

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS PARA DETECÇÃO DE OSCILAÇÕES EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

ROBERTO VIEIRA JÚNIOR, CELSO J. MUNARO, MARIANA L. SILVEIRA

*Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910, Vitória, ES, BRASIL*

*E-mails: robertovieirajunior@gmail.com, munaro@ele.ufes.br,
marianalyrasilveira@gmail.com*

Abstract— Detecting the presence of oscillations in industrial processes allows to quickly correcting the damaging effects that they produce. Four important methods in the literature are analysed and compared in this article: Autocorrelation Function, Spectral Envelope, Independent Component Analysis and Discrete Cosine Transform. The comparison is made with signals of an industrial plant with multiple oscillation frequencies, the presence of noise and disturbances, and oscillations of different amplitudes. Considering the operations staff requirements, proposals are presented to the different methods to characterize the oscillations that most impact in the variability of the signals analyzed, guiding staff to quickly identify their sources.

Keywords— detection of oscillations, plant-wide oscillations, Fourier transform, ACF, DCT, spectral envelope, ICA.

Resumo— Detectar a presença de oscilações em processos industriais permite corrigir rapidamente seus efeitos nocivos. Quatro importantes métodos da literatura são analisados e comparados neste artigo: Função de Autocorrelação, Envelope Espectral, Análise de Componentes Independentes e Transformada Discreta de Cosseno. A comparação é feita com sinais de uma planta industrial com múltiplas frequências de oscilação, presença de ruídos e distúrbios, e oscilações de diferentes amplitudes. Considerando-se os requisitos de equipes de operação, propostas são apresentadas aos diferentes métodos para caracterizar as oscilações que mais impactam na variabilidade dos sinais analisados, orientando as equipes para a rápida identificação de suas fontes.

Palavras-chave— detecção de oscilações, oscilações em plantas, transformada de Fourier, ACF, DCT, envelope espectral, ICA.

1 Introdução

Oscilações são comuns em processos industriais e decorrem de problema tais como má sintonia de controladores, válvulas de controle com agarramento e estratégias de controle inadequadas. Elas causam aumento da variabilidade da qualidade do produto, redução do tempo de vida útil dos equipamentos, redução da produção e até a interrupção da operação da planta (Karra e Karim, 2009). Nesse sentido, métodos para detecção de oscilações em malhas de controle industrial foram propostos e 4 têm se destacado na literatura: ACF (*Autocorrelation Function*), DCT (*Discrete Cosine Transform*), SE (*Spectral Envelope*) e ICA (*Independent Component Analysis*).

O método ACF foi utilizado por Thornhill et al. (2003) e Karra e Karim (2009), onde a densidade espectral de potência (PSD) foi utilizada heurística-mente para analisar as frequências de oscilação dominantes do sinal e para filtrá-las. A automação da filtragem para separar as diversas frequências de oscilação do sinal baseou-se na análise do sinal no tempo e no emprego de um algoritmo de agrupamento de frequências próximas. A ACF dos sinais filtrados é obtida a partir da inversa da transformada de Fourier. A aplicação da DCT para detecção de oscilações foi proposta em Li et al. (2010) e aperfeiçoada em Wang et al. (2013). A DCT possui a descorrelação e a compactação de energia como características principais para a detecção de oscilações, permitindo que diferentes componentes de frequência presentes no sinal possam ser representadas por poucos coeficientes

descorrelacionados.

O método SE foi proposto por Jiang et al. (2007) e realiza uma combinação linear ótima em um conjunto de sinais, destacando as oscilações e atenuando os ruídos.

O ICA foi empregado por Xia e Howell (2005) e é uma extensão da abordagem de análise de componentes principais para identificação de espectros com padrões semelhantes (Thornhill et al., 2002).

Este artigo tem como objetivo comparar os quatro algoritmos para a detecção de oscilações e perturbações em uma Unidade Estacionária de Produção de Óleo e Gás (UEPOG) da Petrobras, visando validá-los e aprimorá-los. A seção 2 introduz a metodologia a ser seguida para configuração dos diversos parâmetros que devem ser ajustados nos métodos. A seção 3 apresenta o estudo de caso considerado, e na seção seguinte é feita a conclusão deste trabalho.

2 Metodologia

Apresenta-se aqui a metodologia utilizada para configuração de parâmetros dos métodos utilizados, bem como as modificações efetuadas nos algoritmos. Por restrição de espaço, os métodos não são apresentados. O leitor pode consultar as referências citadas na seção anterior para o seu detalhamento.

2.1 Frequência de corte do filtro de pré-tratamento dos sinais

Antes da aplicação dos métodos, um filtro passa

faixa é utilizado com o objetivo de eliminar distúrbios e ruídos em frequências altas. O limiar superior é escolhido com o objetivo de eliminar frequências próximas da frequência de amostragem do sinal (1Hz/Hz), sendo usado o limiar de 0,99Hz/Hz proposto em Karra e Karim (2009). A escolha da frequência de corte inferior do filtro é feita avaliando os espectros dos sinais monitorados, de modo a filtrar o espectro de baixa frequência associado a distúrbios, caracterizados por bandas largas de frequência.

2.2 Tratamento de Vazamento Espectral

Um grande número de frequências pode ser detectado quando o vazamento espectral está presente. Esse fenômeno ocasiona o surgimento de múltiplos picos próximos para uma única frequência original do sinal e pode dificultar a caracterização de oscilações que possuam pouca energia, quando múltiplas frequências estão presentes no sinal.

Para mitigar esse problema utiliza-se uma estimativa suavizada da PSD obtida a partir de uma janela espectral ponderada consistente (Uitert, 1978; Jiang et al. 2007). As janelas de Hamming e de Gauss são as que mostraram melhores resultados para os dados utilizados. Adicionalmente, a janela Gaussiana permite ajustar o efeito desse tratamento. O aumento do efeito melhora o vazamento espectral, porém atenua a energia de oscilação, de modo que sua escolha deve ser feita a partir da avaliação dos espectros dos sinais a serem monitorados, objetivando a eliminação dos múltiplos picos espectrais próximos.

O algoritmo empregado no método DCT não utiliza a PSD dos sinais e, desse modo, ele não prevê nenhum tipo de suavização.

2.3 Parâmetros específicos de cada método

2.3.1 Método ACF

O método ACF tem dois limiares que são aplicados na PSD do sinal com o objetivo de separar o ruído das frequências dominantes. O primeiro limiar, $\mathcal{E}_p$, analisa a potência da PSD, determinando bandas de frequência relevantes para a análise do comportamento oscilatório do sinal. As frequências inferiores (f_L) e superiores (f_U) das bandas selecionadas são determinadas pela interseção de $\mathcal{E}_p$ com o gráfico da PSD do sinal. Esse limiar é calculado a partir da média (μ_{PSD}) e do desvio padrão (σ_{PSD}) da PSD analisada.

O segundo limiar verifica a energia das bandas selecionadas, descartando aquelas com energia inferior ao limiar. As energias são calculadas como as áreas sob as curvas delimitadas por cada banda.

2.3.2 Método DCT

O método DCT adota dois limiares com o objetivo de minimizar os efeitos indesejados de ruídos

presentes no sinal. Inicialmente, utiliza-se um limiar maior calculado a partir do desvio padrão (σ_{DCT}) da DCT do sinal, para separar a transformada em diversos segmentos. Esses segmentos são levados de volta ao domínio do tempo e são avaliados por um teste de regularidade do período de oscilação. Aqueles que passarem no teste são considerados como candidatos a oscilações. A utilização de um limiar maior se faz necessária para evitar que segmentos muito estreitos sejam selecionados de forma automática pelo algoritmo (segmentos estreitos geram uma senoide quase perfeita após a aplicação da DCT inversa sobre eles, ocasionando falsas detecções).

O segundo limiar, de valor menor, também calculado a partir de σ_{DCT} , tem o objetivo de descartar eventuais falsas detecções ocasionadas por ruídos ou distúrbios. Esse limiar aumenta a largura do segmento, fazendo com que componentes descartadas anteriormente originadas de ruídos (e que fizeram com que o segmento passasse no teste de regularidade) sejam incluídas e avaliadas em um novo teste.

A escolha do primeiro limiar deve ser feita a partir da avaliação das transformadas dos sinais monitorados, preservando os segmentos com picos mais significativos e eliminando os efeitos de ruídos (componentes com coeficientes de menores valores). O segundo limiar deve ser escolhido com o objetivo de preservar um maior número de coeficientes em torno dos maiores picos, mas mantendo a separação entre os diferentes segmentos definidos pelo primeiro limiar.

2.3.3 Método SE

O método SE possui um limiar similar ao parâmetro $\mathcal{E}_p$, utilizado no método ACF, que tem o objetivo de descartar pequenos picos associados a componentes ruidosos no gráfico com o envelope espectral do conjunto de sinais. Como os picos de frequências no envelope decorrentes da atividade oscilatória são afastados da média da distribuição estatística do envelope, o valor desse limiar é determinado a partir de sua média (μ_{SE}) e de seu desvio padrão (σ_{SE}).

2.3.4 Método ICA

Após a decomposição do sinal em componentes independentes (ICs), deve ser avaliado se as ICs obtidas correspondem a uma componente oscilatória ou a um sinal ruidoso. Essa avaliação é efetuada a partir da quantidade de picos que ultrapassam um limiar calculado a partir da média (μ_{IC}) e do desvio padrão (σ_{IC}) da IC analisada e da energia desses picos.

Outra configuração a ser ajustada é o número de ICs que devem ser incluídas no modelo para representar de forma satisfatória o conjunto de espectros. Esse ajuste é efetuado de forma indireta a partir da escolha do percentual da variabilidade do espectro que pode ser explicado por um modelo de componentes principais (PCA), onde o número de ICs será a quantidade de componentes principais necessárias.

2.4 Teste de regularidade das oscilações

Uma vez detectadas as frequências de oscilação, deve-se avaliar se os correspondentes sinais no tempo apresentam regularidade dos períodos, verificando os cruzamentos por zero.

O método ACF utiliza como indicador o índice de regularidade de períodos (Thornhill et al., 2003), que considera o período regular caso seu valor médio seja superior a três vezes o seu desvio padrão, utilizando para isso os oito primeiros períodos calculados.

Para o método DCT, Li et al. (2010) também propõe a utilização do índice de regularidade dos períodos, enquanto que Wang et al. (2013) apresenta uma evolução para esse índice, baseada no coeficiente de variação (CV), definido abaixo:

$$CV = \frac{\sigma_p}{\mu_p} \quad (1)$$

O CV mede a dispersão da distribuição de probabilidade do sinal, ou mais especificamente a variabilidade relativa à média. Gulhar et al. (2012) avaliou de forma empírica a distribuição do CV e propôs o seguinte intervalo de confiança:

$$\frac{\hat{CV} \sqrt{L-1}}{\sqrt{\chi^2_{L-1, 1-\alpha/2}}} < CV < \frac{\hat{CV} \sqrt{L-1}}{\sqrt{\chi^2_{L-1, \alpha/2}}} \quad (2)$$

onde $\hat{CV} = \sigma_T / \mu_T$, μ_T e σ_T são as estimativas da média e do desvio padrão do sinal, L é o tamanho da amostra, α está associado ao intervalo de confiança e $\chi^2_{L-1, \alpha/2}$ é a 100 $\alpha/2$ percentagem de uma distribuição chi-quadrada com $L-1$ graus de liberdade. O teste revisado tem a seguinte forma:

$$R_{T, \alpha} = \frac{\sqrt{\chi^2_{L-1, \alpha/2}}}{\sigma_T / \mu_T \sqrt{L-1}} > 3 \quad (3)$$

Os métodos SE e ICA não foram propostos originalmente com mecanismos para verificação da regularidade das oscilações detectadas, pois ambos processam as informações de todos os sinais avaliados de forma conjunta, não sendo efetuada uma análise individual de cada sinal. Desse modo, após a aplicação dos métodos SE ou ICA e de posse das oscilações identificadas em cada sinal, é proposta aqui a utilização de um método de verificação de regularidade que utilize como base a PSD individual de cada sinal. As bordas dos filtros passa faixa que serão utilizados para separar as frequências dominantes presentes no sinal são definidas de modo que fiquem centralizadas entre cada par de bandas de frequência selecionadas por um limiar calculado a partir da média e do desvio padrão da PSD individual.

Foi avaliada também a possibilidade de utilização do envelope espectral e das respectivas componentes independentes para definição do limiar e das bordas dos filtros. No entanto, essa abordagem resultou em filtros com larguras de faixa mais amplas, que resultaram no descarte indevido de oscilações cuja regularidade havia sido comprovada por outros métodos. Tal característica ocorre porque o envelope e as ICs possuem características do conjunto total de sinais,

cujos gráficos representando as características espectrais apresentam picos com uma base mais alargada que no caso das PSD individuais.

2.5 Agrupamento das oscilações

É necessário agrupar as oscilações, já que elas se propagam pelas malhas próximas e podem ser detectadas com frequências ligeiramente diferentes. Um método foi proposto em Thornhill et al. (2003), no qual dois períodos podem ser agrupados se:

$$\frac{T_{p1} - T_{p2}}{\max(\sigma_1, \sigma_2)} < 1 \quad (4)$$

onde T_{p1} e T_{p2} representam os períodos dos sinais e σ_1 e σ_2 são seus desvios padrões. O agrupamento das frequências pode ser controlado através da multiplicação do desvio padrão por um escalar (K_σ), podendo ser incluídas em um mesmo grupo períodos com menor desvio padrão, aumentando assim o agrupamento das frequências próximas.

2.6 Amplitude das oscilações

Oscilações que apresentem baixa variabilidade (pequena amplitude) tendem a não trazer muitos transtornos para a operação da planta e por isso a sua detecção e exibição não são de interesse do pessoal de operação. Desse modo, é proposta a aplicação de um limiar seletivo para avaliação da variabilidade das oscilações identificadas. São utilizados filtros passa faixa para separar as oscilações dominantes detectadas em cada sinal, muito importantes em sinais com múltiplas frequências de oscilação. Após a filtragem, é calculada a variabilidade média das amplitudes de cada oscilação em relação ao valor médio do sinal.

No processo de avaliação das amplitudes das oscilações é importante que seja efetuado o descarte da parte inicial do sinal filtrado, já que eles são afetados pelo efeito transitório dos filtros. Em geral, o descarte dos dados equivalentes aos cinco primeiros períodos da oscilação avaliada elimina esse efeito.

3 Estudo de Caso

Os 4 métodos de detecção de oscilações foram aplicados sobre os 12 sinais mostrados na Figura 1(a), que foram coletados de uma Unidade Estacionária de Processamento de Óleo e Gás da Petrobras a cada 5s, tendo sido utilizadas 5000 amostras de cada sinal. O tamanho de 25000 segundos para a janela de dados foi selecionado conforme recomendação de Thornhill e Hagglund (1997), que prevê um tamanho de 50 vezes o período da oscilação presumida (análises preliminares das PSDs dos sinais indicaram a existência de oscilações de períodos aproximados de 200 e 450 segundos na maioria dos sinais analisados). Foram selecionados sinais com características oscilatórias, incluindo frequências distintas sobrepostas (sinais 1 a 6), sinais corrompidos por distúrbios

(sinais 7 a 10) e sinais com presença de oscilações de pequena amplitude (sinais 11 e 12), visando avaliar o comportamento dos métodos nessas condições.

A Figura 1(b) apresenta as PSDs dos 12 sinais com a remoção das médias, enquanto que a Figura 1(c) mostra as PSDs após a aplicação de um filtro passa-faixa e suavização. A frequência de corte inferior do filtro foi configurada para remover os distúrbios em baixa frequência mais acentuados do conjunto de sinais em questão (frequências inferiores a 1/8 do tamanho da janela de dados). Já a frequência de corte superior foi selecionada para eliminar valores maiores que 99% da frequência de Nyquist do sinal. Para a suavização das PSDs utilizadas nos métodos ACF,

ICA e SE foi empregada uma janela Gaussiana com $\alpha = 15$, que eliminou o vazamento espectral sem atenuar de forma acentuada a energia do sinal oscilatório.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros usados na configuração individual de cada método. Para o agrupamento das oscilações detectadas será utilizado $K_\sigma = 1$ (um desvio padrão).

3.1 Aplicação dos Métodos

O resultado da aplicação dos métodos sobre os 12 sinais é mostrado na Figura 2. As cores indicam o número de métodos que identificaram cada frequência de oscilação em um respectivo sinal.

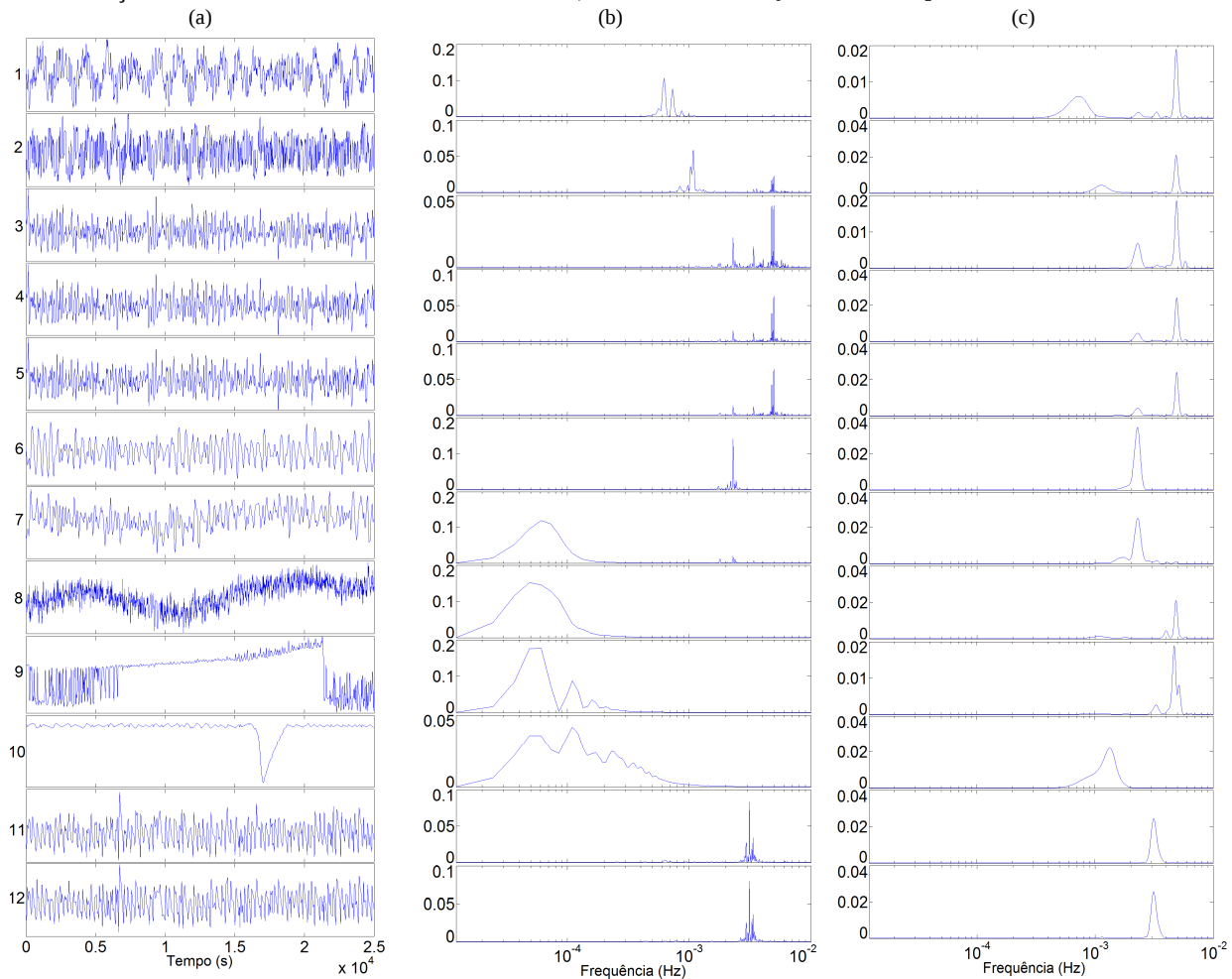


Figura 1. Sinais industriais e suas densidades espectrais de potência. a) Sinais no tempo; b) PSD dos sinais sem pré-tratamento; c) PSDs dos sinais apresentados usando janela gaussiana para geração da PSD e filtro passa-faixa.

A partir das PSDs na Figura 1(c) é possível identificar os períodos das principais oscilações que deveriam ser identificadas pelos métodos: 207 segundos nos sinais 1 a 5, 8 e 9; 321 segundos nos sinais 11 e 12; 444 segundos nos sinais 3 a 7; 873 segundos nos sinais 2 e 10; e 1284 segundos no sinal 1. Ou seja, é esperado que os métodos efetuem 17 detecções.

Da Figura 2 se observa que as oscilações de períodos 207, 321, 444 e 1285 segundos foram identificadas pelos 4 métodos nos sinais esperados. A exceção foi a oscilação de período 873 segundos que não foi encontrada por todos os métodos nos sinais esperados.

O método ICA não efetuou a detecção dessa oscilação em nenhum sinal porque a IC que a continha foi descartada de forma automática pelo algoritmo, uma vez que as outras componentes conseguiram explicar 99% da variabilidade do conjunto de espectros dos 12 sinais. Já o método DCT identificou o valor de 1998 segundos como sendo o período dessa oscilação no sinal 10, com desvio padrão de 894 segundos. Ou seja, a DCT inversa do segmento isolado pelo algoritmo apresentou um grau de irregularidade acentuada devido ao distúrbio presente no sinal.

Os métodos DCT e SE apresentaram um número

maior de detecções de oscilações sobre os 12 sinais (26 e 21, respectivamente), mesmo após a realização das configurações indicadas na Tabela 1, que visavam eliminar detecções de oscilações de menor relevância. Durante a configuração dos dois métodos, observou-se que pequenas alterações nos parâmetros de ajuste resultavam tanto em descarte indevido de oscilações importantes como na detecção de falsos positivos. Por outro lado, o método ICA efetuou apenas 15 detecções devido ao descarte da IC correspondente   oscilação de 873 segundos. Já o método ACF efetuou exatamente 17 detecções.

Tabela 1. Parâmetros utilizados nas configurações dos métodos.

Método	Parâmetros
ACF	$\text{Limiar} = \mu_{\text{PSD}} + \sigma_{\text{PSD}}$ $\text{Energia} = 8\%$
DCT	1� $\text{Limiar} = 10\sigma_{\text{DCT}}$ 2� $\text{Limiar} = 8\sigma_{\text{DCT}}$
SE	$\text{Limiar} = \mu_{\text{SE}} + 2,5\sigma_{\text{SE}}$
ICA	$\text{Limiar} = \mu_{\text{IC}} + \sigma_{\text{IC}}$ $\text{Energia} = 8\%$ $\% \text{ da variabilidade} = 99\%$

3.2 Aplicação do Teste de Regularidade Sobre as Oscilações Detectadas

Os testes de regularidade foram aplicados sobre as oscilações detectadas pelos 4 algoritmos e apenas as oscilações de períodos 873, 1285 e 1998 segundos presentes nos sinais 9, 10 e 11 foram descartadas por alguns dos métodos, conforme Figura 3.

A oscilação presente no sinal 10 foi descartada por todos os testes de regularidade. O gráfico com a PSD desse sinal na Figura 1(c) apresenta um pico de base irregular para essa oscilação, indicando a possibilidade de não regularidade, que foi confirmada pelos testes de regularidade dos métodos ACF, DCT e SE. Por outro lado, as oscilações descartadas nos sinais 9 e 11 são falsos positivos detectados pelos métodos DCT e SE, conforme pode ser observado pela ausência de picos para esses períodos nas PSDs dos sinais. As amplitudes m dias das oscilações regulares detectadas são exibidas na Figura 4. A amplitude média individual é calculada como a razão entre a média dos picos da oscilação isolada e a média do sinal. As amplitudes m dias na Figura 4 são a soma das m dias das amplitudes individuais dividida pelos 12 sinais.

3.3 Aplicação do Teste de Avaliação da Amplitude das Oscilações Detectadas – Limiar de 2%

Foram aplicados os testes de avaliação das amplitudes das oscilações detectadas por todos os métodos. Foi utilizado um limiar de 2% em torno da média do sinal. As oscilações de períodos 207, 321, 444 e 562 segundos presentes nos sinais 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 e 12 foram descartadas, conforme Figura 5.

A Figura 6 apresenta as amplitudes das oscilações

regulares detectadas (Figura 3), onde as cores indicam a amplitude. A busca da causa da oscilação com maior impacto pode se restringir aos sinais 1, 2, 7 e 9, pois os demais provavelmente foram includos devido à propagação da oscilação.

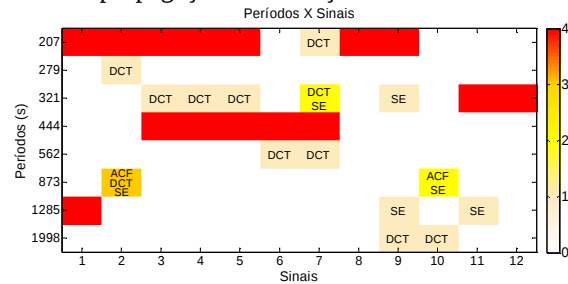


Figura 2. Resultados dos algoritmos de detecção para os 12 sinais.

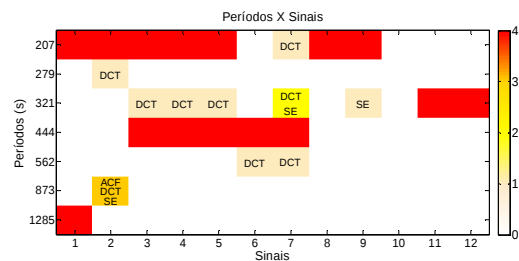


Figura 3. Resultados dos algoritmos de detecção para os 12 sinais após a aplicação do teste de regularidade.

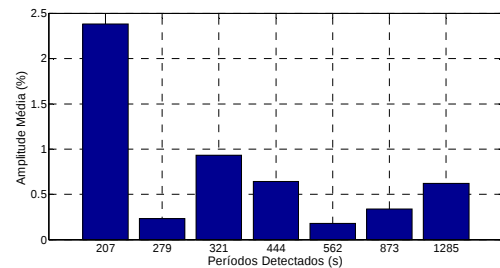


Figura 4. Amplitude média das oscilações regulares presentes nos 12 sinais.

Os benefícios da utilização de técnicas que avaliem a amplitude das oscilações detectadas ficam evidenciados na Figura 5, onde é possível perceber a redução da quantidade de sinais que devem ser verificadas de forma prioritária para a obtenção de ganhos consideráveis na redução da variabilidade do conjunto de sinais monitorados, evidenciando o caráter gerencial de utilização dessa metodologia. Detectadas as oscilações que estejam causando maiores impactos na operação da planta, devem ser utilizados algoritmos que efetuem a busca da causa raiz, objetivando sanar o comportamento oscilatório presente nos sinais.

3.4 Avaliação dos métodos de detecção de oscilações

Após a aplicação da estratégia descrita neste artigo, os 4 métodos detectaram as oscilações que contrib iram de forma mais significativa para o aumento da variabilidade nos sinais analisados. Entretanto, a configuração dos parâmetros individuais dos métodos

ACF e ICA se mostrou mais simples. Nos métodos DCT e SE pequenas alterações resultaram no descarte indevido de oscilações importantes e/ou na detecção de falsos positivos (por exemplo, detecções no sinal 7 na Figura 5).

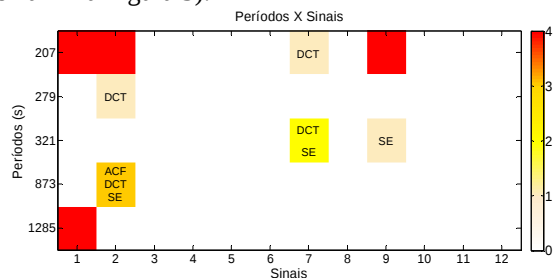


Figura 5. Resultados dos algoritmos de detecção para os 12 sinais após a aplicação de teste de amplitude com limiar de 2%.

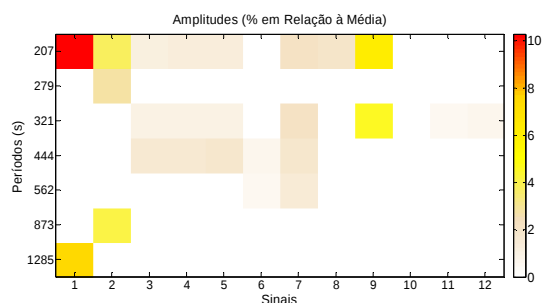


Figura 6. Amplitudes das oscilações.

Os ajustes dos parâmetros relacionados ao pré-tratamento (pré-filtragem e tratamento de vazamento espectral), comuns a todos os métodos, se mostraram muito importantes e são feitos facilmente observando as PSDs dos sinais. Para os métodos ACF e ICA esses ajustes se mostram mais importantes do que a escolha dos parâmetros individuais (Tabela 1).

Desse modo, baseado na experiência dos autores, é proposto que os métodos sejam configurados de acordo com as características dos sinais a serem analisados. As análises periódicas subsequentes não requerem novos ajustes, pois a dinâmica do processo muda muito pouco.

4 Conclusões

Neste artigo foi apresentada uma comparação da aplicação de 4 métodos de detecção de oscilações em sinais de um processo industrial. Foi verificado que a utilização de um pré-tratamento adequado sobre os sinais a serem analisados (filtragem e alisamento das PSDs) é fundamental para que os métodos apresentem resultados consistentes. Foi observado também que os métodos ACF e ICA apresentaram os melhores resultados, além de seus parâmetros serem de configuração mais simples.

A utilização de técnicas para descarte de oscilações sem regularidade e de oscilações com pequenas amplitudes permite direcionar a busca da causa da oscilação naqueles sinais que causam grandes impactos na variabilidade da planta, reduzindo a quantidade de

sinais a serem investigados pela equipe de operação. Como proposta de trabalho futuro, sugere-se a avaliação de outras técnicas para verificação da variabilidade dos sinais, em substituição à utilização das amplitudes das oscilações, que usa filtros passa faixa que eventualmente podem induzir falsas oscilações, principalmente quando a aplicação é efetuada sobre sinais com forte presença de *outliers* e distúrbios.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio e pelos dados utilizados no estudo de caso.

Referências Bibliográficas

- Gulhar, M., Kibria, B. M. G., Albatineh, A. N. e Ahmed, N. U. (2012). A comparison of some confidence intervals for estimating the population coefficient of variation: a simulation study. *Statistics and Operations Research Transactions*, v. 36, n. 1, p. 45-68.
- Jiang, H., Choudhury, M. A. A. S. e Shah, S. L. (2007). Detection and diagnosis of plant-wide oscillations from industrial data using the spectral envelope method. *Journal of Process Control*, v. 17, n. 2, p. 143-155.
- Karra, S. e Karim, M. N. (2009). Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops. *Control Engineering Practice*, v. 17, n. 8, p. 939-956.
- Li, X., Wang, J., Huang, B. e Lu, S. (2010). The DCT-based oscillation detection method for a single time series. *Journal of Process Control*, v. 20, n. 5, p. 609-617.
- Thornhill, N.F. e Hagglund, T. (1997). Detection and diagnosis of oscillations in control loops. *Control Engineering Practice*, v. 5, n. 10, p. 1343-1354.
- Thornhill, N. F., Huang, B. e Zhang, H. (2003). Detection of multiple oscillations in control loops. *Journal of Process Control*, v. 13, n. 1, p. 91-100.
- Thornhill, N. F., Shah, S. L., Huang, B. e Vishnubhotla, A. (2002). Spectral principal component analysis of dynamic process data. *Control Engineering Practice*, v. 10, n. 8, p. 833-846.
- Uitert, G. V. (1978). Reduction of leakage and increase of resolution in power spectral density and coherence functions. *Nuclear Instruments and Methods*, v. 157, n. 3, p. 583-589.
- Wang, J., Huang, B. e Lu, S. (2013). Improved DCT-based method for online detection of oscillations in univariate time series. *Control Engineering Practice*, v. 21, n. 5, p. 622-630.
- Xia, C. e Howell, J. (2005). Isolating multiple sources of plant-wide oscillations via independent component analysis. *Control Engineering Practice*, v. 13, n. 8, p. 1027-1035.