#### ADILSON AMARO LIMA RODRIGUES

#### DIAGNÓSTICO DE FONTES DE PERTURBAÇÃO EM PLANTAS INDUSTRIAIS

Tese apresentada 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. 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)

Rodrigues, Adilson Amaro Lima, 1978-

R696d Diagnóstico de fontes de perturbação em plantas industriais / Adilson Amaro Lima Rodrigues. – 2011. 95 f. : il.

Orientador: Celso José Munaro.

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

1. Oscilações. 2. Análise de componentes principais. 3. Processos de fabricação. 4. Análise espectral. I. Munaro, Celso José. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

#### ADILSON AMARO LIMA RODRIGUES

#### DIAGNÓSTICO DE FONTES DE PERTURBAÇÃO EM PLANTAS INDUSTRIAIS

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.

Setembro de 2011.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

die

Prof. Dr. José Leandro Félix Salles Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Saul Munareto Instituto Federal do Espírito Santo

<u>"Uma vida sem desafios não vale a pena ser vivida ..."</u> (Sócrates)

À minha família pelo apoio e paciência. Aos meus pais por sempre acreditarem nas minhas capacidades.

## Agradecimentos

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro para que esse trabalho hoje fosse realidade, e aos meus professores em especial, o meu orientador Celso Munaro, pela dedicação e paciência durante o desenvolvimento dessa dissertação.

Também agradeço aos meus colegas de laboratório, em especial ao Vinícius Moura, aos engenheiros Aderilson e Frederico Frossard pela colaboração, à gentileza da Arcelor Mittal Tubarão na cedência dos dados e a pronta disponibilidade do Eng. Valter na análise final do processo.

#### Resumo

Em processos industriais, perturbações oscilatórias ou não-oscilatórias normalmente se propagam ao longo de todo o processo, indicando a presença de degradações das malhas de controle, distúrbios, deficiências do sistema de controle ou equipamentos. Nessa dissertação é proposta uma metodologia baseada em dois algoritmos para detecção de perturbações e em seguida é feito o diagnóstico da fonte de perturbação. A detecção de sinais oscilatórios é feita usando a autocorrelação filtrada a partir do gráfico de densidade espectral. As perturbações não oscilatórias são detectadas via análise de componentes principais do gráfico de densidade espectral filtrada. O diagnóstico de ambas as perturbações é efetuado a partir do conhecimento da relação de causa efeito das malhas e da análise de energia. A aplicação da metodologia a uma central termoelétrica permite ilustrar o alcance dos algoritmos propostos.

#### Abstract

In industrial processes, oscillatory and non oscillatory disturbances usually travel along propagation paths, and are indicative of degradation in control loops, disturbances, limitations in equipments or control system. In this work, a methodology based in two algorithms from literature to detect these disturbances and the root cause analysis of theses disturbances is proposed. The detection of oscillatory signals is done using the filtered autocorrelation from the power spectral density. The non-periodic disturbances are detected through analysis of principal components of the power spectral density filter. The diagnosis of both disturbances is made based on the cause and effect relations of the loops and energy analysis. The application of the methodology to a power plant illustrates the usefulness of the proposed algorithms.

# Sumário

Capítulo 1: Introdução	16
1.1– Justificativa	17
1.2 – Métodos de detecção de perturbações	19
1.3 – Objetivos e a estrutura da dissertação	21
Capítulo 2 – Metodologias para a detecção de perturbações e busca de suas fontes	22
2.1– Metodologias para detecção de perturbação	22
2.1.1 – Algoritmo de detecção e caracterização de oscilação – ODC	22
2.1.1.1– Descrição conceitual do algoritmo - ODC	22
2.1.1.2- Etapas de implementação do método ODC	26
2.1.1.3- Agrupamento das freqüências de múltiplas malhas em uma matriz	26
2.1.2 – Algoritmo de análise de componentes principais de espectro - SPCA	29
2.1.2.1 – Pré-processamento e geração do PSD	29
2.1.2.2 – Formulação e etapas do algoritmo <i>PCA</i>	29
2.1.2.3 – Agrupamento dos dados por padrões de similaridade	32
2.1.3 – Modelo de teste	35
2.1.3.1 – Breve descrição do Modelo	35
2.1.3.2– Aplicação do modelo ao SPCA	37
2.2– Metodologias para busca de fonte de perturbação	43
2.2.1 – Metodologia baseada na matriz de causa-efeito para busca da fonte	43
2.2.1.1– Algoritmo de busca de caminhos de perturbação	43
2.2.1.2 – Processamento da informação no algoritmo de busca	44
2.2.1.3 – Cruzamento de informação e diagnóstico	45
2.2.2 – Método baseado na energia para busca da fonte	48
2.3 – Análise das duas metodologias usando o modelo	49
2.3.1 - Análise usando o algoritmo ODC	50
2.3.2 - Análise usando o algoritmo SPCA	52
2.4 – Proposta de metodologia	54
Capítulo 3 – Descrição do processo	56
3.1– Breve descrição da unidade industrial	56
3.1.1– Processo de Geração de energia de uma CTE	56

3.1.1.1– Processo de Queima de Combustíveis	. 58
3.1.1.2– Sistema de Vapor e Água	. 65
3.1.1.3 - Sistemas Auxiliares	. 75
Capítulo 4 – Estudo de caso	78
4.1 – Tratamento e análise dos dados	.78
4.2 – Obtenção da matriz de relação causa e efeito	.80
4.3 – Análise de perturbação oscilatória	.81
4.4 – Análise de perturbação não-oscilatória	.86
Capítulo 5 – Conclusões	89
Referências Bibliográficas	90

# Lista de Figuras

Figura 1.1 – Redução da variabilidade e Operação mais próxima das restrições	
(EMBIRUÇU, 2004)	17
Figura 1.2 – Métodos de detecção de distúrbios (THORNHILL, 2007)	19
Figura 2.1 – ACF e o PSD de um sinal com ruído (KARRA, 2009)	24
Figura 2.2 – (a) Modelo desenvolvido em Simulink, (b) Inter-relação das malhas do	
modelo (c) Matriz de relação de causa e efeito.	35
Figura 2.3 – Modelo de malha incluindo a FT, controlador e válvula de controle com	
possibilidade de atrito	36
Figura 2.4 – (a) Sinais das 5 malhas, (b) PSD dos sinais, (c) Componentes principais,	
(d) Gráfico de Scores	38
Figura 2.5 – Similaridade espectral dos sinais	10
Figura 2.6 – Gráfico SPE do exemplo	11
Figura 2.7 - (a) Exemplo de inter-relações entre malhas de controle, (b) Matriz de	
relação de causa e efeito – M (THORNHILL, 2009)	13
Figura 2.8 - (a) Exemplo de inter-relações entre malhas de controle, (b) Matriz de	
relação de causa e efeito, (c) Matrizes D e C	15
Figura 2.9 – Fluxograma do algoritmo busca de fonte perturbação	16
Figura 2.10 – Fluxograma para diagnóstico da fonte de perturbação	17
Figura 2.11 – Sinais no tempo	50
Figura 2.12 – a) Espectro sinal normalizado, b) matriz malhas versus freqüências	50
Figura 2.13 – a) <i>PSD SPCA</i> , b) Componentes principais – CP	52
Figura 3.1 – Visão geral do processo de uma CTE	57
Figura 3.2 – Diagrama de controle de Vazão dos Combustíveis	58
Figura 3.3 – Malha de controle de vazão de <i>BFG</i> simplificada	50
Figura 3.4 – Malha de controle de vazão de <i>LDG</i> simplificada6	51
Figura 3.5 – Malha de controle de vazão de COG principal e estabilizante	52
Figura 3.6 – Malha de controle de vazão superior e inferior de Alcatrão	52
Figura 3.7 – Fluxograma da estratégia de controle de limite cruzado	53
Figura 3.8 – Fluxo do ar na Fornalha6	54
Figura 3.9 – Visão geral do funcionamento do processo da CTE	55
Figura 3.10 – Esquema geral do ciclo vapor/condensado	56

Figura 3.11 – Esquema de controle da PIC-400 simplificada	67
Figura 3.12 – Esquema de controle da PIC-400 simplificada	68
Figura 3.13– Fluxo de vapor/condensado na Turbina	70
Figura 3.14 – Esquema simplificado do condensador	71
Figura 3.15 – Instrumentação e processo dos Aquecedores de baixa pressão	72
Figura 3.16 – Instrumentação e processo dos Aquecedores de alta pressão	74
Figura 3.17 – Esquema simplificado do Economizador	74
Figura 3.18 – <i>Header</i> de baixa pressão	75
Figura 4.1 – Droop Control	79
Figura 4.2 – Sinais no tempo das 30 malhas do processo	81
Figura 4.3 – Malhas versus energia dos sinais	82
Figura 4.4 – <i>PSD</i> das 30 malhas da CTE	83
Figura 4.5– <i>PSD</i> filtrado das 5 malhas com energia maior que 30%	86
Figura 4.6 – CPs (esq.) e Scores (dir.)	86

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros das FTs das malhas e controladores do modelo	37
Tabela 2.2 – Malhas versus padrão de similaridade do caso exemplo	42
Tabela 2.3 – Parâmetros das FTs das malhas e controladores do modelo	49
Tabela 2.4 – Nova matriz malhas versus freqüência	51
Tabela 2.5 – Matriz malhas fontes perturbação oscilatória	51
Tabela 2.6 – Matriz malhas versus padrão de similaridade	53
Tabela 3.1 - Calorias por unidade de volume dos combustíveis	59
Tabela 4.1 – Listagem das 30 malhas do processo	79
Tabela 4.2 – Relação Causa-Efeito das 30 malhas da CTE	80
Tabela 4.3 – Análise de Energia	83
Tabela 4.4 – Análise via matriz Causa-Efeito	84
Tabela 4.6 – Análise via matriz Causa-Efeito	87

# Nomenclatura

Símbolos	Descrição		
E	Parte não modelada da matriz X - SPCA		
J	Parâmetro de agarramento válvula (Jump)		
Р	Potência de Oscilação		
P <sub>pca</sub>	Limiar de PSDs com baixa energia – SPCA		
r	Regularidade de Oscilação		
R <sub>ACF</sub>	Razão de Decaimento – ODC		
$r_{xx}(k)$	Função de Autocorrelação		
S	Parâmetro de agarramento válvula (Stiction)		
$\overline{T_p}$	Período Médio		
$W_c$	Limiar de corte de baixa freqüência - SPCA		
$\epsilon_p$	Limiar de energia – ODC		
$\phi_x(f)$	PSD – Transformada discreta de Fourier da ACF		
σ	Desvio Padrão		
$ au_t$	Limiar de Truncamento – SPCA		
$ au_{sp}$	Limiar de Padrão de similaridade – SPCA		

Siglas e Glossário	Descrição			
ACF	Função de Autocorrelação			
AF	Vazão de ar de combustão (Air Flow)			
BFG	Gás de alto forno (Blast Furnace Gas)			
BSF	Vazão de vapor da Caldeira (Boiler Steam Flow)			
BM	Boiler Master			
CTE	Central Termoelétrica			
CDB	Calorie Data Base			
COG	Gás de apagamento a seco do coque (Coke Dry Quenching)			
СР	Componentes principais			
DFS	Algoritmo de Busca em Profundidade (Depth-First Search)			
ICA	Análise de componentes independentes (Independent component analysis)			
LDG	Gás de Aciaria (Linz-Donawitz Gas)			
М	Matriz de relação causa-efeito			
MF	Matriz malha versus freqüências			
NNMF	Fatorização da matriz não-negativa (Non-Negative Matrix factorization)			
ODC	Algoritmo de Detecção e Caracterização de Oscilação (Oscillation Detection and Characterization)			
P&ID	Diagrama de Instrumentação e tubulação (piping and instrumentation diagram/ drawing)			
PCA	Análise de Componentes Principais (Principal component analysis)			
PSD	Densidade Espectral de potência (Power Spectral Density)			
SPE	Predição quadrática do erro (Square prediction error)			
SVD	Decomposição de valores singulares (Singular value decomposition)			
SPCA	Algoritmo de análise de Componentes Principais			

TAR	Óleo derivado da queima do Coque - Alcatrão	
TFC	Total de calorias do combustível (Total fuel calorie)	
X	Matriz de N canais de freqüência m variáveis do processo - SPCA	

#### Capítulo 1: Introdução

A busca incessante pela competitividade implica que uma empresa para sobreviver ela precisa produzir com alta qualidade e em quantidade de energia suficiente para atender ao mercado mundial. Tudo isso com uso racional de energia, com baixo índice de reprocessamento, com segurança e respeitando às leis ambientais vigentes. Por isso a busca de melhorias em malhas de controle na indústria passou a ser uma constante, através da identificação precoce de tendências de degradação do desempenho que é muito importante no processo de manutenção preventiva (DIAS PASSOS, 2009; KARRA, 2009).

Vários estudos sobre monitoramento de desempenho mostram que grande parte das malhas de controle na indústria possuem baixo desempenho devido principalmente à má sintonia de controladores, equipamentos defeituosos, não-linearidades nas válvulas de controle causadas por agarramento, estratégias de controle inadequadas e inter-relação entre malhas (BECKMAN, 1997). As perturbações causadas pelo mau desempenho existentes nas malhas atualmente provêem da transferência de massa e/ou energia entre as diferentes unidades, que se manifestam na maioria das vezes na forma de oscilações que se propagam para outras malhas, dificultando a análise da causa raiz. Em sistemas de cogeração, que têm o propósito de buscar a eficiência energética racionalizando o consumo de combustível para responder às preocupações ambientais, as realimentações existentes colaboram para dificultar na identificação da malha que gerou a oscilação.

Estudos apontam que mais de 60% de todos os controladores industriais possuem algum tipo de problema de desempenho (BIALKOWSKI, 1993). Uma auditoria Canadense mostrou que de todas as malhas de controle analisadas em fábricas de papel e celulose; 30% eram oscilatórias devido aos problemas com válvulas, 30% mal sintonizadas, 20% tinham problemas de projeto e somente 20% tinham comportamento aceitável (BIALKOWSKI, 1993). Esses problemas acarretam sérios custos, desde variabilidade na qualidade do produto final passando pela degradação precoce dos equipamentos até uma possível parada devido à quebra dos mesmos. No Brasil, esses problemas representam gastos entre 15 e 25 bilhões de reais respectivamente em energia e serviços terceirizados em manutenção (IBGE, 2005). Uma melhoria de 1% na eficiência energética ou em algum outro componente de controle representaria economia de centenas de milhões anuais, segundo o estudo.

#### 1.1 – Justificativa

A área de controle de processos teve um grande avanço nas últimas três décadas, no entanto, a tarefa de responder a eventos anormais nos processos permanece ainda no modo manual. Esta tarefa envolve a oportuna detecção de eventos anormais, diagnóstico da origem das causas, apropriada tomada de decisões no controle supervisório e ações para levar o processo a retornar a um estado normal e seguro de operação. Um estado normal de operação consiste na menor variabilidade do processo, ou seja, na menor dispersão de suas medidas em relação ao valor médio significando melhor desempenho da unidade (DIAS PASSOS, 2009). A figura 1.1 mostra o gráfico de tendência de uma variável de processo, cuja variabilidade é reduzida após melhoria do seu controle. Inicialmente a referência (*setpoint*) foi mantida, longe da restrição para evitar que a mesma fosse violada. Após a redução da variabilidade, a referência pôde ser deslocada para um ponto mais próximo da restrição conseqüentemente de maior desempenho e maior lucratividade (EMBIRUÇU, 2004).



Figura 1.1 – Redução da variabilidade e Operação mais próxima das restrições (EMBIRUÇU, 2004)

Portanto torna-se cada vez mais importante a utilização de um sistema de controle automático de processos (CAP) capaz de garantir a mínima variabilidade, a despeito de variações nas demandas, nas condições de operação e nas características da matéria-prima e insumos. Operar na mínima variabilidade além de garantir um grande retorno econômico para empresa garante a segurança dos operários da unidade. Por isso, segundo Dias Passos (2009) é indiscutível a importância de sistemas automáticos de controle regulatório no controle dos custos e na qualidade de produção. Porém, ao contrário disso na maioria das plantas industriais, os sistemas de controle não conseguem desempenhar adequadamente o seu papel ou o fazem operando com um desempenho distante do ideal. Estudos como os já citados mostram o quão às malhas de controle apresentam um comportamento fora do desejado.

Apesar da maioria dos problemas de desempenho ser atribuídas às válvulas, a interrelação existente atualmente entre as malhas é também um dos causadores do baixo desempenho de malhas de controle.

Para Dias Passos (2009), desde a partida da planta, usualmente a sintonia dos controladores é ajustada apenas para satisfazer as condições mínimas que permitem o início da produção. Depois disso, o sistema regulatório começa a operar com deficiência sofrendo intervenções corretivas apenas em situações extremas (instabilidades que podem levar a uma parada da planta). Segundo Dias Passos (2009) existe várias razões que contribuem para manutenção desse cenário:

- Questão cultural, baseada:
  - Na falta de conscientização do impacto do desempenho do sistema de controle na vida útil dos equipamentos, no consumo de energia e insumos,
  - No medo por parte dos técnicos e operadores em alterar a configuração de um sistema de controle devido a sua complexidade,
  - Na possibilidade de intervir manualmente no processo para corrigir desvios excessivos quando necessário.
- Questão técnica, baseada:
  - Na ausência e escassez de recursos (materiais e humanos) para medir o desempenho de um sistema de controle e diagnosticar as falhas e realizar ajustes,
  - No agravante do processo ser dinâmico o que faz com que haja sempre mudanças nas condições operacionais, portanto degradação de desempenho em curto tempo.
- Questão econômica, baseada:
  - Na dificuldade em contabilizar o retorno econômico decorrente de um trabalho de melhoria de uma malha de controle.

 Na dificuldade de avaliar a viabilidade no emprego de mão-de-obra especializada com competência ampla em identificação de sistemas, controle de processos e otimização.

Esses problemas de desempenho, originados de várias fontes são responsáveis pelo aparecimento de perturbações oscilatórias e não-oscilatórias em processos industriais. Pelo fato dessas perturbações possuírem várias origens, há uma idéia básica em controle de processos de desviar a variabilidade do processo chave para outros lugares, os utilitários (LUYBEN, 1999). Mas isso nem sempre é possível, pelo fato das indústrias hoje terem por objetivo reduzirem o seu inventário. Essa redução do inventário tem levado à diminuição da capacidade de armazenamento dos produtos e também a recuperação de calor pelos utilitários.

Existe uma importante demanda de técnicas, metodologias e procedimentos, tanto gerenciais e organizacionais quanto operacionais para viabilizar a gestão de malhas de controle. Como maior parte das vezes o primeiro sinal de degradação de desempenho de uma malha aparece na forma de uma perturbação oscilatória e/ou não-oscilatória, surgiram na literatura vários métodos para sua detecção.

#### 1.2 – Métodos de detecção de perturbações



A figura 1.2 mostra os principais métodos de detecção de perturbações.

Figura 1.2 – Métodos de detecção de perturbações (THORNHILL, 2007)

Dentre esses métodos, existem três que são considerados os principais para detecção de perturbações oscilatórias: métodos no domínio do tempo, métodos de autocorrelação (*ACF*) e detecção de picos espectrais.

A aplicação da filtragem nos métodos no domínio do tempo é para tratar o problema do ruído existente nos sinais. O grande benefício no uso da função de autocorrelação (*ACF*) é que o ruído, normalmente presente no sinal é eliminado, segundo Horch (2007a). Em Thornhill (2003) é apresentado um método no domínio do tempo para detectar oscilações usando um fator de regularidade, que também é estendido para casos de múltiplas freqüências, usando análise espectral para medir a intensidade das oscilações. Outro método que detecta oscilações baseado na densidade espectral de potência (*PSD*) e *ACF* é proposto por Karra (2009). Existem outros métodos que fazem o agrupamento de freqüências para identificar malhas com freqüências similares, com mesmo padrão de similaridade de espectro (THORNHILL, 2002, 2007; CHUMMING, 2005).

A presença de perturbações não-oscilatórias caracterizadas normalmente em espectros de baixa freqüência, ao longo de uma larga faixa de banda com múltiplos picos tem-se tornando um problema de detecção para esse tipo de perturbação. A detecção dessa perturbação requer técnicas (decomposição espectral) que agrupam espectros similares. Em Thornhill (2007) encontram-se alguns métodos de decomposição espectral; análise de componentes principais (*PCA*), análise de componentes independentes (*ICA*) e fatorização da matriz não-negativa (*NNMF*). Existe outro método que analisa sinais com perturbações oscilatórias e não-oscilatórias pelo espectro de freqüência, que é o envelope espectral (JIANG, 2006). Essa referência usa o envelope espectral para detectar e caracterizar processos que possuem mesma similaridade espectral. Um método que utiliza apenas sinais no tempo e que permite caracterizar as diversas componentes oscilatórias de um sinal é denominado de Decomposição Empírica (SRINIVASAN, 2007). Em todos esses métodos há sempre parâmetros que precisam ser ajustados a partir do conhecimento da malha de controle em análise.

Outros métodos para detecção de perturbações em sinais não-estacionários e que contenham efeitos de não-linearidades, que usam a análise do bi-espectro relacionado à bicoerência têm sido estudados nos últimos trabalhos de pesquisa na área (CHOUDHURY, 2004).

Os métodos que usam o conceito de Envelope Espectral, Decomposição Empírica, *ICA*, *NNMF* e Forma de Onda estão fora do escopo dessa dissertação.

#### 1.3 – Objetivos e a estrutura da dissertação

O objetivo desse trabalho é propor uma metodologia de detecção de perturbações oscilatória e não oscilatória realizando em seguida o diagnóstico de fonte de perturbação. Esse diagnóstico baseia-se nas relações de causa-efeito e na análise de energia.

A metodologia proposta é validada através de um estudo de caso.

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no capítulo 2 discutem-se as duas metodologias adotadas para detecção de perturbações, bem como os métodos de busca de fonte perturbação.

A descrição sucinta do funcionamento da unidade industrial que serviu de estudo de caso para os testes dos algoritmos é apresentada no capítulo 3. A análise do estudo de caso das malhas de controle do processo industrial é apresentada no capítulo 4. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2 – Metodologias para a detecção de perturbações e busca de suas fontes

O presente capítulo visa discutir as duas metodologias adotadas para detecção de perturbações em malhas de controle e as duas técnicas de busca de suas fontes. Conhecidas as malhas com mesma perturbação discutem-se os métodos para busca de sua fonte. Um sistema composto de cinco malhas interligadas é proposto para análise dos algoritmos. Por último, é proposta a metodologia para análise das malhas do estudo de caso.

#### 2.1- Metodologias para detecção de perturbação

#### 2.1.1 – Algoritmo de detecção e caracterização de oscilação – ODC

O *ODC* é um algoritmo de detecção de oscilações. O seu desenvolvimento baseou-se em Karra (2009), que propôs um método para detecção de oscilações por cruzamento por zero que usa o *PSD* baseado na transformada discreta de *Fourier* da *ACF* do sinal (Correlograma) para identificar e caracterizar a oscilação. Também, usa a razão de decaimento e fator de regularidade para evitar falha na detecção de oscilação quando o ruído encontra-se presente em sinais com múltiplas freqüências.

Esse algoritmo consegue eliminar o problema de detecção de um período regular por cruzamento por zero em *ACF* do sinal com mais de uma oscilação sobreposta, quando mais de uma freqüência de oscilação do sinal é analisado. Também consegue distinguir o pico de ruído e o pico de sinal (KARRA, 2009).

#### 2.1.1.1– Descrição conceitual do algoritmo - ODC

Descreve-se aqui o método *ODC* de forma sucinta, conceituando os parâmetros responsáveis pelo seu funcionamento.

Os sinais considerados são processos estocásticos com características oscilatórias que podem ser definidas por certas funções matemáticas: *ACF* (Função autocorrelação do sinal), e pelo *PSD* (*Power Spectral Density*), Densidade Espectral de Potência. Essas funções são usadas para identificar a periodicidade presente nos sinais.

A dependência estatística de um conjunto de dados no tempo pode ser caracterizada pela *ACF* e definida:

$$r_{xx}(k) = \frac{\sum_{t=1}^{N-K} \left( x(t) - \overline{x} \right) \left( x(t+k) - \overline{x} \right)}{\sum_{t=1}^{N} \left( x(t) - \overline{x} \right)^2}$$
(2.1)

onde x(t) é a medida no instante t,  $\bar{x}$  é o valor médio do sinal para N amostras, e k é o número de atrasos. A *ACF* de um sinal oscilatório é também oscilatória.

O *PSD* descreve como as potências do sinal ou de um conjunto de sinais encontram-se distribuídas no domínio da freqüência. Segundo Karra (2009), matematicamente a densidade espectral de potência é a transformada discreta de *Fourier* da função autocorrelação,  $r_{xx}(k)$ , do sinal e é dada por:

$$\phi_{x}(f) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} r_{xx}(k) e^{-i2\pi f \cdot k}$$
(2.2)

onde  $\phi_x(f)$  é a densidade espectral do sinal na freqüência f. A densidade espectral captura o conteúdo de freqüência de um processo estocástico e ajuda a identificar as periodicidades.

Com intuito de tratar o problema de vazamento espectral, fenômeno este que ocasiona o surgimento de múltiplos picos próximos de freqüência em  $\phi_x(f)$ , o qual gera múltiplas bandas de freqüência para uma única freqüência original do sinal, optou-se por usar o método Periodograma modificado (janela *Hamming*) da *ACF* para as faixas de freqüência que correspondem aos sinais oscilatórios para construção dos *PSDs* (STOICA, 1997).

A Figura 2.1 exemplifica um sinal senoidal com ruído 0.5sen(0.1t) + e(t) onde e(t)é um ruído branco com média nula e variância igual a 0,2. Observando a Figura abaixo, verifica-se que *ACF* é oscilatória na mesma freqüência dominante (0,1rad/s) e que o gráfico do *PSD* exibe um pico de energia dominante nessa mesma freqüência.



Figura 2.1 – ACF e o PSD de um sinal com ruído (KARRA, 2009)

A intensidade das oscilações pode ser quantificada usando o período, a regularidade, e a energia, segundo Thornhill (2003). Também, a intensidade das oscilações pode ser quantificada pela razão de decaimento (Miao & Seborg, 1999). A energia das oscilações é um meio de quantificar a amplitude de um sinal oscilatório. A equação (2.3) fornece a energia normalizada de uma banda de freqüência.

$$P = \frac{\sum_{f=f_1}^{f_2} \phi_x(f)}{\sum_{f=0}^{1} \phi_x(f)}$$
(2.3)

onde  $\phi_x(f)$  é a densidade de potência espectral sendo que,  $f_1$  e  $f_2$  são respectivamente os limites inferior e superior da banda de filtro normalizado. Um baixo valor de P indica que o sinal possui pouca intensidade na banda de freqüência selecionada.

Após calcular a energia do sinal faz-se a transformada inversa de *Fourier* para obter a os sinais da *ACF* e então medir os cruzamentos por zero. O período de oscilação é o dobro do tempo entre dois cruzamentos consecutivos por zero do sinal oscilatório. O período médio de oscilação,  $\overline{T}_p$ , pode ser determinado por:

$$\overline{T}_{p} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta t_{i} = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( t_{i} - t_{i-1} \right)$$
(2.4)

onde  $t_{i-1}$  e  $t_i$  definem o intervalo de tempo entre dois cruzamentos por zeros consecutivos do sinal de interesse, e n é o número de intervalos observados.

Os múltiplos cruzamentos por zero de (2.4) podem ser usados para verificar a regularidade da oscilação. Se a variação no sinal é devido a distúrbios aleatórios, o período de oscilação obtido na equação (2.4) terá uma distribuição de probabilidade muito grande se comparado aos sinais de natureza realmente oscilatória. Sejam  $\overline{T}_p$  e  $\sigma_{T_p}$ , respectivamente o período médio de oscilação e o desvio padrão desse período, a regularidade da oscilação pode ser calculada por (THORNHILL, 2003):

$$r = f \cdot \left(\frac{\overline{\overline{T}_p}}{\sigma_{T_P}}\right) \approx \frac{1}{3} \frac{\overline{T}_p}{\sigma_{T_P}}$$
(2.5)

onde para valores de r > 1 conclui-se que a oscilação é regular.

A razão de decaimento,  $R_{acf}$  da *ACF* de um sinal também é uma medida da regularidade da oscilação. Sendo dada por:

$$R_{acf} = \frac{a}{b}$$
(2.6)

onde **a** e **b** são calculados conforme o gráfico da *ACF* presente na Figura 2.1. Se  $R_{acf} > 0.5$ , considera-se que sinal exibe comportamento oscilatório.

#### 2.1.1.2- Etapas de implementação do método ODC

A detecção de picos espectrais combinada com os cálculos de  $\mathbf{R}_{acf}$  e de  $\mathbf{r}$  evita falsas detecções como no caso de sinais ruidosos com oscilações em múltiplas freqüências dominantes. O *PSD* é usado para identificar as freqüências dominantes as quais indicam possíveis oscilações presentes. Cada oscilação é isolada utilizando filtros passa-banda e como resultado vários conjuntos de dados são gerados. Em seguida é usada a *ACF* filtrada para quantificar a regularidade e a razão de decaimento de cada conjunto gerado. Este método pode identificar e quantificar múltiplas oscilações presentes em um sinal. O *ODC* pode ser sumarizado nos seguintes passos:

- i. Remover tendências e filtrar as baixas e altas freqüências,
- ii. Calcular o PSD e obter as faixas de freqüências,
- iii. Filtrar os sinais das faixas de freqüências encontrados. Nessas faixas é contabilizado no mínimo 8 (oito) intervalos para o cálculo do período como forma de garantir a regularidade (THORNHILL, 2003b),
- iv. Medir os cruzamentos por zero do sinal filtrado e verificar se é regular usando  $R_{acf}$  e r.

### 2.1.1.3– Agrupamento das freqüências de múltiplas malhas em uma matriz

O algoritmo permite tratar naturalmente sinais com múltiplas freqüências de oscilação. Nesse tratamento há a necessidade de descartar as variáveis aleatórias do *PSD* e assim determinar os picos de freqüências que correspondem às freqüências de oscilação no tempo (DEPIZZOL, 2011). Para escolher as faixas de freqüência a serem analisadas, um limiar de potência,  $\epsilon_p$ , é calculado a partir da regra de  $3\sigma$  para eliminar componentes de *PSD* que possuem potência muito baixa. O limiar  $\epsilon_p$  é dado por:

$$\epsilon_p = \overline{\phi_x(f)} + m.\,\sigma_{\phi_x(f)} \tag{2.7}$$

onde  $\overline{\phi_x(f)}$  é a média aritmética do *PSD* do sinal, o *m* é o número de  $\sigma_{\phi_x(f)}$  a ser considerado no cálculo de  $\epsilon_p$ .

A avaliação do uso de  $3\sigma$  é feita para determinar as bandas de freqüências relevantes ao estudo do comportamento oscilatório do sinal. Isto é feito a partir da Fig. 2.2 b, que exibe um histograma de um *PSD* de um sinal pertencente a uma malha de pressão com 4100 pontos, onde apesar dos valores de *PSD* não se ajustaram perfeitamente à curva da distribuição Gaussiana, tal regra pôde separar grande parte das variáveis aleatórias dos picos de freqüência do *PSD* que correspondem as freqüências de oscilação no sinal do tempo; quando aplicados 1 $\sigma$ , 2 $\sigma$  e 3 $\sigma$  (DEPIZZOL, 2011). Verifica-se que os picos de freqüência do *PSD* decorrentes da intensidade oscilatória do sinal são afastados da média da distribuição estatística do *PSD* ao passo que o sinal possui menor intensidade ruído favorecendo o uso da regra de 3 $\sigma$ .



Figura 2.2 – Uso da regra 3σ para análise oscilatória a) PSD de um sinal da indústria,
b) Histograma do PSD e Curva de Gauss (DEPIZZOL, 2011).

A Fig. 2.3 mostra o cálculo do limiar,  $\epsilon_p$ , para valores de m = 1 (68%), m = 2 (95%) e m = 3 (99,7%). Observa-se que quanto menor for m, maior será o valor de,  $\epsilon_p$ , mais restrita será a seleção da banda de freqüência.



Figura 2.3 – Cálculo de  $\epsilon_p$  para três valores de m

O agrupamento de freqüências próximas em múltiplas malhas de controle foi proposto em Thornhill (2003b). Dois períodos podem ser agrupados se:

$$\frac{T_{p1} - T_{p2}}{\max(\sigma_1, \sigma_2)} < 1 \tag{2.8}$$

onde  $T_{p1}$  e  $T_{p2}$  representam os períodos dos sinais,  $\sigma_1 e \sigma_2$  são seus desvios padrões. Eventualmente o desvio padrão pode ser multiplicado por um escalar para incluir no mesmo grupo, períodos com menor desvio padrão, aumentando assim o agrupamento das freqüências próximas.

Quando múltiplas malhas são consideradas, o algoritmo fornece a relação das malhas que contém cada freqüência de oscilação detectada resultando numa matriz que representa malhas por freqüências. Na montagem dessa matriz primeiramente é ajustado o limiar de energia, equação (2.7), e o número agrupamento de freqüências, equação (2.8), para o conjunto de sinais de entrada. Depois através do *ODC* encontra-se a(s) freqüência(s) de oscilação e a energia de cada malha que possui comportamento oscilatório. Após isso calcula-se um desvio padrão das freqüências com regularidade maior que 1. Esse cálculo permite encontrar todas as freqüências que pertencem ao grupo. Agrupa-se todas as freqüências para todas as malhas.

# 2.1.2 – Algoritmo de análise de componentes principais de espectro - *SPCA*

A decomposição espectral é usada para distinguir características espectrais significativas numa faixa grande de ruído que se propaga ao longo de todo espectro (THORNHILL, 2007). Das várias técnicas de decomposição espectral mencionadas na seção 1.2 optou-se por escolher a decomposição por componentes principais de espectro – *SPCA*. Além de detectar perturbações oscilatórias, também trata dos sinais com comportamento não oscilatório.

A análise por componentes principais, *PCA*, é um procedimento matemático que transforma um número possível de variáveis correlacionadas num pequeno número de variáveis não correlacionadas denominadas de componentes principais. Trata-se, pois, de método não-paramétrico para extração de informações relevantes muitas vezes obscuras, a partir de um conjunto de dados.

Esse algoritmo usa a análise de componentes principais para fazer o agrupamento dos sinais que possuem espectros similares e que podem ser exibidos pelo gráfico de árvore de classificação espectral (THORNHILL, 2006).

#### 2.1.2.1 – Pré-processamento e geração do PSD

Inicialmente deve-se fazer o pré-processamento dos dados para tratar os sinais ruidosos. Somente são considerados na análise, sinais cujo valor de *ACF* normalizada seja maior que 10% para um atraso, o que elimina a maioria dos sinais compostos apenas de ruído. Os *PSDs* são calculados pela transformada discreta de *Fourier* da *ACF*, sendo eliminados os valores menores que  $3\sigma$ , resultantes de ruídos, vazamentos espectral e outros fatores. Portanto usa-se a equação (2.2) para o seu cálculo denominado de Correlograma.

#### 2.1.2.2 – Formulação e etapas do algoritmo PCA

Segundo Thornhill (2002), existem várias formulações de análise de componentes principais: *Spectral PCA*, *Autocovariance PCA*, *Time-shift PCA* e *Time domain PCA*. Todas essas formulações possuem o mesmo principio de funcionamento diferenciando-se somente na composição da matriz de dados X. A formulação dessa matriz é dada por,

*N* canais de freqüências →

$$X = \begin{pmatrix} P_1(f_1) & \cdots & P_1(f_N) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ P_m(f_1) & \cdots & P_m(f_N) \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{Processo}} (2.9)$$

onde o número de linhas dessa matriz representa as m variáveis do processo e as N colunas que representam os canais de freqüências, dependendo da formulação que se deseja utilizar (THORNHILL, 2002). Cada linha da matriz X é composta somente pela metade do *PSD* (formulação *PCAEspectral*) ou pela metade da função de autocovariância (formulação *Autocovariance PCA*). Isto se deve à similaridade imposta pela transformada discreta de *Fourier* e pela *ACF*. Enquanto que, nas outras formulações usa-se o vetor completo do sinal em todas as **m** variáveis que compõem o processo. Todas essas formulações usam um vetor linha em todas as **m** variáveis do processo,  $P_1(f_1), ..., P_1(f_n)$ , determinada a partir da formulação escolhida. A cada linha da matriz X, significa as freqüências,  $f_1, ..., f_n$ , para os quais o espectro é calculado.

A opção pelo uso do *PCA Espectral* deve-se ao seu melhor desempenho em relação às demais formulações traduzido na captura da maior variabilidade dos dados do processo, para um menor número de componentes principais. Esta garante um desempenho superior de uma formulação em relação à outra, segundo Thornhill (2002).

A decomposição em valores singulares da matriz X é dada por,

$$X = \begin{pmatrix} t_{1,1} \\ \cdots \\ t_{m,1} \end{pmatrix} \cdot w_{1}^{'} + \begin{pmatrix} t_{1,2} \\ \cdots \\ t_{m,2} \end{pmatrix} \cdot w_{2}^{'} + \cdots + \begin{pmatrix} t_{1,m} \\ \cdots \\ t_{m,m} \end{pmatrix} \cdot w_{m}^{'}$$
(2.10)

onde  $t_{i,1}, \dots e t_{i,n}$  representam os vetores coordenadas-t (*Scores*) e  $w'_1 a w'_m$  são as componentes principais.

A decomposição dos valores singulares dos componentes principais (SVD - SingularValues Decomposition), X = U.D.V', onde U é o vetor ortogonal responsável pela mudança de base dos dados de entrada, D vetor coluna com todas as variâncias em ordem decrescente ou seja raiz quadrada dos autovalores, e V' vetor ortonormal dos autovetores associado aos autovalores. Um meio para se calcular os vetores de coordenadas-t é T = U.D onde W' = V'. A matriz D é diagonal e todos os seus elementos são as raízes quadradas dos autovetores da X'X.

A descrição da maioria das variações de X pode ser alcançada pelo truncamento da análise dos componentes principais (*PCA*). Se todas as variações tiverem características similares então há um termo, uma componente principal, que descreve a maioria ou todas as variabilidades contidas no espectro. Há outros casos onde mais de uma componente principal é requerida para descrever as variabilidades.

Quando, por exemplo, as três componentes principais de um modelo não conseguem capturar todas as variabilidades da matriz X aparece uma matriz de erro, **E**, que é adicionada à equação (2.10),

$$X = \begin{pmatrix} t_{1,1} \\ \dots \\ t_{m,1} \end{pmatrix} w_1' + \begin{pmatrix} t_{1,2} \\ \dots \\ t_{m,2} \end{pmatrix} w_2' + \begin{pmatrix} t_{1,3} \\ \dots \\ t_{m,3} \end{pmatrix} w_3' + E$$
(2.11)

Além da matriz **E** que representa a parte não modelada do espectro na matriz X (equação 2.11), outra matriz denominada *SPE* (*square prediction error*), predição quadrática do erro, pode ser calculada. Ela é usada em cada termo e representa a soma quadrática dos elementos de cada linha da matriz **E**, dada pela seguinte equação:

$$SPE = \begin{pmatrix} SPE_{1} \\ SPE_{2} \\ \dots \\ SPE_{m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N} (E_{1,i})^{2} \\ \sum_{i=1}^{N} (E_{2,i})^{2} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{N} (E_{m,i})^{2} \end{pmatrix}$$
(2.12)

A principal razão do espectro pertencente a uma malha possuir valor elevado de *SPE*, deve-se ao fato de existirem características espectrais em freqüências que não conseguiram ser identificadas em nenhum outro espectro.

Segundo Thornhill (2002), a maioria das plantas industriais apresenta no máximo três tipos de espectros diferentes, logo somente três componentes principais são necessários para descrever a variabilidade da matriz X. A condição ou a decisão para o truncamento das componentes principais acontece quando o autovalor associado ao próximo componente principal é maior que a porcentagem da soma do total dos autovalores. Normalmente essa

porcentagem situa-se na ordem dos 3 a 5% dependendo das características da malhas no domínio do tempo.

Essa condição de truncamento é denominada de limiar de truncamento -  $\tau_t$ . Existe o limiar de similaridade,  $\tau_{sp}$ , que calcula os padrões de similaridade entre as malhas. Esses padrões de similaridade são similaridades espectrais existente entre as malhas, dadas através dos ângulos de coordenadas-t. O item da seção 2.1.2.3 mostra um exemplo do cálculo de  $\tau_{sp}$ .

As etapas do algoritmo SPCA são:

- Pré-tratamento dos dados para eliminar os sinais de ruído e baixas freqüências (quando necessário) conforme o item 2.1.2.1,
- ii. Cálculo do PSD (Matriz X),
- iii. Decomposição da matriz X em valores singulares,
- iv. Truncar as componentes principais mantendo aquelas mais significativas (limiar dado por  $\tau_t$ ),
- v. Cálculo dos padrões de similaridade existente entre as malhas (limiar dado por  $\tau_{st}$ )
- vi. Agrupamento das malhas com mesmo padrão de similaridade considerando os *PSDs* que sejam maiores que  $P_{pca}$ . Onde  $P_{pca}$  é um fator que elimina os *PSDs* com pouca energia.

#### 2.1.2.3 – Agrupamento dos dados por padrões de similaridade

A análise de componentes principais é realizada procurando as similaridades espectrais dadas pelo número de componentes principais e por padrões de similaridade existentes entre as malhas fornecidos pelos ângulos das coordenadas - t conectados da origem até cada ponto que representa cada malha (THORNHILL, 2002, 2007).

O agrupamento dos dados por padrões de similaridade provém da premissa que espectros similares possuem coordenadas – t similares que podem ser determinados através dos ângulos de coordenadas – t.

A montagem da matriz de malhas por padrões de similaridade é realizada da direita para esquerda considerando sempre que o padrão começa em 1 até n. Sendo que n é o número máximo de padrões de similaridade encontrados no conjunto de dados.



A figura 2.4 mostra a como é feita o cálculo dos ângulos de coordenadas-t a partir de um conjunto de malhas.

A figura 2.4 exemplifica o cálculo do ângulo de coordenadas – t entre as malhas 4 e 5. Esse cálculo é feito entre a malha 4 e todas as restantes. O mesmo procedimento é feito entre todas as malhas do processo. Após o cálculo dos ângulos entre as malhas é montada a matriz de ângulos. Em seguida é feita a procura das malhas que possuem os mesmos valores de ângulos usando o limiar de padrão de similaridade. Aquelas malhas que apresentarem os mesmos valores de ângulo possuem a mesma similaridade espectral. Por fim monta-se a matriz de malhas por padrões de similaridade.

$$\hat{a}ngulo = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

<b>Tabela 2.1 –</b> Malhas vs Padrão de similarid	lade
---------------------------------------------------	------

Malhas	Padrões de Similaridade		
m1	1	0	0
m2	1	0	0
m3	0	2	0
m4	0	2	0
m5	0	0	3

Pela Fig. 2.4, verifica-se que apesar das malhas 1 e 2 apresentarem diferenças nas coordenadas –t, o algoritmo detectou o mesmo padrão de similaridade nessas duas malhas. Isso se deve a pouca relevância da componente de espectro de menor magnitude detectada na malha 2.

#### 2.1.3 – Modelo de teste

Além de mostrar o funcionamento do *SPCA*, esse modelo de teste servirá também para analisar as duas metodologias de detecção de perturbações (*SPCA* e *ODC*).

#### 2.1.3.1 – Breve descrição do Modelo

O modelo é composto por cinco malhas inter-relacionadas que permite que sejam analisados comportamentos oscilatórios e suas propagações ao longo dessas malhas. A figura 2.2 mostra o modelo em *Simulink* (ambiente de simulação em MATLAB<sup>@</sup>) e o diagrama de blocos e a matriz de relação causa e efeito respectivamente.



(b) (c)
 Figura 2.5 – (a) Modelo desenvolvido em *Simulink*, (b) Inter-relação das malhas do modelo (c) Matriz de relação de causa e efeito.

Todas as cinco malhas possuem uma função de transferência discreta inserida num modelo de configuração semelhante ao da Figura 2.6. Observa-se que no modelo da Figura 2.5a é possível inserir perturbações (P2, P3, P4 e P5) em cada uma das malhas (com exceção da malha 1), as entradas degrau (R1 a R4) e as magnitudes de acoplamento existente entre
elas. A Fig. 2.5b mostra a inter-relação das malhas do processo, onde a malha 1 influencia na malha 2 e esta na malha 3, que recebe influência também da malha 4, que por sua vez influencia ainda a malha 5. Na matriz de relação de causa e efeito, Fig. 2.5c, as linhas representam as malhas que provocam a causa enquanto que as malhas das colunas representam o efeito.

Em todas as malhas é possível introduzir agarramento ( $S - Stiction \ e \ J$ - Jump), nas válvulas o que produz oscilações na malha. O modelo de atrito usado foi o de dois parâmetros baseado em dados proposto em Choudhury (2006).

O detalhe de uma destas malhas é encontrado na Figura 2.6 sendo idêntico para as demais malhas.



Figura 2.6 – Modelo de malha incluindo a FT, controlador e válvula de controle com possibilidade de atrito

Essa configuração contém um sistema de controle em malha fechada com controlador PI mais ruído e um seletor para inclusão de um modelo de agarramento de válvula, que gera outro tipo de oscilação no sistema. O agarramento na válvula é introduzido através do parâmetro S1 (nesse modelo da malha 1) dependendo da situação de teste. Se esse valor for zero há ausência de agarramento na válvula. Os processos a serem controlados são todos discretos e de primeira ordem

#### 2.1.3.2 – Aplicação do modelo ao SPCA

A Tabela 2.2 mostra os parâmetros das funções de transferência (FT), as estruturas das FTs e dos controladores utilizados no modelo para simulação mostrada na Fig. 2.5. Também encontram-se as amplitudes das perturbações. O ruído tem 1 milésimo de unidade de magnitude e todas as malhas foram amostradas a cada 1s, com 2048 pontos.

Observa-se na figura 2.7a que todos os sinais aparentam um comportamento oscilatório no domínio do tempo com exceção do sinal 2 que aparenta um período irregular, conseqüência da soma dos agarramentos das válvulas 1 e da 2. O sinal 3 apresenta um comportamento oscilatório devido à presença da perturbação externa oscilatória de 0,2 rad/s e à influência da malha 2 e 4. Enquanto que a malha 4 apresenta um comportamento oscilatório devido à perturbação externa oscilatório devido à perturbação oscilatória de 0,2 rad/s. A malha 5 é influenciada diretamente pela malha 4 e também recebe uma perturbação externa que é uma onda quadrada com período de 500s conferindo-lhe um comportamento aparentemente oscilatório.

Sinais	FT (malhas)	Entrada	Perturbação	Parâmetros de Agarramento na Válvula	FT controladores PI
Y1	$\frac{0,1}{z-0.8}$	R1(t) = 2		S = 4 $J = 2$	$0.6\left(\frac{z-0.25}{z-1}\right)$
Y2	$\frac{0,1}{z-0.9}$	R2(t) = 4		S = 4 $J = 2$	$0.3\left(\frac{z-0.5}{z-1}\right)$
¥3	$\frac{0,1}{z-0.2}$	R3(t) = 5	P3 = 4sen (0.2t)	S = 0 $J = 2$	$1.65\left(\frac{z-0.09}{z-1}\right)$
¥4	$\frac{0,1}{z-0.95}$	R4(t) = 10	P4 = 4sen (0.2t)	S = 0 $J = 2$	$0.18\left(\frac{z-0.83}{z-1}\right)$
¥5	$\frac{0,02}{z-0.4}$		P5 = sen (0.2t)	S = 0 $J = 2$	$1.65\left(\frac{z-0.09}{z-1}\right)$

Tabela 2.2 – Parâmetros das FTs das malhas e controladores do modelo



Figura 2.7 – (a) Sinais das 5 malhas, (b) *PSD* dos sinais, (c) Componentes principais, (d) Gráfico de *Scores* 

Para gerar os *PSDs* escolheram-se os seguintes valores para os limiares de truncamento, de padrão de similaridade e freqüência de corte respectivamente,  $\tau_{st} = 0.987, \tau_{t} = 0.05, e w_{c} = 0.003$ .

Constata-se que os sinais 1, 2, 3 e 4 possuem espectros que representam características de uma onda senoidal enquanto que, o sinal 5 é uma onda quadrada resultado de uma perturbação, P5, do tipo onda quadrada com período de 500s e amplitude 1.

Verifica-se que o algoritmo *SPCA* conseguiu gerar 3 (três) componentes principais, conseqüentemente um gráfico de *Scores* em 3D gerado a partir da matriz de coordenadas – t truncada, Tt = U.D, pelo número de componentes principais encontrados, dado por.

Constata-se que os sinais 3 e 4 possuem a mesma similaridade comprovada pelas Figuras 2.7b e d. Essas duas Figuras 2.7b e d mostram que quando há similaridade de espectro haverá similaridade na magnitude das coordenadas - t. A similaridade de espectros constituiuse num agrupamento dado pelas componentes principais (THORNHILL, 2002).

A Fig 2.8 mostra um gráfico denominado, Dendograma, que agrupa as malhas que possuem a mesma similaridade espectral. Um procedimento de cálculo para construção desse gráfico é descrito a seguir:

 Calcula-se a distância Euclidiana entre dois pares de objetos da matriz Tt (m x n), dada por:

$$d_{st}^2 = (x_s - x_t)(x_s - x_t)'$$
(2.13)

- Desse cálculo resulta um vetor linha de comprimento m(m-1)/2, das várias distâncias entre os vetores x<sub>s</sub> e x<sub>t</sub> da matriz Tt, sendo m o número de observações (malhas),
- 3. Após isso, cria-se o agrupamento hierárquico de árvore a partir dos dados do vetor de distâncias dada pelo método *Ward's*:

$$d^{2}(r,s) = n_{t}n_{s}\frac{\|\overline{x_{r}} - \overline{x_{s}}\|^{2}}{(n_{r} + n_{s})}$$
(2.14)

onde r e s são dois agrupamentos obtidos, o  $n_r$  e  $n_t$ são os números de objetos dos agrupamentos r e s,  $\|\overline{x_r} - \overline{x_s}\|_2^2$  é a distância Euclidiana ao quadrado entre os centróides dos dois agrupamentos r e s.

4. O tamanho dessa nova matriz é (m-1) x 3 onde as 1° e 2° colunas indicam os índices dos agrupamentos aos pares que forma uma árvore binária e a 3° coluna a distância entre os dois agrupamentos surgidos. Cada nó final em uma estrutura de dados em árvore é formado a partir de agrupamentos maiores. Cada novo agrupamento formado corresponde a uma linha Z(I,:) e a um índice m+1. Portanto numa linha da matriz Z(I,1:2) contém dois componentes agrupados que formam um novo agrupamento m+I. No caso da Fig. 2.8

verifica-se o surgimento na linha da matriz Z(1,:) do agrupamento das malhas 3 e 4 que dão origem a um novo agrupamento denominado de 6 (5+1 = 6) e assim sucessivamente para Z(2,:) que dá origem a um novo agrupamento 7 (5+2 = 7). Onde 5 é o número de observações (malhas).

$$Z = \begin{bmatrix} 3 & 4 & 0.0003 \\ 1 & 2 & 0.0834 \\ 5 & 7 & 0.9267 \\ 6 & 8 & 1.2143 \end{bmatrix}$$

A abcissa no gráfico da Fig. 2.8 representa os pares das malhas agrupadas, também chamados de nós de folhas em uma estrutura de dados em árvore. A ordenada representa a distância entre os pares agrupados e que também mostra o grau de dissimilaridade existente entre as malhas.



Figura 2.8 – Similaridade espectral dos sinais

Observa-se que as malhas 3 e 4 possuem um índice de dissimilaridade (distância de agrupamento) próximo de zero, o que significa que essas duas malhas possuem a mesma similaridade espectral portanto mesmo padrão de similaridade. Enquanto que as malhas 1 e 2 essa distância de agrupamento ficou próximo de 0.1 unidades. Pelo fato da malha 2 possuir uma componente espectral adicional de menor energia, acabou por influenciar na diferença

entre as componentes – t das duas malhas (1 e 2) Por último a malha 5 não apresentou agrupamento com nenhuma malha que faz parte do processo.

Vale lembrar que as componentes principais (Figura 2.7c), que representam o agrupamento das malhas com mesma similaridade espectral independem da magnitude do espectro, mas sim da freqüência que a identifica.



Os valores de SPE e o gráfico gerado para esse exemplo foram as seguintes;

Verifica-se que as malhas 3 e 4 possuem um valor de *SPE* maior em magnitude relativo às outras malhas, e que na malha 5 esse valor aproxima-se muito de zero. Isto mostra que pelo o número de componentes principais que foi gerado, as malhas 3 e 4 possuem características espectrais em freqüência que não conseguiram ser mostrados nas outras malhas.

A matriz de padrões de similaridade obtida a partir das coordenadas-t encontra-se na tabela 2.2. Onde observa-se a presença de 3 (três) padrões de similaridades obtidos nesse exemplo.

Malhas	Padrões de Similaridade		
m1	1	0	0
m2	1	0	0
m3	0	2	0
m4	0	2	0
m5	0	0	3

**Tabela 2.3 –** <u>Malhas versus padrão de similaridade do</u> caso exemplo

Verifica-se que as duas primeiras malhas possuem o mesmo padrão de similaridade não obstante a 2° malha possuir uma componente de espectro de menor magnitude. A magnitude desse espectro de menor energia não foi suficiente para que o algoritmo detectasse um padrão de similaridade diferente em relação a 1° malha. As malhas 3 e 4 apresentaram o mesmo padrão pelo fato de exibirem o mesmo espectro (dissimilaridade zero) enquanto, que na última malha o algoritmo detectou um padrão diferente das demais. O que já era de se esperar pelo formato do seu espectro.

# 2.2- Metodologias para busca de fonte de perturbação

Para a busca de fonte de perturbação foram usadas duas técnicas: uma baseada na matriz de causa-efeito entre as malhas analisadas e outra analisa a energia dos sinais a partir dos *PSDs*.

# 2.2.1 – Metodologia baseada na matriz de causa-efeito para busca da fonte

Essa metodologia baseia-se no algoritmo de busca de profundidade, *DFS*, proposto por Thornhill (2009) e implementado por Lima (2010). Para sua implementação usou-se a relação de causa-efeito das malhas analisadas e as perturbações oscilatórias e não-oscilatórias detectadas pelos algoritmos na seção 2.1.

#### 2.2.1.1- Algoritmo de busca de caminhos de perturbação

Segundo Horch (2007b), existem dois métodos para o conhecimento da inter-relação entre as malhas: *Transfer entropy* (Transferência de entropia) e *Time-delay* (Tempo Morto). Além desses dois métodos existe a variância da estimação do erro que é proposto por Fertner (1986) e Jacovitti (1993). Esses métodos serão mantidos como referências para trabalhos futuros. Nesse trabalho o conhecimento da inter-relação entre as malhas para montar a matriz de causa-efeito partiu do conhecimento do processo por parte do engenheiro de controle.

A Fig. 2.10 mostra um exemplo da inter-relação e a matriz de causa-efeito de um conjunto de malhas de um processo industrial.



Figura 2.10 – (a) Exemplo de inter-relações entre malhas de controle, (b) Matriz de relação de causa e efeito – M (THORNHILL, 2009)

A estrutura da matriz de causa-efeito ou matriz de inter-relação entre as malhas é um excelente ponto de partida para se estabelecer uma analogia entre a busca de caminhos para propagação das perturbações em malhas de controle e alguns métodos de busca de caminhos de comunicação entre dispositivos interligados em rede. Dos métodos encontrados na literatura e por recomendação de Thornhill (2009) optou-se por usar o método *DFS* (*Depth First Search*), busca de profundidade. Entende-se como um algoritmo de busca que parte de um nó mais próximo a ele e continua a se expandir até que o nó sem ramificações ou até o nó pré-definido seja alcançado. Quando isso ocorre a procura retorna ao nó inicial.

Esse algoritmo pode ser encontrado em MatlabBGL v1(2008) e na referência Gleich (2006). O algoritmo interpreta a matriz de inter-relações das malhas exatamente como foi apresentada Fig 2.10b, com a linha 1 da matriz causa-efeito representando sobre quais malhas, a malha 1 exerce influência, o mesmo acontecendo com a linha 2 e assim sucessivamente. Também pode trabalhar com fluxos bidirecionais, o que no caso de controle de processos pode representar realimentação entre duas malhas. Para que isso ocorra basta que o termo transposto da matriz causa-efeito (matriz M) também seja preenchido com 1. Para exemplificar essa situação pode-se usar a Fig 2.10a, onde se a referência da malha 5 é definida pela variável manipulada da malha 1 há uma influência direta da malha 1 em 5, logo M(1,5) = 1 ou se for realizado um controle em cascata com essas duas malhas é natural que haja uma realimentação do sinal do erro da malha 5 em 1, exercendo influência direta da malha 5 em 1, logo M(5,1) = 1, configurando a realimentação das duas malhas na matriz M.

O uso do algoritmo de busca de profundidade no diagnóstico de fonte de oscilação é feita na idéia de que, não se interessa saber quais as malhas que são alcançadas pela malha y, mas sim quais as malhas que alcançam a malha y. Para isso basta fazer a transposta da matriz M.

#### 2.2.1.2 – Processamento da informação no algoritmo de busca

As perturbações oscilatórias e não-oscilatórias são encontradas pelos algoritmos de detecção de oscilação, enquanto que o algoritmo de busca gera todos os nós alcançáveis por cada um dos nós executando a função *DFS* para cada uma das malhas.

Define-se uma matriz de distâncias D no qual o elemento D(i,j) representa a distância entre as malhas j e i, definindo assim todas as distâncias entre cada uma das malhas. Em seguida, cada linha da matriz de distâncias é organizada, de modo que o primeiro elemento de cada linha corresponda à malha mais distante da representada pela linha em questão, o segundo termo corresponde à segunda malha mais distante e assim sucessivamente. Também é criada uma matriz C onde o termo C(i,j) é a identificação da malha representada por D(i,j).

Um exemplo da criação das matrizes D e C e o fluxograma correspondente encontra-se na Figura 2.11. Por exemplo, na linha 5 da matriz C é possível perceber que as malhas 1 e 3,  $C(5,1) \in C(5,2)$  respectivamente, são as malhas mais distantes da malha 5 e ao consultar os termos D(5,1) e D(5,2), nota-se que a distância entre as malhas 5 e 1 é de três saltos (malhas), o mesmo acontecendo entre as malhas 5 e 3. As malhas 2 e 4 encontram-se a 2 e 1 saltos respectivamente da malha 5.



**Figura 2.11 – (a)** Exemplo de inter-relações entre malhas de controle, **(b)** Matriz de relação de causa e efeito, **(c)** Matrizes D e C.

A matriz C é de suma importância no algoritmo de busca de fonte de perturbação, porque define o índice ordenado de prioridade com todas as malhas que influenciam a malha representada na sua linha correspondente.

#### 2.2.1.3 – Cruzamento de informação e diagnóstico

As informações das matrizes de malhas versus freqüências ou versus padrões de similaridades fornecidas pelos algoritmos de detecção de perturbação, bem como a matriz de inter-relação são pontos de partida para o diagnóstico das fontes de oscilação em múltiplas malhas de controle pelo algoritmo de busca de fonte de perturbação. A figura 2.9 mostra o fluxograma que resume o funcionamento do algoritmo.



Figura 2.12 – Fluxograma do algoritmo busca de fonte perturbação

O diagnóstico para determinar as fontes de perturbação é realizado por meio do cruzamento de informações presentes nas matrizes malhas versus freqüências – MF (ou malhas versus padrões de similaridades) e a matriz C que é obtido conforme os passos a seguir:

- 1. A cada freqüência existente na matriz malhas vs freqüência busca-se as malhas que apresentam perturbações naquela freqüência,
- 2. Ao se encontrar a malha com a perturbação em questão analisam-se dois casos na matriz C: I) Se essa malha apresenta uma freqüência de oscilação e se esta não for influenciada por nenhuma outra malha, essa malha é fonte de perturbação oscilatória nessa freqüência, II) Se uma malha y que apresenta perturbação e é influenciada por outra malha inicia-se a busca pela linha y que representa a malha na matriz C. Se a primeira malha indicada na linha y apresentar perturbação oscilatória na freqüência na matriz MF, ela é indicada como fonte da perturbação oscilatória caso contrário, faz-se a mesma análise para o segundo elemento e assim sucessivamente. Se nenhuma outra malha que influência a malha y possuir perturbação em questão, a própria malha y é definida como fonte da perturbação. Ao se detectar a fonte de perturbação inclui-se a informação da malha e a freqüência correspondente em uma matriz malhas fontes, matriz F, que contém todas as fontes de perturbação.
- 3. Repete-se o passo 2 para as outras malhas da mesma freqüência. Caso seja encontrada uma fonte já presente na matriz F ela não é incluída novamente, caso não esteja presente é incluída. Esse procedimento é realizado para eliminar casos onde existem malhas independentes que originam perturbações oscilatórias na mesma freqüência. Esse caso, por caracterizar uma situação

rara, o algoritmo de busca de fonte de oscilação gera um aviso indicando que provavelmente essas malhas devem possuir alguma dependência que não está representada na matriz causa-efeito.

4. Segue-se o mesmo procedimento até que todas as freqüências sejam analisadas.

Esse diagnóstico é feito de forma idêntica quando é usado o algoritmo *SPCA*, substituindo a busca de freqüências de oscilações por padrões de similaridade.

O fluxograma da Figura 2.13, mostra de maneira simplificada o roteiro descrito acima para o diagnóstico da fonte de perturbação.



Figura 2.13 – Fluxograma para diagnóstico da fonte de perturbação

Verifica-se que a matriz C presente na Fig 2.11c encontra-se organizada em ordem decrescente em termos de distância. Isso se deve ao fato que serão analisadas em primeira instância as malhas mais distantes em relação àquela onde foi encontrada a freqüência. Logo caso uma malha seja apontada como origem, não será necessário analisar as demais malhas, que possuem menor distância até a malha onde foi encontrada a oscilação original. A possibilidade de haverem falhas na detecção de oscilação por problemas na medição ou pelo fato da malha que apresenta a oscilação atuar como um filtro natural para a freqüência ou padrão de similaridade que está sendo analisada é outra razão para a necessidade de organizar a matriz C em ordem decrescente em termos de distância. Essa necessidade fez com que o algoritmo sempre procure a fonte da oscilação no sentido de maior para menor distância

conferindo-o uma grande eficácia na determinação da fonte de oscilação correta ou pelo menos a malha mais próxima possível da fonte.

Quando houver duas malhas realimentadas, o algoritmo indica essa realimentação dizendo que ambas são fontes. Nesse caso há necessidade de analisar as duas malhas para se chegar ao diagnóstico.

## 2.2.2 – Método baseado na energia para busca da fonte

O cálculo de energia usado como ferramenta na busca de fonte de perturbação surgiu da premissa que cada freqüência pertencente a uma determinada malha possui uma energia associada a ela, que dá uma estimativa de sua força. Uma vez que esta energia é atenuada ao se propagar pelas malhas de controle do processo, a malha que apresentar maior energia é a provável candidata a causa raiz da oscilação (THORNHILL, 2003a).

A energia de um sinal x(t) é dada por:

$$E_X = \sum_{t=1}^{N} |x(t)|^2$$
(2.15)

sendo antes subtraído o valor médio para calcular a energia do sinal oscilatório apenas.

No método *ODC*, a energia de cada banda de freqüência é multiplicada por  $E_X$  para calcular a energia associada a mesma. Para o método *SPCA* usa-se a energia do *PSD*filtrado

Para comparar a energia de sinais oscilatórios entre diferentes malhas, a energia calculada de cada sinal é antes dividida pela faixa do sinal em questão.

# 2.3 – Análise das duas metodologias usando o modelo

O mesmo modelo que foi usado na seção 2.1.3, serviu para análise das duas metodologias de detecção de perturbação. Para isso foram usados novos parâmetros contidos na Tabela 2.4.

A Fig 2.14 mostra que os sinais também aparentam um comportamento oscilatório no domínio do tempo. A saída do sinal 1 é motivado pelo agarramento na válvula 1 conferindolhe a aparência oscilatória. O sinal 2 recebe uma forte perturbação senoidal de 10 unidades de magnitude e 0,02rad/s de freqüência além de ser influenciada pelo sinal 1 conferindo-lhe um período regular. O período regular do sinal 3 é causado pelo acoplamento da malha 4 em 3 e pela perturbação externa senoidal de 0.2 rad/s. O sinal 4 também apresenta um comportamento oscilatório motivado pela perturbação externa senoidal de 0.2 rad/s e 4 unidades de magnitude. O sinal 5 apresenta um formato de uma onda quadrada regular motivado perturbação externa quadrada com período de 500s.

Sinais	FT (malhas)	Entrada	Perturbação	Parâmetros de Agarramento na Válvula	FT controladores PI
Y1	$\frac{0,1}{z-0.8}$	R1(t) = 2		S = 3 J = 2	$0.6\left(\frac{z-0.25}{z-1}\right)$
Y2	$\frac{0,1}{z-0.9}$	R2(t) = 4	P2 = 10sen(0.02t)	S = 0 $J = 2$	$0.3\left(\frac{z-0.5}{z-1}\right)$
¥3	$\frac{0,1}{z-0.2}$	R3(t) = 5	P3 = 4sen (0.2t)	S = 0 $J = 2$	$1.65\left(\frac{z-0.09}{z-1}\right)$
Y4	$\frac{0,1}{z-0.95}$	R4(t) = 10	P4 = 4sen (0.2t)	S = 0 $J = 2$	$0.18\left(\frac{z-0.83}{z-1}\right)$
¥5	$\frac{0,02}{z-0.4}$		P5 = sen (0.2t)	S = 0 $J = 2$	$1.65\left(\frac{z-0.09}{z-1}\right)$

Tabela 2.4 – Parâmetros das FTs das malhas e controladores do modelo



Figura 2.14 – Sinais no tempo

# 2.3.1 - Análise usando o algoritmo ODC

O gráfico do *PSD* gerado e a conseqüente matriz malhas por freqüências encontram-se na Fig 2.15.



	Freqüências (rad/s) e Energia				
Malhas	0.0205 rad/s	0.1187 rad/s	0.200 rad/s		
m1	0	0.0175	0		
m2	0.0205	0	0		
m3 0		0	1.0000		
m4	0	0	0.0102		
m5	0	0	0		

b)

Figura 2.15 – a) Espectro sinal normalizado, b) matriz malhas versus freqüências

O gráfico dos *PSDs* bem como matriz de malhas (Fig.2.15b) por freqüências foram obtidos adotando 1 desvio padrão para agrupamento e manteve-se os sinais com energia normalizada maior e igual a 2%. Verifica-se que o algoritmo *ODC* não detectou presença de

comportamento oscilatório na malha 5. Isso pode ser explicado pelo seu espectro ser composta por uma faixa larga de freqüências característica de sinais não-oscilatórios.

Nos sinais restantes foram detectados comportamento oscilatório com as respectivas freqüências de oscilação. Também vale realçar que, devido ao acoplamento existente entre as malhas 1 em 2, da 2 em 3 e 4 e, por último da 4 em 5 deveriam aparecer as freqüências de oscilação nessas malhas que recebem influência. Uma maneira de investigar essas freqüências é variar os parâmetros de ajuste do algoritmo, como o nível de energia que cada malha deverá possuir na análise e no agrupamento. Reduzindo a energia para um valor menor 1% e adotando 6 desvios padrões para agrupamento detectou-se a presença de freqüências de oscilação na malhas 2 devido à malha 1, e da malha 4 em 5. No entanto não foi possível verificar a presença da freqüência de oscilação da malha 2 em 3. Isto, pode ser explicado pela maior influência da malha 4 em 3 (acoplamento com ganho de 10) em relação à malha 2 em 3 (acoplamento com ganho 4). E por último detectou-se uma freqüência 0.0762 rad/s na malha 5 com amplitude muito baixa. A nova matriz de malha por freqüências que pode ser visualizada na Tabela 2.5. Também cabe realçar que se sinal possuir uma energia muito baixa o sinal é normalmente desprezado. Essa constatação é a justificativa pela ausência da freqüência da malha 2 em 3.

Malhas	Freqüências (rad/s)			
m1	0	0	0.1187	0
m2	0.0209	0	0.1187	0
m3	0	0	0	0.2000
m4	0	0	0	0.2000
m5	0	0.0762	0	0.2000

Tabela 2.5 – Nova matriz malhas versus freqüência

Usou-se a metodologia de energia e da relação de causa efeito para buscar a fonte de perturbação oscilatória a partir dos dados da Fig 2.15b.

Com as relações de causa-efeito gerou-se a matriz das malhas fonte de perturbação oscilatória tomando as informações da figura 2.15b e da matriz M (Fig.2.5c).

Malhas	Freqüências e Energia		
Fonte	0.0205 rad/s	0.1187 rad/s	0.200 rad/s
m1	0	0.0175	0
m2	0.2254	0	0
m4	0	0	0.0102

Tabela 2.6 – Matriz malhas fontes perturbação oscilatória

Constata-se que a malha 1, 2 e 4 são fontes de oscilação nas freqüências 0,1187, 0,0205 e 0,200 rad/s respectivamente. No entanto observa-se que a malha 3 possui maior energia na freqüência de 0,200 rad/s em relação às malhas 4 e 5. Mas não foi indicada como fonte de perturbação nessa freqüência. A não indicação da malha 3 como fonte de oscilação se deve a relação de causa-efeito, onde essa malha não exerce influência em nenhuma outra malha.

#### 2.3.2 - Análise usando o algoritmo SPCA

Os valores dos limiares de truncamento,  $\tau_t = 0,05$  e de padrão de similaridade  $\tau_{st} = 0,987$  foram utilizados na simulação. Também usou-se uma freqüência de corte, 0,003 rad/s, para eliminar as baixas freqüências.

A partir dos dados dos *PSDs* montou-se a matriz de dados X, conseqüentemente determinaram-se as componentes principais conforme mostradas na Figura 2.16b.



Figura 2.16 – a) PSD SPCA, b) Componentes principais – CP

A figura 2.16b mostra que foram detectadas quatro componentes principais, que significa quatro padrões de espectros diferentes: o primeiro corresponde a malha 1, o segundo a malha 3 e 4, o quarto a malha 2 e o quinto a malha 5.

O método de decomposição espectral por análise de componentes principais, *PCA*, não se consegue fazer a atribuição da componente principal à malha correspondente. Essa

correspondência somente pode ser feita através da similaridade gráfica. No caso do modelo, a correspondência pode ser feita observando a similaridade gráfica entre as figuras 2.16a e 2.16b. No entanto, a decomposição espectral por análise de Componentes Independentes, *ICA*, fornece parâmetros como; *CRI* (indica o componente independente dominante numa assinatura espectral e a malha a que pertence) e *CRR* (indica a influência de cada componente independente na perturbação da planta) que são formas razoáveis de se estabelecer uma correspondência entre a componente independente e o espectro da respectiva malha (CHUMMING, 2005).

Usando a premissa de que espectros similares possuem coordenadas – t similares, que formam agrupamentos que podem ser determinados através dos ângulos das coordenadas – t, montou-se a matriz de malhas por padrões de similaridades.

Malhac	Padrões de Similaridade e Energia				
wiamas	1	2	3	4	
1	0,0403	0	0	0	
2	0	0,1688	0	0	
3	0	0	0,3038	0	
4	0	0	1,000	0	
5	0	0	0	0,0021	

Tabela 2.7 – Matriz malhas versus padrão de similaridade

Essa matriz mostra que as malhas 3 e 4 possuem o mesmo padrão de similaridade no entanto possuem energia diferente, enquanto que nas malhas restantes há padrões diferentes. Conforme foi mencionado na seção 2.2.2, o cálculo da energia no *SPCA* é calculada a partir do *PSD*filtrado. A Tabela 2.7 mostra a energia normalizada pela máxima energia do *PSD*filtrado.

Esse método mostra que embora haja 4 padrões de similaridade, foram detectadas 3 freqüências, porque o espectro da última malha representa uma faixa larga de freqüência. Tornando-se um método adequado para o caso em que apenas uma freqüência é detectada.

A partir das análises feitas no item 2.1.3.2 e em 2.3, pode-se dizer que o *ODC* é mais adequado para detecção de perturbações oscilatórias. No entanto quando há faixas largas de freqüência que caracterizam comportamento não-oscilatório, este algoritmo mostrou-se inadequado. Por sua vez o *SPCA* mostra-se mais adequado quando sinais possuem características não-oscilatórias conseguindo através de padrões de similaridade diferenciar os espectros existentes nas malhas. Por outro lado quando há mais que uma freqüência por malha

com amplitudes muito diferentes, o *SPCA* apresenta dificuldade em considerar a magnitude do espectro de menor amplitude em relação a maior na formação de um padrão de similaridade da malha, conforme ficou evidente no item 2.1.3.2. Porém o *ODC* mostrou-se capaz de identificar várias freqüências por malhas com amplitudes diferentes de espectro.

# 2.4 – Proposta de metodologia

O método de *ODC* detecta perturbações oscilatórias e o método *SPCA* analisa perturbações oscilatórias e não-oscilatórias. O método *SPCA* não permite verificar se um sinal oscilatório tem período regular. Também não permite detectar múltiplas freqüências de oscilação, a não ser que bancos de filtros sejam usados para definir faixas de freqüências nos espectros considerados.

Os passos desta proposta encontram-se listados abaixo:

- I. Remoção de tendências e filtragem dos sinais,
- II. Cálculo dos *PSDs* e obtenção dos sinais com período regular presentes nas malhas,
- III. Filtragem dos *PSDs* eliminando aquelas faixas de freqüências que correspondem aos sinais identificados na etapa ii),
- IV. Buscar a causa raiz, através da análise de energia e das relações de causa efeito.

Nas malhas com presença de perturbações não-oscilatórias, os *PSDs* correspondentes apresentam bandas com grande energia em baixas freqüências. Uma vez eliminadas as faixas que correspondem aos sinais com período regular, o método *SPCA* passa a buscar as malhas com espectro similar associadas a essas perturbações, no passo iii). Essa busca não poderia ser feita pelo método *ODC*. Ao final do passo iii), estarão disponíveis a relação das malhas com a presença de sinais oscilatórios de mesma freqüência e a relação das malhas com espectro filtrados similares, ou seja, que foram afetadas pela mesma perturbação. Em ambos, *ODC* e *SPCA*, a busca pelas malhas fonte é feita pela relação de causa de causa-efeito e pela energia, no passo iv).

É importante enfatizar que tanto as perturbações oscilatórias quanto as nãooscilatórias causam muitos problemas em uma planta à medida que se propagam pelas malhas de controle levando ao baixo desempenho da unidade e por último na variabilidade da qualidade do produto final. Nos dois casos, a busca da causa raiz é importante.

A validação dos algoritmos usados nesse trabalho, em múltiplas malhas de um processo industrial constituiu-se no último passo da proposta desse trabalho.

# Capítulo 3 – Descrição do processo

As 40 malhas do sistema de geração de vapor de uma central termoelétrica foram selecionadas para servir de estudo de caso nesse trabalho. Por causa disso, houve a necessidade de conhecer o funcionamento do processo. Vários foram os encontros com os responsáveis da operação da unidade para que as dúvidas do funcionamento desse processo fossem sanadas.

Neste capítulo é feita a descrição sucinta do funcionamento do processo e da interrelação das diversas malhas de controle, com o objetivo de obter as relações de causa-efeito e validar a aplicação dos algoritmos no Cap.4.

# 3.1- Breve descrição da unidade industrial

Nessa descrição serão abordadas: o processo de queima de combustíveis, o sistema de vapor e água e os sistemas auxiliares que fazem parte da CTE em estudo.

# 3.1.1 – Processo de Geração de energia de uma CTE

Essa unidade industrial faz parte de uma das quatro Centrais Termoelétricas (CTE), que geram energia elétrica para uma indústria siderúrgica. Como qualquer unidade desse tipo, a sua finalidade é gerar energia elétrica a partir do calor produzido da queima de combustíveis. Todo processo similar a esse utiliza uma fornalha para a queima dos combustíveis, uma caldeira para a geração de vapor d'água e por fim uma turbina que impulsiona o rotor de um gerador para produzir energia elétrica além de equipamentos auxiliares tais como: condensadores, pré-aquecedores de água etc. Vale realçar que dependendo do tipo de combustível, por exemplo, carvão, há presença de outros componentes auxiliares (secadores).

A Figura 3.1 dá uma visão geral da CTE com os seus principais equipamentos, insumos (combustível, água e ar) e os respectivos circuitos.



Figura 3.1 – Visão geral do processo de uma CTE

Os combustíveis usados na queima são provenientes dos processos de fabricação de aço: o gás de alto forno (*BFG- Blast Furnace*), *LDG (Linz-Donawitz Gas*, ou Gás de Aciaria), o *COG (Coke Dry Quenching*, ou apagamento a seco do coque) e *TAR* (Alcatrão, óleo resultante do processo de fabricação do Coque). A fornalha utiliza gás natural (GN) como fonte de ignição para manter a chama sempre acessa quando há troca de combustível e também para ajudar na combustão do Alcatrão devido à sua alta viscosidade.

Para que a mistura seja completa há alimentação do ar (linha em bege).

O circuito de água de alimentação sai do condensador da turbina e vai até o tubulão superior da caldeira (linha verde). Quando há perdas, essa água que provém do vapor condensado no condensador da turbina, é reposta a partir do *Surge Tank* com água desmineralizada com intuito de evitar formação de calcário e obstruir as tubulações da caldeira. A água também passa permanentemente por um Desaerador térmico, cujo objetivo é retirar ar da água e evitar corrosão devido à presença de oxigênio.

A linha vermelha mostra o circuito de vapor superaquecido que sai do tubulão superior da caldeira, como força propulsora para girar as pás da turbina. O vapor superaquecido é transformado em vapor saturado através do desvio para o coletor de baixa pressão e também através das várias extrações de vapor pelos diversos estágios da própria turbina (linha azul). Esse vapor é fundamental para garantir o pré-aquecimento da água de recirculação como forma de garantir estabilidade térmica na caldeira e gerar vácuo. As grandes perdas de calor nessa unidade resultam da saída dos gases pela chaminé (linha amarela), no entanto uma parte retorna para a fornalha para controle da pressão da mesma, chamado de gás de recirculação. Os vários trocadores de calor (caixas representadas em branco) têm a finalidade de garantir a estabilidade térmica da unidade tais como: os préaquecedores de ar de combustão (verde), economizadores (último estágio de aquecimento da água de alimentação antes de entrar na caldeira - quadro verde à esquerda da fornalha).

#### 3.1.1.1 – Processo de Queima de Combustíveis

Os combustíveis usados no processo de produção de vapor são armazenados em gasômetros que se encontram instalados dentro da usina. O gás natural é o único combustível proveniente da rede distribuição externa.



Figura 3.2 – Diagrama de controle de Vazão dos Combustíveis

A Figura 3.2 mostra o fluxograma de controle de vazão dos combustíveis. Quando um combustível é selecionado para ser queimado na fornalha, este passa a ser a fonte de calor da caldeira entrando em modo *Boiler Master (BM)*. Ou seja, o controle de vazão recebe *setpoint* remoto de uma malha, chamada de *Calorie Master* (FIC-400). A malha FIC-400 é chamada de *Calorie Master* porque calcula o total de calorias que estão sendo fornecidas por todos combustíveis à fornalha e através do valor de energia demandado na caldeira, envia o valor de *setpoint* para a malha de combustível selecionada em *BM*. Esse funcionamento caracteriza-se

por modo cascata, em que a FIC-400 é uma malha mestre e as vazões de combustível e ar são escravas. Somente um combustível por vez pode estar em modo *BM*, os demais ficam em modo automático com o *setpoint* determinado pela equipe de operação.

Conforme pode-se verificar pela Figura 3.2, a malha FIC-400 tem uma estratégia de controle de limite cruzado no qual o *setpoint* enviado por esta malha passa por um seletor de menor sinal, que compara dois sinais distintos; o sinal de controle de pressão da caldeira (MV – variável manipulada) vindo da PIC-400 (demanda energética), e o sinal da vazão total de ar de combustão dado pela *AF* (vindo da FIC-405 e FIC-406) e retransmite o menor entre eles. O controle por limite cruzado é um intertravamento lógico de segurança que impede a criação de uma rica mistura comburente, em caso de alguma falha mecânica, problemas na válvula de combustível, ou bloqueio do *damper* de ar (entrada de ar), por exemplo. Se houver diminuição no consumo de vapor refletindo num aumento de pressão dentro da caldeira, a priorização da ação de controle para essa situação é a redução de vazão de combustível e depois o ar de combustão. O menor sinal entre eles é enviado como *setpoint* para o controlador PID da FIC-400 conforme a Figura 3.2. A finalidade dessa ação de controle é garantir uma mistura estequiometricamente correta.

Para realizar o cálculo da quantidade de calorias fornecidas à fornalha, a malha FIC-400 recebe os sinais de vazão de todos os combustíveis utilizados na fornalha, verifica qual o combustível está sendo utilizado no momento da queima e procura na tabela abaixo, chamada *Calorie Data Base (CDB)*, a quantidade de calorias por unidade de volume que este combustível pode fornecer e lança estes dados num bloco de cálculo. O sinal proveniente deste bloco de cálculo é chamado de *Total Fuel Calorie (TFC)* e além de ser enviado ao bloco subtrator do controlador da malha FIC-400, também é enviado às malhas FIC-405 e FIC-406 para ser condicionado e utilizado para determinar o valor de *setpoint* destas malhas.

Deste modo, as malhas de controle de vazão de combustíveis são capazes de controlar o fluxo de gás necessário para manter o balanço energético da fornalha e controlar a temperatura e pressão do vapor produzido na caldeira.

Calorie Data Base (CDB)		
Combustível C	alorias [kcal/Nm <sup>3</sup> ]	
BFG 8	16	
LDG 20	010	
<b>COG</b> 55	332	
<b>TAR</b> 83	577	

 Tabela 3.1 - Calorias por unidade de volume dos combustíveis

A seguir será feita a descrição do funcionamento dos sistemas de combustíveis da unidade bem como o controle de ar dentro da fornalha.

#### 3.1.1.1.1– Vazão de *BFG*

O controle de vazão de *BFG* para a fornalha é feito pela malha FIC-402. Esta malha funciona como escrava no modo cascata (*BM*) e recebe *setpoint* da FIC-400, ou este valor pode ser definido pela operação em modo automático. Por ser o gás mais abundante, mais barato é o mais utilizado para gerar calor para caldeira, no entanto possui menor poder calorífico (816 kcal/m<sup>3</sup>N). Por causa disso, a malha de controle deste gás possui quatro elementos finais de controle, FCV-402-1, FCV-402-2, FCV-402-3, FCV-402-4 (válvulas de controle de vazão) situadas uma em cada canto da fornalha. A malha de controle de vazão de *BFG* encontra-se de maneira simplificada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Malha de controle de vazão de BFG simplificada

#### 3.1.1.1.2– Vazão de *LDG*

O controle da vazão de *LDG* para fornalha é realizado pela malha FIC-401. Essa malha funciona como escrava em operação cascata (*BM*) e também recebe o sinal de *setpoint* da FIC-400 (*Calorie Master*), ou esse valor pode ser definido pela operação em modo automático. A *MV* (a variável manipulada) é enviada ao elemento final de controle, uma válvula de controle de vazão (FCV-401) que controlará o fluxo de *LDG* para a fornalha. A malha de controle de vazão de *LDG* encontra-se na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Malha de controle de vazão de LDG simplificada

## 3.1.1.1.3 - Vazão de COG

O controle da vazão de *COG* é feito por duas malhas independentes: FIC-403A, controla a vazão do *COG* principal e FIC-403B controla a vazão do *COG* estabilizante ambos são enviados para fornalha. A função da FIC-403B é manter uma vazão mínima de *COG* para garantir estabilidade da combustão na fornalha, pelo fato de *COG* possuir um poder calorífico maior que *BFG* e *LDG*. Essa malha, FIC-403A opera como escravo recebendo sinal de *setpoint* da FIC-400 em modo cascata, ou podendo ser definido pela operação em modo automático enquanto que na FIC-403B esse valor somente é determinado pela equipe de operação da CTE. O controle do fluxo de *COG* dentro da fornalha é feito pelas MV's dos controladores da FIC-403A e FIC-403B que são transmitidas às respectivas válvulas de controle de vazão (FCV-403A e FCV-403B).



Figura 3.5 – Malha de controle de vazão de COG principal e estabilizante

# 3.1.1.1.4 - Vazão de TAR

O controle da vazão de *TAR* para a fornalha é realizado por duas malhas: FIC-404A e FIC-404B. Essas malhas recebem o *setpoint* da FIC-400 quando operam em modo cascata ou a operação determina este valor em modo automático. A FIC-404A alimenta o alcatrão (*TAR*) pela parte superior da fornalha e possui uma capacidade de dosagem maior, enquanto que na FIC-404B essa alimentação é feita na parte inferior da fornalha.



Figura 3.6 – Malha de controle de vazão superior e inferior de Alcatrão

## 3.1.1.1.5 - Controle de ar dentro da Fornalha

Para que o combustível dentro da fornalha possa queimar, uma das condições que se deve ter é uma atmosfera rica em Oxigênio (O<sub>2</sub>) no ambiente. As malhas que garantem essa condição são: a FIC-405 e a FIC-406. A malha FIC-405 (vazão de ar de combustão inferior) é responsável pelo controle de vazão de ar de combustão quando estão sendo dosados *LDG* ou *TAR* pela FIC-404A. A malha FIC-406 (Vazão de ar de combustão superior) é responsável pelo controle de vazão de ar de combustão sendo dosados *BFG*, *COG* ou *TAR* pela FIC-404B. O sinal *AF* (*Air Flow*) é a soma das vazões das duas malhas (FIC-405 e FIC-406) que é transmitido à estratégia de controle de limite cruzado com o sinal de demanda energética da PIC-400 que assegura um sinal de *setpoint* para a FIC-400, tal que impeça o surgimento de uma atmosfera altamente explosiva no interior da fornalha.

Essas duas malhas possuem uma estratégia de controle de limite cruzado, que atua no caso de aumento do consumo de vapor. O consumo de vapor leva a queda de pressão dentro da caldeira com conseqüente aumento de calor fornecido para recuperar a pressão dentro do equipamento. Neste caso há primeiro o aumento da vazão de ar de combustão para garantir à não existência de uma atmosfera altamente explosiva, priorização feita pelo seletor de maior sinal. Os sinais de entrada do seletor são: a MV do controlador de pressão da caldeira (Demanda Energética) e o valor real de vazão de combustível (*TFC*). O maior valor entre eles será o valor de *setpoint* para o controlador de vazão de ar de combustão tanto da FIC-405, quanto da FIC-406.



Figura 3.7 – Fluxograma da estratégia de controle de limite cruzado



Os sinais das *PV* dessas malhas de controle de vazão de ar são enviados para os seus respectivos elementos finais de controle, válvulas de admissão de ar, (FCD-405A, FCD-405B, FCD-406A, FCD-406B) que controlam o fluxo de entrada de ar para os queimadores da fornalha. Na saída da fornalha existe uma malha, AIC400, que controla a quantidade de  $O_2$  dos gases de exaustão. Sua função é garantir um excesso de  $O_2$  que permita uma combustão completa evitando que ar seja queimado sem necessidade. O seu *SP* é determinado pela relação entre a vazão de vapor gerado (*BSF*) e vazão de total de combustíveis em base calórica, servindo dessa forma como um "medidor" da eficiência da caldeira.

A pressão dentro da fornalha é monitorada e controlada através da malha PIC-405 que atua na retirada induzida dos gases resultantes da combustão de dentro da fornalha. A *PV* do controlador da PIC-405 transmitida ao elemento final de controle PCD-405 (ventilador centrífugo) é somada em estratégia *feedforward* com a ação de controle da PIC-406 (admissão de ar de combustão), da FIC-402 (vazão de *BFG*) e da FIC-401 (vazão de *LDG*). A estratégia de *feedforward* é utilizada a fim de antecipar qualquer distúrbio na pressão dentro da fornalha, seja pelo aumento de pressão por causa da diminuição da vazão de combustível. Outra malha que é responsável pela pressão dentro da fornalha é a PIC-406 que controla a pressão do ar de combustão que é enviado para a fornalha. Esta malha cumpre a sua tarefa controlando o elemento final de controle, ventilador centrífugo (PCD-406), admitindo o ar da atmosfera que passa por um filtro e um silenciador antes de chegar à fornalha através de uma linha de

ventilação forçada. Além disso, a *PV* da PIC-406 serve como entrada do controle antecipativo da PIC-405.

#### 3.1.1.2– Sistema de Vapor e Água

Atualmente os processos industriais funcionam em ciclo fechado, tentando aproveitar o máximo possível o calor gerado (energia) através de sistemas de recuperação, ciclos combinados (Cogeração), evitando dessa forma perdas. Esse sistema de vapor é toda ela de recuperação, onde todo o fluído que é usado no trabalho é reaproveitado. Neste caso a água é aquecida transformada em vapor superaquecido para mover a turbina e depois é condensada. Alguma perda no sistema é compensada pelo *Surge Tank*. A Figura 3.9, mostra uma visão geral do funcionamento do processo na CTE.



Figura 3.9 – Visão geral do funcionamento do processo da CTE

## 3.1.1.2.1 - Caldeira

O processo de geração de vapor é realizado na caldeira. Trata-se de uma caldeira aquatubular (KAYSER, 2010).

A malha de controle responsável pelo nível de água do tubulão superior é a LIC-400. Ela controla o nível do tubulão através de dois sensores instalados em cada lado do tubulão superior e retransmitem este sinal ao controlador da malha. A *MV* deste controlador é enviada como sinal de *setpoint* para a malha FIC-408 que controla a vazão de água de alimentação para o tubulão superior, caracterizando um funcionamento em modo cascata onde a malha LIC-400 é a malha mestre e a malha FIC-408 é a escrava. Esta última possui um sensor instalado na linha principal do ciclo de vapor/água e faz a medição de vazão de água condensada, que sai do segundo aquecedor de alta pressão passando pelo economizador e até ao tubulão superior. Entretanto, o elemento final de controle desta malha, uma válvula de controle de vazão (FIC-408), encontra-se antes do primeiro aquecedor de alta pressão e controla o fluxo de água que sai do desaerador para os aquecedores de alta, depois para o economizador e finalmente chega ao tubulão. Este fluxo de condensado/vapor encontra-se representado na Figura 3.10.



Figura 3.10 – Esquema geral do ciclo vapor/condensado

O sinal de controle enviado à FCV-408 é somado em estratégia *feedforward* com o sinal da vazão de vapor gerado pela caldeira, o *Boiler Steam Flow (BSF)*, definido pelo medidor de vazão FI-407.

Outra variável a ser monitorada e controlada na caldeira, é a pressão de vapor em seu interior. A pressão de vapor deve ser mantida numa faixa de variação estreita, pois este vapor é normalmente utilizado em equipamentos complexos e que devem operar com grande estabilidade, por exemplo, turbinas. Essa pressão é controlada variando as vazões do combustível e do ar de combustão injetados na fornalha, que respondem a uma demanda energética (maior demanda maior produção de vapor). Essa pressão é uma variável chave do

processo que indica o estado de equilíbrio entre o fornecimento e a demanda de vapor. Por isso, a PIC400 (pressão da caldeira) é a malha pivô de todo o processo de geração da CTE, também conhecida por *Boiler Master (BM)*. A PIC-400 mede a pressão de saída de vapor do de-superaquecedor através do medidor de pressão PT-400 e retransmite-o ao controlador da malha. A *MV* do controlador é somada em estratégia *feedforward* com o *BSF* (vazão de vapor gerado na caldeira) e este novo sinal é comparado com vazão de ar de combustão, o menor valor deles é enviado ao seletor limite cruzado utilizada pela FIC-400 e através desta é definido o sinal de vazão de combustível para aquele que estiver selecionado como *BM*. O esquema de controle da PIC-400 encontra-se na Fig.3.11.



Figura 3.11 – Esquema de controle da PIC-400 simplificada

O mesmo sinal que é mandado para a FIC-400 também é enviado para as malhas de vazão de ar de combustão (FIC-405 e FIC-406). Com os sinais de vazão de combustível e de ar definidos, a PIC-400 consegue controlar a queima dentro da fornalha e conseqüentemente a pressão de vapor na caldeira. Quando a pressão dentro da caldeira atingir o valor de 105kgf/cm<sup>2</sup>, o elemento final de controle (PCV-400) da PIC-400L (Alívio de vapor na caldeira) atua liberando o vapor para a atmosfera. O ideal é que esta malha entre em operação o mínimo possível, pois as perdas e diminuindo a eficiência energética da caldeira.

Existem artifícios que podem ser usados para evitar que o valor da PIC400 suba, como por exemplo, retirar outros combustíveis que não estejam em cascata (modo *BM*), ou mesmo reduzir o *SP* de pressão de vapor fazendo com que a velocidade da resposta aumente. Por norma essa redução de vapor não deverá ser feita porque pode provocar distúrbio e em muitos casos até a parada da unidade. A PIC 400 em manual provoca problema no controle da

LIC400, nível do tubulão, sendo que este último também não deve ter grande variabilidade sob pena de prejudicar a produção de vapor na caldeira.

#### **3.1.1.2.2 – Superaquecedores**

Após passar pela caldeira o vapor saturado transforma-se em vapor superaquecido. Essa operação acontece com a passagem do vapor por um feixe de tubos em forma de serpentina que formam os superaquecedores. A caldeira da CTE possui dois superaquecedores em série no ciclo de vapor. Após a passagem do vapor pelo primeiro superaquecedor começase o processo de superaquecimento, a sua temperatura é controlada pelo de-superaquecedor que resfria o vapor pela adição de água atomizada em alta pressão na linha de vapor através de um sistema *spray* atemperador. O sistema *spray* é denominado dessa forma, porque a água deve estar atomizada (em névoa), para depois ser pulverizada evitando o choque térmico com a parede da tubulação de vapor.



Figura 3.12 – Esquema de controle da PIC-400 simplificada

As malhas que controlam a temperatura do vapor superaquecido são a TIC-400 e a TIC-401. A primeira mede a temperatura do vapor superaquecido através do medidor TE-400 que está instalado depois do segundo superaquecedor. O sinal do controlador da TIC-400 é somado em estratégia *feedforward* com *BSF* e este sinal é transmitido como *setpoint* para a TIC-401. Esta mede a temperatura do vapor superaquecido depois do de-superaquecedor (através do TE-401). As duas malhas funcionam em modo cascata, no qual a TIC-400 é a

mestra e a TIC-401 a escrava que atua no elemento final de controle (TCV-401) injetando mais ou menos água no de-superaquecedor proveniente do desaerador.

Além dessas malhas existem outras que participam do controle dos superaquecedores são; PIC-451 (pressão de saída do de-superaquecedor) e a TIC-431 (temperatura de saída do de-superaquecedor). A PIC-451 controla a pressão do vapor na saída do de-superaquecedor enviando vapor do *header* de baixa pressão para a linha principal de vapor através da válvula PCV-451. A TIC-431 é responsável pelo controle da temperatura do vapor de água injetado na saída do de-superaquecedor. O sinal do controlador da PIC-451 é somado em estratégia *feedforward* com a TIC-431 e este sinal é transmitido como *SP* para a TIC-431. Essa malha realiza sua tarefa através do controle da válvula TCV-431 que faz a injeção de água pulverizada na saída de-superaquecedor.

#### 3.1.1.2.3 – Turbina

A energia entálpica do vapor superaquecido transforma-se em energia mecânica para acionar a turbina, conseqüentemente o gerador elétrico e o soprador que envia ar para o Alto Forno. Esse vapor chega à turbina a uma temperatura de 515°C e 103kgf/cm<sup>2</sup>. Após realização do trabalho há uma expansão térmica, o fluído começa a mudar de fase e volta a ter características de vapor saturado. Este vapor sai por diversas tubulações chamadas de extrações. A turbina da CTE possui as seguintes extrações:

- 1° Extração: Aquecedor de alta pressão n°2,
- 2º Extração: Aquecedor de alta pressão nº1 e *header* de baixa pressão,
- 3° Extração: Desaerador,
- 4º Extração: Aquecedor de baixa pressão nº2,
- 5° Extração: Aquecedor de baixa pressão nº1.

A energia dos vapores dessas extrações serve para manter o equilíbrio térmico do condensado durante seu percurso até a caldeira, por causa da perda de carga. Dessa forma garante-se a eficiência energética da unidade.



Figura 3.13– Fluxo de vapor/condensado na Turbina

A PIC-440 é uma malha importante no controle da pressão de vapor que entra na turbina. Ela atua no desvio da linha principal de alimentação de vapor para a turbina. Se a pressão medida pelo transmissor de pressão (PT-440) ultrapassar 103kgf/cm<sup>2</sup>, o controle abre o desvio através da válvula PCV-452 e envia o vapor para ser condensado no condensador. A malha TIC-432 é responsável por controlar a temperatura do vapor que é desviado da linha principal de vapor para o condensador pela malha PIC-440 injetando água através da válvula TCV-432. Este fluído refrigerante provém do próprio condensador. Além dessas malhas a turbina possui FIC-490 que controla a vazão de ar soprado para o Alto-Forno e SI-400 que controla a velocidade de rotação da turbina atuando na inclinação das palhetas.

## 3.1.1.2.4 – Condensador

O vapor que não é utilizado das extrações segue para o condensador onde troca calor com o fluído refrigerante (água do mar) e passa ao estado liquido. O condensador devido à troca térmica tem no seu interior pressão negativa (vácuo) que é mantida em conjunto com o ejetor de ar, que faz a retirada (sucção) dos gases não condensáveis. O condensado acumulado na parte inferior do condensador é bombeado para os aquecedores de baixa pressão depois para o desaerador e por último é bombeado para os aquecedores de alta. Depois de passar por esses equipamentos, o condensado segue para o economizador chegando ao tubulão superior ï

fechando o ciclo. Para repor as perdas o sistema possui um reservatório de água (*Surge Tank*) interligado com o condensador.



Figura 3.14 – Esquema simplificado do condensador

O condensador possui três malhas de controle que monitoram e controlam o nível de condensado dentro dele. Estas malhas são: LIC-431A-1 (Nível do condensador – *Make up* A), LIC-431A-2 (Nível do condensador – *Make up* B) e LIC-431B (Nível do condensador – *Spill Over*). Todas as três malhas recebem o sinal de nível de condensado através do medidor de nível LT-431. De entre as três malhas, a LIC-431A-1 é a que atua na maior parte do tempo, controlando o seu elemento final de controle (LCV-431A-1) que envia água do *Surge Tank* para o condensador repor fluído no processo. A LIC-431A-2 só atua quando a capacidade de envio d'água da LIC-431A-1 for ultrapassada controlando o elemento final de controle (LCV-431A-2) que envia água do *Surge Tank* para o condensador. A LIC-431B envia água do condensador para *Surge Tank* atuando na válvula LCV-431B. O LIC-431B atua somente quando há necessidade de diminuir o nível de água no condensador.

#### 3.1.1.2.5 – Aquecedores de baixa pressão

Os aquecedores de baixa pressão são os primeiros equipamentos que pré-aquecem o fluído, com o objetivo de aumentar a eficiência energética do processo reduzindo o consumo de combustível na fornalha. Eles pré-aquecem o condensado por meio do vapor proveniente
da 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> extração da turbina. Nesta etapa do processo, o condensado atua como fluído refrigerante na troca térmica que ocorre entre o vapor de extração da turbina e o condensado. Deste modo, ele chega do condensador a uma temperatura de cerca de 40°C e sai dos aquecedores de baixa pressão à 120°C aproximadamente. Convém deixar claro que neste processo de pré-aquecimento, o condensado do processo transformado em vapor não se mistura com o vapor de extração da turbina. Enquanto o condensado passa por dentro de tubos, o vapor passa por fora destes realizando a troca de calor através das paredes das tubulações. Nesse processo de troca de calor o vapor saturado vai se condensado, e fica depositado no interior destes equipamentos aguardando que o sistema de controle o encaminhe para o devido destino.

Existem duas malhas de controle nos aquecedores de baixa pressão: a LIC-434 e a LIC-435. A LIC-434 é responsável pelo controle de nível de água do primeiro aquecedor de baixa pressão. O nível de fluído é monitorado pelo sensor de nível LT-434 que transmite o sinal ao controlador. O controlador por sua vez envia um sinal de controle para a válvula LCV-434 que envia o acúmulo de água de volta ao condensador, conforme a figura 3.15.

De forma similar à LIC-434, a LIC-435 é responsável pelo controle de nível de água do segundo aquecedor de baixa pressão. O nível de água é monitorado pelo transmissor, LT-435 que transmite o sinal ao controlador da malha e este envia um sinal de controle à válvula LCV-435 que por sua vez manda o acúmulo de água de volta ao primeiro aquecedor de baixa.



Figura 3.15 – Instrumentação e processo dos Aquecedores de baixa pressão

### **3.1.1.2.6 – Desaerador**

A função do desaerador é retirar o ar do condensado, evitando a corrosão devido à presença de oxigênio. Inicialmente a água é atomizada através de *spray* e bandejas sobrepostas, que em contracorrente com vapor oriundo da  $3^{a}$  extração da turbina, libera os gases não condensáveis que são purgados do sistema. Além disso, é injetado hidrazina (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) na saída do condensador que reage com o O<sub>2</sub> livre formando água e liberando N<sub>2</sub>.

A LIC-430 controla o nível do desaerador atuando em uma válvula que está na descarga do condensador. Conduzindo dessa forma a água pela tubulação principal de vapor passando pelos aquecedores de baixa pressão até chegar ao desaerador. O objetivo deste controlador é atuar como pulmão e atenuar os distúrbios do processo evitando que se propaguem por outras malhas do processo. O fluído que circula neste equipamento e que tem seu fluxo controlado pela LIC-430 é a mesma que será transformada em vapor dentro da caldeira. Esta situação é diferente do que ocorre nos aquecedores de baixa pressão onde a água controlada pelas malhas de controle, é a condensada do vapor de extração da turbina que troca calor com a água que será transformada em vapor.

### 3.1.1.1.7 – Aquecedores de alta pressão

Possuem a mesma finalidade dos aquecedores de baixa pressão. Os vapores saturados provenientes da 1° e 2° extração de vapor da turbina são as fontes de calor desses equipamentos. Encontram-se situados em série entre o desaerador e o economizador.

De maneira análoga aos aquecedores de baixa pressão, os de alta pressão possuem duas malhas de controle que regulam o nível de condensado dentro dos equipamentos. Estas malhas são: a LIC-436 (nível do aquecedor de alta pressão 1) e a LIC-437 (nível do aquecedor de alta pressão 2). A primeira malha é responsável pelo controle de nível de água do primeiro aquecedor de alta, que controla o acúmulo de água para o desaerador e para o condensador através das válvulas LCV-436A e LCV-436B respectivamente. O nível de água dentro deste equipamento é medido pelo transmissor LT-436. Enquanto que a malha LIC-437 é responsável pelo controle do nível de água para o desaerador de alta pressão e do desaerador enviando acúmulo de água para o desaerador e para o primeiro aquecedor de alta pressão e do desaerador enviando acúmulo de água para o desaerador e para o primeiro aquecedor de alta pressão e do desaerador enviando acúmulo de água para o desaerador e para o primeiro aquecedor de alta pressão e torta de segundo através das válvulas LCV-437B e LCV-437A respectivamente.



Figura 3.16 – Instrumentação e processo dos Aquecedores de alta pressão

### 3.1.1.1.8 – Economizador

É um equipamento que possui função análoga aos aquecedores, porém este aquece a água de alimentação da caldeira através da troca de calor com os gases de exaustão retirados do interior da fornalha. Este pré-aquecimento do condensado faz com que a caldeira receba a água de alimentação com uma temperatura superior a 200°C ao invés dos 40°C da saída do condensador. Essa temperatura de 200°C garante maior estabilidade térmica da caldeira conseqüentemente maior eficiência energética do processo.



Figura 3.17 – Esquema simplificado do Economizador

#### 3.1.1.3 - Sistemas Auxiliares

#### 3.1.1.3.1 – *Header* de baixa pressão

Trata-se de um sistema que recebe vapor da 2ª extração da turbina e do também do *bypass* da linha principal de vapor para turbina. O *header* distribui vapor para os equipamentos consumidores como aquecedores, selagem, atomização de alcatrão e também envia para a rede principal de vapor de processo, como complemento de acordo com a demanda energética.

A malha responsável pela pressão interna do *header* é o PIC-450. Esta realiza o controle admitindo vapor da linha principal (por meio de um desvio) para o *header* através da válvula PCV-450. Enquanto que o controle de temperatura é da responsabilidade da TIC-430. Esta malha controla a temperatura do vapor injetando água do desaerador no desvio através da válvula de controle TCV-430. O *header* além de receber vapor superaquecido da linha principal de vapor, também recebe vapor saturado através da 2ª extração da turbina. A pressão deste vapor tem o seu controle realizado pela PIC-453. Enquanto que o controle de temperatura deste vapor é realizado pela TIC-433. A TIC-433 envia água através da válvula TCV-433A do desaerador para o header de baixa pressão.



Agua vem do Desaerador

Figura 3.18 – Header de baixa pressão

### 3.1.1.3.2 – Atomização e aquecimento do Alcatrão

A atomização é um processo de divisão de partículas (em forma de *spray*), para que o óleo combustível (alcatrão) fique propício para uma queima mais eficaz (uma combustão completa). No conjunto queimador do alcatrão existe duas tubulações de entrada, sendo uma de alcatrão e outra de vapor. Os dois fluídos seguem separadamente por uma lança que possui dois compartimentos. Na ponta da mesma existe um difusor que facilita a mistura vapor/alcatrão, em forma de *spray ideal* para combustão. A pressão de vapor de atomização é mantida por uma válvula controladora em torno de 7,0 kgf/cm<sup>2</sup>. Quando é dado o comando de acendimento do alcatrão, primeiramente ocorre a abertura da válvula de vapor e em seguida, a do alcatrão. O controle dessa pressão é feito pela malha PIC-412. Como foi visto no item 3.1.1.1.4 a vazão do alcatrão fornecida à fornalha é dada por duas válvulas FIC404A (para alimentação superior) e FIC404B (para alimentação inferior).

O vapor de traço é o de aquecimento da tubulação por onde escoa o alcatrão. Isso é feito devido à grande viscosidade desse combustível à temperatura ambiente. Esse aquecimento dá-se pelo contato externo da tubulação com uma linha que vapor proveniente do *header* de baixa pressão. A PIC-454 controla o vapor de traço com uma pressão de 4,0 kgf/cm<sup>2</sup> de forma a manter a tubulação sempre aquecida. O vapor que foi condensado é retirado através de purgadores instalados na rede vapor.

O alcatrão por ser um combustível de alto poder calorífico é muitas vezes usado para compensar a perda do combustível que estiver em uso no momento da queima conseguindo dessa forma garantir uma mistura estequiométrica. No entanto a sua disponibilidade é limitada. O que é produzido na maior parte das vezes é comercializado para empresas químicas. Os gases de exaustão de recirculação na fornalha são usados para ajudar na queima do alcatrão e no melhor aproveitamento do calor transmitido por condução pelo gás queimado na fornalha.

#### 3.1.1.3.3 – Selagem da Turbina

A selagem da turbina é feita para evitar que vapor escape para o ambiente. Essa selagem pode ser dividida em duas partes: no lado de alta e de baixa pressão. No lado de alta pressão da turbina, ela evita que o vapor interno vaze para o lado externo no contato entre o eixo e a carcaça da turbina, devido à folga existente entre essas partes. O vapor que tende a escapar passa por labirintos que os direcionam para um condensador específico (condensador

de vapor de selagem). No lado de baixa (lado da exaustão da turbina) que trabalha a vácuo (-700 mmHg) haveria a possibilidade da infiltração do ar na junção do eixo com a carcaça. Para resolver esse problema, o vapor é fornecido para essa região de contato mantendo um fluxo constante que segue por canais até o condensador de vapor de selagem. O vapor provoca um arraste não permitindo que entre ar na turbina, pelo lado da exaustão por causa do vácuo existente nesse lado.

O controle da pressão de vapor de selagem é feito por uma válvula controladora de pressão, entre 0,2 a 0,4 Kgf/cm<sup>2</sup>. O vapor de selagem é proveniente do *header* de baixa pressão (vapor do processo). E a malha PIC-442 é responsável pelo controle dessa selagem na turbina.

# Capítulo 4 – Estudo de caso

Neste capítulo as perturbações das 40 malhas de controle do processo descrito no capítulo 3, que foram selecionadas pela equipe de produção da CTE são analisadas a partir da metodologia proposta no capítulo 2.

## 4.1 – Tratamento e análise dos dados

Inicialmente os responsáveis da CTE forneceram 4 (quatro) bateladas de dados referentes aos dias 02 e 03 de setembro de 2010. Cada batelada de dados era composta por 12 horas de medições de cada malha constituída pelo(a): *PV* (variável do processo), *SP* (*setpoint*), *OP* (saída do controlador) e *MODO* (controlador em modo automático, manual ou cascata).

Porém, ao se fazer uma análise prévia dos mesmos verificou-se que havia três tempos de amostragem diferentes: 5, 10 e 20 segundos. Pelo fato de não se conhecer a dinâmica das malhas, optou-se por realizar nova medição dos dados com todas as malhas amostradas de 8640 pontos a cada 5s que representa 12 horas de funcionamento, como forma de evitar a perda de informação. Com o tempo de amostragem ajustado, foram coletados novamente duas bateladas de dados referente ao dia 06-10-10, no período diurno (06:00 – 18:00) e noturno (18:00 – 06:00). Optou-se por analisar os dados do período diurno pelo fato das malhas terem apresentado aparentemente comportamento oscilatório.

Das 40 malhas inicialmente selecionadas, dez foram suprimidas. Algumas por não terem apresentado informações de freqüência (vazões de *COG*, *LDG*) e outros não chegaram a entrar em funcionamento (vazão e pressão do *TAR*) durante o período. A malha de vazão do gás natural, GN, por ser um combustível usado somente para manter a ignição da caldeira optou-se por excluí-la da análise. A velocidade de turbina é uma malha que tem uma variação limitada, seguindo a teoria de *Droop control*: o controlador do regulador de velocidade da turbina a vapor tenta sempre manter a velocidade do equipamento dentro do intervalo de tolerância, independente da variação da demanda de produção. O cálculo do *Droop control* para esse tipo de equipamento é dada pela fórmula seguinte:

$$Droop(\%) = \frac{(Sr_o - S_o)}{S_o} \times 100$$
(4.1)

onde  $S_o$  é a velocidade ajustada sem carga (Hz) e  $Sr_o$  é a velocidade com 100% de carga (Hz) (Fig. 4.1). O Droop descrito aqui é em kW.



Figura 4.1 – Droop Control

As 30 malhas de controle que restaram para análise encontram-se listadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Listagem das 30 malhas do processo							
Designação da malhas	Numeração						
Vazão BFG para caldeira	1						
Vazão COG estabilizador	2						
Pressão Caldeira	3						
Caloria Master	4						
Pressão na Fornalha	5						
Vazão de Ar combustão inferior	6						
Vazão de Ar combustão superior	7						
Pressão de Ar de combustão	8						
Temperatura de Ar de combustão	9						
Vazão de ar soprado	10						
Analisador Oxigênio	11						
Alívio vapor da Caldeira	12						
Nível aquecedor de baixa	13						
Nível aquecedor de média	14						
Nível aquecedor de alta 1	15						
Nível aquecedor de alta 2	16						
Vazão Água alimentação	17						
Nível Tubulão	18						
Nível condensador – Make up A	19						
Nível condensador – Make up B	20						
Nível condensador – Spill Over	21						
Nível Desaerador	22						
Temperatura bypass vapor de alta turbina- injeção de água	23						
Pressão saída De-superaquecedor	24						
Temperatura saída do de-superaquecedor – injeção água	25						
Temperatura do vapor do de-superaquecedor	26						
Temperatura vapor principal	27						
Pressão header de baixa pressão	28						
Temperatura 2ª extração turbina para header de baixa- injeção água	29						
Pressão da 2ª extração turbina para header de baixa	30						

## 4.2 – Obtenção da matriz de relação causa e efeito

Conforme foi mencionado no item 2.2.1, a matriz de inter-relação é imprescindível para se buscar a(s) malha(s) fonte de oscilação pelo algoritmo de busca em grafos. Essa matriz foi montada a partir da análise física e dos diagramas *P&ID* disponibilizados pela empresa e pelas várias reuniões com os responsáveis da produção. Essa matriz foi validada pelos especialistas da produção da CTE. Tendo sofrido muitas mudanças ao longo da análise. Isso se deve ao fato da relação de causa-efeito não ser uma tarefa fácil, motivado pela complexidade do processo.

A literatura tem sugerido várias técnicas com o propósito de contornar esse problema, os quais foram mencionados na seção 2.2.1.1.

CAUSA	EFEITO																													
	1	Ś	3	4	5	6	7	8	Ś	10	11	12	13	14	15	16	17	18	15	50	21	22	23	24	25	26	27	28	23	30
1	0	Û	0			0	Q	0	51	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Û	0	0			0	0	0
\$	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0		0		1	0	0	0	0	165	20	0	0	Û	0		0	0	0		0	0	0	0		0	0	0
4		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	Ū.	0	0		0	0	0	0
5	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	Û	0		.0	9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0		Ó	0	0		0	0	Ô	0	0	0	0	0	.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	Ó	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	Ó	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	Ó	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	Û	0	0	Ó	0	0	0	Û	0	0	0	0	0	Û	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	Û	Û	0	0	0	0	0	0	0	0	Û	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	.0	0	0	0	0	0	0	0	0	.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		.0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	Û	0	0	Û	0	Û	0	Ű	0	0	0	0	0	0	Û	0	0	Û	0	0	Û	0	0	0	0	Û	Û	0	0
55	0	0	.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	Ű,	0	0	0	0
23	0	0	.0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	Ó	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0		0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Û	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.0	0	0	0	0		0

Tabela 4.2 – Relação Causa-Efeito das 30 malhas da CTE

Na Tabela 4.2 as linhas representam a causa e as colunas o efeito. A coloração vermelha dos quadrados mostra a influência que uma determinada malha da linha provoca numa determinada malha coluna.

## 4.3 – Análise de perturbação oscilatória

A Figura 4.2 mostra os sinais PV das 30 malhas de controle do processo no tempo.



Figura 4.2 – Sinais no tempo das 30 malhas do processo

Verifica-se que todas as malhas aparentam comportamento oscilatório no domínio do tempo. Consegue-se perceber pela análise gráfica que as malhas 14 e 15 possuem a maior e menor variabilidade respectivamente em relação às demais ao longo de todo período da amostra.

Usando o algoritmo *ODC* geraram-se os *PSDs* adotando 2 desvios padrões para agrupamento das freqüências próximas e manteve-se os sinais oscilatórios de energia normalizada maior ou igual a 0.3, que garanta pelo menos uma malha para cada freqüência detectada, conforme a Figura 4.3.



Cada cor representa a freqüência que foi detectada pelo algoritmo. Verifica-se que a partir dos 30% de energia ainda foi possível detectar malhas nas três faixas de freqüências.

A Figura 4.4 mostra o gráfico dos *PSDs* gerados a partir dos dados dos sinais no tempo. Observa-se que algumas malhas apresentam *PSDs* típico de sinais senoidais (período regular) com formato bem estreito e afunilado, enquanto que outros são típicos de sinais com período irregular, sem um formato definido.



Figura 4.4 – PSD das 30 malhas da CTE

Com os valores dos limiares ajustados montou-se a matriz de malhas versus freqüências abaixo. Em cada malha onde a freqüência foi detectada registra-se o valor da energia do sinal oscilatório correspondente necessário para análise da causa raiz a partir da energia.

i abela 4.5 – Analise de Ellergia												
Togg	Freqüências e Energia											
Tags	0.0024rad/s	0.0048rad/s	0.0102rad/s									
3			0.00									
9	0.00											
12			0.00									
13			3.72*10-2									
14		1.0										
18			6.07*10-5									
19	1.79*10-4											
20	1.79*10-4											
21	1.79*10-4											
22			5.87*10-2									
23	2.27*10-5											
27			0.00									

Tabela 4.3 – Análise de Energia	
---------------------------------	--

As energias das malhas 3, 9, 12 e 27 apresentam magnitudes na faixa de:  $7.37*10^{-8}$ ,  $1.92*10^{-7}$ ,  $7.36*10^{-8}$  e  $4.82*10^{-7}$  respectivamente. Valores esses, muito baixos com pouca representatividade para análise. Sendo assim, optou-se por zerá-los conforme a Tab.4.3, todas as energias com intensidade abaixo de  $10^{-5}$ .

Pela Tabela 4.3 verifica-se que na freqüência 0.0048rad/s, a malha 14 é fonte de oscilação por ser a única detectada com o limiar de energia escolhido. Conforme se explicou através da Figura 4.2, usando limiares menores de energia, essa freqüência é detectada em outras malhas, porém com energia menor. Essa malha controla o nível do 2º aquecedor de baixa pressão e o seu nível é o próprio *SP*. A malha 14 é influenciada pela variação de produção de condensado pela turbina conseqüência da demanda energética.

Na freqüência, 0.0024rad/s, as malhas 19, 20 e 21 possuem maior energia e podem ser indicadas como prováveis fonte de oscilação. Essas malhas controlam o nível de água do condensador. A 20 funciona quando a 19 não consegue suprir a demanda, enquanto que a 21 trabalha quanto há necessidade de diminuir o nível de água no condensador. Essas são solicitadas quando houver necessidade de repor água no processo conseqüência de aumento da demanda de vapor. As malhas 9 e 23 que apresentam baixa energia nessa freqüência são responsáveis pelo controle da temperatura de saída dos gases e do ar de combustão e pela temperatura do *header* de baixa através de um desvio na linha de vapor principal respectivamente. O *header* de baixa é uma espécie de caldeira que fornece vapor para aquecer outras unidades da usina. A sua estabilidade térmica está diretamente relacionada com a produção de vapor.

<b>Tabela 4.4 –</b> Analise via matriz Causa-Eleno												
Togo	Freqüências											
Tags	0.0024rad/s	0.0048rad/s	0.0102rad/s									
3			X									
14		Χ										
19	Χ											
23	X											

Tabela 4.4 – Análise via matriz Causa-Efeito

Pela análise da matriz de causa-efeito, as malhas 19 e 23 foram indicadas como sendo fontes de perturbação oscilatória na freqüência de 0.0024 rad/s. Isso é explicado primeiro pelo fato da malha 19 influenciar diretamente as malhas 20 e 21, por isso essas duas não foram indicadas como fontes de perturbação nessa freqüência. A indicação da malha 23 como fonte de perturbação nessa freqüência deveu-se ao fato de não se ter conseguido detectar uma

relação de causa-efeito entre essa malha e a 19. Logo sendo os dois independentes, o algoritmo indicou-os como fonte de perturbação nessa freqüência.

Na freqüência 0.0102rad/s, a malha 22 apresentou maior energia quando comparada às demais (3, 12, 13, 18 e 27), portanto é indicada como provável fonte. A malha 22 é responsável pelo controle do nível do desaerador. Este equipamento é responsável pela alimentação do tubulão e pela eliminação de distúrbios que poderiam se propagar pela planta. A malha 12 é responsável pelo alívio de vapor na caldeira quando a pressão em 3 atingir 105kgf/cm<sup>2</sup>. A malha 13 é responsável pelo controle do nível do primeiro aquecedor de baixa pressão enviando o acúmulo para o condensador. Ela sofre influencia diretamente da malha 3 e 14. A malha 18 é responsável pelo controle do nível do tubulão da caldeira diretamente influenciada da demanda de produção de vapor. A temperatura de vapor principal, 27, varia em conseqüência da demanda de vapor, no entanto similar à 3 ela não pode ter grande variabilidade por causa da sua importância no processo. Pela análise de causa-efeito constatase que a malha 3 foi indicada como sendo a fonte de oscilação na freqüência 0.0102 rad/s pelo algoritmo de busca. Isso se deve ao fato dela influenciar todas as malhas (12, 13, 18, 22 e 27) nessa faixa de freqüência conforme a Tabela 4.2. Por outro lado pela análise de energia verifica-se que essa malha apresentou baixa energia, isso se deve a sua necessidade de funcionar com muita estabilidade. Ela controla a pressão na caldeira funcionando como um "medidor" da eficiência energética da unidade. Essa eficiência está diretamente relacionada com a produção de vapor conseqüência das vazões do tipo de combustível e do ar respectivamente na relação estequiométrica correta. A vazão de combustível é definida pela quantidade de calorias disponível para queima na fornalha. A indicação da malha 3 como fonte de oscilação pela Tab.4.4 nessa faixa de freqüência, mostra que a relação de causa-efeito prevaleceu em relação ao método de energia nessa faixa de freqüência. Ela também pode ser indicada como fonte de perturbação oscilatória pelo fato dela ser um medidor da eficiência energética, regulando a produção de vapor consoante a demanda energética influenciando diretamente as malhas nas outras faixas de freqüência. Pois as malhas com freqüências nas faixas 0.0024 e 0.0048 rad/s encontram-se diretamente dependentes da produção de vapor.

## 4.4 – Análise de perturbação não-oscilatória

Seguindo a metodologia ajustaram-se os parâmetros do *SPCA* nos seguintes valores:  $\tau_t = 0.03, \tau_{st} = 0.98 \text{ e } P_{PCA} > 30\%$ . A Figura 4.5 mostra os *PSD's* com comportamento nãooscilatório obtidos a partir da Figura 4.3.



Figura 4.5– PSD filtrado das 5 malhas com energia maior que 30%

A Figura 4.6 apresenta três componentes principais (*CPs*) – Fig.4.6 (esq.) e o gráfico de *Scores* – Fig.4.6(dir.).



Figura 4.6 – CPs (esq.) e Scores (dir.)

O gráfico de *Scores* indica um agrupamento formado pelas malhas 4, 11 e 26 com similaridade espectral correspondem ao mesmo padrão de similaridade 1. A dissimilaridade espectral existente nas malhas 6 e 16 correspondem aos padrões de similaridades 2 e 3 respectivamente.

Taga	Padrão de similaridade										
Tags	1	2	3								
4	X										
16			Χ								
6		X									

Tabela 4.5 – Análise via matriz causa-efeito

A malha 4 é a única fonte de perturbação não-oscilatória no padrão 1. A malha 4 calcula o total de calorias que estão sendo alimentados na fornalha através da demanda energética na caldeira e dita os SPs para as malhas de vazão de combustível e ar. Essa é fortemente dependente do tipo de combustível que está sendo utilizado no momento da queima e da demanda energética (produção de vapor). Portanto pela relação de causa-efeito (Tab.4.2), ela influencia no funcionamento das malhas 26(temperatura vapor desuperaquecedor) e 11(analisador de  $O_2$  dos gases e ar de combustão) por isso foi indicada como fonte pelo algoritmo de busca (Tab.4.6). No padrão 2, a malha 6 foi indicada como fonte de perturbação não-oscilatória. Ela é responsável pelo controle de vazão de ar de combustão inferior quando estão sendo dosados LDG, e/ou TAR. Essa malha apresentou grande instabilidade no momento da queima de BFG (malha 1) conforme a Figura 4.2. Ela é escrava da malha 4 pois a última define o SP das vazões de ar necessário para combustão completa. A malha 16 controla os níveis do 2º aquecedor de alta pressão e do desaerador. O SP é o próprio nível. Essa malha recebe o condensado da 1ª extração da turbina, região onde a pressão é fortemente influenciada pela variação da produção de vapor. Consegue-se concluir, que a malha 4 é a causa raiz da fonte de perturbação não-oscilatória pelo fato dela influenciar diretamente a malha 16 e ser a mestre da malha 6. Onde se verificou que a instabilidade inicial na malha 4 se propagou para as outras malhas (6 e 16).

A partir das Tabelas 4.4 e 4.5, pode-se tirar as seguintes conclusões: apesar dos algoritmos terem detectado quatro e três malhas como sendo fontes de perturbação oscilatória e não-oscilatória respectivamente verifica-se que a mudança do tipo de combustível é apontada como sendo a causa raiz dessas perturbações. Isso se deve à diminuição drástica na vazão de *COG* e ausência de *LDG* e *TAR* ficando disponível para queima somente *BFG* 

(malha 1), combustível com menor poder calorífico conforme a Tab.3.1. A não compensação da malha do *TAR* pela ausência do *LDG* e baixa vazão de *COG*, provocou grande instabilidade inicial na malha 4 por não poder num instante inicial suprir a quantidade de calorias suficiente para queima em conseqüência da demanda de vapor requerida, malha 3, acabando por gerar perturbações que se propagaram-se para as outras malhas pela influência direta e indireta. Verifica-se pela Figura 4.2, grande instabilidade das malhas 1, 6 (vazão de ar de combustão inferior) e 7 (vazão de ar de combustão superior) conseqüência da disponibilidade de calorias inicial da malha 4 para o cálculo estequiométrico. Também observa-se grande instabilidade na pressão dentro da fornalha dada pela malha 5 (pressão da fornalha).

A análise de perturbações oscilatória indicou um grupo de 4 malhas como possíveis fontes, embora não ficasse clara a causa. Pelo fato dessas malhas não terem uma relação direta com a 4, as perturbações sentidas nessas malhas não são imediatas. No entanto, da conclusão que se chegou, indicou-se a malha 3 como sendo da fonte de oscilação na análise oscilatória. Como existe uma relação muito estreita entre a malha 3 e 4. A primeira "envia" a demanda de vapor requerida na caldeira à malha 4 sendo este responsável pela quantidade de calorias que possui a mistura estequiométrica, logo pode-se atribuir à malha 4 como sendo a fonte de perturbação oscilatória. A análise de perturbações não oscilatórias indicou a malha 4 como fonte das instabilidade pela sua influência diretas nas malhas detectadas com perturbações não-oscilatórias, o que correspondeu à análise feita pelo pessoal da operação. Portanto, as análises conjuntas permitiram neste caso detectar a existência de perturbações e indicar um pequeno número de malhas como suas geradoras, reduzindo grandemente o tempo para análise do problema.

# Capítulo 5 – Conclusões

A metodologia para análise conjunta de perturbações oscilatórias e não-oscilatórias proposta foi cumprida tendo sido usada para análise do estudo de caso. O modelo de simulação para caracterizar os algoritmos permitiu propor a metodologia.

Essa metodologia permitiu reduzir grandemente o esforço de análise dos dados de operação passando a concentrar-se em apenas num número reduzido de malhas facilitando em muito a equipe de engenharia e manutenção na detecção de problemas na planta. Essa facilidade de detecção pode ser expressa no ganho de tempo na solução dos problemas indo diretamente na fonte (equipamento com defeito, controlador mal sintonizado, etc). Essa rapidez de análise da fonte de perturbação poderá ser automatizada através de um *plugin* que poderá ser instalado no sistema de monitoramento das malhas passando a analisar as malhas em tempo real e assim permitir a engenharia uma análise rápida e simples da unidade, diminuindo em muito as paradas por manutenção corretiva

Os resultados mostraram-se coerentes com a análise feita pela operação. A análise de busca de fonte de oscilação pela matriz de causa-efeito apresentou melhores resultados quando comparado ao método de energia, no entanto a primeira carece de maior esforço para a sua obtenção. O problema de obter as relações de causa e efeito ficou evidente no trabalho, havendo necessidade de se aprofundar mais nos métodos existentes na literatura citados na seção 2.2.1.1. Observa-se que não basta saber apenas que malhas estão relacionadas, mas qual afeta qual.

Tratando-se de um processo complexo onde há grande inter-relação das malhas visando à eficiência energética, deve-se pensar em repetir a análise para várias situações de operação (disponibilidade de diferentes combustíveis) e diferentes situações que produzem perturbações. Isto certamente trará subsídios para melhoria dos algoritmos.

O uso do algoritmo de análise de componentes independentes, ICA, como uma alternativa ao *PCA* poderá ser avaliado como forma de melhorar os resultados de detecção das perturbações.

# **Referências Bibliográficas**

BAUER, M., COX, J, W., CAVENESS, M., DOWNS, J., THORNHILL, F, N., Finding the direction of disturbance propagation in a chemical process using transfer entropy, **IEEE Transactions on control systems technology**, 15. 2007.

BECKMAN, D., JURY, F. Reducing process variability with control valves, Internal Report, Fisher Controls International Inc, Marcshalltown, Iowa, Nov.1997

BIALKOWSKI, W, L. Dreams versus reality: a view from both sides of the gap. **Pulp and Paper Canada**, v. 94(11), p. 19 – 27, 1993.

C. W., GRANGER, J. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. **Econometrica**, v.37, n<sup>o</sup> 3, p. 424-438, Aug., 1969.

CHOUDHURY, S, M, A, A., THORNHILL, N. F., SHOOK, S, D., Automatic detection and quantification of stiction in control valves, **Control Engineering Practice**, v.14, Issue 12 p.1395 – 1412, 2006

CHOUDHURY, S, M, A, A., SHAHA, L, S., THORNHILL, N. F., Diagnosis of poor controlloop performance using high-order statistic, **Automatica**, v. 40, p.1719 – 1728, 2004

CHUNMING, X., HOWELL, J. Isolating Multiple sources of plant-wide oscillations via independent component analysis, **Control Engineering Practice**, v. 13, p. 1027-1035, 2005.

DEPIZZOL, F, C. Contribuções ao problema de detecção automatica de oscilações em malhas de controle. **Dissertação de Mestrado**, p. 35 – 37. Vitória, Departamento de Engenharia Elétrica - UFES, 2011.

DIAS PASSOS, L, F. Metodologia para Auditoria e Validação Ampla de malhas de controle – Estudo de Caso para uma Caldeira Industrial, **Dissertação de Mestrado**, p. 1 – 5. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Elétrica - UFMG, 2009.

EMBIRUÇU, M. Avaliação Econômica de projetos de Controle e Automação. Curso de Especialização em Instrumentação, Automação, Controle e Otimização de Processos Contínuos. Escola Politécnica da UFBA, 2004. FERTNER, A., et SJOLUND, A. Comparison of Various Time Delay Estimation Methods by Computer Simulation. **IEEE**, v.34, Issue 5, p.1329-1330, 1986.

GLEICH, D.(2006). **Tutorial Matlab BGL v1**. Abr.2006- out.2008. Disponível em:<http://www.standford.edu/~dgleich/programs/matlab\_bgl/old/matlab\_bgl\_v1.0.pdf.>. Acesso em: 03-08-2010.

HORCH, A. et al. Benchmarking control loops with oscillations and stiction. In Ordys, D. Uduechi, & M. A. Johnson (Eds.), **Process control performance assessment**, p. 227-257. 2007.Berlin: Springer London.

HORCH, A., BONAVITA, N. Peak Performance Root Cause Analysis of Plant-wide disturbances. **ABB REVIEW** 1/2007.

I.B.G.E. "Estrutura de custos e despesas das empresas industriais, segundo o grupo de atividade." **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica** – IBGE, 2005.

JACOVITTI, G., et SCARANO, G. "Discrete Time Techniques for Time Delay Estimation" **IEEE**, v.41, issue 2, p. 525-533, 1993.

JIANG, H., et CHOUDHURY, M., A, A. S., SHAH, S. L., COX, J., & PAULONIS. Detection and diagnosis of plant-wide oscillations via the method of spectral envelope. In: **Proceedings** of the IFAC-ADCHEM, Gramado, Brasil, Abril 2006, p. 3 – 5, 2006.

KARRA, S., NAZMUL, K. Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillations control loops, **Control Engineering Practice**, v.17, p. 939-956, 2009.

KAYSER, C., KEMPF, A. **Projeto PilotoTriCLPM – Etapa 2 Auditoria de Malhas**, ArcelorMittal Tubarão, jul. 2010

LIMA, F. Diagnóstico de causa de oscilação em múltiplas malhas de controle. **Projeto de graduação**, Vitória, Departamento de Engenharia Elétrica – UFES, set. 2010.

LUYBEN, W, L., TYREUS, B. D., & LUYBEN, M. L. Plant-Wide process control. McGraw-Hill. New York, 1999.

MATLAB BGL v1, [Pacote do MATLABCENTRAL com algoritmo *DFS*] Disponível em:<<u>http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10922</u>> Acesso em: 01-08-2010.

MIAO, T., SEBORG, D, E. Automatic detection of excessively oscillatory feedback control loops, In: **Proceedings of IEEE conference on control applications**. Hawaii, p.359 – 364, Hawaii 1999.

SCHREIBER, T. Measuring information transfer, **Physical Review Letters**, v.85, p. 461-464, 20 jul. 2000.

SRINIVASAN, R., RENGASWAMY, R., MILLER, R. A modified empirical mode decomposition (EMD) process for oscillation characterization in control loops, **Control Engineering Practice**, v. 15, Issue 9, p. 1135-1148, 2007.

STOICA, P., MOSES, R. Introduction to Spectral Analysis. Ed. Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River New Jersey 1997, pp 2 -3, 1997.

TANGIRALA. A. K., SHAH, S. L., & THORNHILL, N. F. PSCMAP: A new measure for plant-wide oscillation detection. Journal of Process Control, v. 15, p. 931-941, 2005.

THORNHILL, F, N., JEGATHEESWARAN, T., BENABBAS, L., MARGRET, B. Cause– and-effect analysis in chemical processes utilizing XML, palnt connectivity and quantitative process history, **Computers and Chemical Engineering**, v.33, p. 503 – 512, 2009

THORNHILL, F, N., HORCH, A. Advances and new directions in plant-wide disturbance detection and diagnosis, **Control Engineering Practice**, v. 15, p. 1196 – 1206, 2007.

THORNHILL, F, N.,et al. Detection of plant-wide disturbances using a spectral classification tree. In: **Proceedings of IFAC-ACHEM**, Gramado, Brasil, Abril 2006, p.3 -5, 2006.

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

THORNHILL, F, N., HUANG, B., ZHANG, H. Detection of multiple oscillations in control loops, **Journal of Process Control**, v.13, p.91-100, 2003.

THORNHILL, F, N., SHAH, S. L., Huang, B., VISHNUBHOTLA, A. Spectral principal componente analysis of dynamic process data, **Control Engineering Practice**, v.10, p.833-846, 2002.

THORNHILL, N. F., HÄGGLUND, T. Detection and diagnosis of oscillation in control loops, **Control Engineering Practice**, v. 5, Issue 10, p. 1343-1354, 1997.