CLEBER FABIANO DEPIZZOL

CONTRIBUIÇÕES AO PROBLEMA DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE OSCILAÇÕES EM MALHAS DE CONTROLE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.
Orientador: Prof. Dr. Celso José Munaro

VITÓRIA
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Depizzol, Cleber Fabiano, 1980-

D419c Contribuições ao problema de detecção automática de oscilações em malhas de de controle / Cleber Fabiano Depizzol. - 2011.

68 f. : il.

Orientador: Celso José Munaro.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Oscilações. 2. Análise espectral. 3. Processamento de sinais. I. Munaro, Celso José. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

CLEBER FABIANO DEPIZZOL

CONTRIBUIÇÕES AO PROBLEMA DE DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE OSCILAÇÕES EM MALHAS DE CONTROLE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 12 de Dezembro de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Celso José Munaro
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo

Avaliador Interno

Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Avaliador Externo

Agradecimentos

À minha família por sempre me apoiar fazendo-me acreditar que vencer é possível quando se tem dedicação e fé;

Agradeço ao meu orientador e professor Celso José Munaro, pelo apoio, incentivo e, em especial, pela sua dedicação desde o início do mestrado;

Agradeço também à minha namorada Joana pela compreensão em minha ausência, pelo seu apoio e carinho;

Aos amigos pelas horas de lazer, as quais me ajudaram a esquecer temporariamente das obrigações.

À Terezinha e Alécio.

"A recompensa de uma coisa bem feita é a de te-la feita."
Ralph Waldo Emerson

Resumo

O comportamento oscilatório de malhas de controle pode ser causado por variados motivos que são inerentes ao processo. Tal comportamento aumenta o custo e reduz a qualidade do produto final. Este assunto tem sido amplamente estudado, entretanto até mesmo algoritmos robustos tem apresentado falhas quando o sinal analisado tem forte presença de ruído, distúrbios não periódicos, e/ou possui baixa freqüência de oscilação. Este trabalho discute o algoritmo Detecção e Caracterização de Oscilação (ODC), um algorimo conhecido da literatura o qual baseia-se na medição dos períodos do sinal autocorrelacionado obtido pela inversa da transformada de Fourier aplicada sobre a densidade espectral de potência, a fim de que a presença do comportamento oscilatório seja caracterizado. Vários problemas verificados no algoritmo são minimizados através da aplicação das propostas deste trabalho. A análise da causa raiz também é considerada, comparando a energia dos sinais oscilatórios calculados usando o gráfico da densidade espectral de potência. As contribuições deste trabalho são destacadas através de sua aplicação a dados de quatro diferentes processos industriais.

Abstract

The oscillatory control loop behavior may be caused by different reasons, which are inherent to the industrial processes. Such behavior increases the costs and decreases the quality of the final products. This subject has being widely studied, however even robust algorithms present false results when the analyzed signals are highly influenced by noise, nonperiodic perturbations, or very low frequencies. This work discusses the algorithm Oscilation Detection and Caracterization, a well-known algorithm used to detect and characterize oscillations based on the measurement of the period of the autocorrelated signal obtained from the inverse Fourier transform of the power spectral density. Several drawbacks of the algorithm are overcome through the application of our proposals. The root cause problem is also addressed, comparing the energy of the oscillatory signals calculated in the power spectral density plot. The contributions of this work are highlighted through its application to data of four different industrial processes.

Artigos Aceitos para Publicação

- Depizzol, Cleber F. e Celso, Munaro J. (2011). *On Frequency Detection and Root Cause Analysis of Plant-wide Oscillations via ACF Method*, Anais do International Conference on Control and Automation (ICCA), Santiago do Chile - Chile.
- Depizzol, Cleber F. e Celso, Munaro J. (2011). Contribution to the Problem of Automatic Detection of Oscillation in Control Loops, Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), São João Del Rei - MG.
- Depizzol, Cleber F. e Celso, Munaro J. (2011). Contribuição ao problema de detecção automática de oscilações em malhas de controle, Anais do Seminário Nacional de Controle e Automação (SNCA), Salvador-BA.

Lista de Tabelas

2.1 Comparação das características entre os métodos de Thornhill et al. (2003b) e ODC 31

2.2 Dados para agrupamento de frequências 35

2.3 Frequências da Tabela 2.2 grupadas 36

4.1 Frequências e energias dos sinais 1-12 52

4.2 Determinação da causa raiz para os sinais de uma planta termoelétrica 57

4.3 Determinação da causa raiz para os sinais de uma planta redutora de pressão . . 59

Lista de Figuras

2.1 Fluxograma do método ODC 25

2.2 Transformada de Fourier aplicada a um sinal oscilatório com ruído 26

2.3 Seleção das bandas de frequências dominantes. 29

2.4 Representação do cálculo das bordas dos filtros passa-banda a partir da PSD, para um sinal com múltiplas frequências de oscilação: 0.5rad/s, 1.0rad/s, e 1.5rad/s. 30

2.5 Exemplificação do cálculo de R_{acf} 33

3.1 Resultado da filtragem do sinal original utilizando f_e e f_l. a) Sinal original; b) Sinal filtrado com banda [0,02 0.99]Hz/Hz; c) Sinal filtrado com banda [(4T_s/ T_w) 0,99]Hz/Hz 39

3.2 Uso da regra 3σ para análise oscilatória. a) PSD de um sinal da indústria; b) Ajuste da curva de Gauss ao histograma da PSD 41

3.3 ε_p calculados para três diferentes σ 42

3.4 Passos da DFT utilizando janela retangular para truncamento dos dados 43

3.5 Passos da DFT utilizando janela ponderada para truncamento dos dados 44

3.6 Espectro da Fig. 3.3 após aplicação a janela de Gauss. 45

4.1 Análise oscilatória para os sinais 1-12. A) sinais no tempo; B) PSD do sinal sem as contribuições; C) PSD quando as contribuições propostas foram aplicadas. 49

4.2 Análise de causa raiz para os sinais 1-7 53

4.3 Análise de causa raiz para os sinal 8-12 53

4.4 Sistema de gás combustível de uma termoelétrica 55

4.5 Sinais oscilatórios coletados em uma termoelétrica 56

4.6 Análise de causa raiz para os sinais de uma termoelétrica 57

4.7 Planta de redutora de pressão de gás 58

4.8 Sinais da planta de controle de pressão. a) Sinal no tempo normalizado a partir da sua faixa de trabalho; b) PSD do sinal no tempo com o limiar ε_p 59

4.9 Análise da causa raiz a partir da energia das frequências de oscilação 59

Lista de Símbolos

a	Distância entre picos e vale da ACF
b	Distância entre vales e pico da ACF
d	Distâncias entre os períodos de oscilação
e	Número de Euler
f_e	Limite inferior original do filtro de pré-processamento
f_l	Limite inferior proposto para o filtro de pré-processamento
f_L	Menor valor de uma banda de frequência
f_o	Centro de uma faixa de fequência
f_U	Maior valor de uma banda de frequência
r	Índice de regularidade dos períodos
r_{xx}	Sinal x autocorrelacionado

ACF	Função de autocorrelação
D	Matriz dos elementos de agrupamento
EMD	Decomposição de modo empírico
FFT	Transformada Rápida de Fourier
HP	Turbina de alta pressão
IAE	Erro absoluto acumulado

ICA	Análise por componentes independentes
IMF	Função de modo intrínseco
K	Atrasos da função de autocorrelação
L	Número de elementos da janela Gaussiana
M	Número de ciclos
$N_{\overline{T_p}}$	Número de períodos médio encontrados
ODC	Detecção e caracterização de oscilação
P	Energia de uma faixa de frequência
PCA	Análise por componentes principais
PSD	Densidade espectral de potência
N	Número total de amostras de um sinal
R_{acf}	Taxa de decaimento da ACF
$\overline{T_p}$	Período médio
T_s	Tempo de amostragem
T_w	Tempo total de amostragem
TP	Turbina de potência
V_x	Variabilidade do sinal x
V_0	Primeiro vale de um sinal autocorrelacionado
V_1	Segundo vale de um sinal autocorrelacionado
W	Janela de dados para obtenção da FFT
W_g	Janela Gaussiana
η	Taxa de amortecimento no tempo
α	Índice de ajuste da janela Gaussiana

β	Vetor número de frequências agrupadas
Δf	Faixa de frequência
ε_P	Limiar de potência da PSD
μ	Média do ruído gaussiano
Φ	Densidade espectral de potência
Φ_N	Densidade espectral de potência normalizada
$\Re_x$	Faixa de trabalho do sinal x
σ	Desvio padrão
σ_{T_p}	Desvio padrão dos períodos
τ	Índice de amortecimento
ϖ	Frequência angular
ζ	Energia de um sinal oscilatório

Conteúdo

1 INTRODUÇÃO **19**

2 MÉTODO ODC **23**

2.1 Pré-Tratamento do Sinal 24

2.2 Densidade Espectral de Potência 26

2.3 Determinação das Frequências Dominantes 27

2.4 Filtragem das Frequências Dominantes 29

2.5 Índices de Oscilação 32

2.5.1 Taxa de Decaimento da ACF 32

2.5.2 Índice de Regularidade dos Períodos 33

2.6 Agrupamento de Frequências 34

3 CONTRIBUIÇÕES PARA O MÉTODO ODC **37**

3.1 Limiar do Filtro de Pré-Processamento 37

3.2 Cálculo do limiar de Potência 40

3.3 Tratamento de Vazamento Espectral 42

3.4 Provável Causa Raiz 45

4 ESTUDOS DE CASO **48**

4.1 Plantas Siderúrgicas e Mineradora 48

4.1.1 Análise de Oscilação Utilizando a PSD 50

4.1.2 Análise do Limiar de Potência 50

4.1.3 Frequências Próximas das Bordas dos Filtros 51

4.1.4 Detecção de Frequências 51

4.1.5 Causa Raiz das Oscilações 53

4.2 Planta Termoelétrica 54

4.2.1 Planta Redutora de Pressão 57

5 CONCLUSÃO **60**

6 TRABALHOS FUTUROS **62**

A TERMOS E DEFINIÇÕES **66**

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Devido às necessidades inerentes à modernização dos processos industriais os seus sistemas de controle tem sido equipados com centenas ou até milhares de malhas de controle. Entretanto, o monitoramento do desempenho destas malhas é muito importante, já que estudos verificaram que até 60% delas apresentam problemas que prejudicam a eficiência do processo (Bialkowski, 1993, Ender, 1993, Rinehart, 1997). Pesquisas em monitoramento do desempenho de malhas de controladores mostram que muitas destas trabalham com baixa eficiência devido a problemas como má sintonia do controlador, equipamentos danificados, ou até mesmo erro de projeto, que muitas vezes levam a malha a desenvolver comportamento oscilatório. Levantamentos feitos (Yang and Clarke, 1999) avaliaram que aproximadamente 32% das malhas de controle de uma fábrica de papel no Canadá estavam oscilando unicamente por problemas em válvulas de controle (Ruel, 2000). Pesquisas comprovaram ainda que malhas de controle com comportamento oscilatório aumentam a variabilidade da qualidade do produto final, diminuem o tempo de vida útil do equipamento, reduzem produção, e até mesmo podem interromper a operação da planta (Karra and Karim, 2009). Nesta mesma linha, estudos revelaram que malhas com comportamento oscilatório aumentam o preço da produção proporcionalmente à amplitude desta oscilação (Shinskey, 1990).

Detectar sinais oscilatórios, sua causa raiz, e fazer a correção deste comportamento é uma necessidade atual que interfere diretamente nos resultados e possivelmente na viabilidade de certas instalações industriais modernas. Métodos para detecção e diagnóstico de malhas de controle industrial, bem como a determinação de sua causa raiz, foram propostos no intuito de maximizar a eficiência do processo com a conseqüente minimização dos custos.

O uso de *Análise por Componentes Principais* (PCA) para identificação dos espectros com padrões semelhantes foi utilizado por Thornhill et al. (2003c). Da mesma forma a *Análise por Componentes Independentes* (ICA) (Li and Wang, 2002) foi empregada por Xia and Howell

(2005) e Xia et al. (2005) para detectar oscilações em malhas de controle. A Decomposição de Modo Empírico (EMD) e a função de modo intrínseco (IMF) (Huang et al., 1998) também foram abordadas na detecção de oscilação. Srinivasan et al. (2007) baseou-se na EMD e modificou-a com o objetivo de obter as IMFs do sinal. Em segunda instância obteve as frequências dominantes do sistema medindo na IMF os cruzamentos por zeros a partir do conceito de área acumulada.

O cálculo do erro acumulado (IAE) entre sucessivos cruzamentos por zeros foi utilizado em (Hägglund, 1995). O sinal no tempo para enumerar a quantidade de vezes que o valor de IAE é maior que um determinado limiar. Uma vez que esta quantidade ultrapasse um limite pré-estabelecido, afirma-se que o sinal possui comportamento oscilatório. Semelhante abordagem foi dada por Forsman and Stattin (1998), o qual utilizou o referido cálculo do IAE para detectar oscilações assimétricas. Computando separadamente os IAEs das áreas positivas e das áreas negativas do sinal no tempo, assim como os períodos de tempo que as delimitam, obteve a porcentagem do número de áreas e períodos similares, a qual foi empregada na detecção de oscilações em malhas de controles. O *Fator de Regularidade* (Thornhill and Hägglund, 1997) também teve a mesma aplicabilidade. Obtido a partir da relação matemática entre o IAE, a estimação do desvio padrão do ruído, e os intervalos de tempo determinados pelos cruzamentos por zeros, o valor do *Fator de Regularidade* contribuiu para o cálculo do *Fator Adimensional de Regularidade*, o qual foi determinante na detecção de sinais oscilatórios.

Entretanto a análise do sinal no tempo é bastante influenciada por perturbações e ruídos, os quais dificultam os cálculos dos índices de detecção de oscilação. Ferramentas estatísticas como a autocorrelação (ACF) tem sido utilizadas constantemente pelos métodos atuais para detectar oscilação em malha de controle. Esta função tem a importante característica de atenuar o ruído e preservar as frequências de oscilação originais do sinal no tempo, além de ser base para cálculo de importantes índices de avaliação do comportamento oscilatório de sinais provenientes de malhas de controle industriais. Em (Miao and Seborg, 1999) foi explicitado a relação entre o decaimento da ACF com o amortecimento de um sinal senoidal de segunda ordem e foi proposto o índice *Taxa de Decaimento da ACF* (R_{ACF}). A partir desta comparação pode determinar um limiar para o R_{ACF} que viabilizou seu uso na detecção do comportamento oscilatório em malhas de controle.

Em Thornhill et al. (2003b) foi evidenciado em seu trabalho *Detecção de Múltiplas Oscilação em Malhas de Controle* o problema causado pelo ruído e pelas múltiplas frequências de oscilação, os quais tem influência direta na análise da regularidade dos períodos de oscilação. No método proposto a função densidade espectral (PSD) foi utilizada heuristicamente para analisar as frequências de oscilação dominantes do sinal e filtrá-las. A automatização da filtragem para separar as diversas frequências de oscilação do sinal, entretanto, 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 partida da inversa da transformada de Fourier teve importante aplicação na medição dos períodos e na análise de sua regularidade. A detecção de oscilação, por final, apóia-se em um índice de regularidade dos períodos, denotado por r.

O método *Caracterização e Detecção de Oscilação* (ODC) (Karra and Karim, 2009) baseia-se no algoritmo apresentado por Thornhill et al. (2003b) e propõe melhorias utilizando a PSD para identificar e separar as prováveis frequências de oscilação do sinal. O índice *Potência de Oscilação* foi introduzido para selecionar os picos de frequências relevantes na PSD e determinar as bandas a serem filtradas. A separação das múltiplas frequências foi proporcionada pelo uso de filtros passa-banda com faixas de frequências previamente estabelecidos durante a análise da PSD. A ACF, obtida a partir da inversa da transformada de Fourier, foi fundamental na detecção e determinação das frequências de oscilação do sinal, quando existente. O emprego do índice de regularidade dos períodos e taxa de decaimento da ACF também foram simultaneamente aplicados para aumentar a confiança de que o sinal é, ou não, oscilatório.

Embora o método ODC utilize diferentes índices e parâmetros para evitar resultados espúrios, este método possui limitações importantes para sua aplicação na indústria. Importantes informações dos sinais coletados em processos industriais podem ser eliminadas durante seu pré-tratamento; um valor fixo de energia é considerado na determinação das bandas de frequências, o que requer ajustes manuais em alguns casos; um grande número de frequências vizinhas pode ser detectado na PSD para uma única frequência correspondente no sinal no tempo, o que torna ainda mais complicada a análise espectral do sinal. Estas limitações comprometem a confiabilidade deste método e restringe seu uso na detecção automática de sinais oscilatórios.

A determinação da causa raiz não é abordada pelo método ODC. A energia obtida a partir das bandas de frequências da PSD pode ser utilizada neste propósito, uma vez que seus valores estão diretamente relacionados com o cálculo da variabilidade, a qual tem sido empregada na determinação da causa raiz.

Apresentaremos, neste trabalho, melhorias na determinação de parâmetros e índices utilizados pelo método ODC, e técnicas serão empregadas para aprimoramento dos resultados. O limite inferior da banda do filtro de pré-processamento será calculado com base no tempo de coleta dos dados, eliminando o problema da filtragem de informações relevantes do sinal para sua análise oscilatória; o limiar de energia utilizado na PSD para selecionar as bandas de frequências dominantes será calculado com base nas características do sinal no tempo, minimizando consideravelmente a necessidade de ajustes manuais; o problema do vazamento espectral será atenuado na obtenção da PSD, facilitando a interpretação dos resultados finais; e a provável causa raiz será determinada através de variáveis geradas pelo próprio método ODC.

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 será apresentado o método ODC, detalhando as técnicas e ferramentas utilizadas. No Capítulo 3 serão apresentadas as limitações

deste método e propostas de melhoria são discutidas. O capítulo 4 abordará um estudo de caso a partir de sinais coletados em plantas industriais, os quais serão utilizados para destacar os resultados obtidos pelo método ODC antes e depois de sua modificação. O capítulo 5 apresentará a conclusão para este trabalho.

Capítulo 2

MÉTODO ODC

O método ODC é classificado como um método baseado na autocorrelação, uma vez que a avaliação do comportamento oscilatório do sinal é obtida a partir da ACF. Outros algoritmos (Miao and Seborg, 1999, Thornhill et al., 2003b), da mesma forma, detectaram oscilação utilizando como base a ACF, pois esta função apresenta duas características desejáveis: atenua o ruído presente em sinais coletados em malha de controle industrial e ao mesmo tempo preserva as frequências de oscilação originais do sinal.

Entretanto não somente o ruído é uma preocupação a ser considerada em sinais provenientes de malhas de controle, não obstante outras componentes encontradas neste tipo de sinais também influenciam os resultados destes algoritmos. Tendências, comportamentos transitórios, *outliers*, escolha do período de amostragem, e múltiplas frequências de oscilação, também podem prejudicar os resultados de algoritmos baseados na ACF.

O emprego conjugado de ferramentas matemáticas para tratar cada uma destas questões deve ser considerado nos algoritmos de detecção de oscilação. O método ODC utiliza a PSD para identificar as frequências dominantes do sinal no tempo; a ACF para atenuar o ruído, cálculo dos períodos, e cálculos dos índices de detecção de oscilação; e filtros são utilizados para pré-tratamento do sinal e separação das sua múltiplas frequências, quando existentes. O passo a passo do método citado são descritos a seguir para um sinal y qualquer coletado em processo industrial:

1. Pré-tratar o sinal y, filtrando as componentes não estacionárias do sinal, como tendências e *outliers*;
2. Remover as baixas e altas frequências usando filtro passa-banda de [0,02 a 0,99]Hz/Hz;
3. Calcular a PSD do sinal pré-processado;

4. Determinar as bandas de frequências com energia normalizada acima do limiar ε_p=0,1, ver seção 2.2;

5. Obter $r_{y_iy_i}(k)$ (ACF dos sinais filtrados), $i = 1...n$, utilizando para tanto a inversa da transformada de Fourier para as faixas de frequências referentes a cada frequência de oscilação do sinal;

6. Calcular os períodos $\overline{T_p}(i)$ para $r_{y_iy_i}(k)$, determinados pelas distâncias entre os sucessivos cruzamentos por zeros;

7. Calcular os índices de oscilação $R_{acf}(i)$ e $r(i)$;

8. O sinal filtrado $r_{y_iy_i}$ será caracterizado como oscilatório, com período $\overline{T_p}(i)$, caso $r(i) > 1$ e $R_{acf}(i) > 0.5$.

O fluxograma do passo a passo acima descrito é mostrado na Fig. 2.1.

O valor do limiar ε_p pode variar de acordo com as características do espectro do sinal. O método ODC adota 0,1 para este parâmetro. Os picos de frequências da PSD, e sua distribuição, dependem de muitos fatores, dentre eles: valor da frequência de oscilação, amplitude do sinal oscilatório, quantidade de frequências presentes no sinal, influência de ruídos, dentre outros. Para uma melhor avaliação do comportamento oscilatório do sinal, o valor de ε_p deve levar em consideração estes fatores. O capítulo 3 discutirá este e outros assuntos relevantes para a correta análise do comportamento oscilatório realizada pelo método ODC.

Os passos acima apresentados serão discutidos e analisados nas seções deste capítulo.

2.1 Pré-Tratamento do Sinal

Os sinais coletados em plantas industriais estão sujeitos a influências de ruídos e perturbações que podem inviabilizar a detecção de seu comportamento oscilatório. Interferência de campo magnético, mudança de *setpoint*, instrumentos com má qualidade de transmissão ou mal dimensionado, e até mesmo a própria dinâmica do processo podem introduzir componentes não estacionárias no sinal, que afetam os resultados dos algoritmos de detecção de oscilação.

Em Karra and Karim (2009) foi propostos o pré-tratamento do sinal a fim de eliminar as componentes não estacionárias como as tendências, *outliers*, nível DC, e comportamento transitório. Este pré-tratamento é realizado pela remoção da média do sinal e pela aplicação de filtro passa-banda com limiares de [0,02 a 0,99] Hz/Hz. A escolha do limiar superior é justificada pela

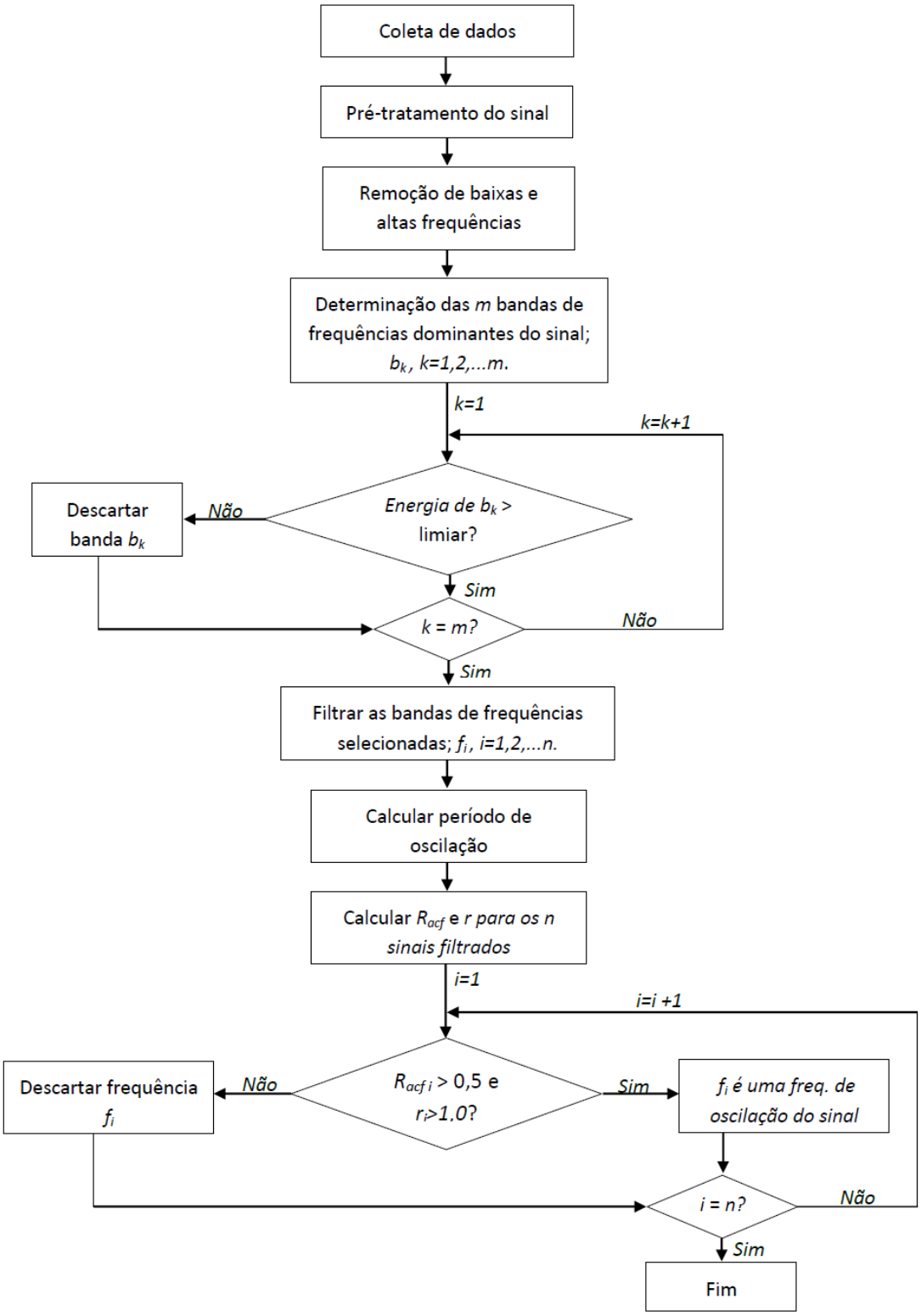

Figura 2.1: Fluxograma do método ODC

possibilidade de existir frequências de oscilação no sinal que estejam muito próximas da frequência de amostragem (1Hz/Hz), o que ocasiona ruídos de alta frequência. Já as componentes não estacionárias de baixa frequência, como tendências e/ou comportamentos transitórios, assim como *outliers*, deverão ser eliminados utilizando o limiar inferior de 0,02Hz/Hz.

Contudo a aplicação de um filtro passa-banda com limiares calculados com base no tempo de amostragem dos dados (T_s) podem trazer inconvenientes para a análise do comportamento oscilatório do sinal. Uma análise detalhada deste assunto juntamente com uma nova proposta de cálculo do limiar inferior do filtro passa-banda será apresentada na seção 3.1 do Capítulo 3.

2.2 Densidade Espectral de Potência

A transformada de Fourier é tipicamente utilizada para decompor um sinal nas suas componentes em frequência e suas amplitudes. Entretanto esta ferramenta matemática é fortemente influenciada pelo ruído existente no sinal no tempo ocasionando falsos picos de potência no espectro, o que dificulta substancialmente sua análise. A Fig. 2.2 mostra a transformada de Fourier aplicada a um sinal oscilatório, onde é possível vizualizar os falsos picos proveniente da presença do ruído do sinal no tempo.

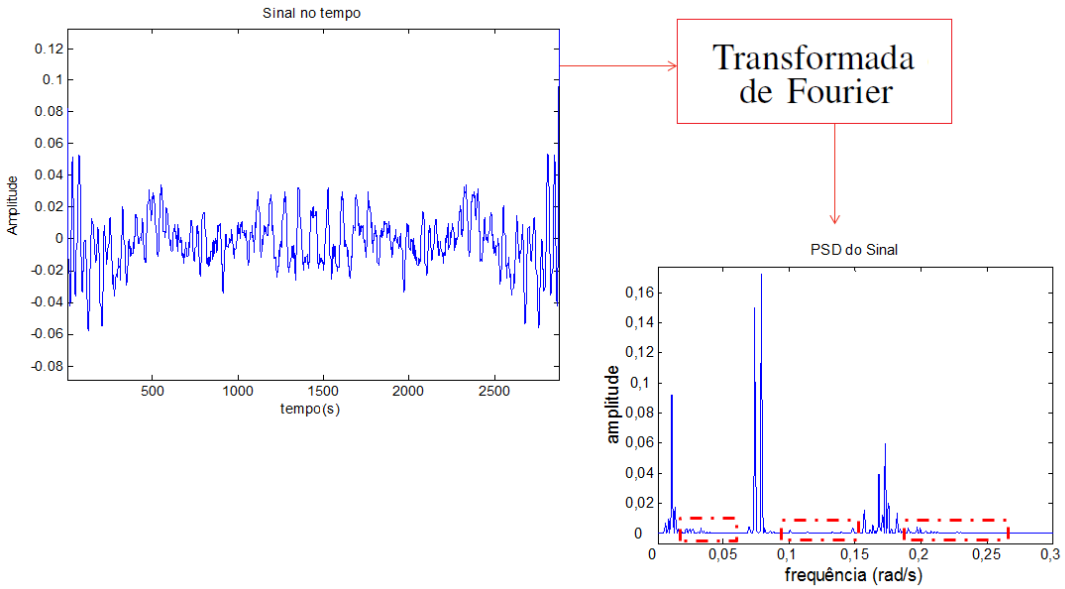

Figura 2.2: Transformada de Fourier aplicada a um sinal oscilatório com ruído

A PSD neste trabalho é calculado a partir da Transformada de Fourier Rápida (FFT) aplicada sobre o sinal autocorrelacionado, o que minimiza o efeito do ruído no espectro. A PSD pode

ser descrita matematicamente por $\Phi_x(f)$,

$$\Phi_x(f) = \sum_{k=1}^{N} r_{xx}(k) e^{-j2\pi fk} \tag{2.1}$$

onde f é a frequência, e N é o número de atrasos de $r_{xx}(k)$. A autocorrelação $r_{xx}(k)$ é descrita matematicamente por,

$$r_{xx}(k) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} [x(t) - \overline{x}][x(t+k) - \overline{x}]}{\sum_{t=1}^{N} [x(t) - \overline{x}]^2} \tag{2.2}$$

onde $\overline{x}$ é o valor médio para as N amostras, e k o atraso.

No método ODC a análise do espectro é realizada a partir da PSD normalizada,

$$\Phi_{Nx}(f) = \frac{\Phi_x(f)}{\sum \Phi_x(f)} \tag{2.3}$$

Neste método o espectro $\Phi_{Nx}(f)$ é empregada tanto para detectar as frequências dominantes, quanto para determinar as faixas de frequência a serem utilizadas para separar as múltiplas frequências de oscilação do sinal. Esta análise é realizada a partir do correlograma normalizado.

O emprego de $\Phi_{Nx}(f)$, entretanto, não é suficiente para eliminar completamente os falsos picos de potência no correlograma. O vazamento espectral também introduz picos espúrios de frequência em $\Phi_{Nx}(f)$ influenciando os resultados finais do método estudado. Deste modo a adoção de técnicas para minimizar seu efeito no espectro do sinal será abordada na seção 3.3 do capítulo 3.

2.3 Determinação das Frequências Dominantes

As diferentes características do sinal no tempo determinarão a forma e distribuição das suas frequências em $\Phi_x(f)$. O número de frequências de oscilação, as amplitudes do sinal oscilatório, a intensidade do ruído, dentre outros fatores, determinarão a amplitude dos picos de potência em $\Phi_{Nx}(f)$. Frequência dominante com pico de pequena amplitude se confundirá entre o efeito do ruído no espectro e tornará não tão óbvia computacionalmente a sua determinação no correlograma. Na tentativa de separar o ruído das frequências dominantes, o método ODC apresenta dois limiares a serem aplicados no correlograma: o primeiro analisa a potência de

$\Phi_{Nx}(f)$, enquanto o segundo verifica a energia das bandas de frequências selecionadas, as quais serão melhores discutidas na seção 2.4.

Uma forma de quantificar a amplitude de um sinal oscilatório presente em um sinal com múltiplas frequências é somar a energia na banda de frequência correspondente em $\Phi_{Nx}(f)$, assim como mostrado a seguir,

$$P = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} \Phi_x(f)}{\sum_{f=0}^{2/T} \Phi_x(f)} \tag{2.4}$$

onde f_1 e f_2 denotam a baixa e alta frequência, respectivamente, selecionadas em $\Phi_{Nx}(f)$. Baixos valores de P indicam que o sinal não possui atividade oscilatória significante na banda selecionada, i.e., o comportamento oscilatório do sinal é dominante para outras frequências. A relação discutida entre a amplitude do sinal oscilatório e a energia de sua banda de frequência é validada pela relação direta entre estes dois fatores.

Um limiar de potência denotado por ε_p foi estabelecido para classificar as bandas de frequência em $\Phi_{Nx}(f)$ relevantes na análise do comportamento oscilatório do sinal. As frequências inferiores (f_L) e superiores (f_U) das bandas selecionadas serão determinadas pela intersecção ε_p com $\Phi_{Nx}(f)$. Karra and Karim (2009) utilizaram em suas análises $\varepsilon_p = 0,1$.

Para exemplificar a obtenção das bandas de frequências dominantes, a Fig. 2.3 apresenta uma PSD com dois picos de frequências localizados em 0.5rad/s e 2rad/s. A band de frequência correspondente ao pico de maior frequência é seccionado por ε_p em f_1 e f_2, tendo energia P suficiente para ser considerada no estudo do comportamento oscilatório do sinal. Já a banda de menor frequência será descartada, pois ela tem baixa energia e será irrelevante neste estudo.

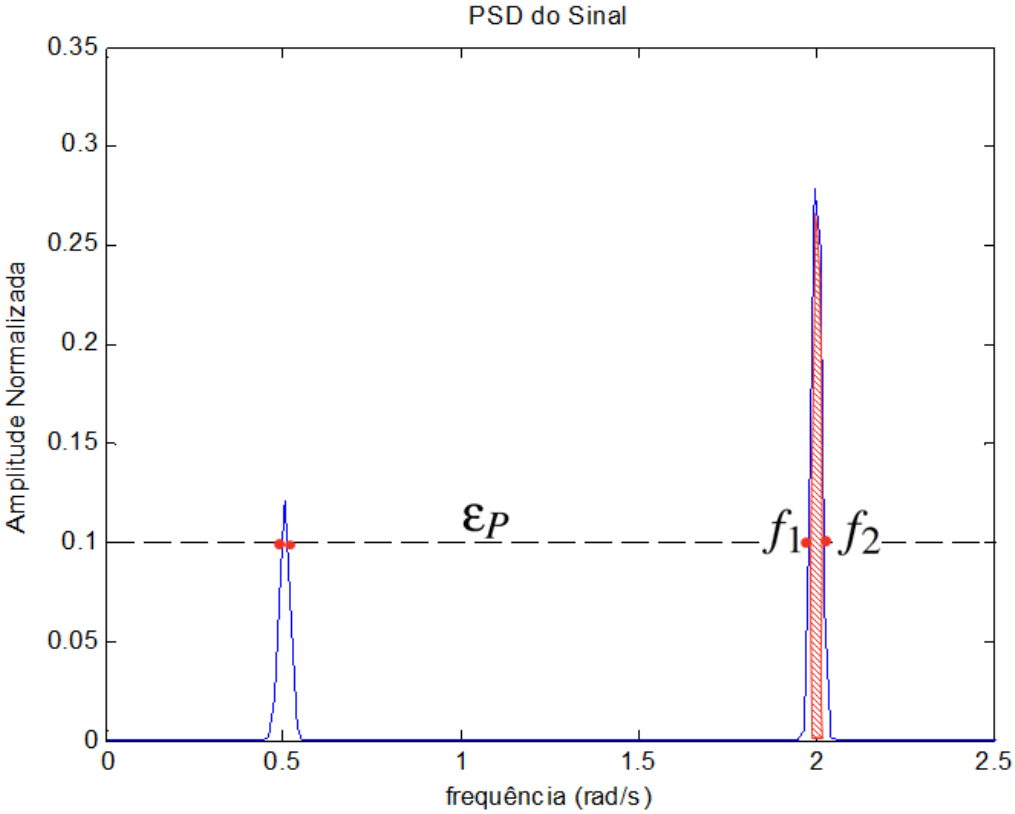

Figura 2.3: Seleção das bandas de frequências dominantes.

pela possui baixo valor de P e será desconsiderado no estudo de oscilação deste sinal. O segundo pico de frequência

A escolha de ε_p é muito dependente das características da PSD, sendo proposta na seção 3.2 do capítulo 3 um método para seu cálculo.

2.4 Filtragem das Frequências Dominantes

A propagação do comportamento oscilatório através das malhas de controle, dentre outras conseqüências, poderá levar uma mesma malha a apresentar mais de uma frequência de oscilação. Múltiplas frequências de oscilação introduzem cruzamentos por zero irregulares, o que dificulta a análise oscilatória do sinal. Thornhill et al. (2003b) abordou este fato e propôs a filtragem das múltiplas frequências de oscilação presentes no sinal, obtendo a ACF a partir da inversa da transformada de Fourier aplicada a $\Phi_x(f)$.

O método ODC, da mesma forma, filtrou as múltiplas frequências do sinal empregando para tanto filtros passa-banda. As bordas destes filtros, os quais serão aplicados em $\Phi_{Nx}(f)$,

estarão centralizadas entre cada par de bandas de frequência selecionadas por ε_p. A borda inferior do filtro utilizado para filtrar a menor frequência do sinal deverá estar centralizada entre a borda inferior do filtro de pré-processamento e a menor frequência da banda correspondente a frequência a ser filtrada. De foma similar, a borda superior do filtro utilizado para filtrar a maior frequência do sinal deverá estar centralizada entre a borda superior do filtro de pré-processamento e a maior frequência da banda correspondente a frequência a ser filtrada. A Fig. 2.4 mostra a PSD de um sinal com três frequências de oscilação e o cálculo dos filtros aqui discutidos.

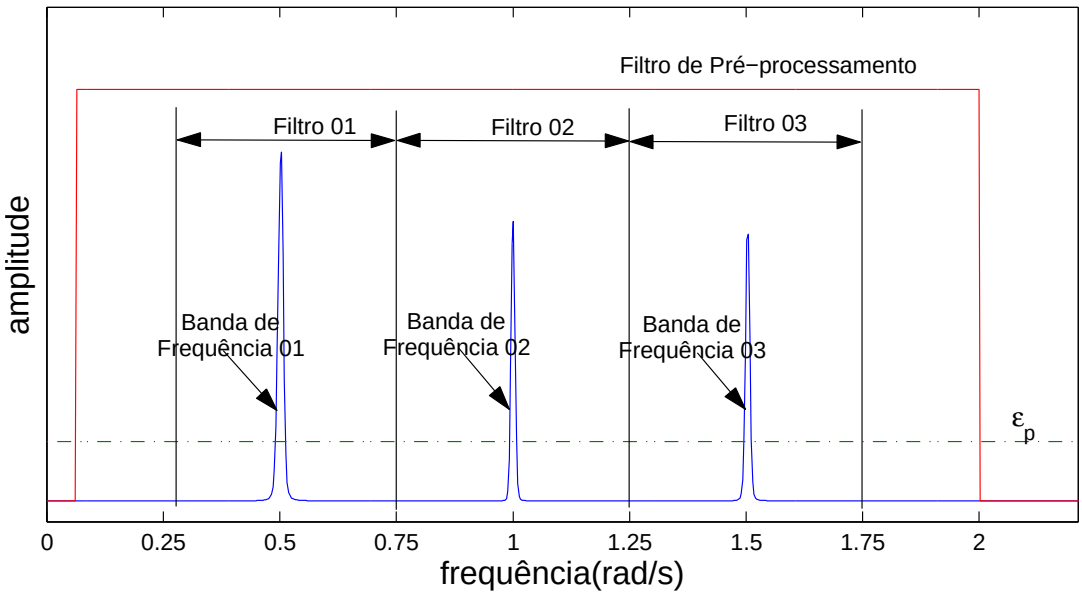

Figura 2.4: Representação do cálculo das bordas dos filtros passa-banda a partir da PSD, para um sinal com múltiplas frequências de oscilação: 0.5rad/s, 1.0rad/s, e 1.5rad/s.

Embora o método ODC baseie-se no método de detecção de oscilação proposto por Thornhill et al. (2003b), ele apresenta características particulares, principalmente no que diz respeito ao cálculo automático dos filtros utilizados para separar as múltiplas frequências do sinal. Enquanto o método ODC utiliza o espectro do sinal para determinar as frequências dominantes e as bordas dos respectivos filtros passa-bandas, o segundo método determina tais filtros utilizando o período médio dos sinais que apresentam períodos regulares. A comparação entre estes dois métodos será descrita na Tabela2.1, onde a coluna à esquerda corresponde às características do método proposto por Thornhill et al. (2003b) e a coluna à direita as do método ODC.

Frequências indesejadas podem ser introduzidas no sinal nas proximidades das bordas dos

Tabela 2.1: Comparação das características entre os métodos de Thornhill et al. (2003b) e ODC

Thornhill et al. (2003b)	ODC
Exige um conjunto de sinais coletados em uma mesma planta industrial para possibilitar a filtragem automática das frequências dominantes do sinal	A determinação automática das bandas de frequências a serem filtradas é realizada com as informações do próprio sinal não sendo necessário um conjunto de sinais para este cálculo
Não garante a detecção caso ao menos um sinal do pacote analisado não apresentar uma única frequência de oscilação	Detecta as múltiplas frequências independentemente do comportamento oscilatório dos demais sinais da planta
Para um sinal com múltiplas frequências não é garantido detectar uma determinada frequência caso ela não tenha período regular em pelo menos uma das malhas analisadas	Detecta as múltiplas frequências independentemente do comportamento oscilatório dos demais sinais da planta
O esforço computacional é drasticamente aumentado pela automatização dos filtros	A automatização não altera o esforço computacional

filtros passa-banda. Assim frequências detectadas nas proximidades destas bordas deverão ser desconsideradas.

Falsos resultados, ainda, podem ser obtidos caso a banda do filtro seja muito estreita, pois este tipo de filtro pode gerar sinais senoidais a partir de sinais puramente ruidosos. Esta afirmação é verificada pela obtenção da ACF a partir de um filtro passa-banda de largura Δf, o qual é centralizada em $\pm f_o$, e aplicado na PSD, como observado em Thornhill et al. (2003b) e descrito a seguir:

$$\begin{aligned} ACF(k) &= \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_x(f) e^{2\pi jfk} df \\ &= \left(\int_{-f_o-\Delta f/2}^{-f_o+\Delta f/2} e^{2\pi jfk} df \right) + \left(\int_{f_o-\Delta f/2}^{f_o+\Delta f/2} e^{2\pi jfk} df \right) \\ &= 2 \quad x \quad cos(2\pi f_o k) \quad x \quad \frac{sen(2\pi k \Delta f/2)}{\pi k} \end{aligned} \tag{2.5}$$

Para Δf muito estreito considera-se $ACF(k) \approx 2\Delta f cos(2\pi f_o k)$. Assim, ACF será oscilatório mesmo que $\Phi_{Nx}(f)$ não indique este comportamento. Os cruzamentos por zero deste sinal

ocorrerão em $k = (2M-1)/4f_o$, onde M é um número interior positivo. Considerando 11 cruzamentos por zeros o intervalo de tempo será de $5/f_o$ (ver seção 2.5.2). Utilizando o mesmo raciocínio $sen(2\pi k\Delta f/2)$ terá seus cruzamentos por zeros em $k = M/\Delta f$. Assumindo que o sinal $sen(2\pi k\Delta f/2)$ deve ter ao menos 2 cruzamentos por zeros, propõe-se a seguinte relação para evitar a introdução de frequências indesejadas no sinal ocasionadas por filtros com bandas estreitas:

$$\frac{2}{\Delta f} \leq \frac{5}{f_o} \quad ou \quad \Delta f \geq \frac{f_o}{2,5}$$

2.5 Índices de Oscilação

Oscilação pode ser definida como uma variação periódica que não é completamente descaracterizada pela presença de ruído (Horch et al., 2007). Detectar esta característica em um sinal coletado na indústria nem sempre é um tarefa simples para um algoritmo computacional. Métodos matemáticos são empregados neste intuito para fornecer índices que ajudam a classificar um sinal como sendo oscilatório, ou não. A taxa de decaimento da ACF R_{acf} (Miao and Seborg, 1999) e o índice de regularidade de período r (Thornhill et al., 2003b), desempenham este papel na análise dos sinais.

2.5.1 Taxa de Decaimento da ACF

Miao and Seborg (1999) consideram a resposta transitória de um sistema de segunda ordem;

$$y(t) = e^{-t/\tau} sen(\varpi t) + e(t) \tag{2.6}$$

onde t é o tempo contínuo, ϖ é a frequência do sinal oscilatório, τ é o amortecimento, e $e(t)$ um ruído gaussiano com média μ e variância σ; para relacionar o seu comportamento oscilatório amortecido com o comportamento do sinal autocorrelacionado, e assim propor o índice de decaimento da ACF. Tal índice é descrito a seguir,

$$R_{acf} = \frac{a}{b} \tag{2.7}$$

O valor de a é dado pela distância entre a reta que contém os dois primeiros vales de $r_{y_i y_i}(k)$ (V_0 e V_1) e o seu primeiro pico (P_1); e b é a distância entre a reta que contém o primeiro ponto

(P_0) e o primeiro pico (P_1) de $r_{y_i y_i}(k)$ e o primeiro vale (V_1).A Fig.2.5 evidencia o cálculo de a e b para um sinal senoidal autocorrelacionado.

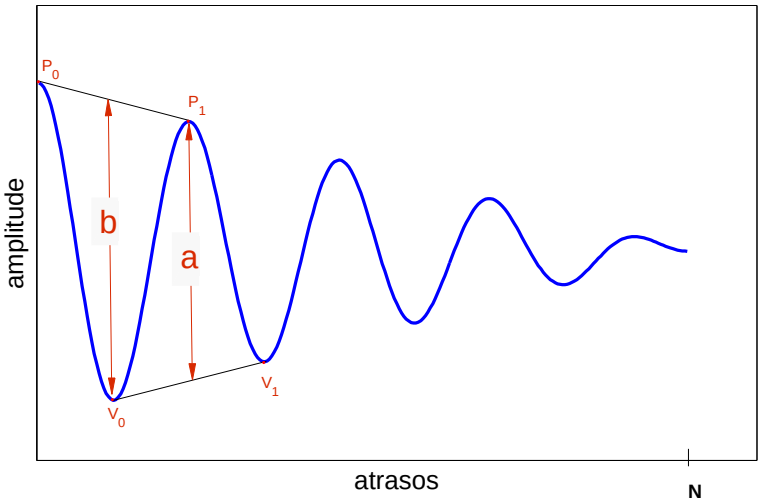

Figura 2.5: Exemplificação do cálculo de R_{acf}

Variando o valor do amortecimento τ confrontou-se a taxa de amortecimento η do sinal no domínio do tempo com o valores do parâmetro R_{acf}. Deste experimento observou-se uma relação logarítmica entre η e R_{acf}, a qual possibilitou o uso do índice R_{acf} para descrever o quão oscilatório é o sinal. Valor pequeno para o parâmetro R_{acf} indica que o sinal possui pouca atividade oscilatória, ao passo que valor grande para o parâmetro R_{acf} indica que o sinal tem comportamento oscilatório significante. Miao and Seborg (1999) e outros autores (Karra and Karim, 2009, Thornhill et al., 2003b) utilizaram o limiar de $\eta > 0,25$, razão de decaimento de um sinal oscilatório no tempo, para determinar o valor $R_{acf} > 0,5$ e considerar um sinal como sendo oscilatório.

O índice R_{acf}, utilizado por diversos algoritmos que tem por finalidade detectar oscilação em malha de controle, tem aplicação restrita a sinais que possuem apenas uma frequência de oscilação. Esta é a razão pela qual este índice é calculado separadamente em cada frequência dominante do sinal previamente filtrada.

2.5.2 Índice de Regularidade dos Períodos

Apesar de a PSD distribuir sua potência de acordo com as frequências de oscilações dominantes no sinal, ela não é recomendada para determinar seus períodos de oscilações (Thornhill

et al., 2003b). A medição dos períodos de oscilação (T_p) do sinal pode ser obtida pelo dobro das distâncias entre os sucessivos cruzamentos por zeros do sinal autocorrelacionado.

Devido aos cruzamentos por zeros irregulares, causados pelo ruído e pelas múltiplas frequências de oscilação, os períodos devem ser calculados sobre cada frequência dominante filtrada e autocorrelacionada. Outros cuidados, contudo, devem ser tomados durante o cálculo dos períodos de oscilação do sinal. Sinais com presença de oscilações intermitentes podem influenciar significativamente no cálculo dos períodos de oscilação sendo uma fonte de erros na caracterização oscilatória do sinal e sua frequência média de oscilação, quando existente. Este estudo abordará, no entanto, apenas sinais com frequências de oscilação constante e contínua.

O índice de regularidade de períodos (r) utiliza o conceito de desvio padrão para verificar o quão regular são os valores dos períodos calculados, servindo de indicativo para caracterizar a presença de comportamento oscilatório no sinal, sendo calculado por,

$$r = \frac{1}{3} x \frac{\overline{T_p}}{\sigma_{T_p}} \tag{2.8}$$

onde $\overline{T_p}$ é a média dos períodos e σ_{T_p} o desvio padrão dos períodos. A obtenção de r utiliza somente os dez primeiros períodos de oscilação calculados, pois a magnitude da função de autocorrelação fica distorcida para atrasos grandes quando o sinal não é perfeitamente oscilatório.

Uma oscilação é considerada regular se o desvio padrão dos períodos é menor que um terço do seu valor médio, ou seja, $r \geq 1$. A utilização deste limiar é justificada estatisticamente por Thornhill et al. (2003b)

Todavia, um valor grande de r não implica que a correspondente componente oscilatória é a causa raiz da pertubação de mesma freqüência encontrada em outras malhas. A oscilação tende a tornar-se cada vez mais regular ao passo que se propaga pelo processo, já que as os equipamentos da planta industrial funcionam como filtro passa-baixa.

2.6 Agrupamento de Frequências

Sinais coletados em um mesmo processo podem apresentar frequências de oscilação de mesmo valor, uma vez que oscilações se propagam pelas malhas de controle. O método de agrupamento de períodos apresentado por Thornhill et al. (2003b) é utilizado para agrupar as frequências próximas. Os passos deste método são:

1. Os períodos médios com oscilação significantes, e.g. $r \geq 1,0$ e potência acima de 10%, encontrados em um pacote de dados coletados em um mesmo processo industrial, são

alocados nas células T_{p_i} do vetor T_p, o qual terá tamanho N_{T_p}. Seus respectivos desvios padrão σ_i e índice de regularidade r_i são alocados em um segundo e terceiro vetor, σ e r respectivamente. Um quarto vetor β, de igual comprimento dos demais, armazenará a informação de quantos períodos de oscilação foram agrupados para uma determinada frequência. Os elementos de β_i deverão ser inicializados com valor 1; onde $i = 1, 2, 3, ..., N_{\overline{T_p}}$;

2. As distâncias entre os períodos de oscilação são calculados como segue,

$$d_{i,j} = \frac{|T_{p_i} - T_{p_j}|}{max(\sigma_i, \sigma_j)} \tag{2.9}$$

A condição $d_{ij} < 1$ indica que as duas frequências corresponde a um mesmo sinal oscilatório, uma vez que a distâncias entre seus períodos é menor que o maior desvios padrão.

A matriz D é determinada pelos elementos $d_{ij} < 1$. Somente os elementos acima da diagonal principal deverão ser considerados, já que esta matriz é simétrica e sua diagonal principal é zero.

3. T_{p_i} receberá o período médio de maior regularidade dentre as duas oscilações detectadas; i.e. o valor de T_{p_i} será mantido se $r_i \geq r_j$, ou $T_{p_i} = T_{p_j}$ caso $r_i < r_j$. Da mesma forma o valor de σ_i é mantido se $r_i \geq r_j$, ou substituído por σ_j caso $r_i < r_j$.

Os elementos r_i serão substituídos pelo maior valor entre r_i e r_j. O vetor β, que indicará o número de frequências agrupadas, terá β_i igual a $\beta_i + \beta_j$ e β_j será eliminado.

As células T_{p_j}, σ_j, r_j, e β_j, deverão ser eliminadas

4. Os passos de 2 a 4 deverão ser repetidos até que nenhuma modificação seja observada para o vetor T_p (i.e. os valores de d_{ij} sejam todos maiores que 1). O resultado final será um vetor T_p contendo os períodos agrupados e com maior regularidade.

A Tabela2.2 exibe os valores fictícios de $\overline{T_p}$ em segundos, σ, e r, para 4 frequências detectadas para um mesmo sinal. Ela será utilizada para exemplificar este procedimento.

- Passo 1

Tabela 2.2: Dados para agrupamento de frequências

i	1	2	3
T_p	10	12	15
σ	4,0	2,0	2,0
r	1,3	1,6	2,5
β	1	1	1

- Passo 2

$$
\begin{aligned}
d_{11} = d_{22} = d_{33} &= 0 \\
d_{12} = d_{21} &= \frac{\overline{T_{p_2}} - \overline{T_{p_1}}}{max(\sigma_2, \sigma_1)} = \frac{2}{4} \\
d_{13} = d_{31} &= \frac{\overline{T_{p_3}} - \overline{T_{p_1}}}{max(\sigma_3, \sigma_1)} = \frac{5}{2} \\
d_{23} = d_{32} &= \frac{\overline{T_{p_3}} - \overline{T_{p_2}}}{max(\sigma_3, \sigma_2)} = \frac{3}{1}
\end{aligned}
$$

$D =$

i/j	1	2	3
1	0	0,5	2,5
2	0,5	0	3
3	2,5	3	0

- Passo 3

  Somente as células em cinza da matriz D serão consideradas nesta análise, já que esta matriz é simétrica, assim,

  $d_{12} < 1$ e $r_1 < r_2$; portanto $T_{p_1} = T_{p_2}$ = 12, σ_1 = σ_2 = 2,0, $r_1 = r_2$=1,6 β_i = 2. σ_2, r_2, T_{p_2}, e β_2 serão descartados
  $d_{13} > 1$; portanto estas duas frequências não serão agrupadas
  $d_{23} > 1$; portanto estas duas frequências não serão agrupadas

- Passo 4 A Tabela2.2 terá as frequências de índices 1 e 2 agrupadas, resultando na Tabela2.3.

Tabela 2.3: Frequências da Tabela 2.2 grupadas

i	1	2
T_p	12	15
σ	2,0	2,0
r	1,6	2,5
β	2	1

Capítulo 3

CONTRIBUIÇÕES PARA O MÉTODO ODC

Na análise oscilatória, o uso de filtros inadequados para tratamento do sinal e o emprego de parâmetros inapropriados para seleção das faixas de frequências relevantes a esta análise, podem acarretar a perda de informações relevantes ou até mesmo adicionar componentes indesejadas. A interpretação da PSD também é fortemente afetada pela presença de ruídos e vazamento espectral quando precauções necessárias não são tomadas. Este capítulo apresenta procedimento eficiente para determinação do filtro de pré-processamento, bem como introduz o uso de técnicas para o cálculo automático dos parâmetros utilizados na detecção de oscilação pelo método ODC. Em adição apresenta um procedimento para determinação da causa raiz provável dos sinais oscilatórios.

3.1 Limiar do Filtro de Pré-Processamento

Embora a ACF seja uma base bastante utilizada para caracterizar oscilações em malhas de controle, esta abordagem pode apresentar resultados inconclusivos, caso tendências e/ou *outliers* estiverem presentes no sinal analisado. A autocorrelação de um sinal não estacionário pode tender a valores maiores que zero, e *outliers* podem afetar seriamente o sinal autocorrelacionado (Chatfield, 2003, p.29). O filtro de pré-processamento é usado no método ODC para eliminar estas componentes indesejáveis, sendo que, originalmente, as bordas de tal filtro foram propostas com valor normalizado de [0,02 0,99] Hz/Hz.

O uso da borda inferior f_e=0,02Hz/Hz pode ocasionar a eliminação de informações do sinal relevantes para sua análise oscilatória. Frequências menores que f_e não serão detectadas sendo

que na grande maioria dos casos elas são responsáveis por grande parte da energia oscilatória do sinal. Relacionar o limite inferior do filtro com a frequência de amostragem do sinal (f_s) não é uma abordagem adequada, já que pelo teorema de Nyquist, f_s está relacionada com a máxima frequência do sinal. Mesmo que f_s seja ajustada para evitar a eliminação de baixas frequências, este ajuste também influenciará na determinação do limite superior do filtro passa banda, além de representar a necessidade de ajustes manuais.

A mínima frequência de um sinal está relacionada com a janela de dados, o qual é denotado aqui por T_w. De acordo com o cálculo do parâmetro r, a menor frequência possível de ser detectada pelo uso deste parâmetro está relacionada com a quantidade de períodos de oscilação presentes nos dados amostrados. Sinais com menos de dois períodos não poderão ser caracterizados como oscilatórios, i.e. 5 cruzamentos por zeros, sendo esta restrição a base para a proposta do cálculo do novo limite inferior do filtro de pré-processamento,

$$f_l = \frac{2}{T_w} Hz \tag{3.1}$$

Desta forma, o limite inferior do filtro de pré-processamento assegura que as tendências e os *outliers* são removidos do sinal sem que seja descartada qualquer componente oscilatória desejada na análise oscilatória do sinal.

Os valores de f_l e f_e usados com limites inferior do filtro de pré-processamento podem ser comparadas e suas implicações verificadas. Normalizando f_l, temos,

$$f_l = \frac{\frac{2}{T_w}}{\frac{1}{2T_s}} = 4\frac{T_s}{T_w} Hz/Hz$$

onde T_S é o tempo de amostragem do sinal.

Comparando f_l com f_e,

$$\begin{aligned} 4\frac{T_s}{T_w} Hz/Hz &= 0,02 Hz/Hz \\ T_w &= 200 T_s \end{aligned}$$

Portanto, os dois critérios para escolha do limite inferior do filtro de pré-processamento são equivalentes se o tempo total de amostragem do sinal é de $200T_s$. Por exemplo, para um tempo de amostragem igual a 10s, T_w deveria ser aproximadamente 33 minutos. É de conhecimento

que oscilações encontradas em malhas de controle de processos industriais podem chegar a apresentar períodos na ordem de horas, sendo mais fácil para o usuário definir T_w do que escolher o limiar inferior de um filtro de pré-processamento baseando-se em T_s.

O sinal da Fig.3.1 foi coletado em uma malha de fluxo e será utilizado para exemplificar o efeito do uso do filtro proposto pelo método ODC, assim como o resultado obtido com a utilização do filtro com banda inferior f_l. O sinal no tempo original mostrado no gráfico superior da Fig.3.1-A foi filtrado com banda [f_e 0,99]Hz/Hz sendo seu resultado exibido na Fig.3.1-B. Da mesma forma o mesmo gráfico no tempo foi filtrado com banda [f_l 0,99]Hz/Hz e seu resultado é apresentado na Fig.3.1-C. Devido a $T_s = 1s$, f_e teve valor calculado de,

$$f_e = 0,02\frac{\pi}{T_s} = 0,06283 rad/s \tag{3.2}$$

eliminando a frequência de oscilação do sinal, a qual era de 0.005rad/s.

O uso de f_l conservou a frequência original do sinal, pois de (3.1),

$$f_l = \frac{2}{6000} = 0,00033 rad/s \tag{3.3}$$

conservando a frequência original do sinal.

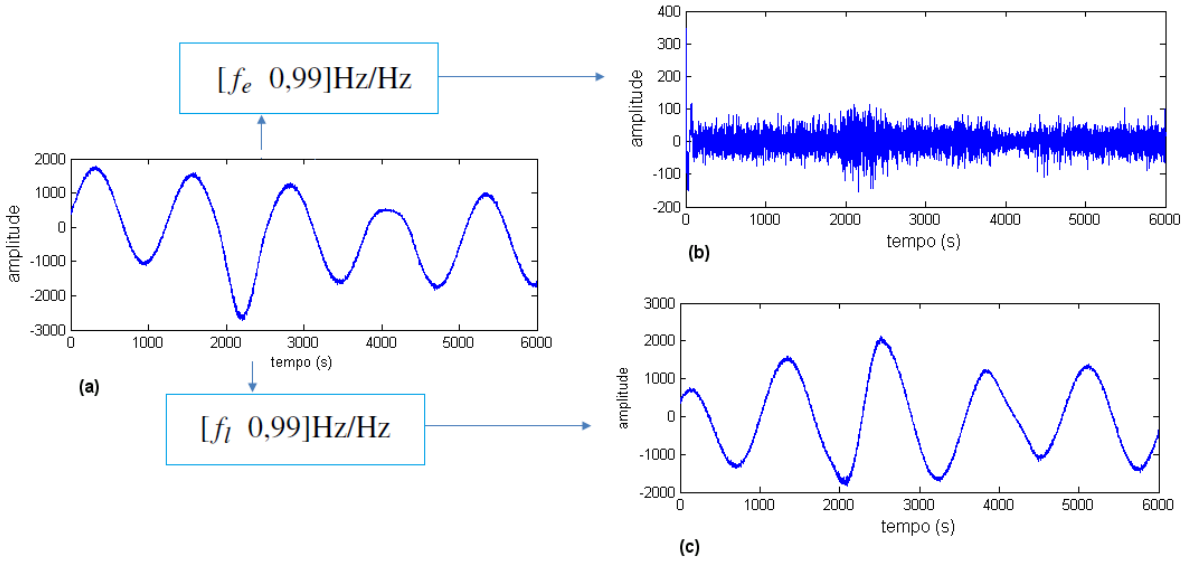

Figura 3.1: Resultado da filtragem do sinal original utilizando f_e e f_l. a) Sinal original; b) Sinal filtrado com banda [0,02 0.99]Hz/Hz; c) Sinal filtrado com banda [($4T_s/T_w$) 0,99]Hz/Hz

3.2 Cálculo do limiar de Potência

O limiar de potência é um importante parâmetro utilizado na identificação das bandas de frequências da PSD com potencial probabilidade de estarem relacionadas com a atividade oscilatória do sinal, e é denotado por ε_p. Embora o correlograma apresente diferentes comportamentos para os sinais coletados na indústria, o método ODC utiliza um valor fixo para este parâmetro.

A variação de ε_p influencia diretamente nos resultados do método ODC. Altos valores de ε_p podem descartar informações oscilatórias importantes que deveriam ser consideradas na caracterização do seu comportamento oscilatório, e/ou selecionar bandas de frequências muito estreitas. Baixos valores de ε_p podem selecionar muitas bandas de frequências com baixa energia, as quais não são relevantes para a análise oscilatória do sinal.

Deste modo a determinação do valor de ε_p deve considerar as características estocásticas e determinísticas do sinal. A análise da distribuição estatística de $\Phi_x(f)$ é apresentada como solução para este problema, o que torna possível o cálculo de ε_p, contribuindo significativamente para tornar viável a aplicação do método ODC em processos industriais, sem que seja necessário supervisão. A distribuição estatística de $\Phi_x(f)$ depende somente da distribuição conjunta das variáveis aleatórias quando o sinal amostrado no tempo tem distribuição Gaussiana. Esta característica de $\Phi_x(f)$ é razoavelmente robusta mesmo para sinais no tempo com distribuição próxima da Gaussiana (Koopmans, 1995, pp 258-261).

Na análise oscilatória do sinal estamos interessados justamente em descartar as variáveis aleatórias da PSD e assim determinar os picos de frequências que correspondem às frequências de oscilação do sinal no tempo. O fato de as variáveis aleatórias de $\Phi_x(f)$ determinar a sua distribuição estatísca será utilizado neste estudo para realizar a seleção dos picos de frequência na PSD relevantes para a análise oscilatória do sinal.

A Fig.3.2 exibe a PSD com 4100 amostras de um sinal coletado em uma malha de pressão. O histograma desta PSD permite-nos avaliar o emprego da regra dos *Três Sigmas* para determinar as bandas de frequências relevantes ao estudo do comportamento oscilatório do sinal. Para visualizar a parte negativa da curva da distribuição Gaussiana, o histograma foi exibido acrescentando a amplitude da PSD em valores negativos. Verifica-se na Fig.3.2-B que, apesar de os valores da PSD não se ajustarem perfeitamente à curva da distribuição Gaussiana, tal regra pôde separar grande parte das variáveis aleatórias dos picos de frequência da PSD que correspondem a frequências de oscilação no sinal no tempo; quando aplicados 1σ, 2σ e 3σ. Verifica-se ainda que, os picos de frequências na PSD decorrentes da atividade oscilatória do sinal são afastados da média da distribuição estatística da PSD ao passo que o sinal possui menor atividade de ruido, o que favorece o uso da regra dos *Três Sigmas*.

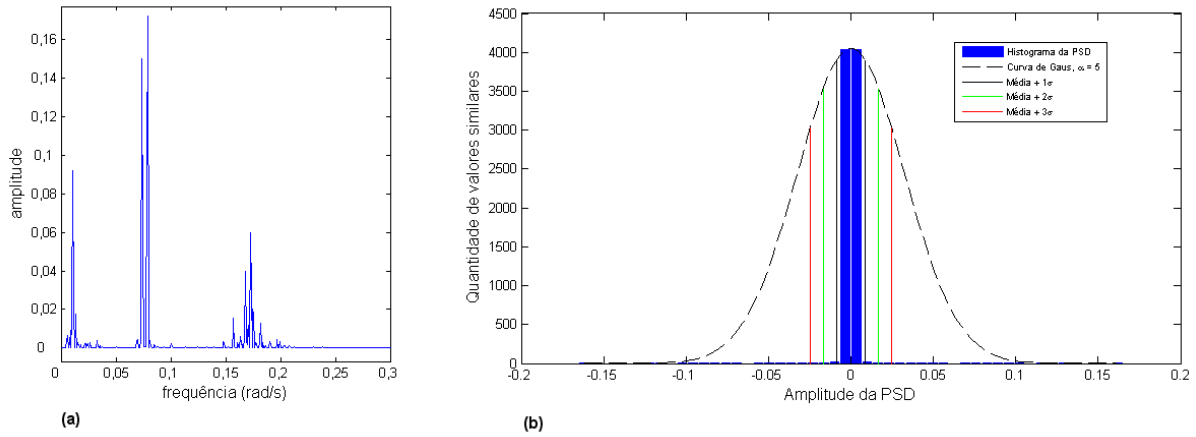

Figura 3.2: Uso da regra 3σ para análise oscilatória. a) PSD de um sinal da indústria; b) Ajuste da curva de Gauss ao histograma da PSD

O emprego da regra dos*Três Sigmas*, portanto, torna-se a chave para o cálculo ε_p e da seleção automática das bandas de frequências a partir de $\Phi_x(f)$. Deste modo o cálculo de ε_p será determinado pela média da PSD somada aos desvios padrões desta função, assim como é mostrado a seguir,

$$\varepsilon_p = \overline{\Phi_x(f)} + m.\sigma_{\Phi_x(f)} \tag{3.4}$$

onde $\overline{\Phi_x(f)}$ é a média aritmética de $\Phi_x(f)$, $\sigma_{\Phi_x(f)}$ é dado pelo desvio padrão de $\Phi_x(f)$,e m é o número de $\sigma_{\Phi_x(f)}$ a ser considerado no cálculo de ε_p.

A Fig. 3.3 mostra a PSD da Figura3.2-A com ε_p calculado para $m = 1$, $m = 2$, e $m = 3$. Quanto menor for m, maior será o valor de ε_p e mais restrita será a seleção da banda de frequência. Pela regra dos 3σ, 68% será a probabilidade de selecionar somente bandas de frequências em $\Phi_x(f)$ que tenha correspondente frequência de oscilação no sinal no tempo quando m=1; para m=2, 95%; e m =3, 99.7%.

Na Fig. 3.3 é possível verificar a presença de três grupos de picos de frequência, que possivelmente correspondem a três frequências de oscilação do sinal. Entretanto, irregularidades do sinal no tempo ocasionam o surgimento de picos de frequências espúrios os quais serão melhores discutidos e tratados da seção 3.3 deste capítulo. Por esta figura também é possível verificar que a utilização do limiar de potência $\varepsilon_p = 0,1$ não foi uma boa escolha para a seleção das bandas de frequências, já que somente duas bandas de frequências foram selecionadas na PSD. O emprego do cálculo de ε_p apresentado nesta seção pode selecionar maior número de bandas de frequências que estão relacionadas com o comportamento oscilatório do sinal.

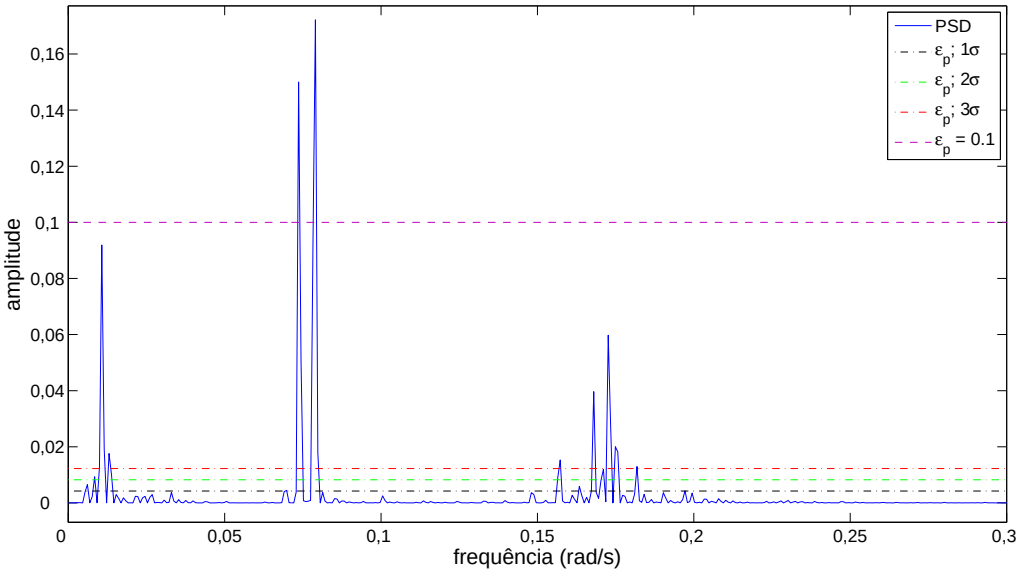

Figura 3.3: ε_p calculados para três diferentes σ

3.3 Tratamento de Vazamento Espectral

Um grande número de frequências podem ser detectado pelo método ODC quando o vazamento espectral está presente. Este fenômeno ocasiona o surgimento de múltiplos picos próximos de frequências dominantes em $\Phi_x(f)$, o qual gera múltiplas bandas de frequência para uma única frequência original do sinal. Além deste inconveniente o vazamento espectral pode dificultar a caracterização de oscilações que possuam pouca energia, quando múltiplas frequências estão presentes no sinal.

O resultado da transformada de Fourier para um sinal oscilatório amostrado com número de períodos inteiros é dado por um único pico de potência no espectro do sinal, pois a média do resultado da multiplicação do sinal original e a frequência fundamental, ou suas harmônicas, que não correspondem a frequência de oscilação do sinal será zero. Entretanto a aplicação de uma janela inadequada ao sinal amostrado pode selecionar números não inteiros de períodos de oscilação afetando a relação descrita . Neste caso a frequência de oscilação original do sinal é distorcida e descontinuidade é introduzida através da convolução entre os dados truncados e a função impulso utilizada na Transformada de Fourier Discreta (DFT). Quanto maior for a descontinuidade maior será o efeito do vazamento espectral.

A Fig.3.4 exemplifica este fato. Na Fig.3.4-I é mostrado um sinal coletado com período de amostragem T_s e frequência $1/T_1$. Na seqüência a Fig.3.4-II exibe uma janela retangular de tamanho T_o utilizada pela DFT para truncamento dos dados coletados, e na Fig.3.4III o resultado deste truncamento. O resultado da convolução entre a Fig.3.4-III e a Fig.3.4-IV, é

apresentado na Fig.3.4-V, onde é possível identificar o aparecimento de descontinuidades em T_o, a qual ocasionará o fenômeno de vazamento espectral.

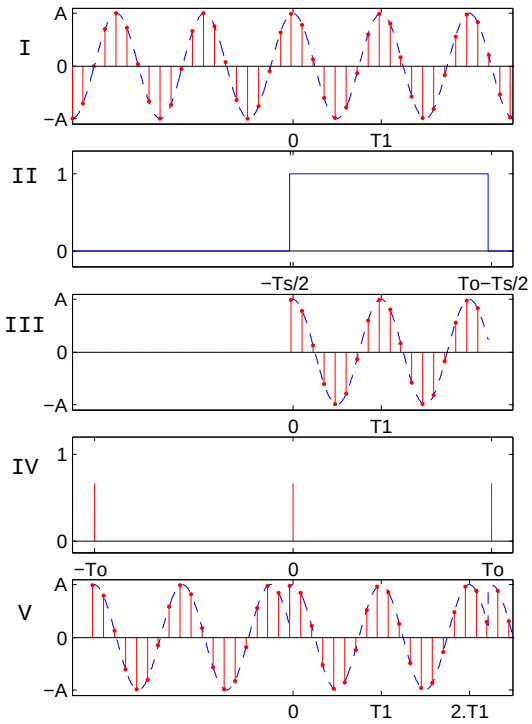

Figura 3.4: Passos da DFT utilizando janela retangular para truncamento dos dados

Garantir uma janela de dados com número inteiro de período é inexeqüível quando a frequência de oscilação do sinal não é previamente conhecida. Adicionalmente, sinais com múltiplas frequências de oscilações podem não apresentar número inteiro de períodos concomitantemente. Assim a utilização de uma janela ponderada é a solução usual (Uitert, 1978).

Existe um grande número de janelas que podem ser utilizadas para este fim, entretanto a janela de Hamming e Gaussiana são as que mostraram melhores resultados no tratamento das descontinuidades para os dados coletados na indústria. A janela Gaussiana, adicionalmente, permite ajustes que maximizam ou minimizam o efeito deste tratamento.

A Fig.3.5 evidencia o efeito da aplicação da janela Gaussina para tratar descontinuidades. Como verifica-se a aplicação da janela Gaussiana na Fig.3.5-II, pode minimizar o efeito de descontinuidade no sinal convolucionado mostrado na Fig. 3.5-V.

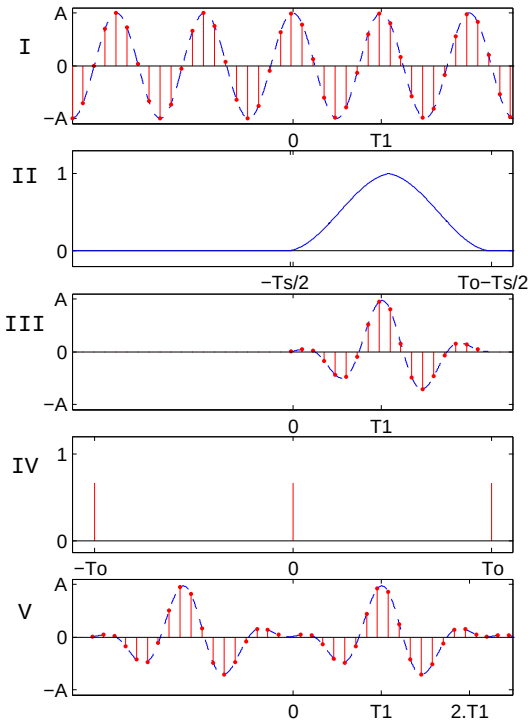

Figura 3.5: Passos da DFT utilizando janela ponderada para truncamento dos dados

Portanto, a fim de evitar o vazamento espectral $r_{xx}(k)$ deve ser previamente multiplicada por uma janela adequada $W(k)$ antes de obter $\Phi_x(f)$,

$$r_{x_w x_w}(k) = r_{xx}(k).W(k) \tag{3.5}$$

Neste trabalho a janela Gaussiana com $\alpha = 5$ será adotada, a qual é escrita a seguir,

$$W_g(k) = e^{-\frac{1}{2}\left(\alpha \frac{n}{L/2}\right)} \tag{3.6}$$

onde $-\frac{N}{2} \leq n \leq \frac{N}{2}$, $\alpha \geq 2$, sendo o tamanho da janela $L = N - 1$.

O uso de W_g diminui a energia do sinal oscilatório e conseqüentemente os picos de potência de $\Phi_x(f)$ terão menores amplitudes. Portanto, o aumento α diminui o efeito de vazamento espectral, porém a energia de oscilação também será atenuada. A Fig. 3.6 permite uma comparação da funcionalidade da janela Gaussiana para minimizar o efeito do vazamento espectral em relação ao espectro do mesmo sinal obtigo a partir de uma janela retangular.

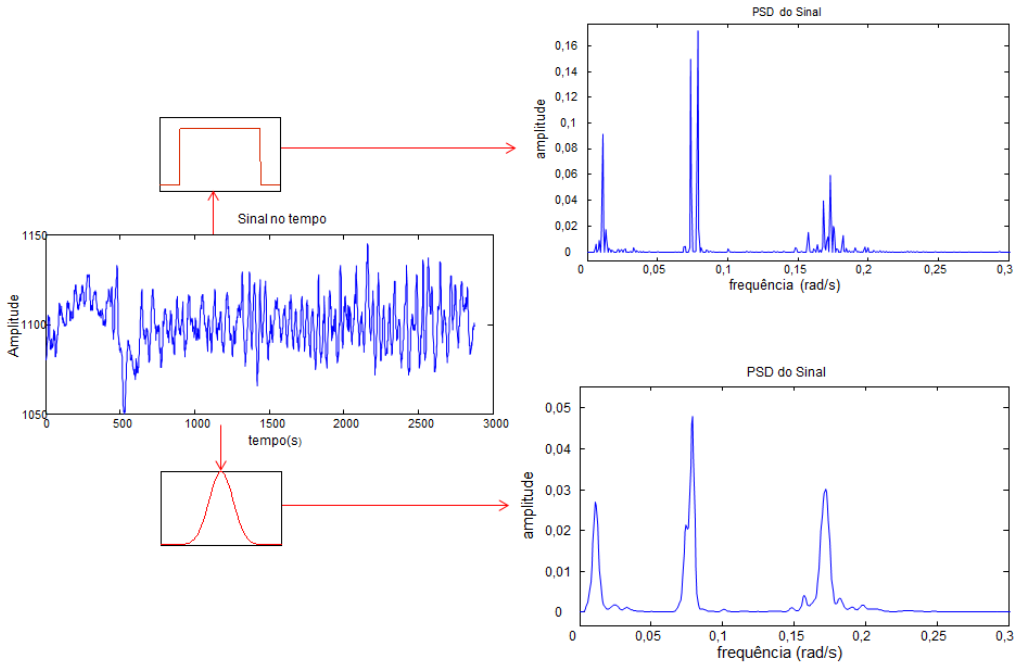

Figura 3.6: Espectro da Fig. 3.3 após aplicação a janela de Gauss.

3.4 Provável Causa Raiz

Após identificar as frequências presentes no sinal, a determinação da causa deste comportamento oscilatório é fundamental para que problemas correspondentes sejam corrigidos. O leitor é remetido para as recentes abordagens (Bauer et al., 2007, Thambirajah et al., 2009, Thornhill et al., 2003a, Xia and Howell, 2003) para proposta de soluções. A discussão abordada neste momento é a possibilidade de utilizar as variáveis geradas pelo método ODC para encontrar a indicação da provável causa raiz.

A energia associada a um sinal oscilatório dá a estimativa de sua força. Uma vez que esta energia é atenuada ao passo que se propaga pelas malhas de controle do processo industrial (Thornhill et al., 2003a), a malha que apresenta maior energia referente a uma considerada frequência é uma boa candidata a ser a causa raiz desta oscilação. Entretanto, quando se deseja comparar a energia de sinais de uma mesma frequência presente em diferentes malhas, algumas características dos sinais devem ser consideradas. A variabilidade tem sido usada para comparação de desempenho entre malhas de controle, a qual é dada por

$$V_x = 200\frac{\sigma_x}{\Re_x} \tag{3.7}$$

onde σ_x é o desvio padrão do sinal e $\Re_x$ a faixa de trabalho da variável analisada.

Em Farenzena et al. (2009), a matriz de variabilidade é computada apartir da variância do sinal e da variância ótima ou pior variância aceitável para medir o impacto da melhoria da variabilidade sobre as demais malhas da planta. Os parâmetros desta matriz não tem dimensão, permitindo a comparação do impacto em diferentes malhas.

O uso da variabilidade para comparar sinais com múltiplas frequências de oscilações torna-se complicada, já que filtros seriam necessários para separar estas frequências. O uso da PSD para medir as energias das bandas de frequências correspondente a frequências de oscilações do sinal no tempo, será a abordagem adotada para este fim.

Pelo teorema de Parseval, $\Phi_x(f)$ fornece a energia do sinal distribuída nas bandas de frequência,

$$E_x = \sum_{k=1}^{N} x(k)^2 = \sum_{f=0}^{f_N} \Phi_x(f) \tag{3.8}$$

Se considerarmos sinais com média zero, uma vez que estamos interessados apenas na componente oscilatória, a variância do sinal é igual a sua energia ponderada pelo número de amostras,

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} x(k)^2 = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{f_N} \Phi_x(f) \tag{3.9}$$

Assim a variabilidade pode ser calculada por,

$$V_x = \frac{200}{\Re_x} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{f=0}^{f_N} \Phi_x(f)} \tag{3.10}$$

Seja agora $x = \sum_{i=1}^{n} cos(w_i K t)$, onde K é um número real e t o vetor tempo, V_x será dada por,

$$V_x = 200 \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \zeta_i} \tag{3.11}$$

onde

$$\zeta_i = \frac{1}{N \Re_x^2} \sum_{f=f_{L_i}}^{f_{U_i}} \Phi_x(f), \quad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{3.12}$$

Os termo ζ_i corresponde a contribuição de energia da faixa de frequência $[f_{L_i}\ f_{U_i}]$ para variabilidade de x. Como ζ_i leva em consideração o número de amostras e a faixa de trabalho do sinal, este termo pode ser base para comparar suas energias. Observa-se que ζ_i e a variabilidade se diferem por apenas uma constante.

A utilização da faixa de trabalho $\Re_x$ permite a comparação de diferentes sinais, já que esta ponderação revela a influência dos sinais oscilatórios para faixas de trabalho normalizadas. As médias dos sinais poderão ser utilizadas no lugar das faixas de trabalho destes sinais, caso estas médias sejam proporcionais as suas respectivas faixas de trabalho.

Portanto, a determinação da provável causa raiz de uma oscilação pode ser baseada na comparação entre as energias calculadas em (3.12), para sinais de um mesmo processo. A partir da determinação das frequências de oscilação dos sinais analisados pelo emprego do método ODC e das contribuições propostas neste trabalho, as energias referentes a cada frequência de oscilação será determinada por 3.12. A a provável causa raiz da oscilação será indicada pela malha que apresente maior valor de energia para a frequência em questão.

Capítulo 4

ESTUDOS DE CASO

Neste capítulo o comportamento oscilatório foi analisado para sinais provenientes de quatro diferentes processos industriais. Tal análise foi realizada pela aplicação do método ODC antes e após as contribuições apresentadas no Capítulo 3. A validação dos resultados apresentados pelo método ODC também será discutida, e adicionalmente a determinação da provável causa raiz será abordada, discutida, e validada.

Na seção 4.1 sinais provenientes de dois processos industriais, planta siderúrgica e mineradora, serão considerados e a detecção oscilatória será realizada utilizando o método ODC.

Na seção 4.2 será apresentado o sistema de queima de gás combustível de uma turbina utilizada em plantas termoelétricas. As frequências de oscilação desta planta serão detectadas pelo método ODC com as melhorias propostas implementadas. Nesta seção o conhecimento da relação entre os sinais coletados permitirá validar a análise da causa raiz. Com o mesmo propósito, na seção 4.2.1, serão apresentados sinais provenientes de uma planta redutora de pressão de gás combustível utilizada em um forno de pelotização. O estudo da causa raiz será apresentado e explorado com maior profundidade e as frequências de oscilação também serão detectadas pela utilização do método ODC com as melhorias propostas implementadas. A análise de causa raiz será baseada na seção 3.4 e os resultados serão validados utilizando o conhecimento das relações de causa e efeito entre os sinais.

4.1 Plantas Siderúrgicas e Mineradora

Nesta seção apresentaremos sinais provenientes de dois processos industriais. Os sinais 1-7 foram obtidos de malhas de controle de uma planta siderúrgica, e os sinais 8-12 são provenientes

de uma planta de mineração. O tempo de amostragem utilizado na coleta dos dados foi de 1 segundo, e os tempos totais de amostragem (T_w) são diferentes para cada conjunto de dados.

O objetivo de usar diferentes sinais com diferentes T_w é destacar a ampla aplicabilidade do método ODC na indústria, quando as contribuições propostas neste artigo são utilizadas. A PSD dos sinais da Fig.4.1-A são apresentadas na Fig.4.1-B quando os limites de filtro [0,02 0,99] Hz/Hz foram aplicados, quando o problema do vazamento espectral não foi considerado, e ε_p= 0,1 foi empregado. Para a PSD da Fig.4.1-C foram utilizados os limites [f_l 0,99] Hz/Hz para o filtro passa-banda, a janela Gaussiana com $\alpha = 5$, e ε_p calculado para $m = 2$. O limiar de potência utilizado para considerar o sinal como sendo oscilatório foi de 10% da energia total da PSD.

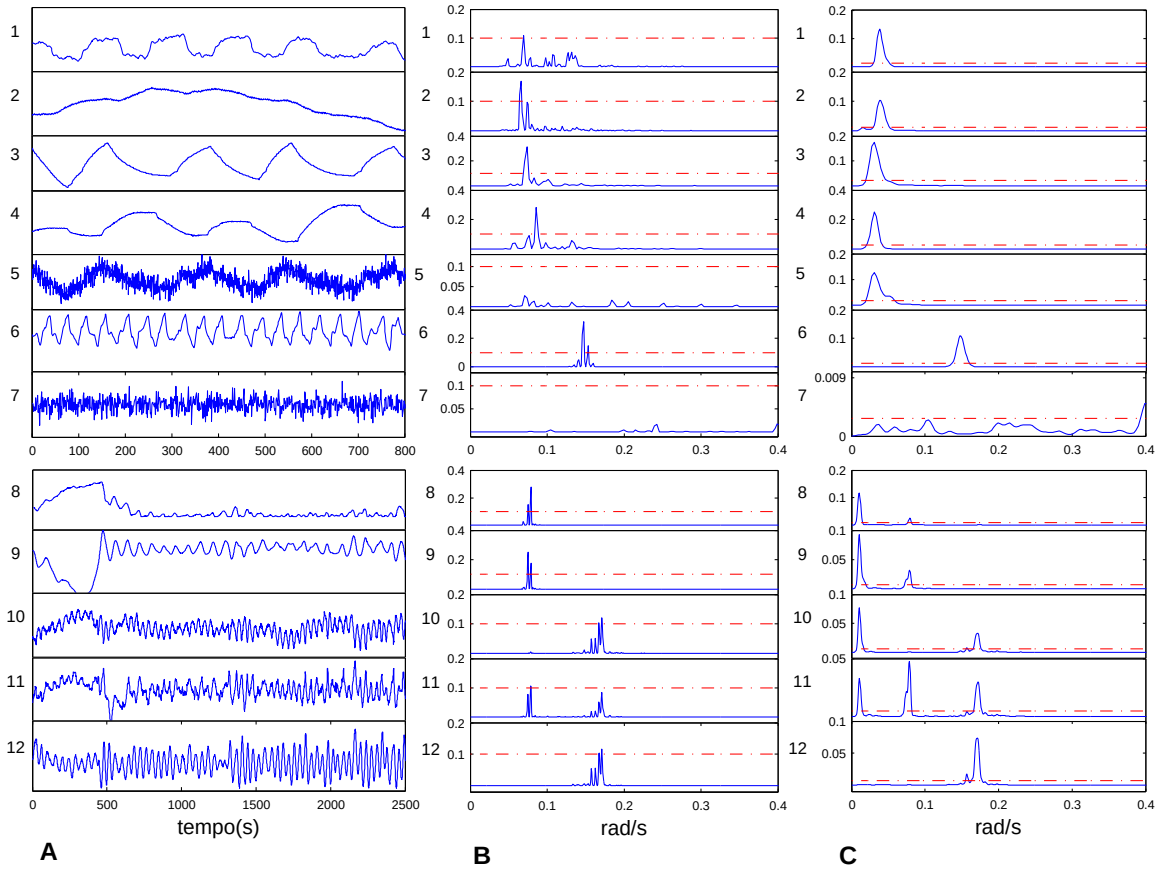

Figura 4.1: Análise oscilatória para os sinais 1-12. A) sinais no tempo; B) PSD do sinal sem as contribuições; C) PSD quando as contribuições propostas foram aplicadas.

Quando conveniente e para facilitar a análise do sinal mostrado na Fig.4.1-A, algumas discussões desta seção apresentarão os períodos em segundos ao invés das frequências em rad/s. Para melhor visualização dos espectro da Fig. 4.1, o máximo valor do eixo das frequências foi ajustado para 0.4rad/s.

4.1.1 Análise de Oscilação Utilizando a PSD

A utilização do filtro de pré-processamento com janela [0.02 0.99]Hz/Hz pode ocasionar perda de informações relevantes para a análise oscilatória do sinal. Neste estudo de caso é possível observar este fato e verificar que a utilização de f_l, como limite inferior para este filtro reduz consideravelmente este problema.

Grande parte dos sinais da Fig.4.1-A é oscilatória, e muitos deles aparentam possuir múltiplas frequências de oscilação. Entretanto, em alguns casos baixas frequências facilmente visualizadas na Fig.4.1-A, sinais 1-2 com $\overline{T_p} = 200s$ e sinais 3-5 com $\overline{T_p} = 160s$, não puderam ser detectadas no espectro exibidos na Fig. 4.1-B. As frequências mencionadas foram descartadas pela utilização de filtros de pré-processamento com limiar inferior a 0.02Hz/Hz. Já para os espectros visualizados na Fig.4.1-C as citadas frequências foram preservadas, pois o tempo T_w foi suficientemente grande para estas frequências apresentarem mais de 4 cruzamentos por zeros no sinal no tempo.

Frequências com alta energia devem ter prioridade na análise e tratamento dos sinais oscilatórios, já que a energia do sinal está diretamente relacionada com a amplitude do sinal oscilatório. As altas frequências dos sinais mostradas na Fig.4.1-B não foram apresentadas na PSD da Fig.4.1-C, pois a energia destas frequências são pequenas quando comparadas com a energia de baixa frequência dos mesmos sinais. Para estes sinais as baixas frequências correspondem em média a 95% da energia total do sinal.

Para todos os sinais da Fig. 4.1-A, o vazamento espectral dividiu a banda de frequência correspondente a uma frequência de oscilação do sinal ocasionando a diminuição da sua energia, assim como verifica-se na Fig. 4.1-B. A utilização da janela Gaussiana permitiu minimizar este problema, assim como exibido na Fig. 4.1-C, facilitando e garantindo melhores resultados na detecção de oscilação. A seção 4.1.4 apresentará estes resultados .

4.1.2 Análise do Limiar de Potência

O valor calculado do limiar de potência ε_p foi analisado e comparado com os resultados apresentados para um valor fixo. Alguns sinais oscilatórios não puderam ser identificados quando este limiar foi de 0,1; assim como mostra o sinal 11.

Na Fig.4.1-C verifica-se que ε_p foi corretamente calculado para todos os sinais, já que todas as bandas de frequência relacionadas com as frequências de oscilação no sinal no tempo foram corretamente selecionadas por este parâmetro. As bandas de frequências com baixa energia dos sinais 7 e 12 foram descartadas na análise oscilatória do sinal, visto que sua energia não foi suficiente para ser considerada na análise oscilatória do sinal.

4.1.3 Frequências Próximas das Bordas dos Filtros

A detecção de oscilação pode gerar resultados incertos quando os limites dos filtros passa-banda são alocados no eixo da frequência de tal forma que dividem o espectro do sinal em duas faixas. A solução encontrada para as falsas detecções é ignorar a detecção do comportamento oscilatório para sinais que possuem frequência de oscilação próximas dos limites destes filtros (Thornhill et al., 2003b).

4.1.4 Detecção de Frequências

O conjunto de dados da Fig.4.1 foi analisado e a Tabela 4.1 mostra as frequências detectadas quando as contribuições propostas ao método ODC são utilizadas (coluna B) e quando elas não são utilizadas (coluna A). Todas as frequências listadas nesta tabela possuem períodos considerados regulares ($r > 1$ e $R_{acf} > 0,5$). Esta tabela mostra também na sub-coluna "Energia"a energia de cada banda correspondente a sua frequência de oscilação. Na sub-coluna "Grupos"é exibido o valor em que a frequência foi agrupada, assim como abordado na seção 2.6. Adicionalmente, para a Coluna B, a sub-coluna "Energia (3.12)"apresenta a energia calculada a partir da equação (3.12), a qual será utilizada na determinação da provável causa raiz.

Embora o sinal no tempo claramente mostra a presença de baixas frequências para os sinais 1-5; $\overline{T_p}$=160s, $\overline{T_p}$=161s, $\overline{T_p}$=198s, $\overline{T_p}$=210s, e $\overline{T_p}$=205s, respectivamente, estas não são relacionadas na coluna A da Tabela 4.1. Estas oscilações não foram detectadas devido ao uso do limiar inferior do filtro de pré-processamento utilizado no tratamento de bordas do sinal ter descartado estas informações. Os sinais 5 e 14 ($\overline{T_p}$=146s / 0.043rad/s) não foram caracterizados como oscilatórios pela mesma razão apresentada anteriormente, mesmo quando frequências de oscilação estavam presentes. A Tabela 4.1 - coluna A, confirma esta observação. Estas frequências foram detectadas quando o proposto filtro passa-banda foi utilizado [f_l 0.99]Hz/Hz, ver Tabela 4.1 - coluna B. As baixas frequências concentraram aproximadamente 90% da energia oscilatória destes sinais, razão pela qual as altas frequências não puderam ser visualizadas na Fig.4.1-C e detectadas.

O vazamento espectral apresentado nos sinais 6, 9-12, ver Fig.4.1-B, produziu diversas bandas de frequências referentes a uma única frequência de oscilação do sinal no tempo, tendo como conseqüência a detecção de frequências próximas, as quais estão apresentadas na Tabela4.1-coluna A. Estas foram eliminadas nos resultados apresentados na coluna B com a utilização da janela de Gauss, assim como apresentado na seção 2.6.

Para o sinal 12 somente uma frequência foi apresentada pela Tabela 4.1 - coluna B, para duas bandas de frequências selecionadas, veja Fig.4.1-C, entretanto bandas com energia menor

que 10% da energia total da PSD não foram consideradas nesta análise. O sinal 7 foi caracterizado com sendo não oscilatório em ambas colunas da Tabela 4.1, já que a energia da banda de frequência selecionada não possuía energia suficiente para sua análise oscilatória.

Diversas frequências foram caracterizadas para os sinais 8-11 visualizadas na Fig.4.1-C. Duas bandas de frequências foram selecionadas para os sinais 8-10, e três para o sinal 11, as quais possuem frequências correspondentes detectadas, ver Tabela 4.1 - coluna B. Algumas destas frequências não puderam ser identificadas quando as contribuições propostas não foram utilizadas, ver Tabela 4.1 - coluna A, uma vez que o limiar inferior do filtro de pré-processamento e o valor fixo de $\varepsilon_p = 0.1$ eliminaram informações relevantes do sinal utilizadas para sua análise oscilatória. A banda de frequência para a componente com frequência de 0.170rad/s não foi selecionada no sinal 11, e a baixa frequência presente nos sinais 8-11 foram eliminadas pelo emprego do filtro com limiares de [0.02 0.99]Hz/Hz.

Concluímos enfatizando os melhores resultados obtidos pelo método ODC quando as contribuições foram aplicadas. Baixas frequências foram detectadas para os sinais 1-6 (siderúrgica) e 8-11 (mineração). O uso de janela de Gauss no cálculo da PSD reduziu o efeito do vazamento espectral e apenas uma frequência foi detectada para cada frequência existente no sinal no tempo. Finalmente, múltiplas frequências de oscilação foram detectadas para os sinais 8-11 quando o limiar de energia foi apropriadamente calculado, sendo que nenhum ajuste manual foi necessário.

Tabela 4.1: Frequências e energias dos sinais 1-12

Sinal	A Frequência Detectada (rad/s)	A Frequência Detectada Energia	A Grupo (rad/s)	B Frequência Detectada (rad/s)	B Frequência Detectada Energia	B Grupo (rad/s)	Energia (3.12)
1	0,070	0,266	0,070	0,041	0,970	0,040	0,0250
2	0,0692	0,252	0,070	0,039	0,914	0,040	0,0198
3	0,070	0,433	0,070	0,031	0,821	0,032	0,0254
4	0,085	0,304	0,085	0,032	0,980	0,032	0,0347
5				0,031	0,355	0,032	0,0255
6	0,149 0,151	0,586 0,240	0,149	0,150	0,971	0,150	0,0332
7							
8	0,079	0,703	0,079	0,011 0,079	0,779 0,131	0,011 0,079	0,1184 0,0982
9	0,073 0,079	0,425 0,439	0,073 0,079	0,011 0,078	0,667 0,252	0,011 0,079	0,1725 0,1483
10	0,157 0,170 0,172	0,191 0,174 0,262	0,157 0,170	0,011 0,170	0,482 0,329	0,011 0,170	0,0918 0,0891
11	0,073 0,079	0,218 0,422	0,073 0,079	0,011 0,078 0,171	0,190 0,345 0,291	0,011 0,079 0,170	0,0757 0,0792 0,0784
12	0,160 0,170 0,173	0,232 0,193 0,249	0,157 0,170	0,170	0,751	0,170	0,0732

4.1.5 Causa Raiz das Oscilações

A análise da causa raiz terá base no procedimento apresentado na seção 3.4 e será realizada para os sinais apresentados na Fig.4.1. Devido ao desconhecimento da relação entre os sinais de 1-7 e de 8-12 a validação dos resultados não será possível.

Os valores de energia exibidos nas Fig.4.2 e 4.3 foram obtidos a partir da Tabela 4.1, onde a energia foi calculada usando (3.12). Esta análise é realizada separadamente para os sinais 1-7, e 8-12, já que estes dois conjuntos de sinais correspondem a diferentes processos industriais. Para os sinais da siderurgia (sinais 1-7) foram detectadas 3 frequências, sendo que a análise da energia de cada frequência de oscilação indicou como provável causa raiz o sinal 1 para a frequência 0.040rad/s e o sinal 4 para a frequência 0.032rad/s, ver Fig.4.2. A frequência 0.150rad/s foi detectada apenas para o sinal 6. O sinal 7 não possui comportamento oscilatório.

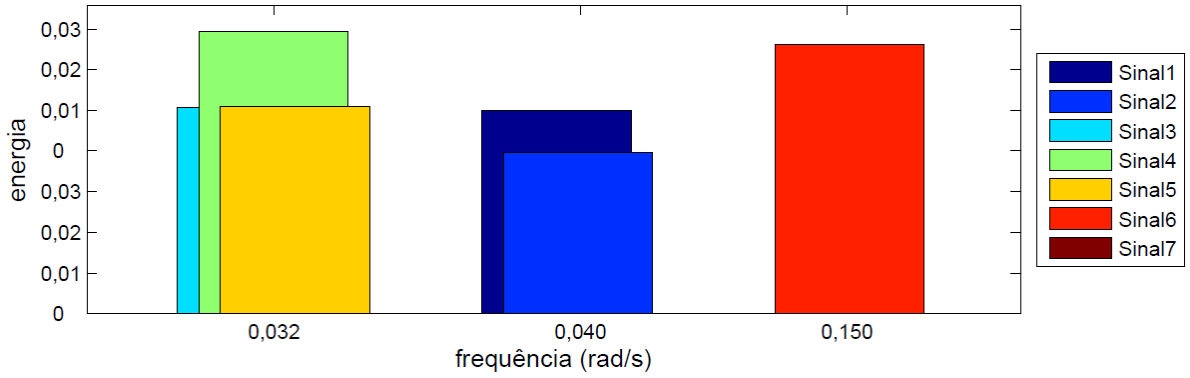

Figura 4.2: Análise de causa raiz para os sinais 1-7

Para o processo de mineração (sinais 8-12), o sinal 8 foi indicado como provável causa raiz das frequências 0.011rad/s e 0.079rad/s, e o sinal 10 para a frequência 0.170rad/s, como mostra a Fig. 4.3.

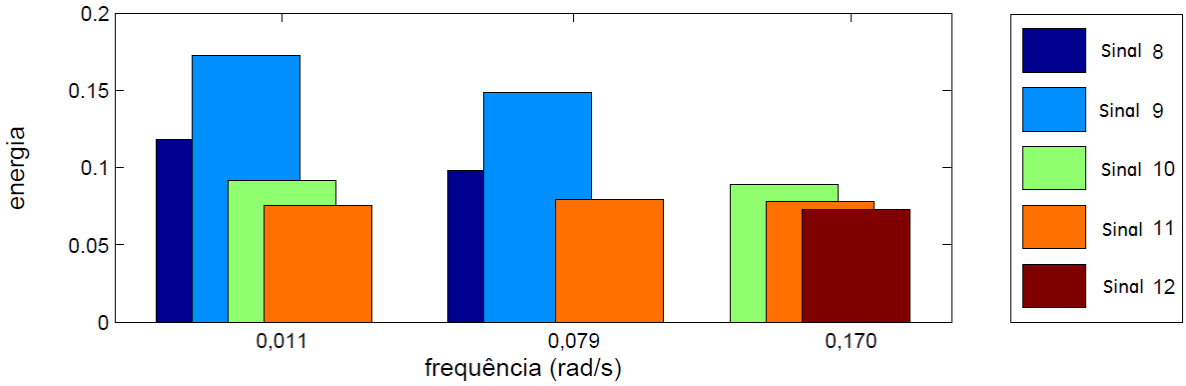

Figura 4.3: Análise de causa raiz para os sinal 8-12

A validação dos resultados encontrados para a provável causa raiz não será realizada para este estudo de caso, pois a relação de causa e efeito entre as malhas aqui consideradas não é de nosso conhecimento. Esta análise será melhor discutida para os processos estudados nas seções 4.2 e 4.2.1.

4.2 Planta Termoelétrica

A planta industrial considerada nesta análise está apresentada na Fig.4.4. Os dados aqui utilizados foram coletados com período de amostragem de 1 segundo e o tempo total de coleta de dados foi de 1100 segundos. A determinação da causa raiz será baseada na energia calculada em (3.12).

O funcionamento desta planta baseia-se na queima de gás combustível para funcionamento de uma turbina, a qual é utilizada como força motriz para um gerador elétrico. A válvula GC-1 controla o fluxo e pressão de gás que será injetado na câmara de combustão da turbina de alta potência (HP): quanto maior o fluxo de gás queimado, maior será a velocidade da HP. Os gases pressurizados que deixam a HP são forçados a passar pela turbina de potência (TP) fazendo-a girar. A abertura da válvula GC-1 é registrada pelo sensor de posição ZT-020; a pressão de gás é registrada pelo transmissor PT-001/A e PT-001/B, sendo a média destes dois registrada em PT-001. A velocidade da HP é dada pelo máximo valor entre dois sensores de velocidade (ST-001/A e ST-001/B), sendo o resultado deste cálculo enviado a ST-001. Da mesma forma, para TP a velocidade é dada pelo máximo valor lido entre ST-002/A e ST-002/B, o qual é registrado em ST-002.

A análise de causa raiz baseia-se nos valores coletados em ZT-020, PT-001, ST-001, e ST-002, os quais apresentam comportamento oscilatório. Estes sinais com suas respectivas PSD são exibidos na Fig.4.5. É de conhecimento que ST-002 varia em função de ST-001 e que a válvula GC-1, com indicação de abertura dada por ZT-020, controla a pressão de gás, implicando diretamente no valor de ST-001 e nos valores registrados por PT-001.

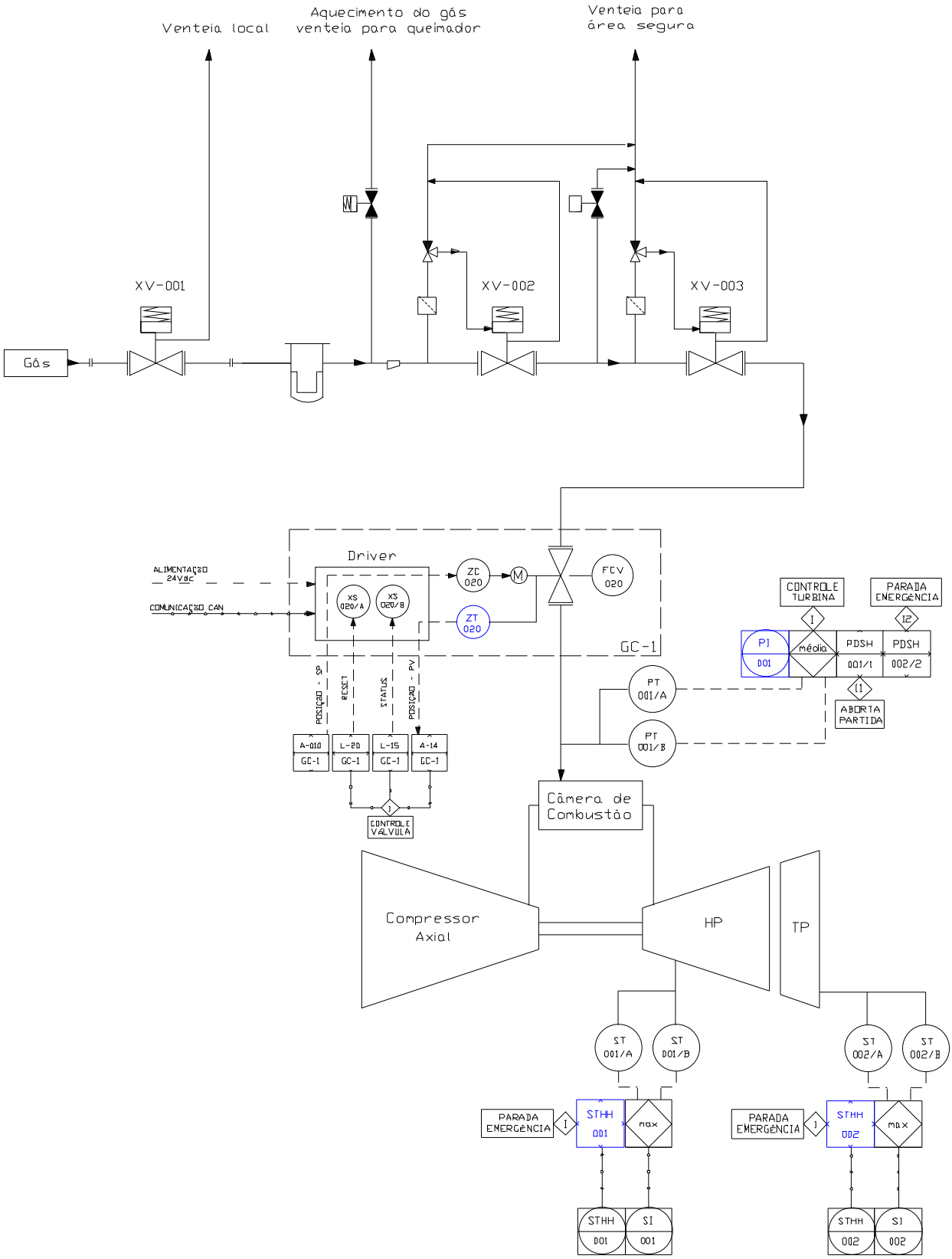

Figura 4.4: Sistema de gás combustível de uma termoelétrica

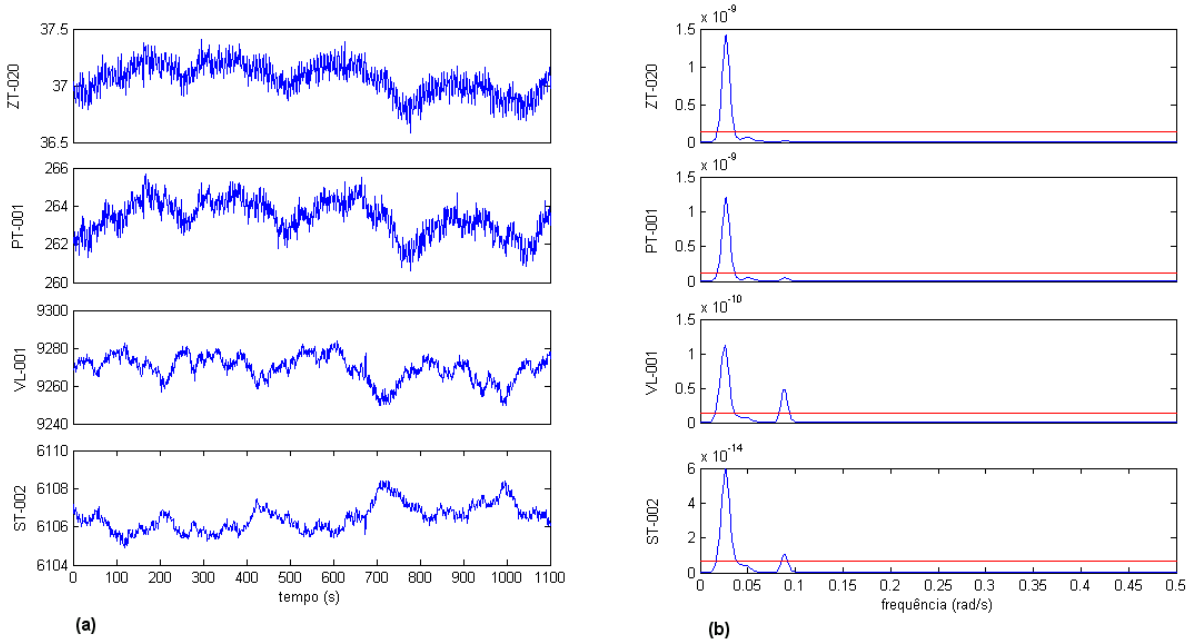

Figura 4.5: Sinais oscilatórios coletados em uma termoelétrica

Para a análise do comportamento oscilatório destes sinais foram utilizados os valores apresentados na Tabela 4.2, os quais foram calculados utilizando as contribuições propostas neste trabalho. Verifica-se pela Tabela 4.2 que os sinais coletados em ZT-020, PT-001, ST-001, e ST-002 apresentam oscilação com frequência de 0,0272rad/s; os sinais ST-001 e ST-002 apresentam uma segunda frequência que é de 0,0889rad/s. Os resultados para a energia oscilatória dos sinais apresentados na Fig.4.6 mostram que para a frequência 0,0889rad/s a malha com maior valor de energia oscilatória é encontrada no sinal proveniente do sensor ZT-020, seguido por PT-011, ST-001, e ST-002. Já para a segunda frequência a provável causa raiz está localizada em ST-001, uma vez que este possui maior valor de ζ_i.

Os resultados apresentados podem ser validados pelo conhecimento da dinâmica do processo. Considerando-se a existência de nenhuma interferência mecânica interna do equipamento, já que os dados coletados são provenientes de uma planta recém instalada; e sabendo que a carga do gerador elétrico e a pressão de fornecimento de gás combustível estavam estáveis durante a coleta dos dados. A variação da velocidade da LP e PT somente poderá ocorrer com a variação do fluxo de gás à jusante da válvula GC-1. Assim, os resultados de causa raiz apresentados para a frequência 0,0272rad/s são consistentes com a relação de causa e efeito do processo, já que a abertura e fechamento da válvula de gás combustível GC-1 é registrada pelo sensor ZT-020.

Para a segunda frequência a TP somente poderá variar de velocidade se o fluxo de ar que passa por ela variar. Entretanto este fluxo está diretamente relacionado com a velocidade da HP, o que está de acordo com o resultado apresentado para a provável causa raiz da frequência

0,0889rad/s.

Assim, confirma-se que a utilização da energia oscilatória do sinal, medida a partir da PSD, é uma abordagem plausível para determinar a provável causa raiz dos sinais oscilatórios provenientes de um mesmo processo industrial.

Tabela 4.2: Determinação da causa raiz para os sinais de uma planta termoelétrica

Sinal	Frequência Detectada (rad/s)	Frequência Grupo (rad/s)	Energia (3.12)
ZT-020	0,0272	0,0272	0,0398
PT-001	0,0273	0,0272	0,0390
ST-001	0,0282	0,0272	0,0359
	0,0889	0,0889	0,0034
ST-002	0,0276	0,0272	0,0283
	0,0894	0,0889	0,0027

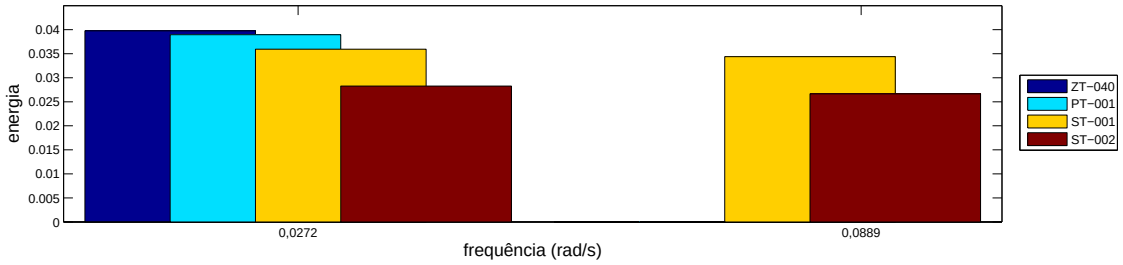

Figura 4.6: Análise de causa raiz para os sinais de uma termoelétrica

4.2.1 Planta Redutora de Pressão

A planta industrial mostrada na Fig.4.7 representa uma planta redutora de pressão de gás de um forno de uma usina de pelotização. Os dados aqui utilizados foram coletados com período de amostragem de 1 segundo e tempo total de coleta de dados foi de 500 segundos. A determinação da causa raiz será baseada na energia calculada usando (3.12).

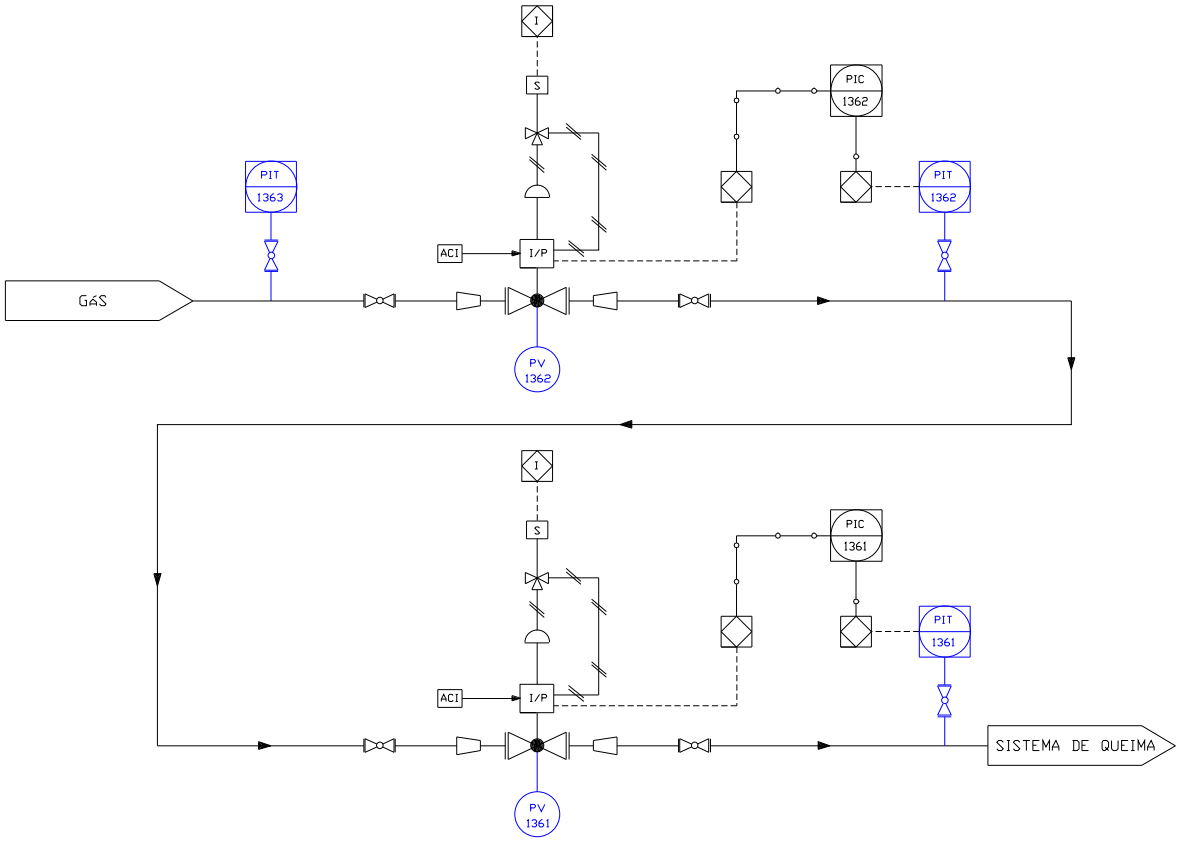

Figura 4.7: Planta de redutora de pressão de gás

Neste processo, a válvula PV-1362 tem a função de reduzir a pressão de gás de 10kgf/cm^2, a montante, para 4kgf/cm^2, a jusante. A válvula PV-1631 reduz esta última pressão para 0,120kgf/cm^2. Os sinais de controle deste processo, normalizados pela faixa de operação de cada sinal, são exibidos na Fig.4.8.

A análise oscilatória dos sinais coletados nesta planta industrial detectou a frequência de oscilação de 0,102 rad/s, ver Tabela 4.3. Pelo gráfico do sinal no tempo, mostrado na Fig.4.8, é possível verificar que estes sinais apresentam mais de uma frequência de oscilação, entretanto a frequência 0,102rad/s apresenta maior energia.

A energia calculada para cada frequência de oscilação é apresentada na Tabela 4.3 e exibida na Fig.4.9. Tais energias indicam que a malha PV-1361 é responsável pelo comportamento oscilatório das demais malhas. Este resultado é validado pelas observações apresentadas por Bravim (2010), o qual afirma que PV-1361 produz comportamento oscilatório nas demais malhas devido a esta válvula ser super dimensionada, e que a válvula PV-1362 apresenta agarramento no seu transmissor de posição, visto que diferentes pressões foram registradas para uma mesma indicação de abertura.

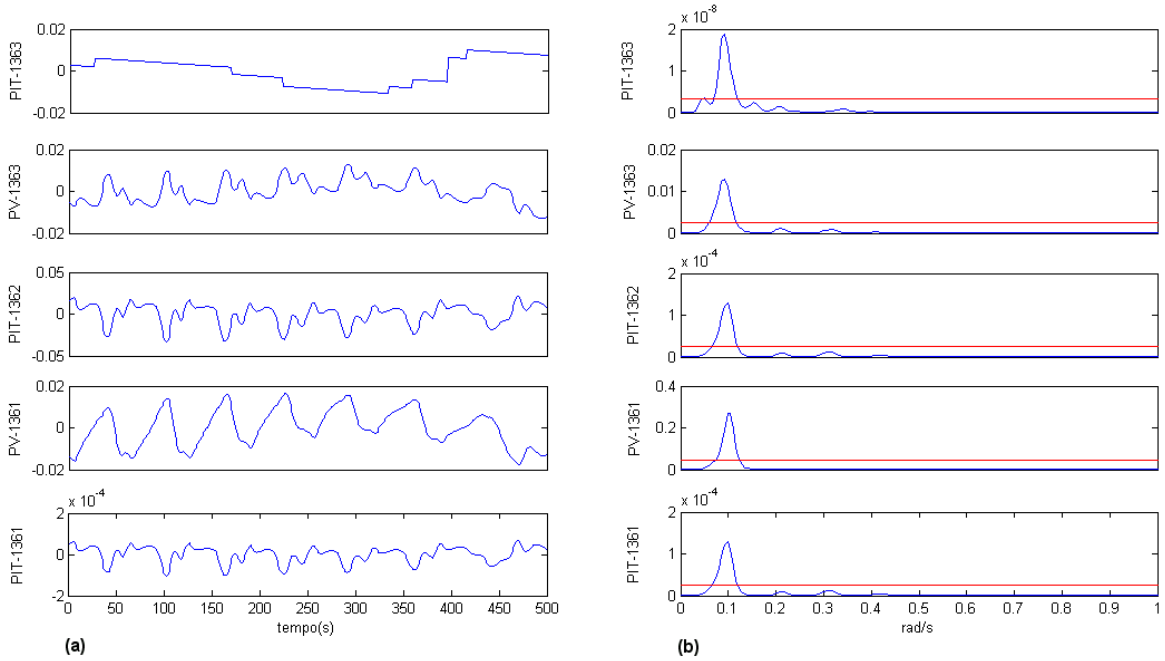

Figura 4.8: Sinais da planta de controle de pressão. a) Sinal no tempo normalizado a partir da sua faixa de trabalho; b) PSD do sinal no tempo com o limiar ε_p

Tabela 4.3: Determinação da causa raiz para os sinais de uma planta redutora de pressão

Sinal	Frequência Detectada (rad/s)	Frequência Grupo (rad/s)	Energia (3.12)
PIT-1363	0,0869	0,1020	0,0368
PV-1362	0,0900	0,1020	0,0557
PIT-1362	0,1015	0,1020	0,0544
PV-1361	0,1019	0,1020	0,0662
PIT-1361	0,1015	0,1020	0,0335

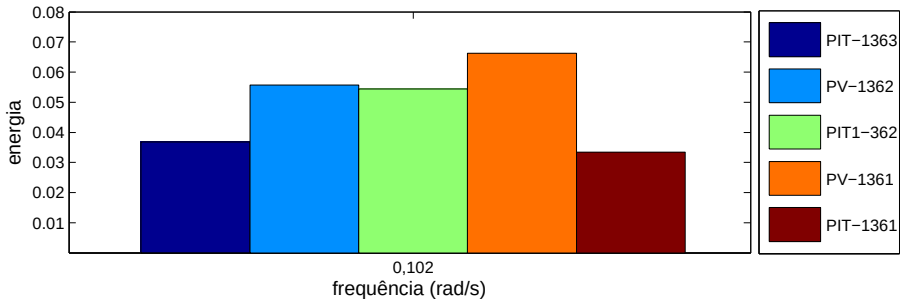

Figura 4.9: Análise da causa raiz a partir da energia das frequências de oscilação

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Neste trabalho, um método para detecção e caracterização de oscilações em processos industriais foi apresentado, discutido e aprimorado. O método baseia-se na medição do período do sinal autocorrelacionado obtido da transformada inversa de Fourier de bandas de frequência selecionadas do gráfico de densidade espectral de potência (PSD). O bom funcionamento do algoritmo depende da escolha de parâmetros tais como banda do filtro de pré-tratamento, limiar de potência para escolha das faixas de frequências no gráfico de PSD, redução do vazamento espectral, os quais eram determinados de forma empírica no algoritmo original.

As propostas apresentadas neste trabalho contribuíram significativamente para que o algoritmo possa ser aplicado a sinais em geral, coletados de malhas de controle, como demonstrado pela aplicação aos estudos de caso.

As bandas do pré-filtro foram selecionadas a partir da duração da janela de dados coletados, por representar uma escolha mais adequada e natural para o usuário.

As bandas de frequência da PSD são selecionadas usando um limiar de potência que considera a distribuição estatística da PSD como sendo gaussiana, o que permite uma parametrização baseada nas características do sinal. Tal contribuição permitiu a aplicação do algoritmo a processos industriais, sem que sejam necessárias as intervenções manuais.

O vazamento espectral foi atenuado diminuido a presença de picos de frequências na PSD que não estão relacionados com as frequência originais presente no sinal. A escolha adequada de janelas na análise espectral reduziu significativamente este problema conferindo ao método resultados claros e precisos.

Como o algoritmo original não permite a análise da causa raiz das oscilações, propostas foram feitas comparando a energia do sinal oscilatório em diferentes malhas. A energia oscilatória do sinal foi calculada usando a PSD e considerando a faixa de operação dos sinais.

Desta forma a variabilidade pôde ser empregada para determinação da provável causa raiz de sinais com múltiplas frequências de oscilação. Processos nos quais as relações entre os sinais analisados eram conhecidas foram utilizados para validar estas análises.

Capítulo 6

TRABALHOS FUTUROS

Detecção de oscilações com comportamento intermitentes

Em processos industriais oscilações podem ocorrer intermitentemente, o que poderá causar falhas nos resultados dos algoritmos propostos na literatura que se baseiam na ACF. Até mesmo a mudança de set point poderá influenciar tais resultados. O estudo de melhorias para algoritmos da literatura, ou novas proposta de algoritmos, que detectam oscilações intermitentes ainda é uma necessidade existente.

Detecção de oscilações com frequência variante no tempo

Os algoritmos de detecção de oscilações variantes no tempo basicamente utilizam sucessivas janelas de amostragem de dados para detectar este tipo de comportamento do sinal. Entretanto a escolha desta janela torna-se difícil quando não se tem informações sobre a frequência do sinal oscilatório. Propõe-se portanto o estudo de um novo algoritmo para detectar oscilações com frequência variante no tempo, sem que seja utilizado sucessivas janelas de dados.

Determinação da provável causa raiz

A utilização da energia de oscilação do sinal, proposta neste trabalho, mostrou-se simples e aplicável para determinar a provável causa raiz das oscilações. Entretanto este método apresenta erros que poderiam ser eliminados com a aplicação conjunta das matrizes de causa e efeito do processo. Pesquisas neste sentido são necessárias.

Bibliografia

Bauer, M., Cox, J. W., Caveness, M. H., Downs, J. J., and Thornhill, N. F. (2007). Finding the direction of disturbance propagation in a chemical process using transfer entropy. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 15(1):12–21.

Bialkowski, W. (1993). A view from both sides of the gap. In *Dreams versus reality*, number 94(11) in 1, pages 19–27. Pulp and Paper, Canadá.

Bravim, V. D. (2010). Análise do sistema de queima do forno da usina de pelotização nibrasco 6 para redução de oscilação nas malhas de controle de pressão de gás natural. Universidade Federal do Espírito Santo.

Chatfield, C. (2003). *The analysis of time series. An introduction*. Chapman and Hall /CRC, Boca Raton, Londres, Inglaterra, sexta edição edition.

Ender, D. (1993). Process control performance: not as good as you think. *Control Engineering*, pages 180–190.

Farenzena, M., Trierweiler, J. O., and Shah, S. L. (2009). Variability matrix: A novel tool to prioritize loop maintenance. *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes, Istanbul, Turquia*.

Forsman, K. and Stattin, A. (1998). A new criterion for detecting oscillations in control loops. In *In European control conference*, Karlsruhe, Alemanha.

Hägglund, T. (1995). A control-loop performance monitor. *Control Engineering Practice*, 3(11):1543 – 1551.

Horch, A., Thornhill, N., Seborg, D., Laing, D., Michael Grimble, P. M., Xial, H., Boll, M., Nohr, M., Corsi, S., Bannauer, M., and Zimmer, G. (2007). Benchmarking control loop with oscillation and stiction. In *Process control performance assessment*, Advances in industrial controls, pages 227–257. Springer Londres, Londres.

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C., and Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum

for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society de Londres. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971):903–995.

Karra, S. and Karim, M. N. (2009). Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops. *Control Engineering Practice*, 17(8):939 – 956.

Koopmans, L. H. (1995). *The Spectral Analysis of Time Series*, volume Volume 22 of *Probability and Mathematical Statistics - A Series of Monographs and Textbooks*. Academic Press, Inc., 525 B Street, Suite 1900, San Diego, California 92101-4495.

Li, R. and Wang, X. Z. (2002). Dimension reduction of process dynamic trends using independent component analysis. *Computers and Chemical Engineering*, 26(3):467–473. cited By (since 1996) 41.

Miao, T. and Seborg, D. (1999). Automatic detection of excessively oscillatory feedback control loops. In *Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 359 –364 vol. 1.

Rinehart, N. (1997). The impact of control loop performance on the successful application of advanced control. In *In Aspen world conference proceedings*, Boston, MA.

Ruel, M. (2000). Stiction the hidden menace. *Control Magazine*.

Shinskey, D. (1990). How good are your controller in absolute performance and robustness? *Measurments & Control*, 23:114–120.

Srinivasan, R., Rengaswamy, R., and Miller, R. (2007). A modified empirical mode decomposition (emd) process for oscillation characterization in control loops. *Control Engineering Practice*, 15(9):1135 – 1148.

Thambirajah, J., Benabbas, L., Bauer, M., and Thornhill, N. F. (2009). Cause-and-effect analysis in chemical processes utilizing xml, plant connectivity and quantitative process history. *Computers & Chemical Engineering*, 33(2):503 – 512.

Thornhill, N. F., Cox, J. W., and Paulonis, M. A. (2003a). Diagnosis of plant-wide oscillation through data-driven analysis and process understanding. *Control Engineering Practice*, 11(12):1481 – 1490. Award winning applications-2002 IFAC World Congress.

Thornhill, N. F. and Hägglund, T. (1997). Detection and diagnosis of oscillation in control loops. *Control Engineering Practice*, 5(10):1343 – 1354.

Thornhill, N. F., Huang, B., and Zhang, H. (2003b). Detection of multiple oscillations in control loops. *Journal of Process Control*, 13(1):91 – 100.

Thornhill, N. F., Shah, S. L., Huang, B., and Vishnubhotla, A. (2003c). Spectral principal component analysis of dynamic process data. *Control Engineering Practice*, 10(8):833 – 846.

Uitert, G. V. (1978). Reduction of leakage and increase of resolution in power spectral density and coherence functions. *Nuclear Instruments and Methods*, 157(3):583 – 589.

Xia, C. and Howell, J. (2003). Loop status monitoring and fault localisation. *Journal of Process Control*, 13(7):679 – 691. Selected Papers from the sixth IFAC Symposium on Bridging Engineering with Science.

Xia, C. and Howell, J. (2005). Isolating multiple sources of plant-wide oscillations via independent component analysis. *Control Engineering Practice*, 13(8):1027 – 1035. Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (S afeprocess 2003).

Xia, C., Howell, J., and Thornhill, N. F. (2005). Detecting and isolating multiple plant-wide oscillations via spectral independent component analysis. *Automatica*, 41(12):2067 – 2075.

Yang, J. C. and Clarke, D. W. (1999). The self-validating actuator. *Control Engineering Practice*, 7(2):249 – 260.

Apêndice A

TERMOS E DEFINIÇÕES

Análise por Componentes Independentes - ICA

Método computacional utilizado para extrair sinais independentes (ICs) a partir de uma mistura de sinais. Este método é bastante conhecido pelo problema *coktail party* o qual consiste em separar as vozes de diversas pessoas que falam ao mesmo tempo em uma sala.

Análise por Componentes Principais - PCA

Também conhecida por Transformada Discreta de Karhunen-Loève, o PCA é um método matemático que utiliza transformações ortogonais para converter um conjunto de observadores que provavelmente estão correlacionados em um conjunto de observadores que com variáveis independentes, as quais são chamadas de "componentes principais".

Autocorrelação - ACF

A *Autocorrelação* é a correlação cruzada de um sinal com ele mesmo. A ACF é uma ferramenta matemática para isolar modelos repetitivos, tais como a presença de sinais periódicos que estão em meio a sinais ruidosos.

Decomposição de Modo Empírico - EMD

Método computacional utilizado para separara e detectar múltiplas frequências de oscilação presente em um sinal oscilatório. O EMD é caracterizado por gerar uma coleção de Função de Modo Intrínseco obtida no domínio do tempo.

Densidade Espectral de Potência- PSD

A PSD é definido como uma função real de frequência variável associada com processos estocástico estacionário. Esta função é frequentemente conhecida como espectro do sinal. Intuitivamente, a densidade espectral mede a frequência contida em um processo estocástico e identifica as periodicidades. A PSD é basicamente obtida pelo emprego da FFT aplicada a um sinal autocorrelacionado elevada ao quadrado.

Função de Modo Intrínseco - IMF

O termo *Função de Modo Intrínseco* é utilizado para expressar a decomposição de um sinal em diversas componentes. Esta decomposição é baseada na extração direta da energia associada com diversas escala de tempos intrínsecas (Huang et al., 1998).

Método ODC

Método computacional baseado na ACF o qual é utilizado para detectar múltiplas frequências de oscilação de um sinal oscilatório.

Regra dos Três Sigmas

Em estatística a *Regra dos Três Sigmas*, ou *Regra 68-95-99.7*, ou *Regra Empírica*, determina que em uma distribuição normal aproximadamente todos os valores estão concentrados a 3 desvios padrões da média. Cerca de 68,27% dos valores concentram-se à 1 desvio padrão da média. Similarmente 95,45% dos valores apresentam-se à 2 desvio padrão da média. E 99,73% dos valores estão à 3 desvios padrões da média da amostra.

Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é uma transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base sinusoidal, i.e., como soma ou integral de funções sinusoidais multiplicadas por coeficientes. Existem diversas variações diretamente relacionadas desta transformada, dependendo do tipo de função a transformar. A Transformada de Fourier pode ser vista como um caso particular da Transformada Z.

Transformada Rápida de Fourier - FFT

Algoritmo computacional para calcular a Transformada Discreta de Fourier e sua inversa. Existem distintos algoritmos para cálculo da FFT os quais envolve um grande número de cálculos matemáticos, desde simples números complexos até a teoria de grupos e números.

Vazamento Espectral

O vazamento espectral é conhecido como qualquer tipo de operação que cria novas frequências no espectro do sinal, as quais não estão presentes no sinal original. Especificamente para a transformada de Fourier o termo vazamento espectral refere-se a efeitos causados no espectro do sinal devido à escolha inadequada do comprimento do vetor de dados ou do tempo de amostragem.