

DETECÇÃO DE OSCILAÇÕES EM PROCESSOS INDUSTRIAIS VIA MÉTODO DO ENVELOPE ESPECTRAL PONDERADO

HEITOR G. FARIA, CELSO J. MUNARO, DÉBORA DE SOUZA MARTINS, VINICIUS B. VASCONCELOS

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo

Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910, Vitória, ES, BRASIL

E-mails: hgfarria90@gmail.com , cjmunaro@gmail.com , deborasm539@gmail.com ,
belmuds.eng@gmail.com

Abstract – Oscillation detection is important in industrial processes in order to rapidly eliminate the negative effects caused by oscillations. This paper proposes a new approach based on the spectral envelope method. The spectral envelope is weighted by the oscillation impact aiming to highlight oscillations in signals that cause higher amplitude variation in the process. The energy from each oscillation is analysed and the regularity calculated in order to eliminate oscillations corrupted by noise. The proposed method is applied to case studies using data from oil and gas industry. The industrial case studies demonstrated similar results in consecutive tests even when analysing signals corrupted by noise and high disturbances. These results might direct the effort of technicians to find problems in the industrial control networks affected by the identified oscillations.

Keywords – Process Control, Oscillation detection, Spectral envelope, Coefficient of variation

Resumo – A detecção de oscilações é de grande importância em processos industriais para corrigir rapidamente os seus efeitos nocivos. Uma nova abordagem da aplicação do método do envelope espectral é proposta neste trabalho. O envelope espectral é ponderado pelo impacto da oscilação, com o objetivo de evidenciar as oscilações presentes em sinais que causam maior variabilidade. A energia de cada oscilação é analisada, e junto com um fator de regularidade do sinal, permite descartar oscilações muito contaminadas por ruídos. O método foi aplicado a três estudos de casos utilizando dados industriais de uma unidade estacionária de processamento de óleo e gás. Além de ilustrar a aplicação do método, os resultados mostraram que consegue-se uma boa repetibilidade dos resultados mesmo na presença de ruídos e distúrbios, permitindo direcionar o esforço das equipes de operação para investigar as malhas de controle mais impactadas pela oscilação.

Palavras-chave – Controle de processos, Detecção de oscilações, Envelope espectral, Coeficiente de variação

1 Introdução

Efeitos oscilatórios são problemas comumente encontrados em sinais de malhas de controle industriais. Normalmente estes distúrbios são causados por má sintonia ou estratégia inadequada de controle, distúrbios externos e problemas em equipamentos, como agarramento em válvulas. (Thornhill, Huang e Zhang, 2003; Karra e Karim, 2009).

Segundo Shinskey (1990), o aumento do custo de produção é proporcional à amplitude da componente oscilatória do sinal. Portanto, deve-se investigar a existência de oscilações que, se propagadas entre as diversas malhas de controle de uma planta industrial, podem causar redução de eficiência no processo e diminuição da vida útil dos equipamentos.

Diversos métodos de detecção de oscilações são encontrados na literatura. O método da transformada discreta do cosseno (*Discrete Cosine Transform – DCT*) tem como objetivo isolar as componentes de frequência de uma série temporal através da transformada e verificar a regularidade dos cruzamentos por zero destas componentes (Li, Wang e Huang, 2010; Wang, Huang e Lu, 2013).

O método proposto por Xia e Howell (2005) consiste na Análise das Componentes Independentes

(*Independent Component Analysis - ICA*). Pode-se definir o método ICA como uma extensão da Análise das Componentes Principais (*Principal Component Analysis - PCA*) aplicada ao espectro de potência. O objetivo é encontrar uma representação linear dos dados na qual as componentes sejam estatisticamente independentes.

O método baseado na Função de Auto Correlação (*Auto Correlation Function – ACF*), inicialmente aplicado por Miao e Seborg (1990) e Thornhill, Huang e Zhang (2003), foi também aplicado em conjunto com a análise da Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density – PSD*) por Karra e Karim (2009). No método ACF, verifica-se os cruzamentos por zero da função de auto correlação do sinal e a PSD é utilizada na identificação das frequências dominantes do sinal.

O método proposto em Jiang, Choudhury e Shah (2007) se baseia no envelope espectral (*spectral envelope - SE*) para detecção e diagnóstico de oscilações e o compara com a Análise Espectral das Componentes Principais (*Spectral Principal Component Analysis - SPCA*). O objetivo deste método é encontrar a transformação linear ótima da série temporal que destaque a natureza periódica no domínio da frequência, destacando oscilações e atenuando os ruídos. Sua grande vantagem é usar apenas uma curva para representar o espectro

presente em todos os sinais analisados.

O presente trabalho tem como objetivo propor uma abordagem alternativa ao método envelope espectral, através de um envelope obtido a partir da ponderação da PSD dos sinais pelos seus coeficientes de variação (CV), de forma a considerar o impacto das oscilações na análise. Na seção 2 é apresentada a metodologia de cálculo do envelope espectral, do coeficiente de variação e da PSD. Na seção 3, são detalhadas as etapas do método proposto para a detecção de oscilações utilizando o envelope ponderado. Na seção 4, são mostrados os resultados da aplicação do algoritmo desenvolvido em dados das malhas de um processo industrial. Por fim, as conclusões são apresentadas na seção 5.

2 Cálculo do Envelope Espectral

2.1 Envelope Espectral (Jiang, Choudhury e Shah, 2007)

Considere a matriz \mathbf{X} composta por m sinais $\mathbf{x}(t)$ no domínio no tempo de comprimento n ,

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(t) \mathbf{x}(t + 1) \dots \mathbf{x}(t + n)] \quad (1)$$

Usando a matriz de dados \mathbf{X} , são calculados a matriz de covariância V_x e a Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density* - PSD) $P_x(\omega)$.

O envelope espectral de potência é dado por

$$\lambda(\omega) = \sup \left\{ \frac{\boldsymbol{\beta}^* P_x(\omega) \boldsymbol{\beta}}{\boldsymbol{\beta}^* V_x \boldsymbol{\beta}} \right\} \quad (2)$$

onde $-\frac{1}{2} < \omega \leq \frac{1}{2}$ e $\boldsymbol{\beta}$ é um vetor $m \times 1$ que pode ser real ou complexo e que associado ao sinal no tempo, gera a combinação linear das linhas dos sinais $\mathbf{x}(t)$.

A grandeza $\lambda(\omega)$ representa a maior porção de potência que pode ser obtida na frequência ω para qualquer série escalar. O vetor $\boldsymbol{\beta}(\omega)$ é o vetor ótimo de escalonamento na frequência ω .

O envelope espectral que será utilizado neste trabalho é obtido a partir de uma estimação do envelope original. Neste caso, os sinais utilizados são normalizados a fim de simplificar os cálculos, originar resultados facilmente interpretáveis e comparáveis entre diferentes sinais, além de obter elementos de $\boldsymbol{\beta}(\omega)$ mais significativos. (Jiang, Choudhury e Shah, 2007):

Com os dados em \mathbf{X} normalizados, pode-se estimar o periodograma dos sinais, a partir da transformada de Fourier,

$$\hat{I}_n(\omega_k) = \frac{1}{n} M M^* \quad (3)$$

onde $M = [\sum_{t=0}^{n-1} \mathbf{x}(t) \exp(-2\pi i t \omega_k)]$.

Para que esta estimativa seja consistente, aplica-se a suavização utilizando o cálculo da média móvel

do periodograma, que resulta em

$$\hat{P}_x(\omega_k) = \sum_{j=-r}^r h_j \hat{I}_n(\omega_{k+j}) \quad (4)$$

onde h_j são pesos simétricos ($h_j = h_{-j}$) positivos para cada ponto da PSD, de forma que: $\sum_{j=-r}^r h_j = 1$.

O parâmetro r corresponde ao grau de suavização da PSD e deve ser escolhido de forma que a suavização não elimine os picos a serem analisados.

A estimativa do envelope espectral, portanto é obtida a partir da matriz de covariância estimada (\hat{V}_x) e da estimativa da PSD (\hat{P}_x):

$$\hat{\lambda}(\omega_k) = \sup_{\boldsymbol{\beta} \neq 0} \left\{ \frac{\boldsymbol{\beta}^* \hat{P}_x(\omega_k) \boldsymbol{\beta}}{\boldsymbol{\beta}^* \hat{V}_x \boldsymbol{\beta}} \right\} \quad (5)$$

2.2 Utilização do CV para eliminar oscilações de pequena amplitude

Oscilações que apresentam pequena amplitude não trazem muitos problemas para a operação de uma planta industrial. Entretanto, como os sinais são normalizados, os métodos de detecção de oscilações indicam todas oscilações presentes. Para eliminar da análise estes sinais, propõe-se o uso de um limiar baseado no coeficiente de variação (CV) dos sinais, calculado em porcentagem por:

$$CV = 100 \frac{\sigma}{\mu} \quad (6)$$

sendo σ e μ respectivamente o desvio padrão e a média dos sinais analisados (Wang, Huang e Lu, 2013). O limiar para o CV deve ser discutido com a equipe de operação, que sabe quantificar o impacto das oscilações, podendo ser diferente para malhas de controle de diferentes tipos. Em malhas de nível tipo pulmão, por exemplo, grandes variabilidades são permitidas sendo necessárias para absorver variações na produção. O uso do CV como fator de ponderação permite evidenciar as oscilações presentes em sinais que causam maior variabilidade, descartando as de menor impacto. É importante destacar que o CV é calculado antes da normalização dos sinais, que é uma etapa necessária antes do cálculo da PSD..

2.3 Limitações do método do envelope espectral

O cálculo do envelope espectral, dado pelas Equações 3, 4 e 5, requer a normalização dos sinais e não permite a inclusão de uma ponderação destes sinais pelo CV. Outra limitação do método do envelope espectral de Jiang, Choudhury e Shah (2007) está relacionada a dificuldade de indicar os sinais nos quais as oscilações estão presentes. O método foi aplicado por Vieira, Munaro e Lyra, (2016) e apresentou falsas detecções quando aplicado

a dados industriais.

2.4 Proposta para o cálculo do envelope ponderado

Diante das limitações citadas para inclusão do CV no cálculo do envelope de Jiang, Choudhury e Shah (2007), a PSD dos sinais foi calculada através da transformada de Fourier dos sinais auto correlacionados (Thornhill et al, 2003),

$$\Phi_x(\omega_k) = \sum_{k=0}^N r_{xx}(k) e^{-i2\pi\omega_k} \quad (7)$$

O envelope espectral ponderado foi calculado somando a PSD dos sinais ponderada pelos seus respectivos valores de CV, através de

$$\lambda_p(\omega_k) = \sum_{i=1}^L D_{CV} * \Phi_x(\omega_k) \quad (8)$$

onde L é o tamanho do vetor contendo a PSD e D_{CV} é a matriz diagonal contendo o CV dos sinais na diagonal. Com esta expressão, a PSD cujos sinais têm maior CV terão maior participação na amplitude do envelope, evidenciando os picos que devem ser investigados. Este método tem a desvantagem de não incluir a matriz de covariância dos sinais (equação 5), que contribui para reduzir o efeito do ruído. Isto será compensado usando um limiar de energia para descartar as partes do espectro com comportamento muito próximo do ruído.

3 Proposta para detecção de oscilações baseado no envelope espectral ponderado

Os passos para detectar oscilações usando o envelope espectral ponderado são:

1. Pré-processamento dos sinais
2. Cálculo do CV de cada sinal
3. Descarte dos sinais com CV menor que o limiar
4. Cálculo da PSD de cada sinal
5. Cálculo do envelope espectral ponderado
6. Determinação dos intervalos de frequência do envelope espectral que podem corresponder a oscilações
7. Descarte dos intervalos de frequências cuja energia seja menor que um limiar
8. Para cada PSD de sinal em análise, verificar se a energia do PSD de cada intervalo de frequências é maior que um limiar. Sendo maior, fazer a IFFT e verificar a regularidade dos cruzamentos por zero
9. Determinar o período da oscilação detectada através do valor médio do intervalo de frequências analisado (passo 6).
10. Gerar uma matriz com frequências de oscilação detectadas e sinais onde foram encontradas.

No pré-processamento dos sinais são eliminadas tendências, *outliers*, mudanças de ponto de operação e distúrbios que geram grandes contribuições em baixas frequências e tendem a ocultar oscilações que devem ser detectadas. Como segmentos de diferentes tamanhos podem ser gerados a partir desta etapa, os de menor tamanho são completados com zeros (*zero-padding*) para que a PSD de todos os sinais tenha o mesmo comprimento na equação (8).

O CV é calculado no passo 2, usando o segmento de dados selecionado, sendo eliminados no passo 3 aqueles sinais cujo CV seja menor que um limiar definido. Calcula-se a PSD dos sinais selecionados utilizando a Equação 7.

No passo 5 é calculado o envelope espectral somando a PSD dos sinais ponderados pelos seus respectivos CV, utilizando a Equação 8. Um envelope não ponderado é também obtido para usar no passo 7. Para selecionar os intervalos de frequência a serem investigados no passo 6, uma busca por intervalos é feita usando uma reta paralela a abscissa do envelope que inicia no maior valor do envelope e diminui em passos discretos até que vários picos sejam encontrados, indicando a presença de espectros devido a ruído. A interseção da reta com o envelope no passo anterior ao passo que encontra ruídos é utilizada para obter os intervalos de frequência que serão investigados. A energia do envelope não ponderado (pelo CV) em cada um dos intervalos é obtido integrando as contribuições em cada frequência do intervalo, sendo eliminados aqueles nos quais a soma das energias for inferior a um determinado limiar. Esta etapa permite desprezar oscilações de pequeno impacto quando comparadas a energia do espectro. Oscilações bem definidas têm energia próxima a 100%. Quando a energia é menor que 20%, a oscilação em geral é muito contaminada por ruído, e sua inclusão nas frequências detectadas interfere muito na repetibilidade das análises.

A energia da PSD é obtida através do cálculo da área abaixo das curvas de cada banda, conforme Equação 9 (Koopmans, 1995).

$$Energia = \sum_{f=f_L}^{f_U} \Phi(f) \quad (9)$$

onde f_L e f_U delimitam o intervalo de frequência e Φ é a PSD do sinal. Analogamente, a energia do envelope não ponderado pode ser obtida através da área sob a curva do envelope. Quando a energia de um determinado intervalo de frequências deste envelope espectral for inferior a um limiar, pode-se concluir que a energia de cada PSD adicionado para obter o mesmo também é inferior ao limiar. A partir da experiência dos autores, foi definido o limiar de 20% de energia para que um intervalo de frequências fosse investigado.

No passo 8, a PSD de cada sinal terá sua energia verificada para o intervalo definido. Caso a energia da PSD seja superior ao limiar, calcula-se a inversa da transformada de Fourier do intervalo (IFFT) e em

seguida verifica-se a regularidade dos 8 primeiros cruzamentos por zero. A regularidade é calculada pela Equação 10 (Thornhill et al., 2003), onde \bar{T}_p é a média e σ_{T_p} é o desvio padrão dos períodos. Uma oscilação é considerada regular caso R seja maior que 1.

$$R = \frac{1}{3} \frac{\bar{T}_p}{\sigma_{T_p}} \quad (10)$$

Quando uma oscilação regular é identificada no intervalo analisado (passo 8), o período da oscilação detectada é definido como o valor médio das frequências do intervalo (passo 9). A verificação da energia e da regularidade é feita em cada sinal, permitindo identificar os sinais nas quais está presente, sem a necessidade de testes estatísticos como em Jiang et al.(2007). No passo 10 é gerada uma matriz contendo as frequências das oscilações detectadas e os sinais onde elas foram encontradas.

4 Aplicação a dados de um processo industrial

O algoritmo proposto foi implementado utilizando o software *Matlab*. O método foi aplicado em dados industriais de uma unidade estacionária de produção de óleo e gás da Petrobrás. Foram coletados dados com uma taxa de amostragem de 10s para todas as análises. Na presente seção foram utilizados gráficos de espectro com unidades das abcissas em segundos e não em Hz, para melhor interpretação dos resultados. O limiar escolhido para o CV em conjunto com a equipe de operação foi de 0,7%. Para a energia, o limiar escolhido em todos os casos foi 20%.

4.1 Primeiro estudo de caso

O primeiro estudo de caso visa ilustrar as etapas do método proposto. Para isto foram utilizados 5 sinais coletados durante 6 horas. A Figura 1 mostra os sinais no tempo e o CV de cada um dos 5 sinais utilizados.

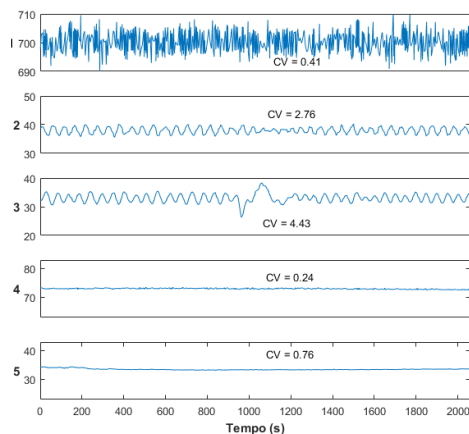


Figura 1. Sinais no tempo e CV do primeiro estudo de caso

Na Figura 1 pode-se perceber que os sinais 1 e 4 foram descartados por terem CV abaixo do limiar. A PSD dos sinais selecionados foi calculada e ponderada pelo respectivo CV, resultando no envelope espectral mostrado na Figura 2. Apenas um intervalo de frequência foi identificado para investigação de oscilações no passo 6. O intervalo [500,555] segundos é investigado, por ter energia de 82%, maior que o limiar.

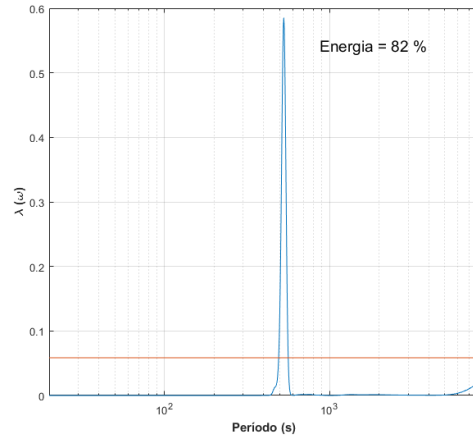


Figura 2. Envelope espectral ponderado do primeiro estudo de caso

A Figura 3 mostra a análise feita em cada PSD com o intuito de identificar oscilações acima do limiar de energia dentro dos intervalos da etapa anterior (passo 8). Os intervalos destacados em verde possuem energia acima do limiar de 20%

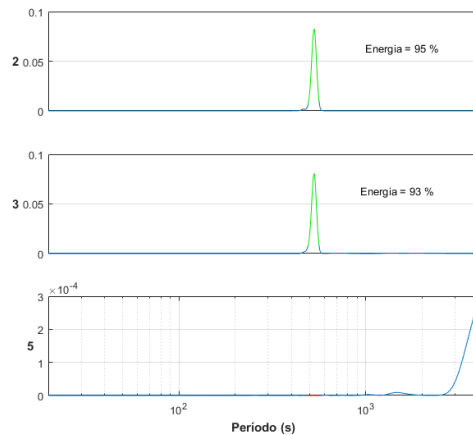


Figura 3. Investigação de oscilações na PSD de cada sinal

De acordo com a Figura 3, não foram encontradas oscilações no intervalo de frequência especificado para o sinal 5. Já os sinais 2 e 3 tiveram oscilações relevantes neste intervalo. Para verificar a regularidade, calculou-se a Transformada Inversa de Fourier para o intervalo [500,555] segundos em cada PSD. Os resultados da regularidade obtidos para os sinais 2 e 3 foram, respectivamente, 273 e 216, sendo ambos considerados regulares. Conclui-se que os sinais 2 e 3 têm uma oscilação com período de 523 segundos, que é o valor médio do intervalo, o que é evidenciado pela observação da Figura 1.

4.2 Segundo estudo de caso

O segundo estudo de caso tem o objetivo de realizar análises em intervalos subsequentes de dados e verificar a característica de repetibilidade do algoritmo. Para isto, foram utilizados dados de 18 horas, divididos em 3 intervalos de 6 horas cada.

Na Figura 4 são mostrados os envelopes espectrais das 3 análises. Os intervalos encontrados nos envelopes espectrais das 3 análises foram: [454,526] segundos, [476,555] segundos e [500,555] segundos.

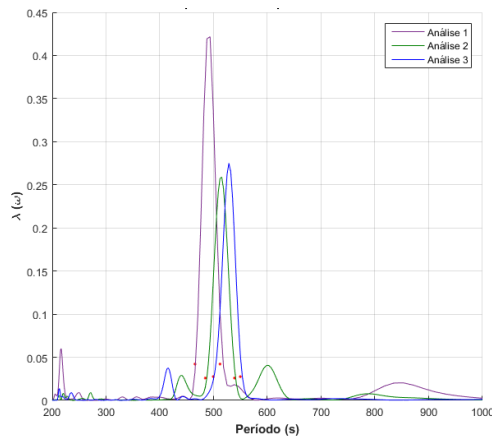


Figura 4. Envelopes espectrais para os três intervalos, segundo estudo de caso

A proximidade dos intervalos dos períodos das três análises confirma a repetibilidade dos resultados. A verificação de energia foi realizada em cada PSD para os intervalos e o teste de regularidade foi executado. Os períodos referentes as oscilações detectadas nas análises 1, 2 e 3 foram respectivamente: 500 segundos, 510 segundos e 523 segundos. Percebe-se que são valores próximos, ou seja, confirmam a presença de uma mesma oscilação de período aproximadamente 500s. É importante destacar que o valor exato do período de oscilação não é relevante para este tipo de análise, e que pequenas variações são esperadas em análises subsequentes.

A Tabela 1 sintetiza os resultados obtidos, mostrando em quais sinais esta oscilação foi detectada, considerando que os sinais 4 e 5 foram eliminados das análises pelo critério do CV.

Tabela 1. Sinais onde a oscilação com período de 500s foi encontrada no segundo estudo de caso

	Análise 1	Análise 2	Análise 3
Sinal 1		x	
Sinal 2	x	x	x
Sinal 3	x	x	x

A oscilação não foi encontrada no sinal 1 nas análises 1 e 3, pois a energia da PSD nestas análises foi de 6,4% e 3%, respectivamente, sendo igual a 22% na análise 2.

4.3 Terceiro estudo de caso

O terceiro estudo de caso tem como objetivo verificar a repetibilidade dos resultados e o efeito da presença de intensos distúrbios. Foram utilizados 10 sinais coletados durante 24h, divididos em 3 intervalos de 8h, sendo eles [0,2880] segundos, [2881,5760] segundos e [5760,8640] segundos (Figura 5).

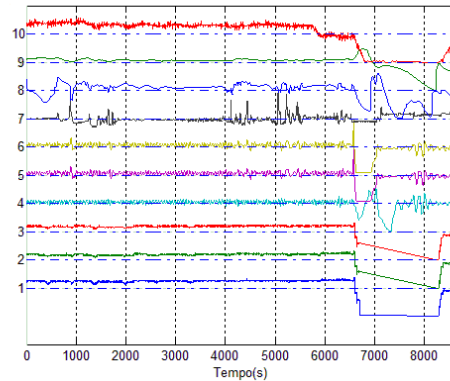


Figura 5. Sinais no tempo para o terceiro estudo de caso

Verifica-se a presença de intensos distúrbios no terceiro intervalo, sendo muito importante manter nas amostras analisadas neste intervalo apenas aqueles variando em torno de um valor médio, descartando as variações bruscas que afetariam muito o espectro. A Figura 6 mostra os envelopes espectrais para as 3 análises após a pré-seleção dos dados.

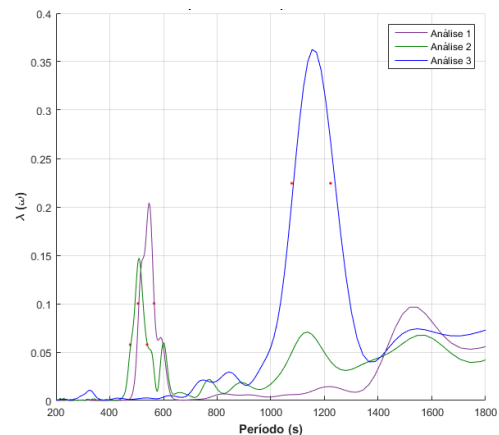


Figura 6. Envelopes para os três intervalos, terceiro estudo de caso

Nas análises 1 e 2, os sinais 4, 7, 9 e 10 foram eliminados pelo critério do CV. Na terceira análise, mais afetada pelos distúrbios, foram eliminados os sinais 1 e 10. Dos sinais restantes, foram identificados 3 intervalos através do envelope: [508,565] segundos, [480,538] segundos e [1082,1240] (ver Figura 6). Os períodos das oscilações detectadas nas 3 análises foram respectivamente: 536s, 509s e 1160s. Devido ao valor próximo encontrado nas análises 1 e 2 considera-se uma mesma oscilação com período de aproximadamente 500s. Na terceira análise, afetada por distúrbios, a mesma oscilação não foi detectada. Isto ocorreu pois parte dos dados utilizados na

terceira análise foram removidos na seleção de dados, o que mostra a importância da realização da etapa de pré-processamento dos sinais antes de utilizar o algoritmo proposto. O percentual de dados mantidos em cada análise é um indicativo da confiabilidade da análise.

A Tabela 2 sintetiza os resultados do terceiro estudo de caso.

Tabela 2. Sinais onde a oscilação com período de 500s foi encontrada no terceiro estudo de caso

	Análise 1	Análise 2	Análise 3
Sinal 5	x	x	
Sinal 6	x	x	

A oscilação em torno de 500s foi detectada nas análises 1 e 2 nos sinais 5 e 6. Já na terceira análise esta mesma oscilação não foi detectada. A oscilação com período 1160s foi detectada apenas na análise 3, sendo provavelmente o resultado dos intensos distúrbios.

5 Conclusão

Foi apresentada uma proposta de metodologia para detecção de oscilações a partir do cálculo do envelope espectral ponderado pelo coeficiente de variação dos sinais. O objetivo da metodologia é detectar e indicar apenas as oscilações que efetivamente causam impacto nas malhas de controle, e que precisam ter suas causas investigadas. Um limiar para este impacto pode ser definido pelas equipes de operação, podendo ser único ou específico por tipo de malha de controle.

O uso de um limiar para a energia da oscilação detectada visou eliminar as oscilações muito contaminadas por ruído. Além de serem oscilações menos definidas, elas afetam a repetibilidade e assim a credibilidade dos resultados das análises. O método indica todos os sinais nos quais a oscilação está presente.

A aplicação da metodologia a uma unidade estacionária de produção de óleo e gás da Petrobrás, com sinais muito contaminados por distúrbios, permitiu ilustrar as características desejadas do método. Sinais com baixo CV ou energia foram eliminados, e a repetição da análise em intervalos de dados subsequentes resultou na detecção das mesmas frequências de oscilação, com exceção do caso em que os dados do intervalo em análise estavam muito contaminados por distúrbios.

Destaca-se que nenhuma propriedade estatística é requerida sobre os dados, pois nenhum teste estatístico é feito sobre os mesmos após calcular seu espectro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio

financeiro ao projeto e pelos dados fornecidos. Agradecem também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pela bolsa de um dos participantes.

Referências Bibliográficas

- Jiang, H., Choudhury, M.S. and Shah, S.L., 2007. Detection and diagnosis of plant-wide oscillations from industrial data using the spectral envelope method. *Journal of Process Control*, 17(2), pp.143-155.
- Karra, S. and Karim, M.N., 2009. Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops. *Control Engineering Practice*, 17(8), pp.939-956.
- Koopmans, L.H., 1995. *The spectral analysis of time series*. Academic press.
- Li, X., Wang, J., Huang, B. and Lu, S., 2010. The DCT-based oscillation detection method for a single time series. *Journal of Process Control*, 20(5), pp.609-617.
- Miao, T. and Seborg, D.E., 1999. Automatic detection of excessively oscillatory feedback control loops. In *Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on (Vol. 1)*, pp. 359-364.
- Shinsky, F.G., 1990. How good are our controllers in absolute performance and robustness?. *Measurement and Control*, 23(4), pp.114-121.
- Thornhill, N.F., Huang, B. and Zhang, H., 2003. Detection of multiple oscillations in control loops. *Journal of Process Control*, 13(1), pp.91-100.
- Vieira Junior, R.; Munaro, C. J., Silveira, M. L. Comparação de métodos para detecção de oscilações em processos industriais. XXI Congresso Brasileiro de Automática, 2016.
- Wang, J., Huang, B. and Lu, S., 2013. Improved DCT-based method for online detection of oscillations in univariate time series. *Control Engineering Practice*, 21(5), pp.622-630.
- Xia, C. and Howell, J., 2005. Isolating multiple sources of plant-wide oscillations via independent component analysis. *Control Engineering Practice*, 13(8), pp.1027-1035.