes experimentais realizados em um motor de indução trifásico, rotor gaiola de esquilo. A Figura 2 mostra a foto da bancada. Os dados nominais do motor estão descritos na Tabela 1. Uma máquina de corrente contínua (2) operando como gerador foi usada como sistema de carga. O gerador foi conectado ao motor por meio de um acoplamento flexível e um medidor de torque (3) que permitiu garantir as mesmas condições em todos os testes.

Tabela 1. Parâmetros do motor de indução.

Parâmetro	**Valor**	**Parâmetro**	**Valor**
Potência [hp]	3	**Corrente [A]**	8,7
Número de pólos	4	**Frequência [Hz]**	60
Tensão [V]	220	**Velocidade [rpm]**	1730

O motor possui derivações externas (4) e as espiras foram conectadas em série (três a cada vez) com um banco de resistores (5) para permitir a representação da condição de baixo isolamento (curto-circuito). Os sinais foram coletados com o motor operando com um percentual de carga de 80% do torque nominal nas condições: sem falha e com 3, 6 e 9 espiras curto circuitadas (1,5%, 3% e 4,5% das espiras do estator).

Os sinais foram obtidos usando um sensor de efeito *Hall Tectronix* A622 CA/CC - 100 Hz, conectado a uma placa de aquisição da *National Instruments* NI PCI-4461 (6), após passar por um filtro anti-*aliasing* de 12,5 kHz. Foram adquiridos 32 sinais de corrente para cada condição, totalizando 128 sinais, com uma frequência de amostragem de 25,6 kHz, e tempo total de 1 segundo de cada teste.

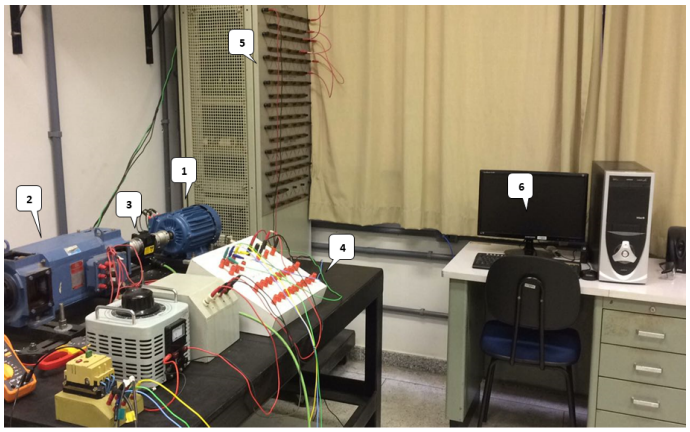

Figura 2. Bancada experimental.

2.2 Envelope

As modulações nos sinais de tensão, corrente, fluxo e vibração aumentam na presença de defeitos nos enrolamentos do estator da máquina. Esses sinais de modulação também são conhecidos como envelopes e contêm as informações relacionadas à falha. O processo de desmodulação do sinal consiste em extrair o envelope $ym(t)$ e pode ser realizado usando várias ferramentas de processamento de sinal. A Transformada de *Hilbert* é uma técnica clássica de análise de sinais amplamente utilizada na identificação de falhas em MIT (Puche-Panadero et al., 2013).

Para ilustrar, a Figura 3 mostra o Envelope de *Hilbert* do sinal de corrente do estator para duas situações: sem falha e com 9 espiras curto-circuitadas.

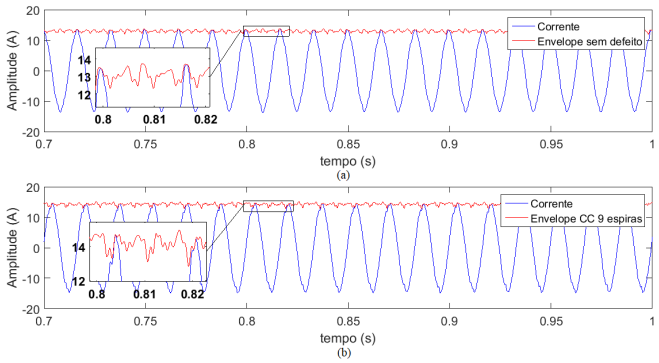

Figura 3. Corrente do estator e o envelope: (a) sem falha, (b) com falha. Resultado experimental.

2.3 Suavização e Extração de Resíduos

A *Extreme Envelope Average* (EEA) é uma técnica de redução de ruído unidimensional proposta por Batista (2012). É baseada em médias sucessivas entre os envelopes extremos que representam as curvaturas máxima e mínima. Parte da energia do sinal que contém dados ruidosos (componentes de alta frequência) é perdida durante o processo de médias. Esse processo é interrompido através de um critério de parada, onde estruturas importantes e necessárias do sinal original ainda estão presentes. O algoritmo EEA compreende as seguintes etapas:

Passo 1: Extrair os máximos e mínimos locais dos dados ruidosos:

$x(t) : j \leftarrow 1(j : \text{iteração})$

Na versão inicial, foi utilizado o seguinte critério para selecionar esses pontos, Batista (2012):

SE $(x[t_n] > x[t_{(n-1)}])$ E $(x[t_n] \geq [t_{(n+1)}])$

OU $(x[t_n] \geq x[t_{(n-1)}])$ E $(x[t_n] > x[t_{(n+1)}])$ ENTÃO Retorna ("É um Máximo")

SE NÃO $(x[t_n] < x[t_{(n-1)}])$ E $(x[t_n] \leq x[t_{(n+1)}])$

OU $((x[t_n] \leq x[t_{(n-1)}])$ E $(x[t_n] < x[t_{(n+1)}]))$ ENTÃO Retorna ("É um Mínimo")

OU ENTÃO Retorna ("Não é um Extremo")

Passo 2: Identificar os envelopes extremos (envelopes superior e inferior), $xu_j(t)$ e $xl_j(t)$, de $x(t)$ interpolando os máximos e mínimos locais. Neste trabalho, foi utilizado o método de "interpolação de *spline* cúbico".

Passo 3: Calcular a curva média, $xm_j(t)$, entre os dois envelopes:

$xm_j(t) = [xu_j(t) + xl_j(t)]/2$

SE $j = 1 : xm_j - 1(t) = x(t)$

Passo 4: Aplicar o critério de parada, SC_j. SE SC_j é satisfeito: $xs(t) \leftarrow xm_j$-1(t) (onde xs é o dado suavizado) OU ENTÃO: atualizar $x(t) \leftarrow xm_j(t)$, $j \leftarrow j + 1$

Repetir Passo 1.

A eficiência da EEA's está altamente relacionada a alguns fatores, como o número de amostras (frequência de amostragem), o nível de ruído e, principalmente, a identificação dos máximos/mínimos locais da Etapa 1, que representam a base do processo de interpolação (a partir da qual os envelopes superior e inferior são criados).

Após algumas iterações do processo de médias, o EEA pode apresentar problemas de instabilidade numérica caracterizados por um aumento nas magnitudes locais e distorções do sinal, mesmo antes de obter a melhor suavização em todo o domínio. Essas instabilidades geralmente ocorrem em regiões de domínio consideradas mais críticas para o processo de adaptação, como as próximas às extremidades ou onde há mudanças bruscas. Essas instabilidades ocorrem, basicamente, devido à falta de pontos extremos em muitas partes do sinal. Devido ao número reduzido de máximos e mínimos e à presença de grandes espaços vazios (lacunas) ao longo dos domínios, o processo de interpolação se torna menos preciso.

Para minimizar os problemas de instabilidade numérica durante o processo de suavização, uma versão mais robusta do EEA, chamada *Extreme Envelope Average* (REEA), foi proposta por Batista and Silveira (2012). A única diferença entre essas duas versões é a maneira de identificar os pontos extremos na Etapa 1. Na versão robusta, a REEA, sua extração é feita da seguinte maneira:

$N = \text{tamanho}(x)$

$\Delta(n) = \Delta_n = x[t_{(n+1)}] - x[t_n], n = 1, 2, \ldots, N-1$

$i = 1, 2, \ldots, N-2$

SE $(\Delta_i > 0$ E $\Delta_{(i+1)} < 0)$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Máximo"

SE NÃO $(\Delta_i < 0$ E $\Delta_{(i+1)} > 0)$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Mínimo"

SE NÃO $(\Delta_i > 0$ E $\Delta_{(i+1)} > 0)$ E $(\mid \Delta_i \mid > \mid \Delta_{(i+1)} \mid)$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Máximo"

SE NÃO $(\Delta_i > 0$ E $\Delta_{(i+1)} > 0)$ E $(\mid \Delta_i \mid < \mid \Delta_{(i+1)} \mid)$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Mínimo"

SE NÃO $(\Delta_{(i)} < 0$ E $\Delta_{(i+1)} < 0)$ E $(\mid \Delta_i \mid < \mid \Delta_{(i+1)} \mid)$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Máximo"

SE NÃO $(\Delta_i < 0$ E $\Delta_{(i+1)} < 0)$ E $(\mid \Delta_i \mid > \mid \Delta_{(i+1)} \mid)$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Mínimo"

SE NÃO $(\Delta_i = \Delta_{(i+1)})$, ENTÃO $x[t_{(i+1)}]$ É "um Máximo" E "um Mínimo"

E, nos pontos finais, tem-se:

SE $(x[t_1] > x[t_2])$, ENTÃO $x[t_1]$ É "um Máximo"

ENTÃO SE $(x[t_1] < x[t_2])$, ENTÃO $x[t_1]$ É "um Mínimo"

SE $(x[t_N] > x[t_{(N-1)}])$, ENTÃO $x[t_N]$ É "um Máximo"

ENTÃO SE $(x[t_N] < x[t_{(N-1)}])$, ENTÃO $x[t_N]$ É "um Mínimo"

Observe que, de acordo com a definição teórica, os extremos locais, máximos e mínimos, diferentemente da versão original, EEA, na REEA não são necessariamente extremos locais verdadeiros. Atualmente, os máximos e mínimos são agora pontos oscilatórios superiores e inferiores, respectivamente. O método de extração desses pontos agora é mais sensível a alterações ao longo das curvaturas do sinal (oscilações em torno das curvaturas de dados silenciosas). Assim, há um aumento nos pontos de referência que, consequentemente, tornam o processo de interpolação mais preciso. Por outro lado, haverá mais iterações até a convergência (o processo de eliminação de ruído é mais lento).

Na versão original, EEA, Batista (2012) propôs um critério de parada, SCj, com base nos *Modal Assurance Criteria* (MAC). A condição é que o valor de SCj, correspondente à $j-$iterações, não seja inferior a um valor limite, $SClimit$, definido a priori (em geral entre $0,9$ e 1). A escolha desse valor limite depende dos níveis de ruído e do tipo de sinal. No REEA, o critério de parada é o número de médias. Neste trabalho, a Etapa 4 é interrompida na primeira iteração, que contém as oscilações das frequências mais altas.

As Figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, o envelope original e suavizado, e o resíduo obtido a partir do envelope.

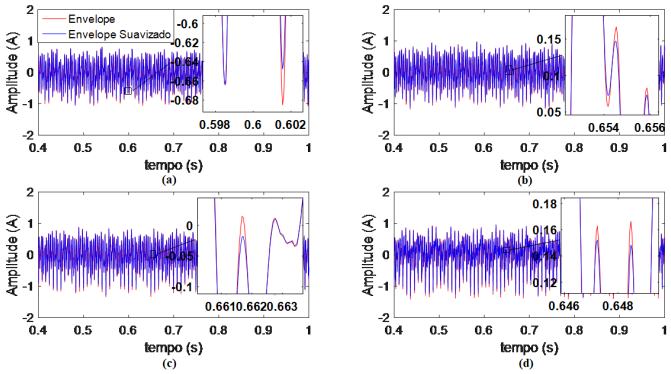

Figura 4. Envelope original e suavizado da corrente do motor sem falha (a), com 3 (b), 6 (c) e 9 (d) espiras em curto.

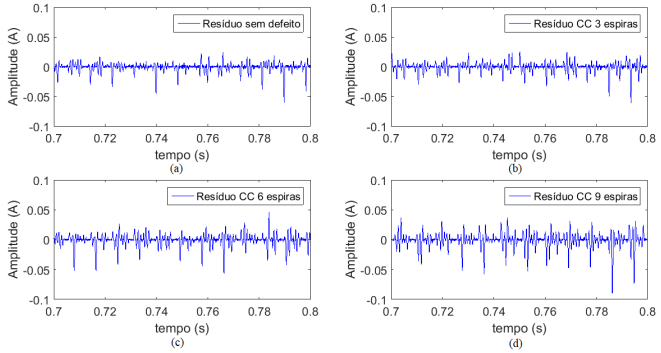

Figura 5. Resíduo obtido do envelope sem falha (a), com 3 (b), 6 (c) e 9 (d) espiras em curto.

2.4 Análise Espectral

Dentre os componentes de frequência excitadas pelo CCEE é observado que a frequência de 240HZ é a mais sensível à falha, portanto todos os resultados foram normalizados em relação à magnitude média do componente de 240 Hz sem defeito, de acordo com a Equação 1. A análise espectral de cada sinal (envelope e resíduo) resulta em um espectro diferente. Sendo assim, mesmo com dados normalizados, não é apropriado comparar a magnitude dos componentes de frequência.

$$X_{F_{normalizado}} = \frac{1}{X_{\text{Médio}_{[F240]}}} X_F \tag{1}$$

Onde $X_{F_{normalizado}}$ é o vetor de frequência normalizado; $X_{Mdio_{[F240]}}$ é a magnitude média do componente de 240 Hz sem defeito; X_F é o vetor de frequência.

Os componentes de frequência no fluxo axial e, portanto, a corrente do estator que pode estar presente no espectro são mostrados na Tabela 2. Onde k é a ordem do harmônico de tempo (um número inteiro positivo); s é o escorregamento; n é o número de barras do rotor; fr é a frequência de rotação do rotor; fs a frequência do componente fundamental da fonte de alimentação (60 Hz); p é o número de pares de polos;

Tabela 2. Expressões gerais dos componentes de frequência presentes no espectro da corrente.

Tipos de Harmônicos	**Expressão geral de frequências no espectro de corrente**	**Envelope: componentes amplificados**
Harmônico de Tempo (HT)	kfs	kfs
Harmônico de Ranhuras do Rotor (HRR)	$fskn(1-s)/pk \pm fs$	kfs
Harmônico de Barra Quebrada (HBQ)	$fs \pm 2ksfs$	$2ksfs$
Harmônico de Excentricidade (HE)	$fs \pm fr$	fr
Harmônico de Excentricidade Mista (HEM)	$fs \pm fsk(1-s)/p$	$fsK(1-s)/p$

O HT pode ser causado por múltiplos integrais do harmônico fundamental da fonte de alimentação e assimetria nos enrolamentos do estator (Joksimovic and Penman, 2000). O HRR é causado pela estrutura do rotor (distribuição das barras do rotor nas ranhuras) e o curto circuito no estator CCEE (Joksimovic and Penman, 2000; Ghoggal et al., 2009; Lamim Filho et al., 2014). O HBQ é resultado de assimetrias nas barras do rotor (Lamim Filho et al., 2018; Batista et al., 2016; Ramirez-Nunez et al., 2018; Henao et al., 2003), o HE por desalinhamentos e presença de excentricidades mistas (Ramirez-Nunez et al., 2018) e HEM por excentricidade estática e dinâmica (Ramirez-Nunez et al., 2018; Ghoggal et al., 2009; Ishkova and Vítek, 2016; Sahraoui et al., 2008).

A Figura 6 mostra a média espectral do envelope da corrente calculada usando 32 sinais para cada condição: sem falha e com presença inicial de curto-circuito entre espiras. Pode-se observar que é impossível identificar e

monitorar esses componentes através da análise espectral aplicada diretamente no envelope. Esse fenômeno pode ser justificado, em parte, pelo fato de que no estágio inicial, a energia associada aos componentes característicos da falha é baixa quando comparada à energia dos outros componentes de frequência que compõem as principais estruturas do envelope. Além disso, Nandi and Toliyat (2002) afirmam que as assimetrias inerentes a construção do motor, muito comuns em motores de baixa potência, podem ser compensadas por um pequeno número de espiras em curto circuito. Essa dificuldade também pode estar associada a pequenos desequilíbrios na tensão de alimentação do motor.

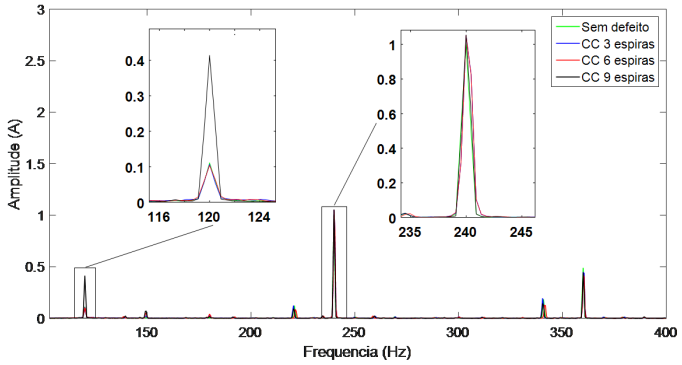

Figura 6. Espectro médio do envelope para cada condição: sem falha, com 3, 6 e 9 espiras curto-circuitadas.

Com base no pressuposto de que a falha é a principal causa das variações de dados no sinal da corrente de alimentação, quando o REEA é aplicado no envelope, o sinal suavizado carrega as informações de frequência mais baixa, o que representa as tendências sistemáticas do processo. Portanto, ele não carrega informações claras sobre falhas elétricas. No entanto, o resíduo contempla essencialmente informações não relacionadas ao sistema, como por exemplo a presença de uma falha elétrica, permitindo que as características da falha sejam perceptíveis no espectro do resíduo.

A Figura 7 mostra o espectro dos 128 sinais experimentais obtidos a partir do resíduo do envelope da corrente para a condição sem falha e com falha. Observa-se que o espectro do resíduo contém múltiplos inteiros de Harmônicos de Tempo (HT) ($2fs$, $4fs$ e $6fs$) mesmo em condições sem falha, porém com amplitudes inferiores às condições de falha.

Como esperado, uma falha de CCEE, não causará novas frequências nos espectros de fluxo magnético e portanto na corrente de alimentação. No entanto, são esperadas variações na amplitude dos componentes harmônicos de frequência já existentes e relacionados ao número de ranhuras do rotor (Joksimovic and Penman, 2000). De acordo com os aspectos teóricos mostrados na Tabela 2, espera-se que os componentes de frequência do envelope, múltiplos inteiros da frequência de alimentação fs, sejam excitados.

A média calculada usando todos os 32 sinais para cada condição é mostrada na Figura 8. A característica dos HT, $2fs$ e $4fs$ (120 Hz e 240 Hz) que descrevem a falha elétrica, conforme a Tabela 2, são perceptíveis entre os demais vizinhos. Durante um monitoramento *on-line*, é perfeitamente possível quantificar o aumento muito rápido da amplitude dos HT para o diagnóstico de um CCEE, mesmo se ainda houver alguma outra falha presente.

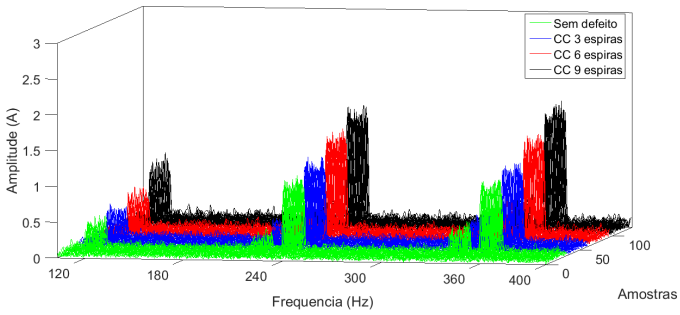

Figura 7. Espectro dos 32 resíduo obtidos para condição: sem defeito, com 3, 6 e 9 espiras curto-circuitadas.

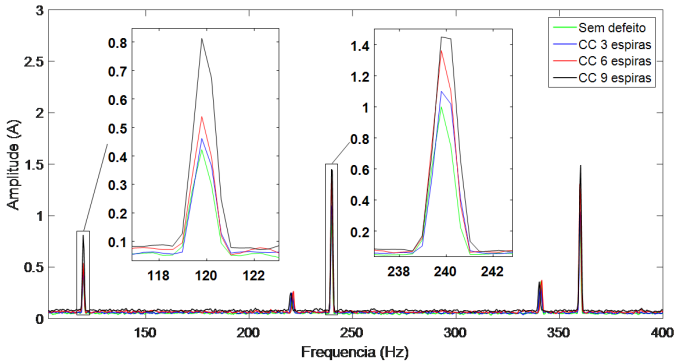

Figura 8. Espectro médio do resíduo obtido para cada condição: sem falha, com 3, 6 e 9 espiras curto-circuitadas.

A Figura 9 e a Tabela 3 apresentam a média e o desvio padrão da amplitude dos HT $2fs$ e $4fs$ das condições sem falha e com falha, mostrando o aumento da amplitude conforme o agravamento da severidade da falha. Devido à baixa energia associada a uma falha inicial, a amplitude dos HT tanto em $2fs$ quanto em $4fs$ com apenas 3 espiras em curto são próximas à situação sem falha e há uma interseção entre as áreas representadas pelo desvio padrão. Portanto, recomenda-se observar mais de um HT para evitar a possibilidade de um falso diagnóstico.

Uma desvantagem desta metodologia é que por ser baseada na análise de resíduos, esta técnica pode ser menos sensível à falhas de baixa intensidade em ambientes extremamente ruidosos.

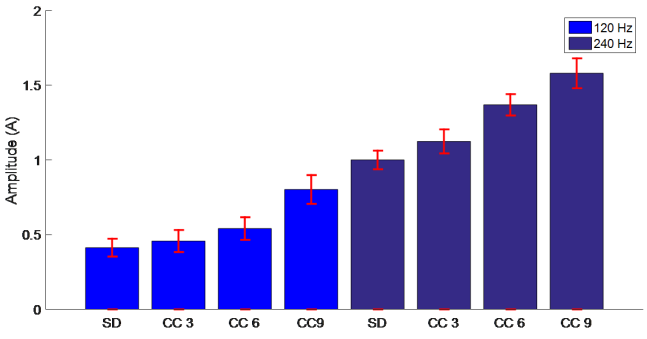

Figura 9. Média e desvio padrão dos HT $2fs4$ e $4fs$.

Tabela 3. Valores correspondentes às médias e desvios padrões dos HT $2fs4$ e $4fs$.

	Média		**Desvio Padrão**	
	$2fs$	$4fs$	$2fs$	$4fs$
Sem Falha	0,4129	1	0,0595	0,0622
CC 3 espiras	0,4574	1,1244	0,0740	0,0805
CC 6 espiras	0,5409	1,3689	0,0756	0,0713
CC 9 espiras	0,8024	1,5803	0,0962	0,1001

3. CONCLUSÃO

O uso do envelope obtido através da Transformação de *Hilbert* combinada com o algoritmo REEA provou ser uma ferramenta poderosa para a detecção do defeito de curto-circuito em um estágio inicial. A análise de resíduos (altas "oscilações" do envelope da corrente) obtidos a partir do envelope da corrente do motor é suficiente para obter as frequências excitadas pela falha. O método proposto mostrou-se robusto, permitindo o diagnóstico inicial de espiras em curto e o monitoramento da evolução da falha com sinais de apenas um segundo de duração.

É importante enfatizar que o diagnóstico e monitoramento de falhas entre espira só é justificado se for contínuo devido à evolução muito rápida para falhas mais graves. Portanto, o método proposto utilizando a REEA é extremamente atrativo para tal propósito, pois é uma ferramenta que requer baixa complexidade computacional e é versátil para a aplicação prática, podendo ser implementada em um ambiente industrial sem grandes restrições, uma vez que requer apenas a medição da corrente em uma fase de alimentação. Para pesquisas futuras sugere-se avaliar o comportamento desta técnica utilizando a corrente das outras fases de alimentação assim como para motores de diferentes potências.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG/INERGE/CAPES pelo apoio financeiro e oportunidade de desenvolver este trabalho. À Universidade Federal de São João de Rei - UFSJ e ao Laboratório de Máquinas e Transformadores - LAMET.

REFERÊNCIAS

Batista, F.B. and Silveira, M.E. (2012). Noise Reduction on Beam Modes Using Extreme Envelope Average. In *SAE Technical Papers*, volume 2012-Novem, 1–6.

Batista, F.B. (2012). One-dimensional smoothing using extreme envelope average. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 432–442.

Batista, F.B., Lamim Filho, P.C.M., Pederiva, R., and Silva, V.A.D. (2016). An Empirical Demodulation for Electrical Fault Detection in Induction Motors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(3), 559–569.

Bonnett, A.H. and Soukup, G.C. (1992). Cause and Analysis of Stator and Rotor Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(4), 921–937.

Choi, D., Kang, T.J., Lee, S.B., Kim, J., and Kim, J. (2018). Stator insulation testing for appliance motors with aluminum windings: Applying solutions to root causes of failure. *IEEE Industry Applications Magazine*, 24(6), 14–24.

Choudhary, A. (2018). Bearing Fault Diagnosis of Induction Motor Using Thermal Imaging. In *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 950–955. IEEE.

Ferreira, F.J. and De Almeida, A.T. (2016). Energy savings potential associated with stator winding connection mode change in induction motors. In *Proceedings - 2016 22nd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2016*, 2775–2783.

Filho, P.C.M.L., Santos, D.C., Batista, F.B., and Baccarini, L.M.R. (2020). Axial Stray Flux Sensor proposal for Three- Phase Induction Motor Fault Monitoring by means of orbital analysis. doi:10.1109/JSEN.2020.2999547.

Frosini, L., Zanazzo, S., and Albini, A. (2016). A wavelet-based technique to detect stator faults in inverter-fed induction motors. In *Proceedings - 2016 22nd International Conference on Electrical Machines, ICEM 2016*, 2917–2923. doi:10.1109/ICELMACH.2016.7732938.

Ghoggal, A., Zouzou, S.E., Razik, H., Sahraoui, M., and Khezzar, A. (2009). An improved model of induction motors for diagnosis purposes - Slot skewing effect and air-gap eccentricity faults. *Energy Conversion and Management*, 50(5), 1336–1347.

Godoy, W.F., Da Silva, I.N., Goedtel, A., and Cunha Palácios, R.H. (2015). Evaluation of stator winding faults severity in inverter-fed induction motors. *Applied Soft Computing Journal*, 32(1), 420–431.

Grubic, S., Aller, J.M., Lu, B., and Habetler, T.G. (2008). A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12), 4127–4136.

Henao, H., Capolino, G.A., and Razik, H. (2003). Analytical approach of the stator current frequency harmonics computation for detection of induction machine rotor faults. In *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003 - Proceedings*, 259–264.

Imoru, O., Arun Bhaskar, M., Abdul-Ganiyu Jimoh, A., and Hamam, Y. (2017). Early Diagnosis of Induction Machine Stator Winding Faults by Discrete Wavelet Transform.

Ishkova, I. and Vítek, O. (2016). Detection and classification of faults in induction motor by means of motor current signature analysis and stray flux monitoring. *Przeglad Elektrotechniczny*, 92(4), 166–170.

Joksimovic, G.M. and Penman, J. (2000). The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(5), 1078–1084.

Karmakar, S. and Al., E. (2016). *Induction Motor Fault Diagnosis*. Springer, 25 edition.

Lamim Filho, P.C., Baccarini, L.M., Batista, F.B., and Alves, D.A. (2018). Broken rotor bar detection using empirical demodulation and wavelet transform: suitable for industrial application. *Electrical Engineering*, 100(4), 2253–2260.

Lamim Filho, P.C., Pederiva, R., and Brito, J.N. (2014). Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1-2), 377–387.

Nandi, S. and Toliyat, H.A. (2002). Novel frequency-domain-based technique to detect stator interturn faults

in induction machines using stator-induced voltages after switch-off. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(1), 101–109.

Puche-Panadero, Rubén, M.P.S., Riera-Guasp, M., Roger-Folch, J., Hurtado-Perez, E., and Perez-Cruz, J. (2013). Improved Resolution of the MCSA Method Via Hilbert Transform, Enabling the Diagnosis of Rotor Asymmetries at Very Low Slip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1), 52–59.

Ramirez-Nunez, J.A., Antonino-Daviu, J.A., Climente-Alarcon, V., Quijano-Lopez, A., Razik, H., Osornio-Rios, R.A., and Romero-Troncoso, R.D.J. (2018). Evaluation of the Detectability of Electromechanical Faults in Induction Motors Via Transient Analysis of the Stray Flux. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 4324–4332.

Sahraoui, M., Ghoggal, A., Zouzou, S.E., and Benbouzid, M.E. (2008). Dynamic eccentricity in squirrel cage induction motors - Simulation and analytical study of its spectral signatures on stator currents. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(9), 1503–1513.

Siddique, A., Yadava, G.S., and Singh, B. (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1), 106–114.

Siddiqui, K.M., Sahay, K., and Giri, V.K. (2017). Stator Inter-turn Fault Detection in Inverter Fed Induction Motor Drives. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, 6(2), 90–103. doi:10.11591/ijape.v6i2.pp90-103.

Singh, G., Kumar, T.C.A., and Naikan, V.N.A. (2016). Infrared Physics & Technology Induction motor inter turn fault detection using infrared thermographic analysis.

Su, H., Chong, K.T., and Ravi Kumar, R. (2011). Vibration signal analysis for electrical fault detection of induction machine using neural networks. *Neural Computing and Applications*, 20(2), 183–194.

Zaparoli, I.O., Rabelo Baccarini, L.M., Lamim Filho, P.C.M., and Batista, F.B. (2020). Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(2), 1–12.

Zhang, P., Du, Y., Habetler, T.G., and Lu, B. (2011). A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(1), 34–46.