

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Metodologia para Auditoria e Validação Ampla de  
Malhas de Controle – Estudo de Caso para uma  
Caldeira Industrial**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Lúcio Fábio Dias Passos

Belo Horizonte/MG  
Abril de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Metodologia para Auditoria e Validação Ampla de  
Malhas de Controle – Estudo de Caso para uma  
Caldeira Industrial**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADORA: Profa. Carmela Maria Polito Braga, D.Sc.

**Banca Examinadora:**

Profa. Carmela Maria Polito Braga, D.Sc.- UFMG - Orientadora

Prof. Ronaldo Tadeu Pena, D.Sc. - UFMG - Examinador Interno

Prof. Jorge Otávio Trierweiler, D.Sc. - UFRGS – Examinador Externo

Agradecimentos,

Agradeço primeiramente à Prof.<sup>ª</sup> Carmela, minha orientadora, pelos ensinamentos, pelo entusiasmo, pelo exemplo de dedicação e, principalmente, pela confiança depositada em mim. Também agradeço ao Prof. Anísio pelos ensinamentos e idéias geniais que tanto me inspiraram.

Em segundo, gostaria de agradecer aos meus colegas do LVAS, Hugo, Laura, Rafael, Mateus e a Prof.<sup>ª</sup> Patrícia, pela amizade e ajuda durante os testes na usina.

Gostaria também de agradecer à CEMIG, representada pelo Eng. Webber, que acreditou neste trabalho e o financiou, além dos funcionários da usina térmica do Barreiro, especialmente, o Gustavo e o Bacharel, pela disponibilidade e auxílio durante os testes.

Por último, gostaria de agradecer aos meus pais, pelo apoio incondicional e irrestrito.

## Resumo

Propõe-se uma metodologia para gerenciamento de malhas de controle, incluindo avaliação de desempenho, diagnóstico e localização de faltas, com uma abordagem de Validação Ampla. Por meio de funções denominadas validadores, os elementos que constituem as malhas de controle, assim como variáveis externas com potencial para influenciar seu desempenho, são individualmente monitorados e avaliados. Entre estes elementos, incluem-se: válvulas de controle, sensores, controladores e equipamentos. Para cada tipo de elemento, um validador é projetado e, por meio de uma interface padronizada, eles são organizados numa estrutura hierárquica do tipo árvore de falha, que leva em conta algumas relações de causa e efeito identificadas entre estes validadores. Considera-se, nesta análise, que as malhas de controle operam razoavelmente bem e que as relações de causa e efeito entre as variáveis são conhecidas. Por isso, como etapa preliminar ao projeto do sistema de validação ampla, é proposta uma metodologia para auditoria das malhas de controle. Ela inclui diversas técnicas presentes na literatura para análise de interação entre variáveis, avaliação de desempenho, diagnóstico de falhas e otimização de controladores PID. Um estudo de caso na área de caldeira em uma usina termelétrica, avalia a aplicação destas propostas. Inicialmente, é realizada a auditoria de todas as malhas de controle e, ao final, um sistema validador para a caldeira é proposto com objetivo de monitorar a qualidade do vapor superaquecido e a eficiência energética da caldeira, correlacionando-os com o desempenho do sistema regulatório e com a ocorrência de eventos perturbadores.

**Palavras-Chave:** Avaliação de desempenho de malhas de controle, gerenciamento de desempenho, validação de sistemas de controle

## Abstract

A methodology for control loop management, including performance assessment, diagnosis and fault detection, with a unit wide validation approach is proposed. Using functions named validators, the control loop subsystems and exogenous variables with potential to influence its performance are individually assessed. Among these subsystems are control valves, sensors, controllers and pieces of equipment. For each subsystem a validation function is designed with a defined standard interface that allow the construction of an organized fault tree hierarchical structure, which considers the main cause-effect relationships in the plant unit. It is assumed that the control loops perform as designed and that the impacting cause-effect relationship can be identified. A methodology for control loops audit is proposed as a preliminary stage of a unit wide validation system project. Algorithms already in current engineering practice were used for variables interaction detection, performance assessment, fault diagnosis and optimization of PID controllers. A case study of a boiler unit of a thermoelectric plant, illustrates the methodology of validation. Initially all control loops are analyzed and scanned for main features and dynamical behavior. These preliminary data are used to design and adjust validation functions to supervision main quality variables of the boiler unit, such as superheated steam and energy efficiency. Disturbance events and different operational modes were used to test the validation methodology proposed.

**Keywords:** control loop performance assessment, asset management, control system validation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Redução da variabilidade.....	2
Figura 2.1 – Funções associadas ao conceito de validação de processos. ....	7
Figura 2.2 – Estrutura de um validador para malhas de controle .....	9
Figura 2.3 – Exemplo de carta de controle de Shewhart.....	10
Figura 2.4 – Classificação das perturbações.....	12
Figura 2.5 – Diagrama de blocos para controle estatístico. ....	12
Figura 2.6 - Versão de filtro passa-alta de primeira ordem.....	13
Figura 2.7 – Diagrama relacional do tipo Árvore de Falha .....	15
Figura 2.8 – Exemplos de situação anormais .....	15
Figura 2.9 – Diagrama temporal de causa e efeito.....	16
Figura 3.1 – Fases propostas para a Auditoria de Malhas de Controle .....	20
Figura 3.2 – Metodologia proposta para detecção e diagnóstico de acoplamentos .....	27
Figura 3.3 – Exemplo de variáveis acopladas devido a uma perturbação externa.....	28
Figura 3.4 – FAC típicas de sinais oscilatórios e não-oscilatórios. ....	32
Figura 3.5 –Método de Forsman e Stattin para detecção de oscilação .....	33
Figura 3.6 – Processo simulado para ilustrar detecção de oscilação .....	35
Figura 3.7 – Proposta de representação gráfica para identificação de acoplamentos .....	36
Figura 3.8 – Espectro de potência de FIC01 .....	37
Figura 3.9 – Simulação pra demonstração de tendência típica de uma malha com agarramento .....	40
Figura 3.10 – Teste manual para detecção e quantificação de agarramento .....	41
Figura 3.11 – Espectro de potência de uma malha com problema de não-linearidade em válvula .....	42
Figura 3.12 – Função de correlação cruzada entre PV e CO numa malha com agarramento. ....	43
Figura 3.13 – Ilustração do método de Singhal e Salsbury.....	43
Figura 3.14 - Curva típica de resposta em freqüência de uma malha de controle PI.....	45
Figura 3.15 – Diagnóstico de oscilação com chaveamento para modo manual .....	48
Figura 3.16 – Seqüência sugerida para testes em malhas aberta .....	53
Figura 4.1 – Fluxograma simplificado de uma usina termelétrica. ....	57

Figura 4.2 – Fluxos de energia numa caldeira. ....	63
Figura 4.3- Arquitetura do Sistema de Automação da usina.....	65
Figura 4.4 – Esquema simplificado das malhas de controle da caldeira .....	67
Figura 4.5 – Esquema de controle de pressão no tubulão (PIC322).....	69
Figura 4.6 – Esquema de controle da pressão no interior da fornalha (PIC323).....	70
Figura 4.7 – Esquema de controle da temperatura do vapor (TIC327) .....	71
Figura 4.8 – Efeito de fase não-mínima no controle de nível da caldeira (LIC302) .....	72
Figura 4.9 – Exemplo de efeito de fase não-mínima causado por “inchamento” (LIC302).....	73
Figura 4.10 – Mudança no comportamento do controle de nível após ligamento do regenerador .....	74
Figura 4.11 – Esquema de controle para alimentação de água. ....	75
Figura 4.12 – Esquema do controle de alimentação de GAF.....	75
Figura 4.13 – Esquema de controle da alimentação de alcatrão.. ....	76
Figura 4.14 – Esquema do controle de adição de GN.....	77
Figura 4.15 – Esquema do controle de vazão de combustíveis e vazão de ar por limites cruzados .....	78
Figura 4.16 – Estratégia para controle de combustão com combustível preferencial.....	80
Figura 4.17 – Perfil típico das curvas de perdas em função do excesso de ar.....	82
Figura 4.18 – Estratégia de controle de combustão com otimização de excesso de ar .....	83
Figura 4.19 – Algoritmo Matlab® para cálculo dos índices de desempenho.....	84
Figura 4.20 – Modelo para perturbações nas malhas de controle da caldeira .....	86
Figura 4.21 – Análise de componentes principais durante variações de carga.....	87
Figura 4.22 – Análise de componentes principais durante distúrbio no PCI do GAF .....	88
Figura 4.23 – Análise de componentes principais durante variação na qualidade do Alcatrão.....	89
Figura 4.24 – Distúrbios causados por impurezas no alcatrão .....	89
Figura 4.25 – Algoritmos Matlab® para detecção automática de oscilação numa série temporal.....	92
Figura 4.26 – Algoritmos Matlab® para detecção automática de agarramento em válvula de controle...93	
Figura 4.27 – Acoplamentos oscilatórios de alta frequência (A) e de baixa frequência (B) .....	97
Figura 4.28 – Acoplamento de baixa frequência nas malhas da caldera .....	98
Figura 4.29 – Reconstituição do sinal de TIC37 no domínio do tempo a partir dos ciclos principais.....	98
Figura 4.30 – Tendência temporal da oscilação de 800 segundos em LIC302 .....	99

Figura 4.31 – Gráficos de tendência do acoplamento de alta frequência.....	100
Figura 4.32 – Ponto de prova de pinça utilizada para a conexão com o painel .....	102
Figura 4.33 – Comparação da coleta de dados utilizando OPC e a aquisição direta .....	103
Figura 4.34 – Aplicação de técnicas de identificação para modelagem dos dados.....	103
Figura 4.35 – Ferramenta utilizada para supervisão dos testes .....	104
Figura 4.36 – Interface gráfica para manipulação do algoritmo de identificação.....	105
Figura 4.37 – PIC313. Seqüência de teste em malha aberta .....	107
Figura 4.38 – PIC313. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. ....	107
Figura 4.39 – FIQ313. Seqüência de teste em malha aberta.....	108
Figura 4.40 - FIQ313. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.....	108
Figura 4.41 – LIC302. Seqüência de teste em malha aberta .....	109
Figura 4.42 – LIC302. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.....	110
Figura 4.43 – TIC327. Seqüência de teste em malha aberta .....	111
Figura 4.44 – TIC327. Teste em malha aberta do tipo duplo-pulso para validação .....	111
Figura 4.45 – TIC327. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. ....	112
Figura 4.46 – PIC341. Seqüência de teste em malha aberta .....	113
Figura 4.47 – FIQ311. Seqüência de teste em malha aberta.....	113
Figura 4.48 – PIC341. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. ....	114
Figura 4.49 – FIQ311. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.....	114
Figura 4.50 – PIC342. Seqüência de teste em malha aberta .....	115
Figura 4.51 – FIQ101. Seqüência de teste em malha aberta.....	115
Figura 4.52 – PIC342. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. ....	115
Figura 4.53 – FIQ101. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.....	116
Figura 4.54 – FCV101. Presença de oscilação no posicionador. ....	116
Figura 4.55 – Principais períodos de oscilação da vazão em operação em regime permanente.....	116
Figura 4.56 – FIQ102. Seqüência de teste em malha aberta.....	117
Figura 4.57 – FIQ102. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.....	117
Figura 4.58 – PIC137. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia .....	118
Figura 4.59 – FIQ103. Seqüência de teste em malha aberta.....	118

Figura 4.60 – FIQ103. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.....	119
Figura 4.61 – TIC327. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria.....	120
Figura 4.62 – LIC302. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria .....	120
Figura 4.63 – FIQ313. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria .....	121
Figura 4.64 – PIC313. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria.....	121
Figura 4.65 – Acoplamentos oscilatórios de alta frequência (A) e de baixa frequência (B) .....	122
Figura 5.1 – Tendência temporal da vazão de alcatrão e limpeza do filtro.....	127
Figura 5.2 –ACP relacionando variância do erro das variáveis e grau de sujeira do filtro .....	127
Figura 5.3 – Árvore de Falha para a Caldeira.....	128
Figura 5.4 – Gráficos de tendência temporal de PIC313, FIQ313, TIC327 e LIC302. ....	129
Figura 5.5 – Cartas de controle para o exemplo 1.....	130
Figura 5.6 – Simulação da árvore de falha, exemplo 1.....	130
Figura 5.7 – Gráficos de tendência temporal da vazão de vapor e de LIC302 e PIC322.....	131
Figura 5.8 – Cartas de controle para o exemplo 2.....	131
Figura 5.9 – Simulação da árvore de falha, exemplo 2.....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Reconfiguração de PID para sensor autovalidado .....	9
Tabela 3.1 – Matriz de coeficientes de correlação entre as oito variáveis .....	29
Tabela 3.2 – Matriz de auto-vetores (participação das variáveis em cada componente principal) .....	29
Tabela 3.3 – Correlação cruzada entre a variável 2 e as demais .....	30
Tabela 3.4 – Período e intensidade das principais componentes de frequência das malhas .....	35
Tabela 3.5 – Períodos principais ordenados em ordem ascendente.....	35
Tabela 4.1 – Relação das malhas de controle e dados sobre instrumentação.....	60
Tabela 4.2 –Variáveis monitoradas durante a auditoria .....	61
Tabela 4.3 – Combinações típicas de mistura de combustível utilizadas.....	62
Tabela 4.4 – Índices de desempenho das malhas .....	85
Tabela 4.5 – Correlação cruzada entre os principais distúrbios e o sistema regulatório .....	90
Tabela 4.6 – Resultado da aplicação dos métodos de detecção de oscilação antes.....	95
Tabela 4.7 – ACP das malhas da caldeira.....	96
Tabela 4.8 – Índices de desempenho das malhas .....	120
Tabela 4.9 – Resultado da aplicação dos métodos de detecção de oscilação depois .....	123
Tabela 5.1 – Mapeamento das principais condições operacionais discretas .....	126

## LISTA DE ABREVIÇÕES

- A/D – Conversor Analógico-Digital
- ACP – Análise em Componentes Principais
- CAP – Controle Automático de Processos
- CEP – Controle Estatístico de Processos
- CLP – Controlador Lógico Programável
- CO – Controller Output (saída de controle)
- CUSUM - Cumulative Sum
- FAC – Função de Auto Correlação
- FCC – Função de Correlação Cruzada
- MV – Manipulated Variable (variável manipulada)
- OPC – OLE for Process Control
- PID – Proporcional-Integral-Derivativo
- PV – Process Variable (variável de processo)
- SDCD – Sistema Digital de Controle Distribuído
- SP – Setpoint (referência de controle)

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1: Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos e Escopo da Dissertação .....	4
<b>Capítulo 2: Validação Ampla de Malhas de Controle.....</b>	<b>6</b>
2.1. Controle Estatístico de Processos Aplicado a Validação .....	10
2.1.1. Controle Estatístico de Malhas de Controle .....	12
2.1.2. Carta de Controle para Diagnóstico de Causas Especiais .....	13
2.2. Diagramas Relacionais Qualitativos.....	14
2.3. Etapas do Processo de Validação.....	16
2.4. Comentários Finais.....	18
<b>Capítulo 3: Metodologia para auditoria de malhas de controle .....</b>	<b>19</b>
3.1 Levantamento de Campo (Fase I) .....	20
3.2 Avaliação Inicial de Desempenho (Fase IIa).....	22
3.3 Diagnósticos Preliminares (Fase IIb).....	26
3.3.1. Identificação de Acoplamentos não-Oscilatórios .....	28
3.3.2. Detecção de oscilação em Malhas de Controle .....	30
3.3.3. Identificação de Acoplamentos Oscilatórios.....	34
3.3.4. Diagnóstico de causa raiz de oscilação .....	37
3.4 Otimização e Ações Corretivas (Fase III).....	49
3.5 Comentários Finais.....	54
<b>Capítulo 4: Auditoria das Malhas de Controle de uma Caldeira .....</b>	<b>56</b>
4.1. A Caldeira e seu Sistema de Controle e Automação .....	56
4.2. Revisão das Estratégias de Controle.....	66
4.3. Avaliação Inicial de Desempenho das Malhas de Controle.....	84
4.4. Diagnósticos Preliminares.....	86
4.4.1. Identificação de Acoplamentos Não-Oscilatórios.....	86

4.4.2. Detecção de oscilação e diagnóstico de Causa Raiz .....	90
4.4.3. Detecção de acoplamentos oscilatórios .....	96
4.5. Otimização e Ações Corretivas .....	100
4.6. Resultados.....	119
4.7. Comentários Finais.....	124
<b>Capítulo 5: Projeto de um Modelo Para Validação Ampla da Caldeira .....</b>	<b>125</b>
5.1. Mapeamento das Causas Especiais de Variabilidade .....	125
5.2. Projeto dos Validadores.....	128
5.3. Exemplos.....	129
5.3.1. Condição Anormal na Pressão de Bombeamento .....	129
5.3.2. Condição Anormal na Vazão de Vapor.....	130
5.4. Comentários Finais.....	132
<b>Capítulo 6: Conclusão e Direcionamento para Trabalhos Futuros.....</b>	<b>133</b>
<b>Refêrencias Bibliográficas .....</b>	<b>136</b>
<b>Anexo A: Modelo de Descritivo de Malhas.....</b>	<b>140</b>
<b>Anexo B: Planejamento de Experimentos .....</b>	<b>141</b>
<b>Anexo C: Métodos Estatísticos .....</b>	<b>147</b>
<b>Anexo D: Métodos de Sintonia Baseados em Modelo.....</b>	<b>149</b>

## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Plantas industriais são notórias por exigências rigorosas de desempenho de suas unidades de processamento. Para uma empresa sobreviver, ela precisa ser “de classe mundial” (*world class*). Isso significa, entre outras coisas, produzir com alta qualidade e em quantidade suficiente para atender ao mercado mundial. Tudo com uso racional de energia, com baixo índice de reprocessamento, com segurança e respeitando restrições impostas pela legislação ambiental. Estes fatores normalmente impõem restrições à produção e à qualidade de produtos, os quais determinam especificações para plantas industriais que só podem ser obtidas a contento com a aplicação eficaz de técnicas avançadas de controle de processo e automação industrial (Clarke, 1999; Braga et al., 2006).

Neste contexto, o desafio permanente apresentado aos engenheiros e gerentes consiste na determinação de índices que indiquem se a produção está sendo assegurada como esperado. Um importante indicador é a variabilidade de variáveis, ao longo da cadeia produtiva, que representam ou impactam as características-chave do produto final e os custos de produção. Quanto menor a variabilidade, ou seja, a dispersão de suas medidas em relação ao valor médio, melhor o desempenho da unidade. Isso justifica a grande aplicação de controle automático de processos (CAP). Seu principal papel é atuar automaticamente no processo, garantindo a mínima variabilidade, a despeito de variações nas demandas, nas condições de operação e nas características da matéria-prima e insumos.

Além de permitir tais condições, um dos benefícios econômicos de se operar com uma variabilidade reduzida é permitir a operação do processo mais próxima de certas restrições que também representam pontos de maior lucratividade (Braga et al. 2006). A Figura 1.1 mostra o gráfico de tendência de uma variável de processo, cuja variabilidade é reduzida após melhoria em seu controle. Inicialmente a referência (setpoint) era mantida, conservadoramente, longe da restrição para evitar que a mesma fosse violada. Após a redução da variabilidade, a referência pode ser deslocada para um ponto mais próximo da restrição e, também, um ponto de maior lucratividade. Se existe uma função que relacione o ganho econômico por unidade de deslocamento no ponto de operação, então é possível quantificar o retorno econômico após esta melhoria (Embiruçu, 2004).

Farenzena e Trierweiler, 2006, discutem que a redução da variabilidade numa malha não pode ser considerada isoladamente, ignorando-se suas interações com as outras malhas de controle do processo. De fato, o ganho econômico obtido com a redução de variabilidade numa malha pode ser perdido com o aumento causado em outra.

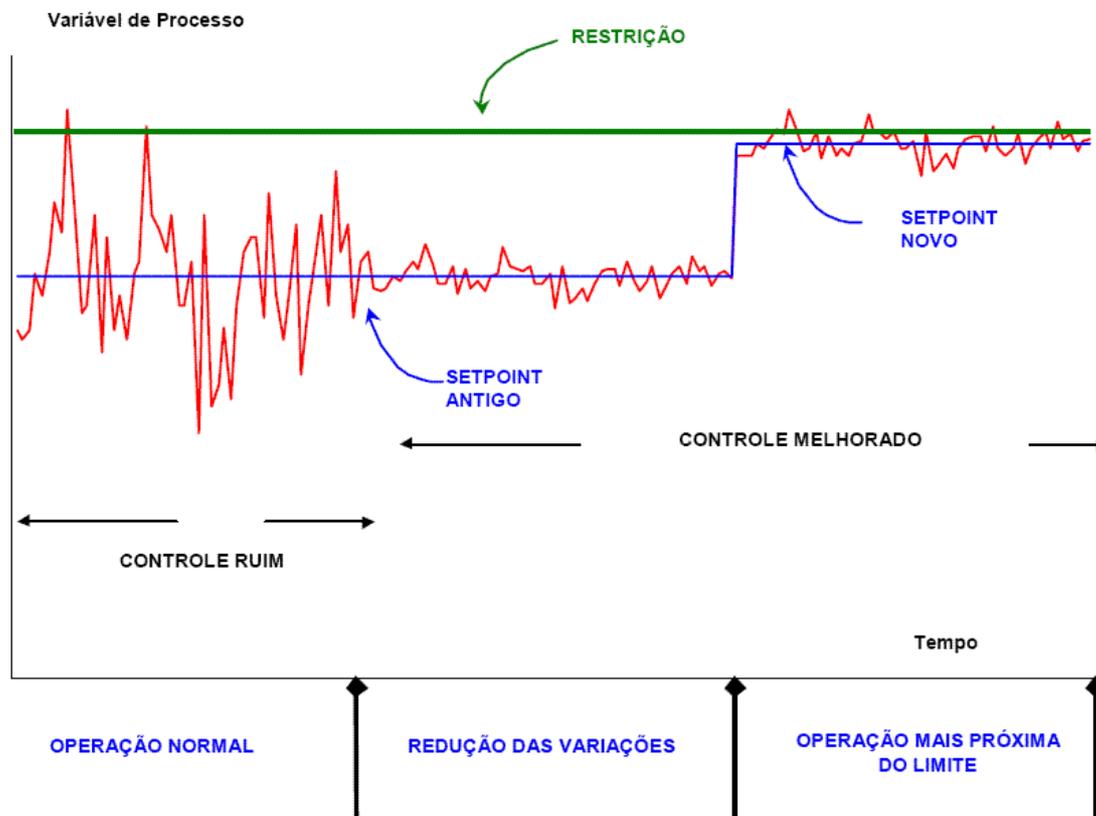


Figura 1.1 – Redução da variabilidade e operação mais próxima de restrições. Fonte: Embiruçu, 2004

É indiscutível a importância dos sistemas automáticos de controle regulatório nos custos e na qualidade de produção. Porém, em aparente contraponto, na maioria das plantas industriais os sistemas de controle não conseguem desempenhar adequadamente o seu papel ou, pelo menos, operam com desempenho distante do ideal. Um estudo realizado em fábricas de papel e celulose revelou que de todas as malhas de controle, 30% são oscilatórias devido a problemas em válvulas, 30% estão mal sintonizadas, 20% têm problemas de projeto e apenas 20% têm um comportamento aceitável (Bialkowski, 1992). E, embora muitos métodos de sintonia sejam propostos na literatura, 25% dos controladores operam com ajustes *default* de fabricantes<sup>1</sup> e outros 30% operam em modo manual (Willis, 1998). Já outro levantamento detalhado, realizado com mais de 700 malhas de controle de 12 diferentes companhias brasileiras, constatou que (Torres et al, 2006):

- 14% das malhas operam desgastando excessivamente seus atuadores
- 15% das válvulas possuem problema acentuado de agarramento e histerese
- 16% dos controladores operam em modo manual

<sup>1</sup> Parâmetros de controladores PID são geralmente pré-ajustados com ganho entre 0.5 e 1, tempo integral equivalente a 10 vezes o intervalo de amostragem e tempo derivativo nulo.

- 16% das malhas possuem sérios problemas de sintonia
- 24% das malhas encontram-se com a saída de controle saturada em boa parte do tempo
- 41% das malhas encontram-se oscilando por problemas com sintonia, interação com outra malha ou problemas em atuador.

Em resumo, constata-se que, embora o controle automático regulatório seja essencial em unidades produtivas, parte considerável das malhas de controle contribui para o aumento da variabilidade do processo (ela seria menor se o controle fosse manual), comprometem a vida útil de atuadores e mobilizam onerosos recursos para o controle do processo (válvulas, sensores), que não são utilizados adequadamente.

De fato, desde a partida da planta, usualmente a sintonia dos controladores é ajustada (quando o é) apenas para satisfazer condições mínimas para permitir o início da produção. Depois disso, o sistema regulatório opera de maneira deficiente, sofrendo intervenções corretivas apenas em condições extremas (instabilidade ou violação de restrições). Algumas possíveis razões para a manutenção desse cenário são:

- Questão cultural: falta de conscientização sobre o impacto do desempenho do sistema de controle na vida útil de equipamentos e consumo de energia e insumos. Receio de técnicos e operadores em alterar a configuração de um sistema de controle devido a sua complexidade (a alteração de um elemento altera o funcionamento de outros). E, por fim, a possibilidade de intervir manualmente no processo para corrigir desvios excessivos, caso necessário;
- Questão técnica: ausência de recursos para medir o desempenho de um sistema de controle e escassez de mão de obra especializada para diagnosticar falhas e realizar ajustes. E para dificultar, mesmo que uma malha seja ajustada, ela tende a apresentar degradação de desempenho num tempo relativamente curto (poucos meses), devido a variações nas características estáticas e dinâmicas do processo causada por desgaste de equipamentos ou mudanças nas condições operacionais.
- Questão econômica: dificuldade de se obter uma função custo capaz de prever o retorno econômico decorrente de um trabalho de otimização de uma malha de controle. Isso dificulta o estudo de viabilidade em emprego de mão-de-obra especializada com competência ampla em identificação de sistemas, controle de processos e otimização.

Portanto, existe uma importante demanda de técnicas, metodologias e procedimentos, tanto gerenciais e organizacionais quanto operacionais para viabilizar

a gestão de malhas de controle. Serviços de otimização têm sido oferecidos por empresas de engenharia e incluem tarefas desde a simples resintonia dos controladores até um trabalho completo de auditoria que inclui a revisão das estratégias de controle, avaliação de sensores e atuadores, estudo das interações existentes no processo e projeto de técnicas avançadas de controle. Além disso, desde a década de 90 tem surgido no mercado uma série de *softwares* com o propósito de auxiliar nestas tarefas. São, basicamente, ferramentas de monitoramento em tempo real em que se calcula, periodicamente, uma série de índices para qualificação de desempenho e geram-se alarmes e notificações quando este desempenho não satisfaz determinada condição. Em alguns casos, diagnósticos de falhas e ações corretivas também são disponibilizados automaticamente.

A maioria destas ferramentas para gestão de malhas de controle, no entanto, possuem três importantes limitações: (1) São ferramentas que se aplicam a qualquer tipo de processo. Por terem um formato genérico, requerem treinamento e não são facilmente usadas pelo pessoal de operação; (2) As avaliações são realizadas isoladamente, malha por malha. Assim, a ocorrência de falha num elemento que impacta no desempenho de outros, pode resultar numa sinalização generalizada de mau funcionamento no sistema de controle; (3) Malhas de controle são sensíveis a falhas em praticamente qualquer elemento que interaja com o processo. Portanto, não é possível uma avaliação precisa sem uma integração com diagnósticos gerados por outras ferramentas de gestão de ativos, tais como sistema de monitoramento de equipamentos (OEE - Overall Equipment Effectiveness), *softwares* para monitoramento de vibrações, *software* para diagnóstico de válvulas, etc.

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para monitoramento contínuo de desempenho e para a localização de falhas em malhas de controle. Seu diferencial está na maneira como as informações diagnósticas são integradas e compartilhadas. Por meio de funções denominadas validadores, cada variável ou equipamento que possa influenciar no desempenho do sistema de controle é monitorado. Estes validadores são organizados numa estrutura hierárquica, levando em conta as relações de causa e efeito existentes entre eles. Essa abordagem sistêmica é chamada de *Validação Ampla*.

### 1.1. OBJETIVOS E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

A *Validação Ampla* é uma proposta metodológica para gerenciamento de ativos desenvolvido por Braga et al, 2006, que abrange todos os níveis de informação e tipos de dispositivos, desde o chão de fábrica, até o nível corporativo. O primeiro objetivo desta dissertação é aprofundar a proposta para o nível de chão de fábrica e propor uma metodologia focando apenas na validação de malhas de controle. Esta proposta é apresentada no capítulo 2.

Como será visto adiante, a implementação de um sistema validador para malhas de controle requer um trabalho preliminar de auditoria das malhas. Baseado na experiência prática e na literatura científica, no capítulo 3, é proposta uma metodologia para auditoria de malhas de controle. O segundo objetivo desta dissertação é testar e reunir de maneira objetiva diversas técnicas presentes na literatura para análise de interação entre variáveis, avaliação de desempenho, diagnóstico de falhas e otimização de controladores PID.

Estas duas propostas são, então, exemplificadas a partir de um estudo de caso na área de caldeira em uma usina termelétrica. No capítulo 4, um estudo preliminar do processo e de suas condições operacionais é realizado, incluindo a auditoria de todas as malhas de controle do processo. No capítulo 5, um sistema validador para a caldeira é proposto com objetivo de monitorar a qualidade de seu produto, o vapor superaquecido, e a eficiência energética. Estes fatores são correlacionados com o desempenho do sistema regulatório e com a ocorrência de eventos perturbadores (mudanças de demanda, mudança de combustível, distúrbios). O uso de uma planta real como estudo de caso foi viabilizado pelo fato dessa dissertação ser uma fase de um projeto de parceria estabelecida entre a CEMIG e o GVAS (Grupo de Validação de Sistemas – UFMG), no escopo de projetos ANEEL, com objetivo de desenvolver pesquisa e obter melhorias no processo de geração de energia.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e os direcionamentos para trabalhos futuros e, no capítulo 7, as referências bibliográficas.

## CAPÍTULO 2: VALIDAÇÃO AMPLA DE MALHAS DE CONTROLE

*Validação* consiste num processo sistemático de avaliação das condições de operação de um sistema, determinando se ele opera conforme sua qualidade especificada. Isto inclui o monitoramento de algum índice-chave que represente sua qualidade, a avaliação diagnóstica de eventuais mudanças nestas características e uma ação voltada para a manutenção da qualidade especificada. Este conceito se aplica a diferentes subsistemas em todos os níveis de um processo. Pode-se validar o desempenho, por exemplo, de instrumentos de campo (sensores e atuadores), de equipamentos de processo (trocadores de calor, bombas, motores), de controladores, de redes de comunicação, de uma subunidade ou de toda uma planta industrial. Até mesmo o desempenho com que funcionários executam suas tarefas pode ser validado, desde que haja uma forma de se quantificar e monitorar consistentemente este desempenho de forma contínua.

Tecnicamente, uma unidade validada é aquela que, além de desempenhar suas funções corriqueiras, possui um mecanismo agregado, implementado em *hardware* ou *software*, que fornece evidências documentais de que a unidade atende consistentemente às especificações. Quando este mecanismo é incorporado a uma unidade, executando as funções de validação internamente, tem-se uma unidade *auto-validada*. (Clarke, 1999).

Tais funções de validação, conforme ilustrado na Figura 2.1, consistem no processo de *Avaliação*, *Otimização* e *Notificação* sobre as condições atuais de operação do sistema validado (Braga et al. 2006). Inicia-se com a Reconciliação de Dados de referência a partir de medições reais do processo. A Reconciliação de Dados pode ser uma simples comparação algébrica de medidas e sinais de referência ou resíduos de modelos estatísticos alimentados com dados reais e inferidos de projeto que são testados para verificar conformidade. Tal resíduo pode consistir, por exemplo, no cálculo da diferença entre uma determinada medida de desempenho e seu valor de referência. Se este resíduo é uma variável estocástica, parâmetros estatísticos podem ser calculados para um determinado conjunto de amostras que, em seguida, são testadas para verificar a conformidade com padrões estatísticos pré-estabelecidos.

Se o resultado do teste de conformidade apontar para um sistema com degradação ou com falha, então se prossegue com as etapas de Avaliação, Otimização e Notificação descritas a seguir.

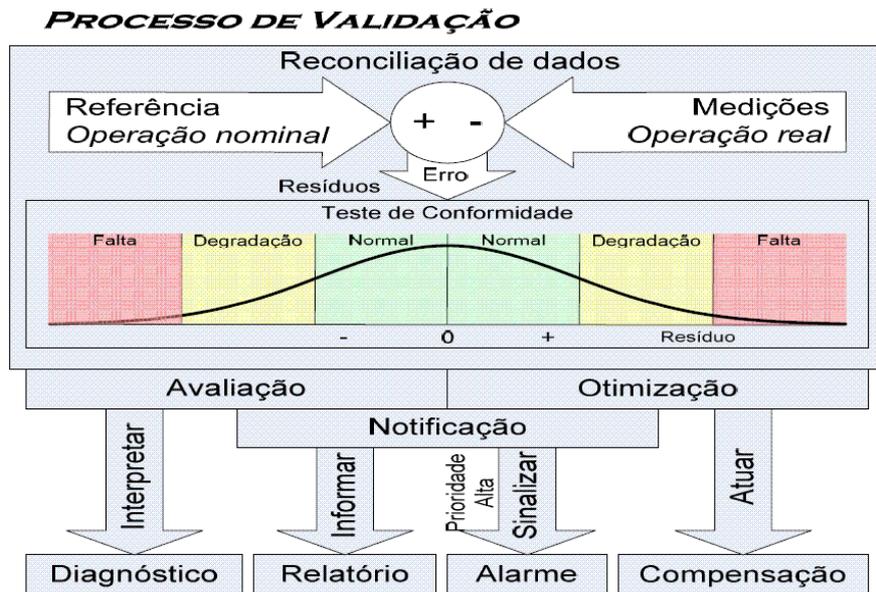


Figura 2.1 – Funções associadas ao conceito de validação de processos. Fonte: Braga et al. 2006

- **Avaliação e Diagnóstico:** consiste na detecção e classificação do tipo de falta e na localização de sua origem. Este procedimento pode ser *Passivo*, quando usa dados de operação ou *Ativo*, quando usa dados resultantes de sinais de prova aplicados intencionalmente no sistema.
- **Otimização:** consiste em determinar as melhores condições de operação considerando as restrições presentes. Neste caso, uma atuação para corrigir ou mitigar faltas identificadas pode ser executada automaticamente para melhorar ou recuperar o desempenho (compensação de falta tipo degradação).
- **Notificação:** consiste em repassar, aos níveis hierárquicos superiores, dados validados por meio de *sinalizações* (advertências ou alarmes) ou *relatórios*. Este último pode ser do tipo *corrente*, com variáveis de tendência, ou *global*, com dados de parâmetros do sistema.

As técnicas de validação aplicam-se a elementos de diferentes tipos, tais como máquinas, linhas de produção, computadores, válvulas, sensores e controladores. Os validadores podem ser implementados remotamente num sistema supervisórios ou, de maneira autônoma, empregando inteligência local, com métodos de auto-validação. O que se vê atualmente em sistemas de automação é o emprego crescente de diversas ferramentas especializadas para gestão de ativos e de instrumentos inteligentes que fornecem diagnósticos de praticamente todos os dispositivos do processo.

O mais importante, porém, é prover meios de monitoramento da planta como um todo, conjugando os diagnósticos num nível local e global, como requerido para a operação confiável de sistemas de controle altamente interconectados e complexos

(Bartys et al, 2006). Num modelo de Validação Ampla, as técnicas de avaliação de desempenho e diagnóstico de determinado tipo de elemento são encapsuladas numa *classe*, de maneira similar ao modelo de programação orientada a objetos. Assim, a cada elemento pode-se aplicar técnicas distintas de validação e, com uma *interface* padronizada, esses validadores podem interagir, trocando informações. Em Braga, 2006, encontra-se uma proposta metodológica teórica para este encapsulamento e um modelo de validação ampla que abrange todos os níveis de informação e tipos de dispositivos, desde o chão de fábrica, até o nível corporativo.

Neste trabalho é considerada uma versão simplificada deste modelo, pois o foco está apenas na validação de malhas de controle. Como o desempenho da malha depende do desempenho de seu sensor, de seu atuador, de equipamentos que interagem com o processo, assim como da ocorrência de perturbações, então a idéia é utilizar blocos validadores especializados para cada um desses elementos. Estes blocos desempenham parte das funcionalidades citadas na Figura 2.1, e são descritos a seguir:

- Validação de Sensores: Um sensor autovalidado utiliza metrologia em tempo real para fornecer uma medida da qualidade dos dados, por exemplo, uma *incerteza*, quantificando o erro associado à medida ou, simplesmente, um *status* de seu funcionamento (Clarke, 1999). Como em processos industriais é comum se ter diversos instrumentos cujas medidas são correlacionadas (por exemplo, a medição de vazão e pressão numa mesma linha), técnicas estatísticas multivariadas podem ser usadas para, em tempo real, detectar padrões faltosos.
- Validação de Atuadores: Um atuador permite que uma variável de processo seja manipulada de acordo com a demanda de um sinal de controle. O tipo de atuador mais comum é a válvula proporcional que sofre frequentemente de não-linearidades (agarramento, histerese, etc.) que degradam seu desempenho (Clarke, 1999). Uma válvula autovalidada é capaz de compensar ou, pelo menos, quantificar essas características indesejáveis, de detectar e corrigir condições faltosas, e de reportar seu comportamento para o elemento no nível imediatamente superior usando uma interface padrão. Essa funcionalidade pode ser implementada em *hardware* (chamadas válvulas inteligentes) ou em *software*, desde que se tenha pelo menos uma medida de sua posição real.
- Validação de Malhas de Controle: Um validador para uma malha de controle possui maior complexidade, pois combina diagnósticos de, pelo menos, três elementos: um sensor, um atuador e um controlador, ver Figura 2.2. Seu desempenho pode ser avaliado, por exemplo, pelo controle estatístico da média e dispersão do erro de controle. Alarmes devem ser gerados caso algum desses índices ultrapasse valores de referência para uma operação normal. Tais eventos podem ser causados por falhas internas (sintonia inadequada após mudança na

característica do processo, não-linearidade no atuador) ou causado por perturbações de carga. Uma simples mudança em degrau na *referência de controle* já pode ser motivo para a ocorrência de um alarme. No capítulo 3 são exploradas técnicas para a detecção e diagnóstico dessas falhas internas e adiante é proposto um mecanismo para diagnóstico de alarmes causados por perturbação de carga.

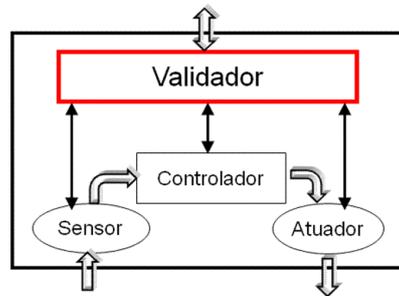


Figura 2.2 – Estrutura de um validador para malhas de controle

Diversos mecanismos de compensação também podem ser utilizados, para citar:

- Reconfiguração automática dos parâmetros do PID a partir da identificação de um evento que, sabidamente, muda alguma característica do processo;
- Se o atuador é autovalidado, o controlador pode ser reconfigurado para mitigar os efeitos de uma falta;
- Se o sensor é autovalidado, os parâmetros do controlador podem ser reconfigurados de acordo com o *status* do instrumento, como por exemplo:

Tabela 2.1 – Reconfiguração de PID para sensor autovalidado (Clarke, 1999)

Status do instrumento de medição	Modo do PID
Clear (Funcionando)	Normal
Dazzled (Embaçado)	Saída congelada
Blurred (Ofuscado)	Dessintonizado de acordo com o grau de incerteza
Blind (Sem medição)	Chaveado para modo manual

- Validação de Equipamentos: A degradação de equipamentos, tal como entupimento de filtros e incrustação em trocadores de calor, modificam a dinâmica do processo, degradando o funcionamento da malha de controle. Em alguns casos essas condições podem ser detectadas por algumas medidas realizadas no processo (e.g., pela medida de queda de pressão sobre o equipamento).

- Validação de Variáveis de Qualidade: As variáveis de qualidade podem ser monitoradas por meio de alguma ferramenta de controle estatístico. Se detectada uma mudança de comportamento, ou seja, um padrão estatístico considerado anormal, uma notificação é realizada.
- Detecção de Perturbações: Perturbações que possuem potencial para serem Causas Especiais de variação numa malha de controle devem ser sinalizadas. Tais eventos podem ser detectados por meio do controle estatístico de resíduos de variáveis que os representem, conforme será mostrado na seção 2.1.2.

## 2.1. CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS APLICADO A VALIDAÇÃO

Controle Estatístico de Processo (CEP) refere-se a um conjunto de técnicas baseadas em estatística e dados experimentais para monitorar, ao longo do tempo, a qualidade de um produto, determinando se a operação de um processo é normal ou anormal. Uma das principais ferramentas de CEP é a *Carta de Controle*. Trata-se de um gráfico temporal da tendência central ou dispersão de uma amostra e seus respectivos limites de controle.

A Figura 2.3 mostra um exemplo de uma carta de controle  $\bar{X}$ , proposta por Shewart para monitorar a tendência temporal da média das amostras. O processo é dito estar em “estado de controle estatístico” quando os parâmetros estatísticos avaliados permanecem dentro de limites de controle estabelecidos a partir de dados experimentais de referência. Nesta condição, a única fonte de variação são Causas Comuns, ou seja, variações que afetam o processo por todo o tempo e são, essencialmente, inevitáveis nas condições atuais do processo. Detalhes de como projetar cartas de controle podem ser vistos em Montgomery, 2001.

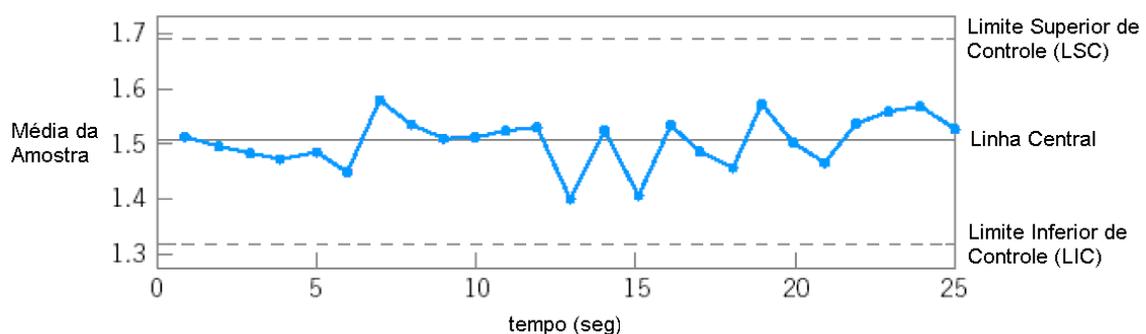


Figura 2.3 – Exemplo de carta de controle de Shewart, do tipo  $\bar{X}$

Numa malha de controle, as Causas Comuns para a variabilidade do erro são uma combinação do ruído de medição com inúmeras ações perturbadoras, em contraponto com uma ou mais ações corretivas (por exemplo, ação de um controle realimentado ou antecipatório). Essas ações corretivas não são completamente eficientes e parte das perturbações é retratada na variável controlada, em parte devido ao atraso de transporte do processo, mas também por causa de limitações de

velocidade e capacidade instalada de controle (Astrom e Hägglund, 2006). Esse erro residual é o responsável por esta variabilidade natural.

Por outro lado, quando uma carta de controle apresenta uma seqüência de pontos fora dos limites diz-se que sua variabilidade possui Causas Especiais. Estas caracterizam um processo como “fora de estado de controle estatístico”, ou seja, que possui uma causa atribuível a algum evento que não faz parte da operação normal do processo. Neste trabalho, as Causas Especiais para a variabilidade de malhas de controle são classificadas em quatro grupos: As *Intervenções Operacionais*, as *Mudanças de Carga*, os *Distúrbios Externos* e os *Distúrbios Internos*.

As *Intervenções Operacionais* são ações intencionais, determinadas pela operação da planta, tais como mudanças na *referência de controle*, abertura de válvula *ON-OFF*, desligamento de equipamento, etc., realizadas manualmente por operadores ou automaticamente pelo sistema de automação. Já as *Mudanças de Carga* são perturbações decorrentes de uma variação na demanda dos processos subseqüentes ou mudança no tipo de material ou produto a ser processado pela unidade. Assim como as *Intervenções Operacionais*, são eventos previsíveis e podem ser facilmente mapeados durante o trabalho de auditoria ou a partir de uma base histórica fornecida por um sistema PIMS (Plant Information Management System), por exemplo.

Os *Distúrbios Externos*, por sua vez, são desvios inevitáveis causados por mudança nas características de materiais ou insumos e são geralmente as principais causas de variabilidade. Distúrbios Externos também podem ser provenientes de sistemas de utilidades, tais como variação na tensão elétrica, pressão de bombeamento de reagentes ou pressão de ar de instrumentos. São, geralmente, difíceis de serem previstos e muitos distúrbios são até mesmo desconhecidos.

Ocorrem, também, casos em que o controle realimentado, ao invés de atenuar as perturbações, as amplifica, ou até mesmo cria variações na variável controlada que não existiriam na ausência de controle realimentado. É o caso de oscilações na variável de processo como resultado de atuadores defeituosos (ex. válvulas com agarramento excessivo), controladores mal sintonizados e malhas com elevado grau de interação. Essas variações na variável de processo, causadas por falhas originadas dentro do sistema de controle realimentado, são denominadas *Distúrbios Internos*. A Figura 2.4 ilustra os quatro grupos de perturbações conforme proposto neste trabalho.

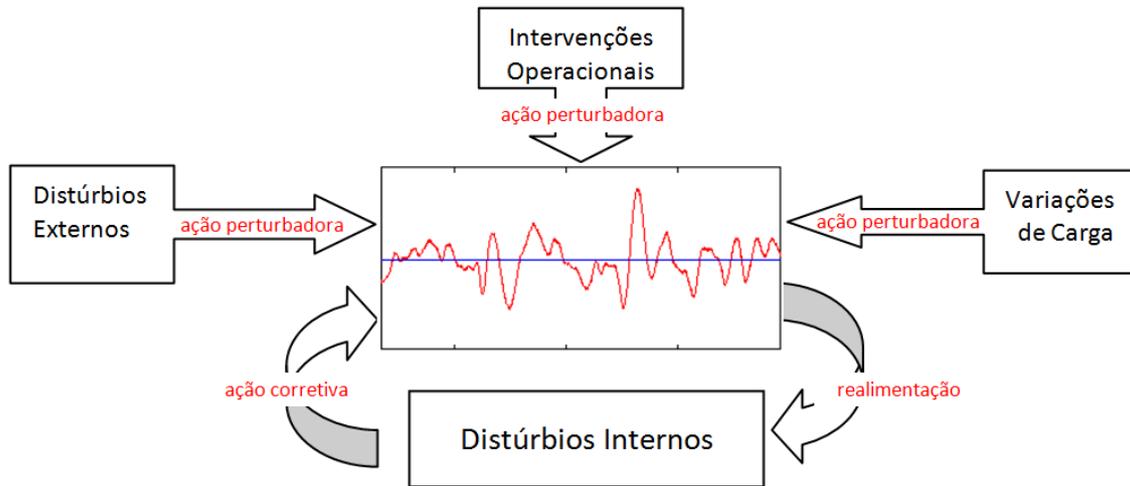


Figura 2.4 – Classificação das perturbações

É importante salientar que somente as perturbações cujas ocorrências são detectáveis ou mensuráveis podem ser tratadas como *Causas Especiais* ou *Causas Atribuíveis*. Esse é o caso da maioria das Intervenções Operacionais e Mudanças de Carga. Por outro lado, se uma causa de variabilidade é conhecida, mas não pode ser medida, então durante o projeto da carta de controle, o efeito dessa perturbação deve ser considerado como uma Causa Comum para a variabilidade.

### 2.1.1.1. CONTROLE ESTATÍSTICO DE MALHAS DE CONTROLE

A primeira função de um validador, conforme apresentado na Figura 2.1, é avaliar se determinada métrica de qualidade está em conformidade com seu padrão estabelecido. No caso de uma malha de controle, a principal métrica de qualidade é o sinal de erro de controle (SP-PV). Em condições normais de operação, a distribuição de probabilidade do erro pode ser considerada Normal, com média ( $\mu_0$ ) e desvio-padrão ( $\sigma_0$ ). Um fato importante é que a distribuição dos dados da média amostral da saída de um processo é aproximadamente normal, mesmo quando os dados originais do processo apresentam algum outro tipo de distribuição. Na estatística, isto é conhecido como Teorema do Limite Central (Mamzic, 1994).

Uma carta de controle para monitorar mudanças nesta distribuição de probabilidade (detecção de Causas Especiais) opera de acordo com a estrutura mostrada na Figura 2.5. Extrai-se uma amostra  $N$  do sinal de erro e a distribuição estatística desta amostra ( $\mu_N, \sigma_N$ ) é submetida a um teste de hipótese para averiguar se está em conformidade com o padrão estatístico de referência ( $\mu_0, \sigma_0$ ). Esta operação é realizada repetidamente e, cada vez que a hipótese for rejeitada, um alarme é gerado.

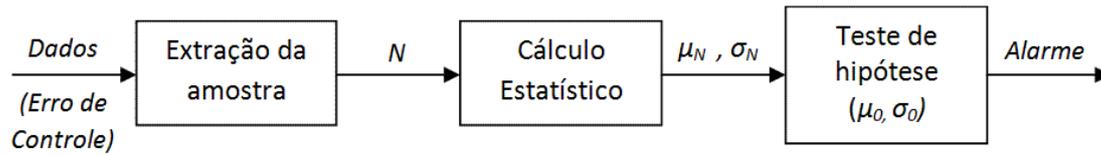


Figura 2.5 – Diagrama de blocos para controle estatístico.

O tamanho da amostra  $N$  deve ter tamanho suficiente para que as métricas estatísticas sejam descorrelacionadas no tempo, pré-requisito essencial em cartas de controle. (Montgomery, 2001). Um critério é utilizar amostras por um período de 10 a 50 vezes a constante de tempo dominante do processo.

São obtidas, portanto, duas cartas de controle, uma para monitorar a média e outra para monitorar o desvio padrão do sinal de erro. A distribuição estatística de referência é obtida a partir de uma base de dados de referência, cujas únicas fontes de variação do processo são Causas Comuns.

### 2.1.1.2. CARTA DE CONTROLE PARA DIAGNÓSTICO DE CAUSAS ESPECIAIS

Quando uma Causa Especial de variabilidade é detectada, ou seja, um alarme é gerado pela carta de controle, é desejável um diagnóstico, localizando o causador desta falha. E, conforme mencionado, esta falha pode ser devida a um *Distúrbio Interno* ou *Externo*.

Um validador específico para aqueles *Distúrbios Externos* que são mensuráveis é projetado para monitoração. O papel deste validador é detectar, nessas variáveis, componentes de freqüência numa faixa que não seja suficientemente atenuada pela malha de controle, resultando em aumento de variabilidade.

Baseando-se num algoritmo para detecção de mudanças apresentado por Gustafsson, 2000, uma técnica bastante simples é pré-processar a variável que representa o *Distúrbio Externo* utilizando um filtro passa-alta. A freqüência de corte do filtro deve coincidir com a freqüência de corte da malha de controle que sofre os efeitos da perturbação. A dispersão do resíduo deste filtro,  $\varepsilon_k$ , é monitorada por uma carta de controle do tipo CUSUM ou Shewhart. Se um alarme é gerado, simultaneamente, por esta carta e pelo validador da malha de controle, então é provável que o aumento na variabilidade seja causado por este distúrbio.

Um exemplo de implementação de um filtro passa-alta de primeira ordem é mostrado na Figura 2.6. A freqüência de corte do filtro é relacionada com o parâmetro  $\lambda$ , por meio da seguinte expressão abaixo, em que  $\tau$  é a constante de tempo do filtro analógico e  $h$  é o intervalo de amostragem.

$$\lambda = 1 - \frac{h}{\tau}$$

Em suma, a idéia de se implementar validadores para variáveis de qualidade e malhas de controle (incluindo seu sensor e atuador) é obter, para cada um deles, um *status* indicando se eles operam em condições normais. No caso de variáveis externas, o papel do validador é indicar se o comportamento dessa variável tem potencial para perturbar alguma malha de controle ou variável de qualidade.

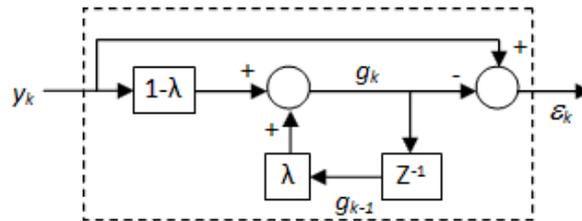


Figura 2.6 - Versão de filtro passa-alta de primeira ordem.

## 2.2. DIAGRAMAS RELACIONAIS QUALITATIVOS

Numa planta industrial, o número de validadores tende a ser grande (dezenas em plantas de pequeno e médio porte e centenas ou milhares em plantas de grande porte). É importante obter uma forma organizada de se visualizar as notificações. Para tanto, foram consideradas técnicas conhecidas por sua simplicidade e eficácia na representação de possíveis falhas (Ordys et al, 2007).

Propõe-se o uso de um diagrama de *Árvore de Falhas*, que permite visualizar o *status* dos validadores, assim como suas relações de causa e efeito, conforme exemplificado na Figura 2.7. Os validadores das variáveis de qualidade são colocados na primeira linha, enquanto na base são posicionados os validadores de todas as possíveis causas de perturbação (distúrbios mensuráveis). Em uma camada intermediária encontram-se os validadores das malhas de controle, cujo papel é evitar que o impacto das perturbações chegue às variáveis de qualidade. No entanto, conforme comentado, as malhas de controle também podem ser as causadoras de perturbações em caso de falha (distúrbios internos). As setas indicam relações de causalidades entre os validadores.

Quando uma condição anormal detectada por um validador tem potencial para ser uma Causa Especial para a variabilidade de outro, é colocada uma seta entre eles com uma indicação "P". A Variável Externa B, por exemplo, pode ser responsável por distúrbios nas malhas de controle A e C. Conforme discutido na seção 2.1.2 acima, o validador dessa variável deve considerar duas cartas de controle, uma para cada malha de controle e sua respectiva frequência de corte.

Já entre os Validadores de Malhas de Controle existem duas outras interações previsíveis. Num esquema mestre-escravo, a malha de controle mestre pode ser a causa de condições anormais na malha escrava ao gerar uma referência de controle que esta última é incapaz de seguir. Esta interação é indicada com uma seta com o

símbolo “M”. E, de maneira recíproca, uma malha escrava pode ser causa de variabilidade em sua malha mestre ao ser incapaz de executar sua função. Esta interação é indicada com uma seta com o símbolo “E”. Para a localização de condições anormais detectadas, propõe-se o uso de “marcadores”, neste caso um sinal de exclamação.

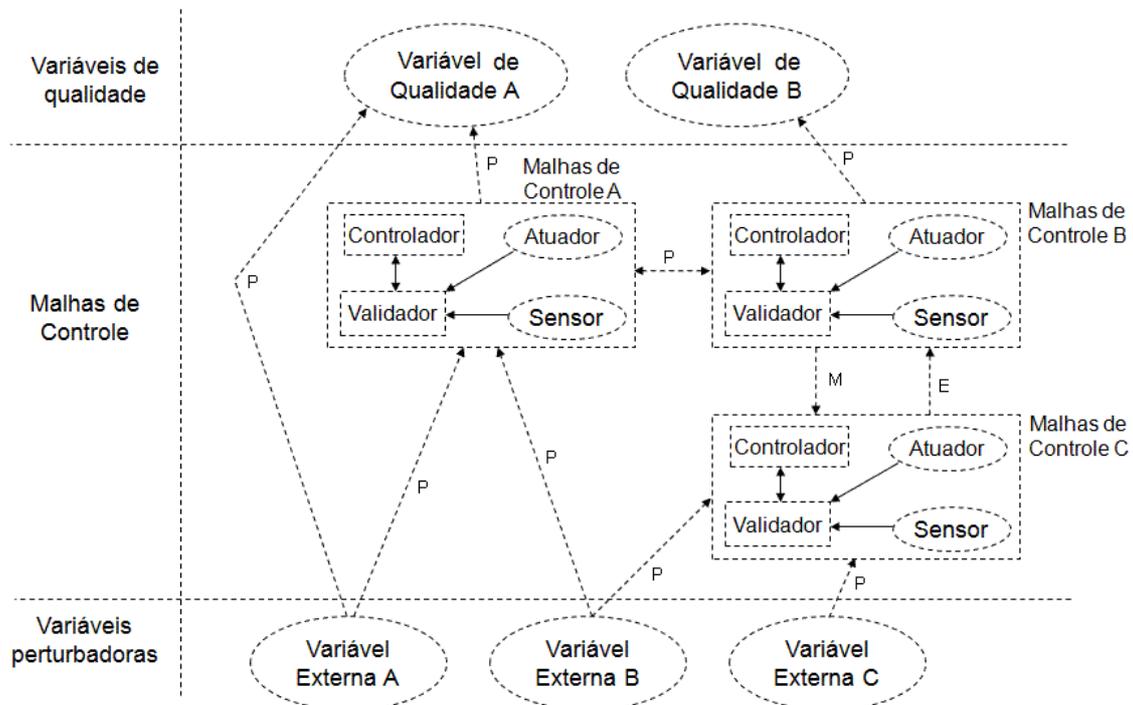


Figura 2.7 – Diagrama relacional do tipo Árvore de Falha para visualização dos diagnósticos do sistema de validação

Na Figura 2.8 é ilustrada uma situação (à esquerda) em que uma condição anormal, indicada por uma exclamação, é detectada no validador da Malha de Controle A. Este alarme é possivelmente causado pela Variável Externa B, também sinalizada como estando em condição anormal. A malha de controle C, por outro lado, não sofre efeito dessa perturbação, pois possui velocidade suficiente para rejeitá-la. Na mesma figura, lado direito, é ilustrada uma situação em que um problema detectado no atuador da Malha de Controle C é responsável por um comportamento anormal na Malha de Controle B e que, por sua vez, é uma Causa Especial para a variabilidade da Variável de Qualidade B.

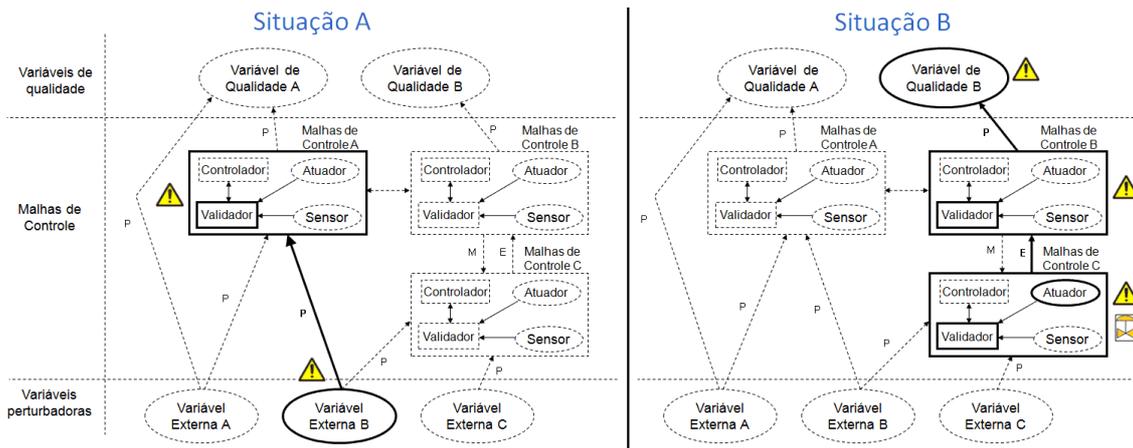


Figura 2.8 – Exemplos de situações anormais

Para complementar a análise e causa/efeito no processo de validação proposto, um diagrama temporal tipo “espinha de peixe” (Ordys et al, 2007) pode ser usado para analisar o desempenho do sistema ao longo do tempo e registrar a frequência com que determinada falha tem ocorrido. Um exemplo é ilustrado na Figura 2.9.

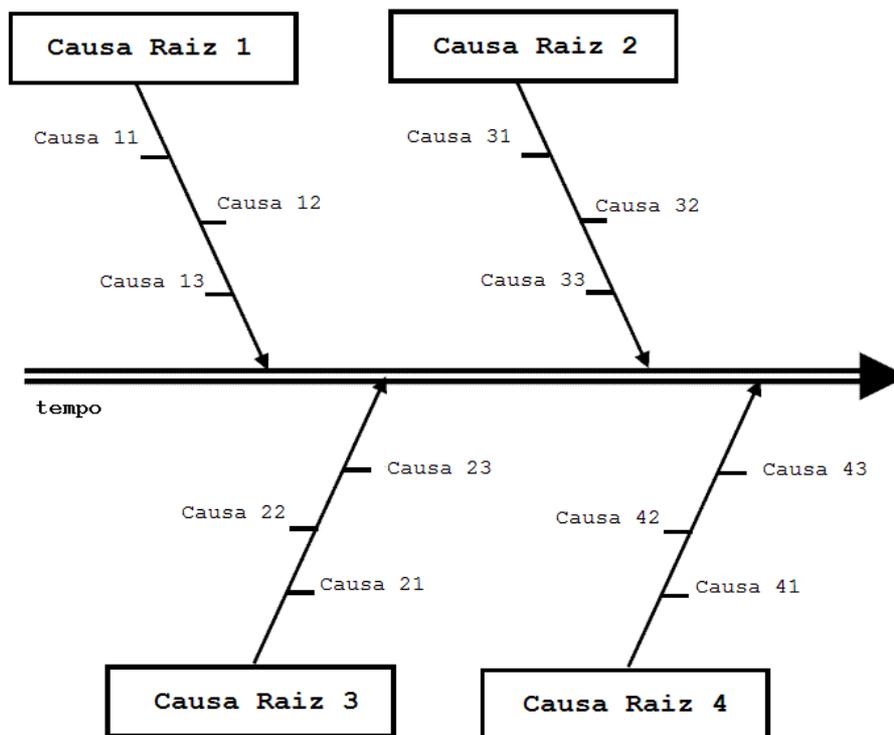


Figura 2.9 – Diagrama temporal de causa e efeito. Baseado em (Ordys, et al, 2007).

Com estas ferramentas, é possível reportar, antecipadamente, faltas incipientes ou degradações, sinalizando necessidade de manutenção pró-ativa ao invés de preventiva e reparadora como ocorre em sistemas convencionais.

**2.3. ETAPAS DO PROCESSO DE VALIDAÇÃO**

Baseando-se em Jatto e Okhamafe (2002) e no guia para validação proposta pelo GHFTF, grupo de estudos sobre gerenciamento de qualidade, e adaptando-o

devidamente para o contexto de validação de malhas de controle, o processo de validação proposto abrange as seguintes fases:

1. **Qualificação da Instalação:** É uma etapa de auditoria em que as malhas de controle que serão validadas são estudadas com profundidade e testes são aplicados para averiguar e otimizar o funcionamento de todos os elementos que influenciam o seu desempenho.
2. **Caracterização da Operação:** Consiste num levantamento sobre os diferentes “cenários operacionais” que podem ocorrer devido a mudanças na operação da planta e que irão influenciar, decisivamente, no comportamento do sistema regulatório. Entre eles, pode-se citar:
  - Mudança no ritmo de produção, tipo de produto ou características da matéria-prima;
  - Parada de algum equipamento ou área sem interrupção de produção;
  - Intervenções manuais, tais como abertura de válvulas, desligamento de equipamento;
  - Condições climáticas ou sazonais, tais como temperatura e umidade do ambiente externo.

A mudança de um destes elementos pode determinar um novo padrão estatístico para as variáveis de qualidade e deve ser devidamente considerada pelo sistema validador. Para isso, cada um desses “cenários” deve ser identificado e registrado. Numa planta automatizada, muitas vezes é possível buscar informações suficientes no sistema de controle para se determinar as condições de operação do processo, sobretudo aquelas relacionadas com o estado dos equipamentos e as características da produção.

3. **Caracterização de desempenho:** Consiste em verificar, para cada malha de controle, em cada cenário operacional, se ela é capaz de operar de maneira aceitável e, principalmente, se é possível determinar os limites nos quais uma eventual queda de desempenho causa impacto em alguma variável de qualidade do processo.
4. **Controle estatístico do processo:** Monitoramento contínuo de desempenho com teste de hipótese para verificar se os elementos validados se mantêm em “estado de controle estatístico”. Esta função é executada pelos blocos validadores.

5. Revalidação: Uma eventual manutenção de alguns parâmetros do validador é necessária para o seu funcionamento adequado. Essa espécie de “validação do validador” é realizada monitorando-se a taxa de alarmes gerados pelas cartas de controle. Tanto um número excessivo de alarmes, quanto sua total ausência, durante um longo período, é um indício de que a atual “condição operacional” é muito distinta daquela utilizada como base para o projeto dos validadores. Neste caso, este novo cenário operacional deve ser considerado e os validadores reprojatados.

#### 2.4. COMENTÁRIOS FINAIS

Validar um equipamento, instrumento ou processo é uma atividade que requer primeiro a obtenção de um sistema que atenda a demandas ou especificações de projeto consistentemente. Isso não significa, necessariamente, que uma unidade validada também está otimizada, ou seja, no melhor desempenho possível. Entretanto, no caso de malhas de controle, é importante que a estratégia de controle seja adequada, que os instrumentos estejam operando normalmente e que os controladores estejam, no mínimo, razoavelmente bem sintonizados.

Além disso, em contraste com as Ferramentas de Gerenciamento de Ativos, o projeto de um sistema de validação ampla requer o máximo de informação sobre o processo e sobre como ele é operado. Para a parametrização dos validadores e da árvore de falhas, é imprescindível o mapeamento das variáveis-chave de qualidade, a identificação das principais fontes de variabilidade, das interações entre as variáveis e conhecimento sobre as limitações de velocidade e sobre o dimensionamento do sistema de controle. Estas informações, felizmente, podem ser obtidas com o uso de uma metodologia adequada de auditoria de malhas, conforme é apresentado no capítulo seguinte.

### CAPÍTULO 3: METODOLOGIA PARA AUDITORIA DE MALHAS DE CONTROLE

Apresenta-se uma metodologia para auditoria de um sistema de controle regulatório, correspondendo às fases de Qualificação da Instalação e Qualificação da Operação do procedimento de Validação. As técnicas descritas neste capítulo são adequadas a qualquer tipo de processo industrial contínuo, porém necessita de adaptações no caso de processos em “batelada”.

Segundo a *American Society of Quality*, um trabalho de auditoria é um exame cuidadoso e sistemático do funcionamento de um sistema, cujo objetivo é averiguar se ele opera de acordo com as disposições planejadas e se ele foi implementado em conformidade com os objetivos propostos. Também tem como objetivo quantificar o limite superior de desempenho dos itens que serão validados. No contexto de um sistema de controle regulatório, isso envolve um estudo aprofundado sobre o funcionamento do processo e seus requisitos de qualidade, a verificação do funcionamento de dispositivos (atuadores, sensores e controladores), um estudo sobre as interações existentes entre as malhas de controle e um levantamento sobre todas as ações que podem interferir no funcionamento das malhas de controle. É um procedimento em que se avalia as possibilidades mutuamente exclusivas e coletivamente exaustivas.

Propõe-se aqui a divisão deste trabalho em quatro etapas. Como mostrado na Figura 3.1, a primeira consiste num estudo detalhado sobre as características da unidade produtiva (fase I, levantamento de campo). Na segunda fase é feita uma medição da condição inicial de desempenho (fase IIA) e é realizada a detecção de falhas internas, análise dos acoplamentos entre malhas e análise do impacto de perturbações (fase IIb). Na fase III, os resultados obtidos nas fases anteriores são avaliados em conjunto com testes na planta e ações corretivas são executadas envolvendo ajustes e manutenção de equipamentos, sem requerer a parada do processo. O foco, portanto, não é uma técnica para a concepção global de um sistema otimizado (*plant-wide design*), e sim uma técnica para conduzir um sistema existente à sua melhor condição operacional possível. Em alguns casos, essa “melhor condição” final, medida na fase IV (avaliação final de desempenho) pode não ser suficiente para atender aos requisitos de qualidade da unidade e, neste caso, o processo precisará sofrer alterações e uma nova abordagem de controle precisará ser concebida.

A Figura 3.1 resume as etapas propostas para a auditoria de malhas de controle. Cada uma delas é discutida em detalhes nas seções seguintes, revisando as técnicas encontradas na literatura que se mostram adequadas para uso em cada uma das fases propostas para execução de um plano de auditoria das malhas.

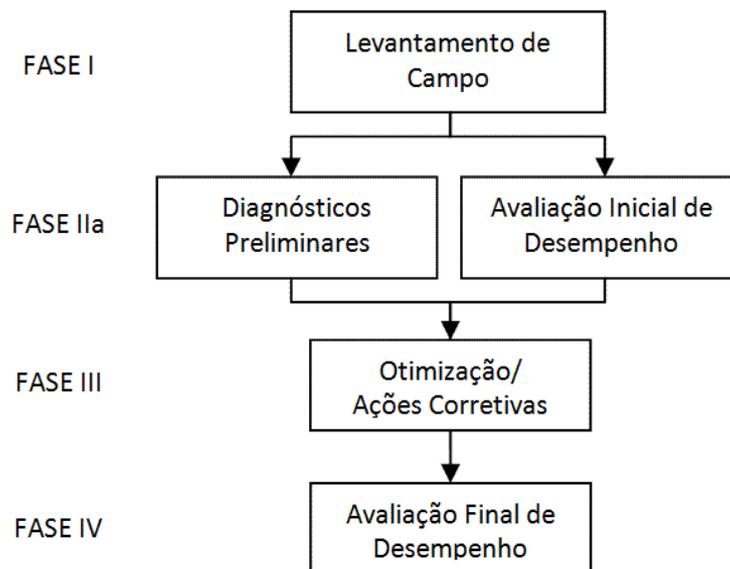


Figura 3.1 – Fases propostas para a Auditoria de Malhas de Controle

### 3.1 LEVANTAMENTO DE CAMPO (FASE I)

Nesta fase, a unidade, incluindo o processo em si, o sistema de controle e a equipe de operação e manutenção, é apresentada para análise. Inicia-se com o levantamento de informações utilizando todos os meios acessíveis e encerra-se com a geração de alguns documentos de referência para os trabalhos de otimização.

Alguns meios possíveis para obtenção de informação são:

- Estudo da documentação de engenharia. P&ID (Diagrama de Tubulações e Instrumentação, também chamado de fluxograma de engenharia), manuais de operação, manuais de equipamentos, especificação funcional e diagramas de malhas são alguns dos documentos que trazem informações sobre o processo, como ele deve ser operado e sobre o papel de cada subunidade e equipamentos. Além disso, os diagramas de processo trazem uma noção do sentido de circulação dos fluxos de energia e material.
- Visita à área e fotos: A inspeção visual do processo é importante para se ter uma noção das dimensões dos equipamentos, do volume de tubulações e dos locais onde estão instalados os sensores e atuadores. O registro fotográfico ou em vídeo evita a necessidade de novas visitas.
- Ambientação. Consiste numa operação assistida ao lado dos operadores da unidade. Esta “imersão” deve dispor de tempo suficiente para a compreensão de como é a rotina de operação da planta. Geralmente, conversas informais com operadores são fontes essenciais de informações sobre as principais deficiências e oportunidades de melhoria no sistema de controle.

- Estudo do sistema de controle e automação. Um levantamento prévio sobre a arquitetura de automação e seus sistemas de aquisição, processamento e registro de informações e o estudo da programação do CLP (ou SDCD) esclarece quais são os recursos disponibilizados pela plataforma de automação e busca identificar suas limitações. Como o trabalho de auditoria inclui tarefas de modelagem matemática do processo, é importante definir a forma como os dados serão coletados e arquivados, levando em conta questões tais como amostragem e atrasos de comunicação. O estudo da programação do CLP/SDCD auxilia no entendimento de como foi projetado o sistema de controle e atesta se a documentação de engenharia está atualizada.
- Revisão bibliográfica: Pesquisar na literatura técnica e científica as melhores práticas e recomendações para o controle do processo em estudo. Verificar conformidade com normas técnicas e recomendações de segurança e operação.

Sugere-se, a partir das informações levantadas, a confecção dos seguintes documentos:

- Memorial descritivo do processo: Explicação sobre o princípio de funcionamento do processo, suas etapas, a função de cada equipamento e como ocorrem as trocas de energia e material entre eles. Alguns dados técnicos tais como dimensão de tubulações, distância entre equipamento, posição de sensores devem ser incluídos.
- Lista de malhas de controle e de variáveis de processo: Relação geral das malhas com informações sobre seus atuadores e sensores, assim como a lista de variáveis que podem ser úteis para medição de distúrbios e como indicadores econômicos.
- Descritivo de malhas: Ficha individual com dados técnicos sobre cada malha de controle, incluindo: objetivos de controle, modos de operação, esquema de controle, dados do controlador, sensor e atuador, possíveis perturbações de carga e interações, níveis de alarme e pontos de operação típicos para a variável controlada e manipulada. Inclui também espaço para registro de todos os testes e modificações realizadas durante trabalho de auditoria. Ver modelo no anexo A.
- Identificação das principais condições operacionais: O desempenho de um sistema regulatório é muito influenciado pelas condições do processo, tais como: ritmo de produção, tipo de produto, condição de operação de equipamentos e linhas de produção. Em cada condição operacional, as

malhas irão operar num ponto de operação diferente e, se o processo for não-linear (o que é comum), o comportamento da malha irá naturalmente depender do ponto de operação. Além disso, diferentes condições operacionais podem determinar diferentes tipos e intensidades das perturbações de carga. O mapeamento dessas condições operacionais é essencial durante o ajuste dos controladores e avaliação de desempenho das malhas de controle.

- Levantamento de indicadores econômicos: É importante monitorar, desde o início do trabalho, métricas que possibilitem quantificar o retorno econômico obtido pelo trabalho de otimização do sistema regulatório. Alguns candidatos comuns são: eficiência energética, taxa de rejeito e reprocessamento, volume de produção e consumo de reagentes. Outros ganhos, infelizmente, são difíceis de ser mensurados, tais como: aumento da disponibilidade da planta (*uptime*) e diminuição de custos de manutenção com um menor desgaste de atuadores e aumento do automatismo da planta.
- Políticas e procedimentos de manutenção: Levantamento de necessidades de manutenção, insumos e estimativas de confiabilidade de sistemas e equipamentos. A robustez e a confiabilidade da planta podem ser afetadas pelo trabalho de auditoria, resultando em demandas por manutenção com uma frequência diferente.

### 3.2 AVALIAÇÃO INICIAL DE DESEMPENHO (FASE IIA)

Antes de iniciar as ações para otimização do sistema de controle, é importante obter um “retrato” de seu desempenho inicial, para possibilitar quantificar os ganhos. Não existe, no entanto, uma regra geral para esta avaliação. Braga e Jota, 1994, apresentam um método que avalia o desempenho de controladores a partir do ponto de vista de diferentes tipos de usuários. Na visão dos gerentes da planta, os critérios recaem principalmente em desgaste dos atuadores, falhas no sistema e custos operacionais. Já os operadores do sistema estão preocupados, principalmente, com os erros de resposta do sistema. Eles querem que a variável controlada atinja a referência de controle rapidamente e permaneça com o mínimo de erro. O engenheiro de controle, por sua vez, está interessado na relação de compromisso entre um bom desempenho regulatório e o mínimo de variações no sinal de controle. Acrescenta-se aqui o ponto de vista do engenheiro de qualidade. Este espera que o sistema de controle regulatório ao longo do processo garanta que a qualidade do produto final esteja dentro de certos limites de tolerância.

Portanto, o desempenho de uma malha de controle pode ser avaliado sob diferentes pontos de vista. Desempenho servo-mecanismo (referência variável),

desempenho regulatório (referência constante), esforço de controle, robustez e variabilidade da variável controlada. Vários desses aspectos, no entanto, são conflitantes. Numa malha com um controlador de apenas um grau de liberdade, por exemplo, é preciso optar entre aperfeiçoar o desempenho servo-mecanismo ou o desempenho regulatório. A principal relação de compromisso, porém, está entre a minimização do erro de controle (o “benefício”) e a minimização do esforço de controle (o “custo”). Este último aspecto também está relacionado com o grau de robustez da malha.

Os indicadores de desempenho podem ser divididos em duas categorias: métodos estocásticos e métodos determinísticos. Os índices estocásticos mais largamente estudados são aqueles baseados na variância mínima de controle como um *benchmark*, conforme discutido inicialmente por Harris, 1989. Seu princípio é comparar a variância da variável controlada com aquela que seria obtida utilizando um controlador de variância mínima. Teoricamente, um controlador de variância mínima é aquele capaz de remover todos os efeitos de um distúrbio após o tempo morto do processo deixando apenas ruído branco. Com isso é obtido um limite inferior de variabilidade, ou máximo desempenho. Nos anos seguintes, diversas modificações foram propostas para que esta comparação fosse mais realista, levando-se em conta, por exemplo, limitações na variação da ação de controle e limitações estruturais do controlador utilizado (Ko e Edgar, 1998; Horch e Isaksson, 1999; Kozub e Garcia, 1993).

Os indicadores determinísticos, por sua vez, são mais informativos como forma de se prever o comportamento no caso de distúrbios de carga ou mudanças na referência de controle (Jounela et al, 2002). Para controladores PI, índices adimensionais para medição de tempo de acomodação e integral do erro absoluto, conforme proposto por Swanda e Seborg, 1999, são especialmente úteis para comparar o desempenho atual com o melhor alcançável por este tipo de controlador.

Atualmente, está disponível no mercado uma grande variedade de ferramentas comerciais para avaliação de desempenho de malhas. Entre as mais comuns, pode-se citar: TriCLPM® e BRPerfx® da Trisolution, Expertune PlantTriage®, Matrikon Process Doctor®, ABB Loop Optimizer Suite®, Honeywell Loop Scout®. Todas elas utilizam diversos índices determinísticos e, menos freqüentemente, índices estocásticos (Torres et al, 2004; Belli et al, 2006). O Loop Scout® se diferencia por ser uma ferramenta *offline*<sup>1</sup> que utiliza um extenso banco de dados de plantas similares para comparação de desempenho. Já as outras são ferramentas para monitoramento *online*<sup>2</sup> em que, geralmente, os indicadores de desempenho são comparados com valores de referência obtidos de uma base de dados histórica da própria planta. A seguir, apresentam-se

---

<sup>1</sup> Cálculos são realizados em batelada, a partir de um conjunto de dados coletados do processo.

<sup>2</sup> Cálculos são realizados com dados coletados em tempo real.

alguns dos índices mais freqüentemente encontrados nessas ferramentas, classificados por tipo de aplicação:

1) Índices para medição de desempenho regulatório e servo-mecanismo:

- **Variabilidade relativa da PV<sup>3</sup>:** Mede a dispersão total da variável de processo ( $6\sigma$ ) em relação aos limites toleráveis especificadas para o processo ( $PV_{max}$  e  $PV_{min}$ ). Um valor de 100% indica que a variável controlada ocupa, praticamente, toda a faixa de tolerância entre os limites aceitáveis. As equações para normalização e cálculo da variabilidade são mostradas a seguir.

$$\%PV = \frac{\overline{PV} - PV_{min}}{PV_{max} - PV_{min}} \quad (1)$$

$$\%variabilidade = 6\sigma_{\%PV} \quad (2)$$

- **Desvio padrão do erro de controle:** Mede a dispersão do erro normalizado entre 0 e 100%. Este índice é ideal para verificar o desempenho do controlador em rejeitar perturbações ao longo do tempo. Como utiliza o erro, ao invés da variável de processo, sofre pouca influência de mudanças na referência de controle.
- **Média do erro de controle:** Normalizado entre -100 e 100%. Valores diferentes de zero indicam a presença de deslocamento entre a variável controlada e sua referência, normalmente indicativo de falta de capacidade de controle.
- **Tempo de acomodação e IAE normalizados:** Proposto por Swanda e Seborg em 1999, estes indicadores medem o tempo de acomodação ( $Ta_d$ ) e a integral do erro absoluto ( $IAE_d$ ) de forma adimensional (equações 3 e 4), onde  $\theta_a$  é o tempo morto aparente do processo. Estes valores são comparados com valores de referência (equações 5 e 6) parametrizados por um fator de “agressividade” (tipicamente igual a 2), que corresponde à relação entre a constante de tempo de malha fechada e o tempo morto. Dessa forma, é possível comparar malhas de controle, determinando quais são as mais conservadoras e quais são as mais agressivas.

$$Ta_d = \frac{\tau_a}{\theta_a}, \text{ onde } \tau_a \text{ é o tempo de acomodação em segundos} \quad (3)$$

$$IAE_d = \frac{IAE}{|r_0|\theta_a}, \text{ onde } |r_0| \text{ é o tamanho do degrau no SP} \quad (4)$$

$$Ta_{ref} = 2.3 \frac{\tau_c}{\theta_a} + 1 \quad (5)$$

$$IAE_{ref} = 1 + \frac{\tau_c}{\theta_a} \quad (6)$$

---

<sup>3</sup> Variável de Processo

2) Índices para medição de esforço de controle e desgaste de atuador

- **%Excursão da CO<sup>4</sup>**: Somatório de todos os incrementos da variável controlada durante certo período de avaliação, desconsiderando aqueles incrementos relacionados com ruído no sinal.
- **Desvio padrão da CO**

3) Índices para avaliar o dimensionamento do sistema e características do processo

- **Banda de ruído**: Pode ser estimada pela variabilidade ( $6\sigma$ ) da variável de processo durante um período em que a malha opera em regime estacionário e livre de perturbações de carga.
- **Tempo de Saturação**: Percentual do tempo em que o valor da saída de controle permanece em um dos limites de máximo ou mínimo.
- **Dimensionamento**: Pode ser estimado pela razão entre a dispersão da PV e a dispersão da CO. Também serve de estimativa para o ganho do processo, sendo seu valor ideal próximo de 1. Valores muito menores indicam um processo cuja faixa de medição é superdimensionada ou cujo atuador é subdimensionado (o que é mais comum). E isso implica numa faixa de controlabilidade limitada. Já valores muito maiores que a unidade indicam um processo superdimensionado e isso resulta em limitação na resolução de controle e realça não-linearidades de atuadores, tais como agarramentos e histerese.

4) Outros índices úteis:

- **Tempo em modo automático**: Tempo em que o controlador opera em modo automático normalizado para um dia de operação.
- **Mudanças de SP por dia**: Número de mudanças na referência de controle normalizado para um dia de operação.

Outra funcionalidade presente em algumas ferramentas de gerenciamento de malhas de controle é a obtenção automática de um modelo matemático com a dinâmica simplificada do processo. Em muitos casos, a identificação de um modelo de primeira ordem com tempo morto a partir de uma mudança na referência de controle é suficiente para estimar o grau de robustez e diagnosticar uma sintonia inadequada

---

<sup>4</sup> Saída de Controle

do controlador. A constante de tempo dominante do processo pode, por exemplo, ser identificada utilizando uma técnica baseado no método dos momentos proposto por Ingimundarson e Hägglund, enquanto diversas técnicas para identificação automática do tempo morto são apresentadas por Bjorklund e Ljung (2003).

### 3.3 DIAGNÓSTICOS PRELIMINARES (FASE IIB)

Um conhecimento preliminar sobre as perturbações presentes numa planta é bastante útil. Ele auxilia no planejamento do trabalho de otimização e é um dos aspectos a ser considerado no projeto das estratégias de controle. Conforme exposto no capítulo 2, na etapa de validação, além da identificação da origem das perturbações, a construção da árvore de falhas também requer conhecimento de como essas perturbações se propagam pelo processo.

Nas subseções seguintes são apresentadas algumas ferramentas capazes de extrair de uma base de dados histórica de um processo, diversas informações sobre a origem e os efeitos das perturbações. Essas técnicas são conhecidas como Técnicas de Análise de Distúrbios em Plantas ou "*Plantwide Disturbance Analysis*" (Horch et al, 2007).

O fluxograma mostrado na Figura 3.2 mostra um resumo da metodologia proposta neste trabalho. Ela pressupõe a disponibilidade de uma base de dados contendo um histórico de operação de todas as variáveis de processo, variáveis controladas, referências de controle, entre outras. Para que os diagnósticos sejam precisos, os dados não podem estar comprimidos por algoritmos de compactação não-lineares com perda de informação e precisam ter sido coletados com uma taxa de amostragem adequada para capturar a dinâmica real do processo, sem falseamento na aquisição de dados.

Na etapa 1 são identificados os Acoplamentos Não-Oscilatórios com o propósito de verificar como as perturbações externas e intervenções operacionais são refletidas nas variáveis controladas e manipuladas. Ferramentas para auxiliar nesta tarefa são apresentadas na subseção 3.3.1.

A etapa 2 serve de preparação para o estudo de Acoplamentos Oscilatórios. São removidas características não-estacionárias, tendências lineares e médias. Em seguida os dados relativos as variáveis controladas e manipuladas são transformados para o domínio da frequência, o espectro é normalizado e as faixas de frequências em que irão se concentrar os estudos são delimitadas por meio de filtragem. É mostrado que a fragmentação do espectro (estudo por faixas) é importante, pois pode haver múltiplas causas para a oscilação, cada uma numa faixa de frequência distinta.

Na etapa 3 (*Detecção de Oscilação*), são identificadas, para cada faixa de frequência de estudo, as malhas que possuem comportamento oscilatório. Na

subseção 3.3.2, alguns algoritmos citados na literatura capazes de detectar automaticamente a presença de um comportamento oscilatório são apresentados e testados.

Identificadas as malhas oscilatórias, o próximo passo é descobrir a causa da oscilação. Em plantas industriais, as oscilações tendem a se espalhar pelo processo, por isso a causa da oscilação de uma malha pode ter origem numa malha vizinha. O simples conhecimento do *layout* da planta pode não ser suficiente, pois a oscilação pode propagar-se por caminhos complexos, principalmente em plantas com grande número de recirculação de material e regeneradores energéticos (Harris e Seppala, 2001).

Um ponto que pode ser explorado é o fato das oscilações se propagarem conservando aproximadamente o mesmo período original. Na etapa 4, são identificadas os grupos de malhas oscilatórias que possuem ciclos em comum (acoplamentos oscilatórios) e, na etapa 5, testes são realizados para determinar em qual das malhas a oscilação se origina. Dois métodos para detecção de acoplamentos são apresentados na subseção 3.3.3 e a questão de como diagnosticar a causa raiz da oscilação é discutida na subseção 3.3.4.

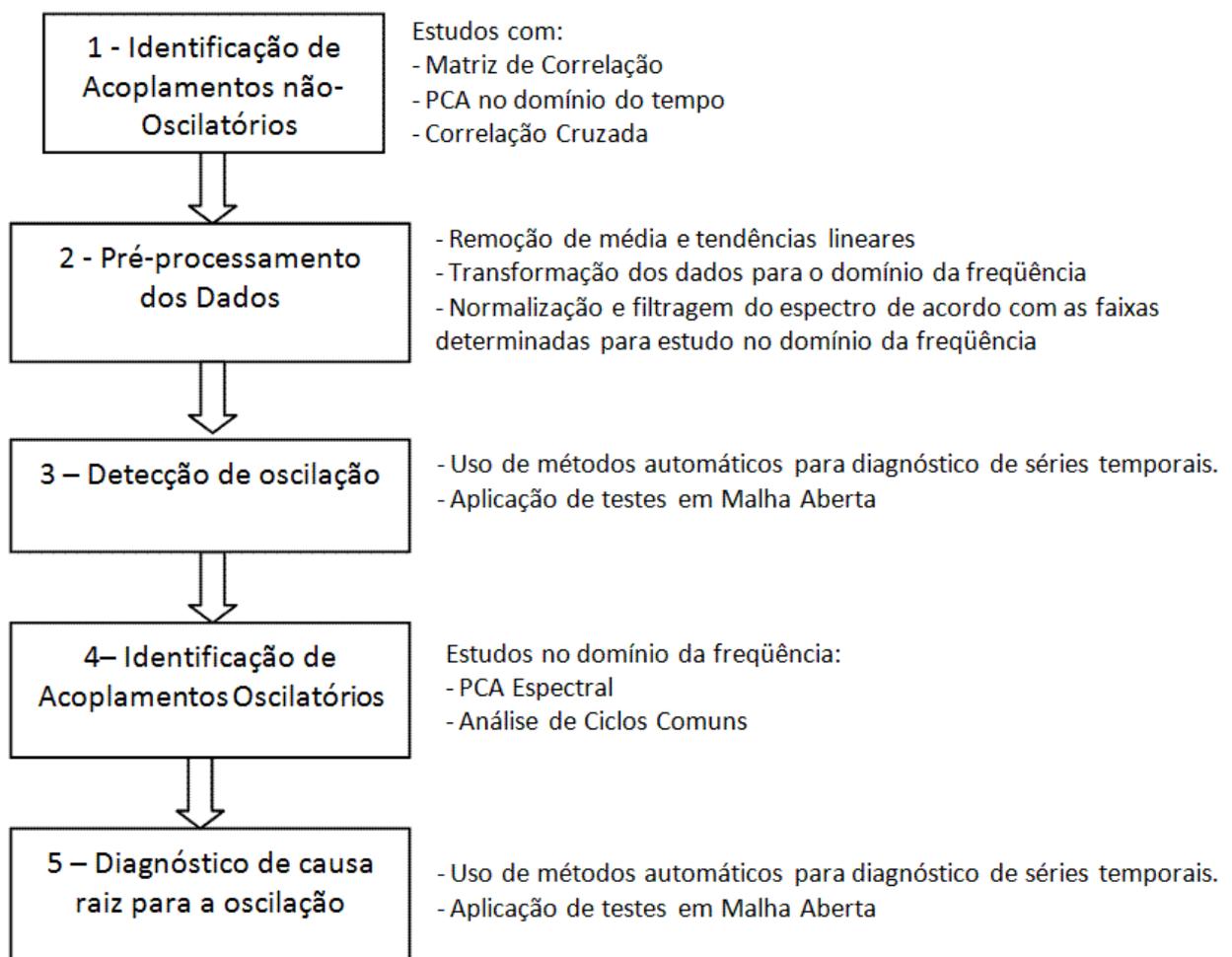


Figura 3.2 – Metodologia proposta para detecção e diagnóstico de acoplamentos

### 3.3.1. IDENTIFICAÇÃO DE ACOPLAMENTOS NÃO-OSCILATÓRIOS

Os Acoplamentos Não-Oscilatórios são, geralmente, produzidos por Distúrbios Externos, Mudanças de Carga ou Intervenções Operacionais e se caracterizam pela presença de alterações irregulares na tendência normal das variáveis, tais como picos, vales e mudanças de patamar. Essas perturbações tendem a se espalhar pelo processo e o papel do sistema de controle é transferi-las para variáveis de menor importância, as variáveis manipuladas, mantendo as variáveis controladas o mais imune possível a essas perturbações.

Uma forma de avaliar a eficácia do sistema de controle é, portanto, medindo o grau de dependência linear entre as variáveis controladas, variáveis manipuladas e variáveis que representem essas perturbações. E uma maneira direta de se fazer isso é pelo cálculo das correlações temporais entre as variáveis. Três métodos são discutidos a seguir.

#### Método 1: Análise por Matriz de Correlação

Considere as oito séries temporais extraídas da base de dados de um processo industrial e mostradas na Figura 3.3. Sabe-se que as variáveis 2, 3, 5 e 7 estão acopladas, pois sofrem conjuntamente o efeito de um determinado distúrbio externo, enquanto o efeito de outro distúrbio se reflete nas variáveis 1 e 8.

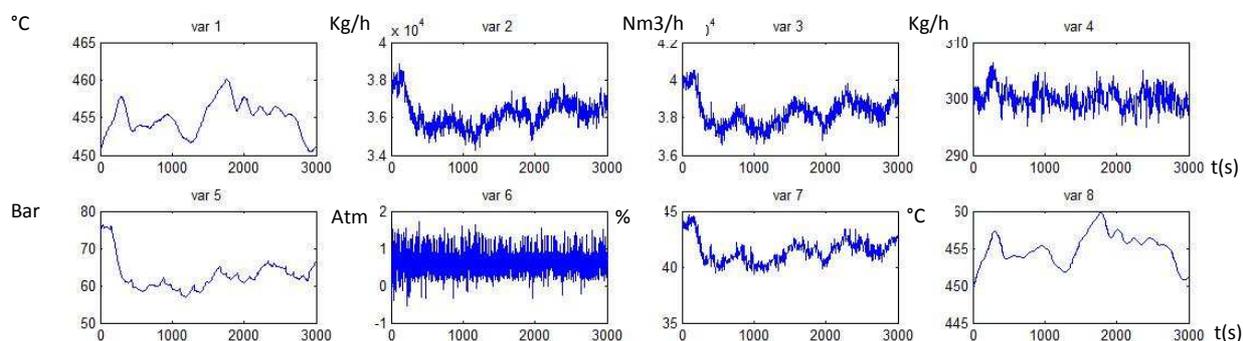


Figura 3.3 – Exemplo de variáveis acopladas devido a uma perturbação externa

A identificação dessas correlações pode ser feita pelo cálculo da matriz de correlação (ver Anexo C), correlação (ver Anexo C), mostrada na

Tabela 3.1. Por ser simétrica, são exibidos apenas os dados abaixo da diagonal principal. Valores acima de 0.8 estão destacados e são indicativos de forte correlação. Orientando-se pelos índices de linha-coluna, as principais correlações são: 3-2, 5-2, 5-3, 7-2, 7-3, 7-5 e 8-1. Os seis primeiros pares equivalem a uma combinação dos elementos {2, 3, 5 e 7}, agrupados de 2 em 2 ( $C_2^{\{2,3,5,7\}}$ ), e formam um grupo de variáveis acopladas. O mesmo pode-se afirmar sobre as variáveis 1 e 8 e, assim, temos:

Grupo 1 = {2,3,5,7} e Grupo 2 = {1,8}.

Tabela 3.1 – Matriz de coeficientes de correlação entre as oito variáveis

VAR 1	X							
VAR 2	0,05	X						
VAR 3	0,01	0,83	X					
VAR 4	0,20	-0,03	-0,15	X				
VAR 5	0,02	0,87	0,85	0,07	X			
VAR 6	-0,03	0,04	0,05	-0,05	0,04	X		
VAR 7	0,01	0,85	0,92	-0,33	0,87	0,05	X	
VAR 8	0,98	-0,02	-0,07	0,17	-0,07	-0,03	-0,07	X
	VAR 1	VAR 2	VAR 3	VAR 4	VAR 5	VAR 6	VAR 7	VAR 8

A determinação desses grupos pode ser perfeitamente automatizada tornando essa ferramenta viável independente do número de variáveis.

### Método 2: Análise em Componentes Principais (ACP)

A análise em componentes principais (ACP) é uma ferramenta também baseada em matriz de correlação, porém ela é capaz de capturar automaticamente em suas “componentes principais” as variações comuns entre variáveis, ou seja, cada componente principal passa a representar um grupo de variáveis correlacionadas. Esta ferramenta tem implementação bastante simples e está descrita no anexo C.

A Tabela 3.2 mostra o resultado da aplicação do ACP aos dados da Figura 3.3. Cada linha representa uma variável e seu percentual de participação em cada componente principal, representada pelas colunas. Destacam-se as duas primeiras componentes (CP1 e CP2), que juntas representam 71% (45.28+25.59) do total de variação dos dados. Observa-se que a componente 1, que captura 45% da variação total dos dados, possui importante participação das variáveis 2, 3, 5 e 7, enquanto que a componente 2 (CP2), possui participação importante das variáveis 1 e 8. As demais componentes são desconsideradas por possuírem baixo poder de representação. Elas são geralmente reflexos de associações pontuais entre variáveis, ou seja, variações conjuntas que ocorrem em apenas curtos instantes de tempo e que, assim, não caracterizam um acoplamento.

Tabela 3.2 – Matriz de auto-vetores (participação das variáveis em cada componente principal)

	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	CP5 (%)	CP6 (%)	CP7 (%)	CP8 (%)
VAR 1	0,02	47,15	2,04	0,55	0,12	0,34	0,00	49,77
VAR 2	23,74	0,46	1,04	0,33	59,66	14,52	0,09	0,16
VAR 3	24,92	0,04	0,00	0,05	35,87	30,65	8,47	0,00
VAR 4	0,82	5,90	52,18	31,03	1,84	0,89	7,24	0,10
VAR 5	24,26	0,30	3,79	1,78	0,04	49,01	20,55	0,27
VAR 6	0,12	0,21	35,83	63,83	0,00	0,00	0,00	0,01
VAR 7	25,82	0,00	1,87	1,68	2,39	4,51	63,43	0,30
VAR 8	0,31	45,95	3,24	0,75	0,07	0,08	0,21	49,39
% captura	45,28	25,59	12,99	12,12	2,12	1,32	0,39	0,18

É importante salientar que a eficiência de métodos baseados em matriz de correlação torna-se baixa quando há deslocamento temporal entre os dados. Isso é comum em processos físicos, devido ao atraso de transporte de material e energia e devido aos atrasos de transferência relacionados com aspectos dinâmicos do processo. Um método utilizado para lidar com esse problema é conhecido como “*Time-Shift PCA*”, (Thornhill et al, 2002). A idéia, no caso, é remover previamente os deslocamentos das variáveis em relação a uma variável eleita como referência antes da aplicação da ACP. Outra solução, mais simples, é aumentar o tamanho da janela de dados até que ela tenha um tamanho muitas vezes maior que o intervalo do deslocamento temporal entre os dados.

### Método 3: Correlação Cruzada para estimação de deslocamento temporal

Considerando novamente os dados da Figura 3.3, sabe-se que a variável 2 é responsável pelas variações nas variáveis 3, 5 e 7. É interessante, neste caso, conhecer o tempo decorrido até que uma variação nestas variáveis seja “sentida” pelas demais. Isso auxilia, por exemplo, no estudo de viabilidade de implementação de mecanismos de compensação direta.

Uma maneira de se determinar esses tempos é o cálculo da função de correlação cruzada (FCC) entre a variável de referência (nesse exemplo, a variável 2) e as demais variáveis e, em seguida, identificar em qual deslocamento (*lag*) ocorre o valor máximo absoluto dessa correlação. Este deslocamento corresponde ao atraso de tempo entre as variáveis (ver Anexo C). A Tabela 3.3 mostra os resultados. A segunda coluna mostra o coeficiente de correlação máximo entre a variável 2 e as demais na escala de -100 a 100 e a coluna 3 (*lag*) mostra o deslocamento no tempo onde ocorre esse máximo. Conclui-se que uma variação na variável 2 é sentida, instantaneamente, pela variável 5, enquanto que nas variáveis 3 e 7, ela é sentida após 9 e 6 segundos, respectivamente.

*Tabela 3.3 – Correlação cruzada entre a variável 2 e as demais*

Correlação Cruzada Referencia: Variável 2		
	Coef. Correlação	Lag
Variável 1	-52	-1130
Variável 2	X	0
Variável 3	85	-9
Variável 4	38	-154
Variável 5	87	0
Variável 6	7	-2093
Variável 7	87	-6
Variável 8	-52	-1158

Uma malha de controle é dita oscilatória quando sua variável controlada apresenta um padrão regular de desvios em torno da referência de controle. No contexto de controle estatístico de processos, diz-se que este é um comportamento determinístico, ou seja, uma causa atribuível para a variabilidade da malha.

Diversos procedimentos permitem detectar oscilação em séries temporais. Um caminho é procurar por picos na análise espectral do sinal. Outros métodos citados na literatura são capazes de detectar a presença de um comportamento oscilatório de maneira automática. Três deles são apresentados a seguir.

O primeiro, proposto por Miao e Seborg (1998), tem como princípio o fato da autocorrelação de um sinal oscilatório ser também oscilatória. Ele leva em conta a taxa de decaimento dos primeiros ciclos da função de autocorrelação da variável de processo e/ou do erro de controle. A taxa de decaimento ( $R$ ) é medida pela relação  $B/A$ , onde  $A$  e  $B$  são, respectivamente, as distâncias determinadas pela profundidade do primeiro mínimo e a altura do segundo máximo da função de autocorrelação (incluindo pico no *lag* zero). No caso de um sinal senoidal, a taxa de decaimento é unitária, enquanto que num sinal não-oscilatório, a taxa de decaimento é próxima de zero. A Figura 3.4 mostra três exemplos. No primeiro caso, para um sinal com oscilação não amortecida, a taxa de decaimento ( $R$ ) é próxima de 1. No segundo, para um sinal ainda oscilatório, mas com decaimento exponencial, ela é de aproximadamente  $2/3$ , enquanto que no terceiro exemplo, sinal não-oscilatório, ela é inferior à 0.5.

Portanto, a técnica é capaz de detectar um sinal oscilatório, mesmo aqueles com decaimento exponencial. Para o fator  $R$ , o autor sugere a utilização de um limiar de 0.5. Este valor corresponde a um valor de decaimento no domínio do tempo inferior à 0.25, o que é aceitável em muitos problemas de controle.

Outro método de detecção de oscilação que opera sobre a função de autocorrelação (FAC) foi proposto por Thornhill et al., 2003. O benefício do uso da função de autocorrelação é que o impacto do ruído é reduzido, porque o ruído branco tem uma FAC teoricamente nula para deslocamentos (*lags*) maiores que zero. O padrão de cruzamentos por zero da FCA, portanto revela a presença de oscilação de maneira mais clara que os cruzamentos do sinal num gráfico de tendência temporal.

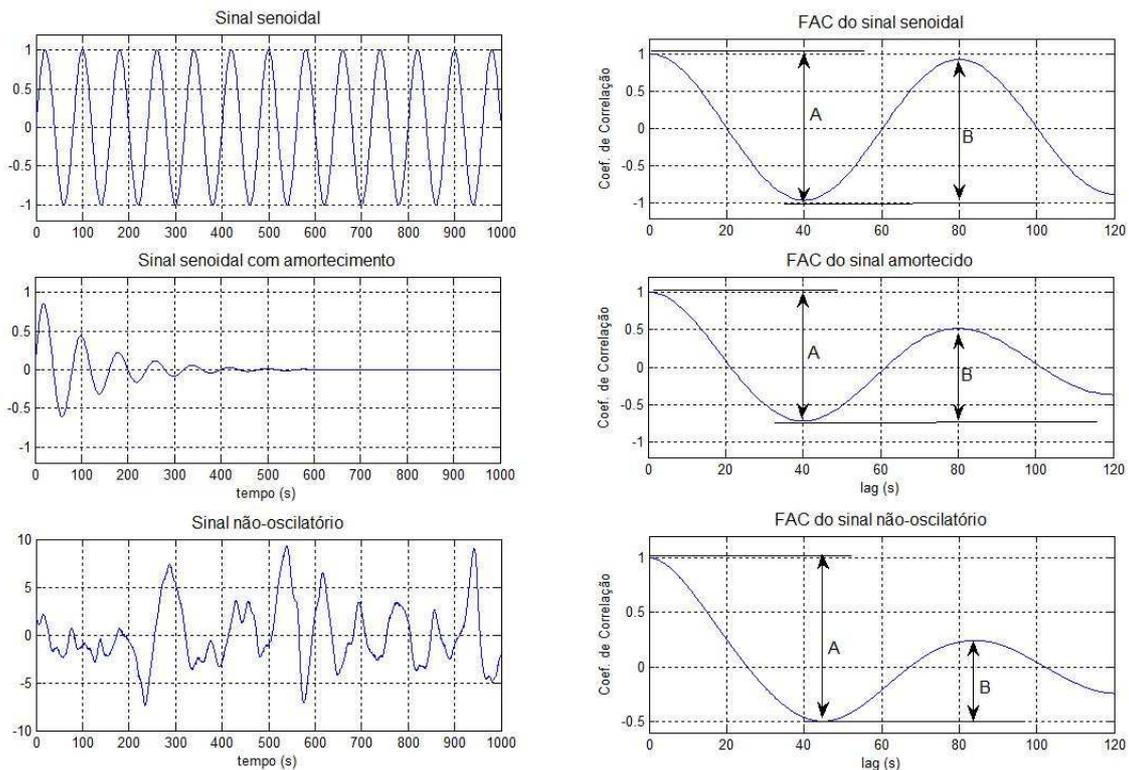


Figura 3.4 – FAC típicas de um sinal com oscilação senoidal (alto), sinal com oscilação amortecida (central) e sinal não-oscilatório (abaixo).

O diagnóstico de oscilação é realizado medindo-se a regularidade dos intervalos de cruzamentos por zero da ACF. Assim, um índice de oscilação ( $r$ ) é calculado pela seguinte expressão:

$$r = \frac{1}{3} \times \frac{\overline{T_p}}{\sigma_{T_p}}$$

Onde  $\overline{T_p}$  corresponde ao período médio dos intervalos ( $T_p = 2 \times$  intervalo entre cruzamentos) e  $\sigma_{T_p} = 2 \times \sigma_{intervalos}$ , onde  $\sigma$  corresponde ao desvio padrão dos intervalos. Se  $r > 1$  então se tem a presença de uma oscilação regular no sinal. Este limiar tem uma justificativa com base estatística, conforme discutido pelos autores.

Outro método, proposto por Forsman e Statin (1999), consiste na detecção de oscilação pelo estudo comparativo tanto das áreas formadas pela curva do sinal com o eixo do tempo, como dos intervalos de tempo em que o erro tem o mesmo sinal (Mejia et al, 2008). A Figura 3.5 mostra como são calculados o vetor de áreas A e o vetor de intervalos T.

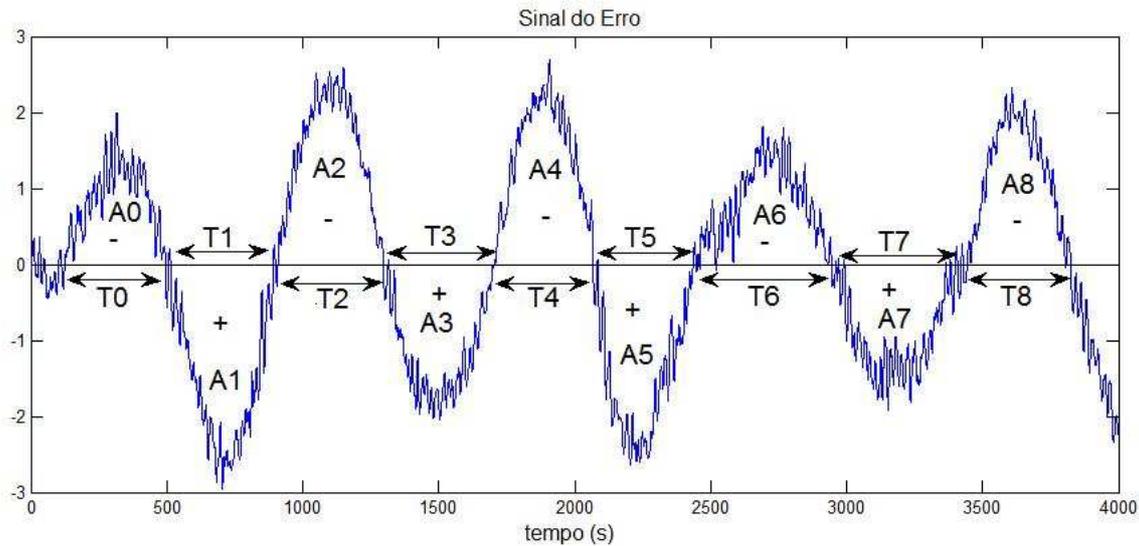


Figura 3.5 –O método é baseado na regularidade de áreas e intervalos de cruzamentos consecutivos (entre grupos de índices pares e ímpares).

A comparação é realizada entre áreas e intervalos consecutivos, porém, originados por um sinal de erro de mesmo sinal, ou seja, os dados de áreas e intervalos são divididos em dois conjuntos, os de índice par (erro negativo) e os de índice ímpar (erro positivo). Para cada par de elementos, calcula-se uma relação binária de comparação. A relação da soma dos elementos de ambos os conjuntos dividida pelo número total de meios períodos (N) forma um indicador de oscilações que pode assumir valores entre 0 (ausência de oscilação) e 1 (oscilação perfeita). As relações binárias são calculadas como a seguir:

$$C_- = \left\{ \alpha < \frac{A_{i+2}}{A_i} < \frac{1}{\alpha} \text{ E } \gamma < \frac{T_{i+2}}{T_i} < \frac{1}{\gamma} \right\}, \text{ onde } i = 0, \dots, \frac{N}{2}$$

$$C_+ = \left\{ \alpha < \frac{A_{i+2}}{A_i} < \frac{1}{\alpha} \text{ E } \gamma < \frac{T_{i+2}}{T_i} < \frac{1}{\gamma} \right\}, \text{ onde } i = 1, \dots, \frac{N}{2}$$

$$ind\_osc = \frac{(\sum C_- + \sum C_+)}{N}$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\gamma$  ajustam a sensibilidade da comparação entre áreas e intervalos, respectivamente. Valores próximos da unidade proporcionam baixa sensibilidade, ou seja, para a comparação ser considerada verdadeira, as áreas ou intervalos precisam ser quase idênticos. Já valores próximos de zero proporcionam alta sensibilidade.

Na implementação realizada neste trabalho, utilizou-se valores de 0.7, com bons resultados práticos. Uma desvantagem deste método em relação aos demais é que ao utilizar dados puros do processo (os outros métodos trabalham sobre a ACF dos sinais), ele precisa lidar com a presença de inúmeros cruzamentos de zero espúrio, causados por ruído no sinal. Como, geralmente, esses cruzamentos espúrios são de curta duração, em contraste com os cruzamentos reais que são de longa duração, uma

forma de eliminá-los é determinar um período mínimo a ser considerado a partir da análise do histograma dos cruzamentos. Outra forma seria fazendo a filtragem do sinal.

Ambos os métodos apresentam bons resultados (que são mostrados no capítulo 4). Entretanto, um diagnóstico preciso depende de uma criteriosa pré-filtragem dos dados. Além disso, os métodos pressupõem a ocorrência de um único ciclo de oscilação, condição pouco razoável em processos reais. Por isso, no caso de múltiplos picos, as análises foram feitas separadamente em diferentes faixas de frequência.

### 3.3.3. IDENTIFICAÇÃO DE ACOPLAMENTOS OSCILATÓRIOS

Sinais com comportamento oscilatório não são localizados no tempo, e a transformada de Fourier e o espectro de potência provêm um caminho natural para sua análise. Segundo Thornhill et al. (2002), ferramentas de análise no domínio da frequência têm várias vantagens em relação às análises no domínio do tempo apresentadas na seção 3.3.1. Elas provêm melhoria na relação sinal-ruído se o conteúdo de frequência de interesse ocupar uma faixa estreita de frequência se comparado com o ruído. Além disso, o espectro de frequência é invariante a atrasos de transporte ou deslocamentos de fase causados pela dinâmica do processo. E, também, é pouco sensível a falhas na coleta de dados ou “*outliers*”, já que a transformada de tais efeitos é espalhada por todas as frequências no espectro.

Serão apresentados a seguir dois métodos para identificação de Acoplamentos Oscilatórios baseados no domínio da frequência: a *Análise de Ciclos Comuns*, e a *Análise de Componentes Principais Espectral*.

#### Método 1: Análise de Ciclos Comuns

Este método, encontrado em ferramentas comerciais de monitoramento de malhas de controle, tais como PlanTriage<sup>®</sup>, Process Doctor<sup>®</sup> e Protuner<sup>®</sup>, consiste em identificar as principais componentes de frequência de um sinal (concentrações no espectro de frequência) e, em seguida, agrupar aqueles sinais que possuem componentes com períodos coincidentes (Torres et al., 2004 e Mitchell et al.).

Para exemplificar, considere um sistema composto por uma malha de controle de pressão de combustível (PIC01), uma malha de temperatura TIC01 e FIC01, malha escrava para controle de vazão de combustível. TIC01 possui comportamento oscilatório, com ciclo de 80 segundos, devido à sintonia inadequada de seu controlador, enquanto um problema de agarramento na válvula PCV01 é responsável por gerar uma oscilação com período em torno de 26 segundos na pressão. A Figura 3.6 mostra o esquema de controle e, à direita, os gráficos de tendência das malhas.

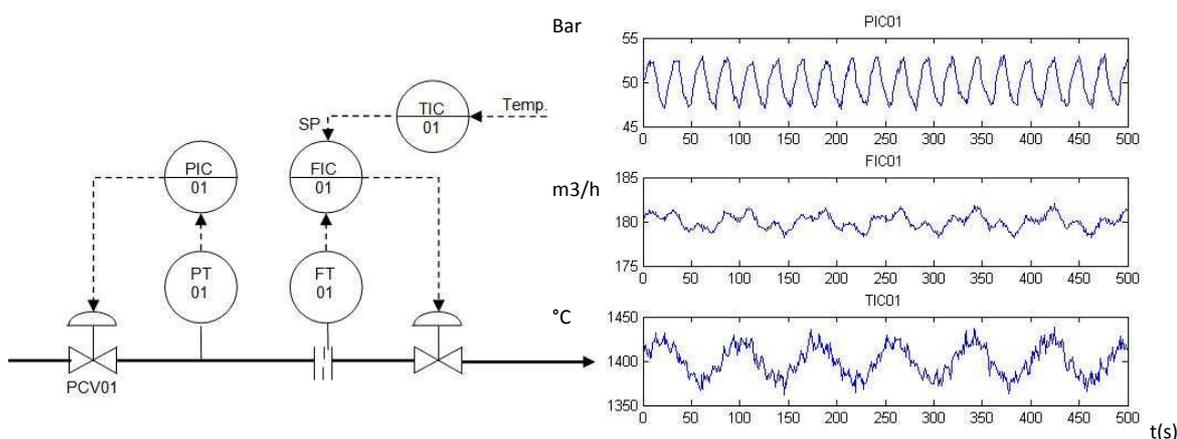


Figura 3.6 – Processo simulado. Esquema de controle (à esquerda) e gráficos de tendência das variáveis controladas (à direita)

Após aplicação da transformada de Fourier dos dados e a identificação dos três principais núcleos (ou aglomerados) no espectro de potência, obteve-se os principais ciclos de oscilação das malhas, conforme mostrado na Tabela 3.4. Relaciona-se, para cada malha, suas três principais componentes de frequência (colunas 2, 4 e 6) e suas intensidades (colunas 3, 5 e 7), medidas como o percentual de participação de cada uma na potência espectral total do sinal. Reorganizando-se estes dados numa única coluna, ordenada pelos períodos (ver Tabela 3.5), dois grupos de malhas acopladas podem ser facilmente identificados: O primeiro, com período em torno de 26 segundos, inclui FIC01 e PIC01 e o segundo, com período em torno de 80 segundos, inclui TIC01 e FIC01.

Tabela 3.4 – Período e intensidade das principais componentes de frequência das malhas

	Período 1 (seg)	Intensidade 1 (% Espectro)	Período 2 (seg)	Intensidade 3 (% Espectro)	Período 3 (seg)	Intensidade 3 (% Espectro)
PIC01	25,90	0,94	8,63	0,02	29,65	0,01
FIC01	78,69	0,45	25,86	0,32	85,25	0,13
TIC01	79,22	0,64	85,25	0,17	9,98	0,06

Tabela 3.5 – Períodos principais ordenados em ordem ascendente para facilitar visualização dos acoplamentos. Baseado em relatório do Expertune PlantTriage®

	Período (seg)	Intensidade (%Espectro)
PIC01 (2)	8,63	0,02
TIC01 (3)	9,98	0,06
FIC01 (2)	25,86	0,32
PIC01 (1)	25,90	0,94
PIC01 (3)	29,65	0,01
FIC01 (1)	78,69	0,45
TIC01 (1)	79,22	0,64
FIC01 (3)	85,25	0,13
TIC01 (2)	85,25	0,17

Os agrupamentos também podem ser identificados usando periodogramas, conforme representação gráfica proposta na Figura 3.7. O eixo horizontal representa o período dos ciclos em segundos e os núcleos (ou aglomeração de picos no espectro de potência) são representados por barras horizontais cuja largura coincide com os limites dos núcleos de cada sinal. A figura mostra a representação dos mesmos quatro núcleos destacados na Tabela 3.5, e suas respectivas intensidades percentuais. Nesta análise, se duas barras estão uma sobre a outra, como é o caso de PIC01/FIC01 e FIC01/TIC01, então as malhas que elas representam estão acopladas, pelo menos nessas faixas de frequência.

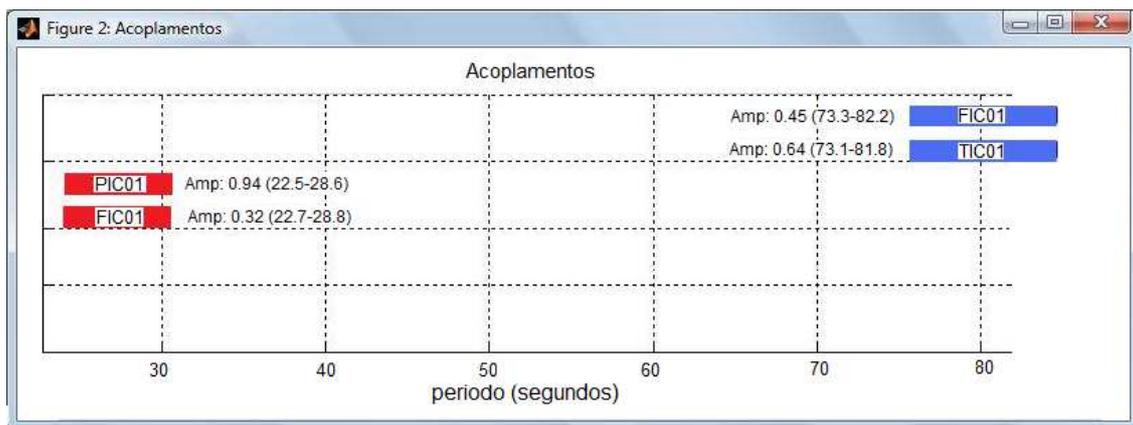


Figura 3.7 – Proposta de representação gráfica para identificação de acoplamentos

Se, paralelamente, forem utilizadas ferramentas para detecção de causa raiz de oscilação (serão discutidas na 3.3.4), pode-se saber que PIC01 possui oscilação devido a problemas com seu atuador e TIC01 por problema de sintonia, enquanto FIC01 teria uma causa externa para sua oscilação. Neste caso, demonstradamente, devido a seu acoplamento com TIC01 e PIC01.

Um aspecto interessante do espectro de potência é que ele expressa o conteúdo de energia do sinal em função da frequência. A Figura 3.8 mostra o espectro de FIC01. A área total abaixo das curvas é igual à variância do sinal e o percentual da área entre duas frequências é o mesmo percentual da variância do sinal nesta faixa (Pryor, 1982). Assim, conclui-se que, caso os problemas em PIC01 e TIC01 sejam solucionados, a variabilidade em FIC01 será reduzida no valor de 32% e 58%, respectivamente, sem que nenhuma ação seja realizada sobre essa malha, já que a análise proporcionada pela Figura 3.7 identificando oscilações significativas na mesma faixa de frequência entre as malhas, deixa evidenciados os acoplamentos existentes.

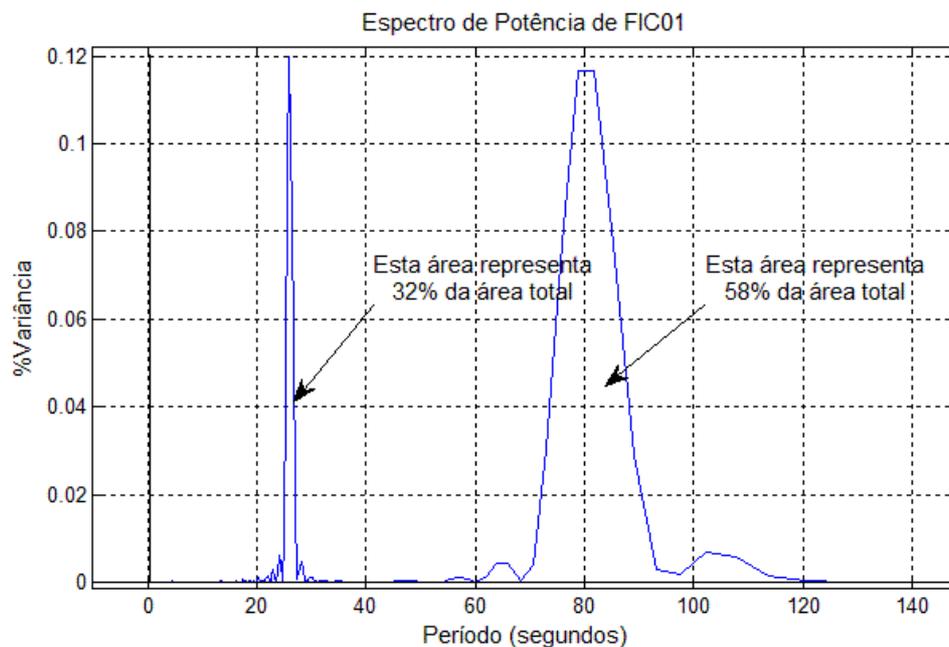


Figura 3.8 – Espectro de potência de FIC01 destacando suas duas principais componentes de frequência

### Método 2: Análise por Componentes Principais baseado no espectro de potência

A ACP Espectral é uma ferramenta que realiza a análise de componentes principais no domínio da frequência. O procedimento é o mesmo descrito na seção 3.3.1, com a diferença que os vetores de dados são os espectros de frequência das séries temporais. E, da mesma forma que os métodos de detecção de oscilação, sinais com múltiplos picos no espectro precisam ser previamente filtrados.

Sua grande vantagem em relação ao ACP no domínio do tempo, é a capacidade de detectar os acoplamentos de sinais oscilatórios, mesmo que, entre eles, exista deslocamento de fase. Além disso, este deslocamento pode ser determinado pelo argumento da transformada de Fourier das séries temporais, conforme relações descritas em Thornhill et al, 2002.

**Observação:** É comum, durante a aplicação dos dois métodos citados para detecção de acoplamentos, a ocorrência de coincidências, ou seja, malhas de controle com ciclos comuns de oscilação, mas que não têm nenhuma relação física. Por isso, essa análise deve ser realizada em conjunto com entendimento sobre processo e conhecimento do *layout* da planta.

#### 3.3.4. DIAGNÓSTICO DE CAUSA RAIZ DE OSCILAÇÃO

Uma revisão de técnicas e métodos encontrados na literatura que se mostram adequados para o diagnóstico de oscilações em malhas de controle é apresentada nesta subseção. Várias são as causas possíveis para estas oscilações, quais sejam:

- Ajuste inadequado do controlador: Uma malha de controle tem resposta oscilatória se tiver pólos complexos em malha fechada. A frequência dessa oscilação está relacionada com características do processo, mas seu grau de dominância pode ser determinado pela sintonia do controlador. Se este grau for elevado, uma malha sujeita a constantes perturbações tenderá a apresentar um persistente comportamento oscilatório;
- Histerese (Backlash): Perda de movimento de um instrumento, durante reversões, devido a folgas existentes entre partes de contato mecânico;
- Agarramento (Stiction): Efeito de atrito estático. A resposta a uma entrada variável é precedida por um instante de ausência de movimento seguida de um “pulo”;
- Banda Morta: Faixa na qual uma variação na entrada não causa nenhuma variação na saída. Em alguns casos ela é intencionalmente programada em controladores e posicionadores (ex.: eletro-válvula) para que pequenos erros de controle sejam ignorados;
- Quantização: Um sinal digitalizado (saída de um conversor A/D) possui resolução mínima determinada pelo arredondamento de seu último dígito binário. Para um controlador provido de ação integral, a quantização do sinal de erro resulta num efeito parecido com o de um agarramento;
- Interação entre malhas: Malhas que possuem bom desempenho isoladamente, mas ao operar juntas, começam a interagir uma com a outra, resultando em oscilações em ambas.
- Oscilação por carga: Oscilação apresentada pela malha é causada por um distúrbio oscilatório.

Apresenta-se a seguir métodos para distinção entre algumas dessas causas.

#### **A. Oscilação causada por agarramento em válvulas**

Válvulas de controle têm sido identificadas como a principal fonte de problemas nos sistemas de controle regulatórios (Åström e Hägglund, 2006). São dispositivos sujeitos a desgastes que, após algum tempo de operação, resultam em problemas mecânicos que comprometem o desempenho.

Entre os problemas encontrados em válvulas, o responsável em gerar oscilação sustentada em malhas de controle é a presença de atrito. O agarramento é um tipo de não-linearidade causada, principalmente, pelo atrito estático entre a haste e a gaxeta, peça instalada para impedir que haja vazamento de fluxo pela haste.

Tal oscilação é explicada pela seguinte seqüência de fatos (Choudhury et al, 2005): Quando a força ativa “Fa”, que é proporcional ao sinal de controle (CO), é menor que a força de atrito estático “Fe”, a válvula agarra. Isto causa uma diferença entre o sinal de controle e a posição real da válvula e, como consequência, causa erro entre a referência de controle e a variável controlada (PV). Este erro persistente, com a presença da componente integral do controlador, resulta num sinal de controle e numa força ativa “Fa” crescentes. Quando “Fa” torna-se maior que “Fe” a válvula desagarra, movendo-se de maneira brusca para uma nova posição. Esta mudança, geralmente, é maior que o necessário e a resposta do processo resulta em novo erro (SP-PV), porém com sinal invertido. A ação integral do controlador, então, começa a decrementar até que a força ativa (produzida pela mola se a válvula opera com “ar para abrir”) seja, novamente, maior que o atrito estático. Nesse momento a válvula pula, bruscamente, para uma nova posição num sentido contrário ao da mudança anterior.

Este ciclo de agarramento repete-se, indefinidamente, e produz alguns padrões bem característicos nas tendências das variáveis monitoradas. A ação integral do controlador, na presença de erros constantes, mas com alternância de sinal, geram um sinal de controle (CO) com um formato aproximadamente triangular, muitas vezes também parecido com um “dente de serra”. A posição da válvula (MV), com suas mudanças bruscas e alternadas, produzem uma tendência parecida com uma onda quadrada. Já a variável controlada (PV), respondendo às mudanças na posição da válvula, possui uma tendência também similar a de uma onda quadrada, mas combinada com a resposta dinâmica do processo. Esses padrões são exemplificados na Figura 3.9, com dados obtidos a partir de simulação utilizando uma válvula com 5% de agarramento. Esta simulação foi realizada em Matlab® baseada num algoritmo proposto por Choudhury et al. (2001).

Fatores relacionados com desgaste e falhas em atuadores estão entre os que determinam o limite inferior de variabilidade em uma malha de controle. Esta dispersão do erro, causada pelo agarramento da válvula, pode ser estimada a partir do conhecimento do ganho do processo e do percentual de agarramento da válvula. Considerando que a amplitude de variação da variável controlada ( $\Delta PV$ ) é igual à amplitude de variação do sinal de controle ( $\Delta CO$ ) multiplicado pelo ganho do processo ( $K_p$ ) e que o valor de  $\Delta CO$  é, aproximadamente, igual ao percentual de agarramento da válvula ( $A$ ), tem-se que:  $\Delta PV = K_p * \Delta CO = K_p * A$ . Como o desvio padrão de uma onda quadrada é a metade do valor pico a pico, então:

$$Std(PV) = \Delta PV / 2 = (K_p * A) / 2 \quad \text{equação (7)}$$

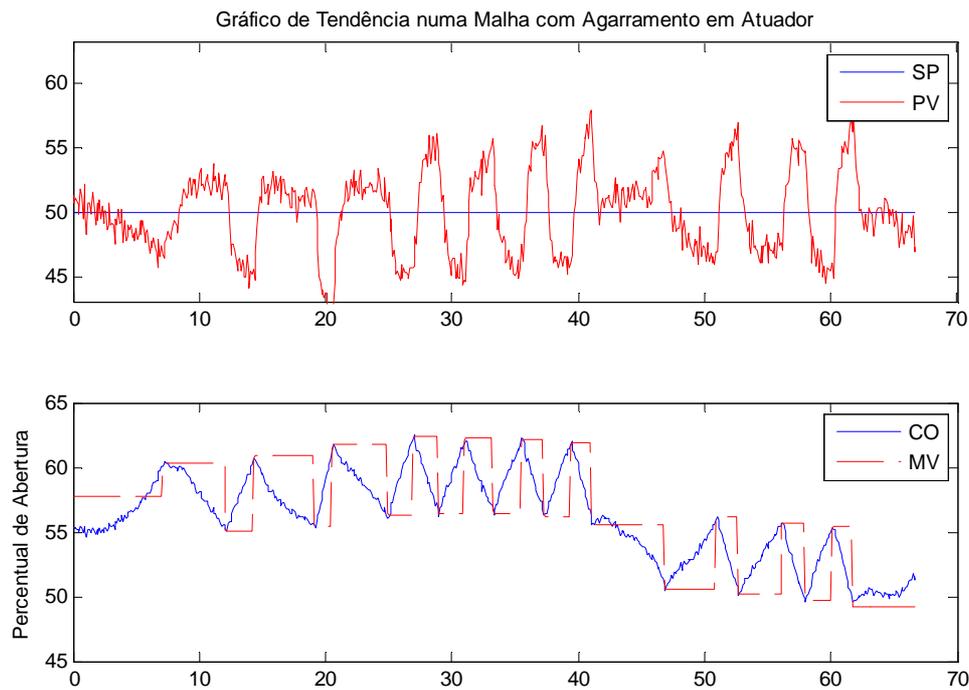


Figura 3.9 – Simulação pra demonstração de tendência típica de uma malha com agarramento em válvula.

Na simulação mostrada na Figura 3.9, a válvula possui agarramento de 5% e o ganho do processo é de 1.5. Utilizando a equação 7, tem-se que o desvio padrão estimado é:  $\text{Std}(PV) = (1.5 \cdot 5) / 2 = 3.75\%$ . Este valor é bem próximo do desvio padrão real, que é de 3.13%.

Já o período de oscilação médio também poderia ser estimado a partir do ganho estático da malha e do tempo integral do controlador, conforme relação mostrada na equação 8 (Hägglund, 1995).

$$T_{osc} = 4T_i \left( \frac{1}{K_p K} - 1 \right) \quad \text{equação (8)}$$

Como existem diversas outras causas possíveis para a oscilação em uma malha de controle, ações para combater oscilação causada por problemas em válvula são muitas vezes feitas, equivocadamente, inserindo-se uma banda morta no controlador ou desintonizando-o, ao invés de realizar a manutenção no equipamento. A inserção da banda morta, além de não evitar os “pulos” na variável controlada, resulta em erro estacionário. Já a ação de desintonizar o controlador, aumenta o tempo de acomodação e reduz a frequência da oscilação (ver equação 8), mas sem diminuir sua amplitude, pois esta independe dos parâmetros de controle (ver equação 7).

### A.1 Detecção e Quantificação do agarramento

Entre os diversos métodos propostos para detecção e quantificação de agarramento, o mais simples e preciso é o proposto por Åström et al. (2006) e Ruel (2000). Ele consiste numa seqüência de testes em malha aberta. A Figura 3.10 mostra um exemplo de sua aplicação. Inicialmente, aplica-se um degrau com amplitude suficiente para causar uma variação perceptível na variável controlada e, também, para vencer possíveis folgas mecânicas da válvula. Em seguida, inicia-se a aplicação de uma seqüência de pequenos incrementos, no mesmo sentido do degrau inicial, até que seja observada uma nova variação na variável controlada. O percentual de agarramento é calculado pelo somatório de incrementos que foram realizados sem que fosse observada qualquer variação na variável controlada. Neste exemplo, como foram necessários nove incrementos, o percentual de agarramento está entre 0.8 e 0.9%.

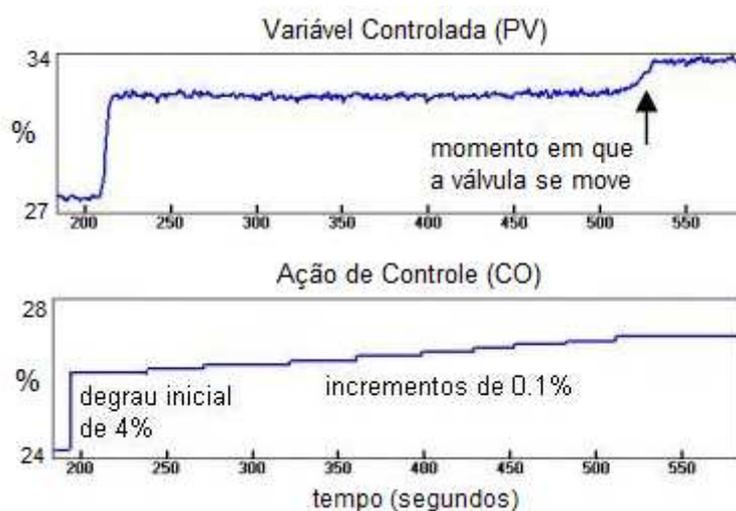


Figura 3.10 – Teste manual para detecção e quantificação de agarramento

Outros métodos possuem a vantagem de não requerem o chaveamento do controlador para modo manual. Gerry e Ruel (2000) e (2001) mostram que a detecção do agarramento pode ser feita por inspeção visual, comparando os gráficos de tendência da malha de controle com os padrões típicos de oscilação por agarramento, conforme exemplificado na Figura 3.9. Este padrão também pode ser identificado no domínio da frequência. Ciclos gerados por não-linearidades, usualmente, não-senoidais e harmônicos em frequências múltiplas da frequência fundamental, aparecem no espectro de potência (Thornhill e Hägglund, 1997). A Figura 3.11 mostra o espectro de potência da malha PIC01, citada na seção 3.3.3, que oscila devido a um problema de agarramento. Além da frequência fundamental que é de aproximadamente 0.05 Hz, tem-se outros picos situados próximos das frequências 0.1 Hz e 0.2 Hz.

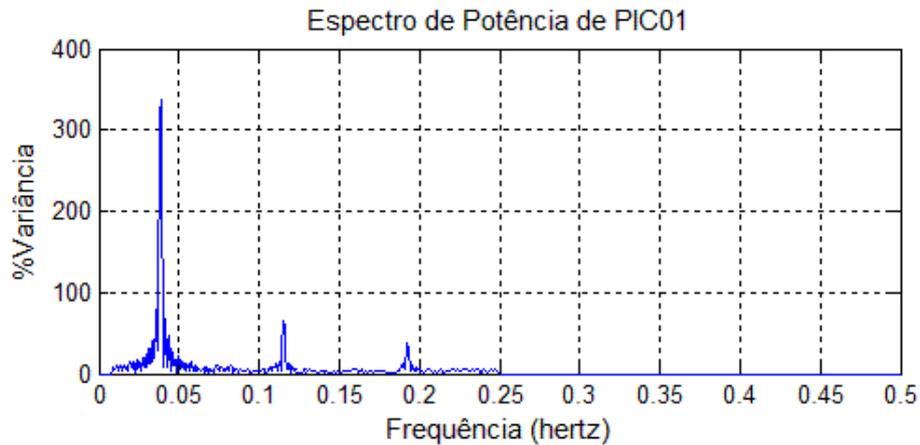


Figura 3.11 – Espectro de potência de uma malha com problema de não-linearidade em válvula

Já Choudhury et al. (2005), propõem analisar o gráfico de tendência da malha após realizar um aumento no ganho do controlador. Se esta alteração implica num aumento da frequência da oscilação, então é confirmado que a oscilação é causada por agarramento do atuador. Já para a quantificação do agarramento, assim como outros tipos de não-linearidades, é proposta a análise de gráficos “MV versus CO” (a medição da posição real da válvula é plotada contra os dados da saída de controle). Este gráfico forma uma figura parecida com um paralelogramo cujas dimensões estão relacionadas com o percentual de agarramento e histerese da válvula.

No caso de uma planta que possui um grande número de malhas, ferramentas não invasivas e capazes de diagnosticar automaticamente oscilação por agarramento são necessárias. Entende-se que estas ferramentas podem ser utilizadas como meio para uma triagem de malhas suspeitas ou podem ser embutidas no validador de malhas de controle para diagnóstico automático de oscilação.

Horch (1999), propõe um método capaz de detectar agarramento em válvulas de controle por meio da análise da função de correlação cruzada (FCC) entre a saída do controlador (CO) e a variável de processo (PV). O princípio deste método vem da observação de que, numa malha oscilando devido a agarramento em válvula, tem-se um deslocamento de fase de  $90^\circ$  (FCC ímpar) entre estes sinais, enquanto que numa malha oscilando por carga ou sintonia, o deslocamento de fase é de  $180^\circ$  (FCC par). Estes dois casos são ilustrados na Figura 3.12. Na parte superior, a tendência de uma malha com oscilação por agarramento e de uma malha oscilando devido a uma sintonia agressiva. Abaixo, suas respectivas FCC's.

O diagnóstico é realizado calculando-se a FCC de uma série de dados e, em seguida, utilizando-se um algoritmo para distinguir se a FCC é par ou ímpar.

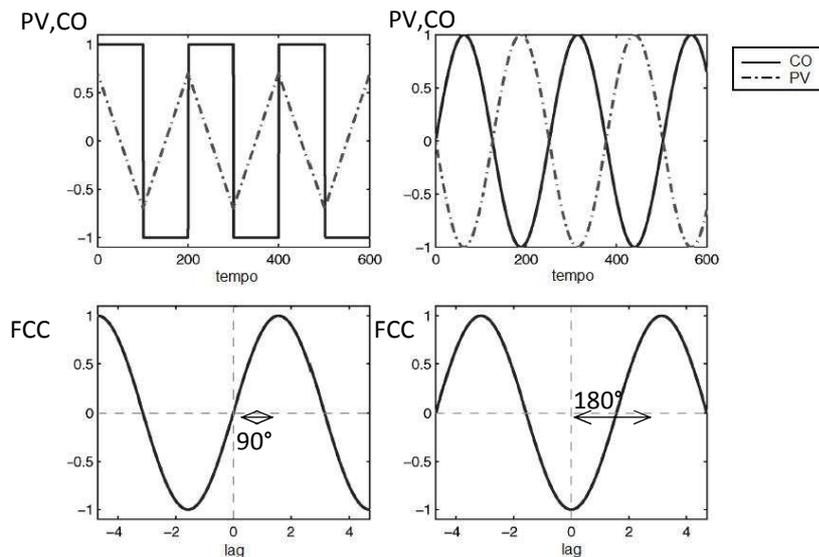


Figura 3.12 – Função de correlação cruzada entre PV e CO numa malha com simulação de agarramento na válvula (à esquerda) e numa malha com outro tipo de oscilação (à direita). Fonte: Horch, 1999.

Outro método proposto por Singhal e Salsbury (2004), também detecta agarramento baseando-se na distinção entre padrões típicos de malhas oscilatórias. Ele observa que, numa malha com oscilação por agarramento, a razão entre as áreas antes e após o pico do sinal de erro de controle (R) entre pontos num mesmo intervalo de cruzamento pelo zero é maior do que 1, enquanto que, para outros casos, este valor é bem próximo de 1. Estas duas situações são ilustradas na Figura 3.13.

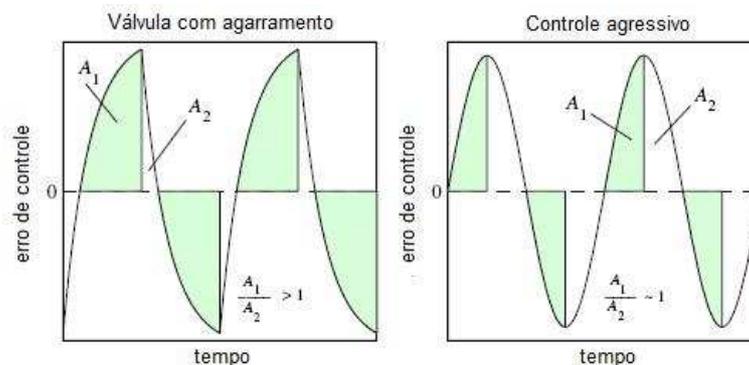


Figura 3.13 – Relação entre as áreas A1 e A2 numa malha com oscilação devido a agarramento de válvula (à esquerda) e numa outra com oscilação por outro motivo (à direita). Fonte: Singhal e Salsbury (2004).

A prova teórica destes métodos encontra-se em suas referências. Ambos são de fácil implementação e foram utilizados no estudo de caso de auditoria desenvolvido neste trabalho e apresentado no capítulo 4.

É importante, no entanto, levar em conta diversas considerações antes de utilizá-los. O método de Horch parte do princípio que o processo é auto-regulatório e que é controlado por um controlador PI. E mesmo com essas condições satisfeitas, pode gerar resultado dúbio no caso de uma malha oscilando por sintonia agressiva ou carga. Em malhas que não operam em saturação, a ação integral introduz deslocamento de fase além dos 180° devido à realimentação negativa. Esse acréscimo

pode gerar uma FCC parecida com aquela produzida em malha com agarramento de válvula.

Já o método de Shinghal considera que a saída do controlador não está oscilando de um limite de saturação a outro e que a oscilação não é causada por um distúrbio externo periódico. A violação destas considerações pode resultar num diagnóstico de agarramento, mesmo quando este é inexistente. Além disso, seu funcionamento também depende de um bom trabalho de pré-processamento nos dados, tanto para a detecção dos pontos de cruzamento, quanto para a detecção do momento em que o sinal muda de tendência. Neste aspecto, o método de Horsch possui a vantagem de realizar operações a partir da função de correlação cruzada, que possui a propriedade de ter maior imunidade a ruídos de medição.

Além disso, estes métodos devem ser aplicados somente em malhas em que já foi previamente detectada a presença de oscilação e, tendo essa oscilação uma única causa. Malhas oscilando com múltiplas causas possuem diferentes ciclos superpostos e necessitam de uma pré-filtragem para expor os algoritmos a apenas um tipo dessas causas por vez.

Outros métodos de implementação mais complexa também foram propostos. Um segundo método proposto por Horsch (2000), detecta a diferença entre os perfis de um sinal oscilando por agarramento e controle agressivo utilizando distribuições de probabilidade e Choudhury e Thornhill (2004), propõem um método que utiliza bi-coerência para detectar agarramento identificando componentes não-gaussianos e não-lineares em séries temporais da variável controlada (PV) e saída de controle (CO).

## **B. Oscilação causada por sintonia**

O aspecto “negativo” na realimentação negativa é que sempre existe uma faixa de frequência em que os distúrbios são amplificados pela malha, ao invés de serem atenuados. A Figura 3.14 mostra a curva da função de sensibilidade típica de uma malha de controle para um processo com pólo dominante  $\tau$ , com tempo morto inferior à  $\tau/2$  e controlada por um PI sintonizado de maneira conservadora (constante de tempo em malha fechada com valor próximo do valor em malha aberta). É assinalado no gráfico o período crítico  $T_c^5$ , o período em que ocorre atenuação de -20dB (aproximado por  $50 T_c$ ), e a faixa entre o período em que os ciclos começam a ser amplificados ( $0.2T_c$ ) até o período em que ocorre atenuação de -3dB ( $5T_c$ ).

---

<sup>5</sup> Inverso da frequência de ressonância (ou  $2\pi/\omega_c$ )

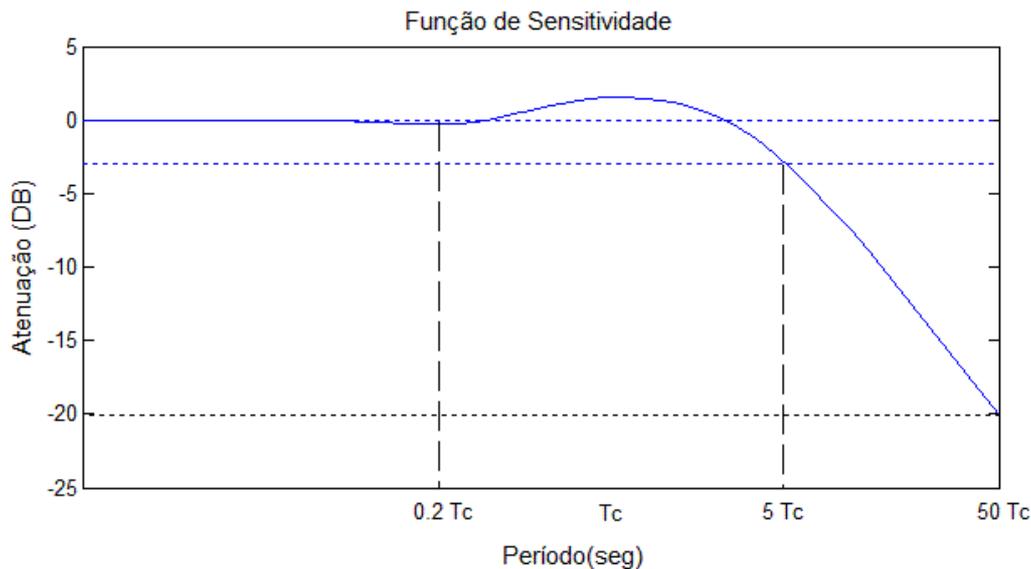


Figura 3.14 - Curva típica de resposta em frequência de uma malha de controle PI. (Os dados podem variar dependendo da ordem do processo e do projeto do controlador).

Distúrbios de carga de frequência relativamente baixa, maiores que  $50 T_c$ , são totalmente eliminados por um controlador com ação integral, já que ele possui elevado ganho em baixas frequências. Já os distúrbios de alta frequência, com períodos menores que  $0.2 T_c$  são, normalmente, atenuados por filtros passa-baixa naturais do próprio processo tais como tanques, capacitância de tubulações, dinâmica de sensores e atuadores, enquanto que aqueles ruídos introduzidos na medição e transmissão podem ser removidos por filtros convencionais instalados nos controladores. O maior problema são os distúrbios com períodos na faixa central (entre  $0.2 T_c$  e  $10 T_c$ ) que não são suficientemente atenuados, degradando o desempenho da malhas de controle. Sendo que, à medida que se aproximam do período crítico,  $T_c$ , são até mesmo amplificadas (Hägglund 1995; Miao e Seborg, 1999).

Além disso, se houver uma frequência em que a soma dos deslocamentos de fase dos elementos que compõem a malha (processo, atuador, sensor, controlador) for de  $180^\circ$ , e o produto do ganho desses elementos for próximo da unidade, então a malha irá apresentar uma oscilação sustentada, com um período próximo de  $T_c$ , independente da presença de perturbações persistentes. Isso é comum em malhas com sintonia "agressiva", ou seja, com ganhos excessivamente elevados. Outra característica deste tipo de oscilação é que ela tem sempre um formato de uma onda senoidal. No espectro de potência, tal sinal é caracterizado por um único pico.

Tais características (oscilação do tipo senoidal e com período próximo a  $T_c$ ) são indícios de que a oscilação é causada por sintonia. Este diagnóstico, porém, depende de uma estimativa da frequência crítica da malha  $\omega_c$ . Para isso é necessário um modelo aproximado para o processo e dados sobre o controlador. Com essas informações, pode-se traçar a função de sensibilidade da malha, e a partir dela, obter os dados mostrados na Figura 3.14.

Ho et al, 1998, apresentam uma expressão para o cálculo direto de  $\omega_c$ . Considerando um modelo para um processo (equação 9), controlado por um controlador PI que implementa a equação 10.

$$G_p(s) = \frac{k_p}{\tau s + 1} e^{-s\theta} \quad \text{equação (9)}$$

$$G_c(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad \text{equação (10)}$$

A frequência crítica  $\omega_c$  pode ser aproximada pela expressão:

$$\frac{1}{2}\pi - \frac{\pi}{4\omega_c T_i} + \frac{\pi}{4\omega_c \tau_1} - \omega_c \theta = 0 \quad \text{equação (11)}$$

Thornhill e Hägglund (1997), também citam que uma evidência de oscilação por sintonia é a identificação de um padrão elíptico no gráfico de espalhamento SP-PV. Este diagnóstico, entretanto, depende de dados em que há variações suficientes na referência de controle.

### C. Oscilação causada por carga

Conforme já mencionado, se uma oscilação é gerada num ponto do processo, ela pode se espalhar afetando diversas malhas de controle. Neste caso, diz-se que a malha oscila por carga e a intensidade com que isso ocorre depende de sua função de sensibilidade.

Não existe na literatura um método específico para diagnóstico de uma oscilação por carga. A alternativa, neste caso, é pelo método da exclusão. Se não foi diagnosticado nenhum problema com o atuador e a sintonia do controlador é considerada adequada, então, por exceção, a malha é diagnosticada como oscilando por carga.

A dificuldade, porém, é que quando o distúrbio possui um perfil senoidal, ele pode ser confundido com uma oscilação por sintonia. Este tipo de distúrbio é, geralmente, originado por falha em alguma outra malha de controle, porém também pode ser inerente ao processo, tal como em plantas em que um sistema de alimentação de material opera em bateladas cíclicas ou plantas com tanques, cujo nível é controlado por um sistema *on-off*. Nestes casos, uma maneira de se diagnosticar se uma oscilação é causada por carga ou por sintonia é chavear o controlador para modo manual. Se a oscilação persistir, então está comprovado que ela é causada por distúrbio externo. Já em malhas de controle que não podem operar em manual, uma forma de detectar se a oscilação é causada por carga é modificar a sintonia e verificar se o período da oscilação permanece constante.

A maneira correta de tratar distúrbios oscilatórios é, primeiramente, tentar descobrir quem é o causador da oscilação e, se possível, corrigir o problema. Ou seja, a

oscilação é combatida eliminando-se sua causa raiz. Porém, nos casos em que a oscilação é inerente ao processo, a única ação possível é atenuá-la ao máximo utilizando compensação direta ou aumentando a frequência de corte do controle realimentado. De fato, o que se faz neste caso é mover o efeito do distúrbio para uma variável de menor interesse.

#### **D. Oscilação devido a malhas interativas**

A interação entre malhas pode ser do tipo parcial ou completa. No primeiro caso, uma malha perturba uma segunda, mas essa segunda não pode perturbar a primeira. Num sistema interativo completo, a atuação de um controlador gera oscilação em outro e vice-versa, embora as malhas, individualmente, sejam estáveis quando operando uma de cada vez (Shinskey , 1998). Em outras palavras, as malhas possuem bom desempenho isoladamente, mas ao operar juntas, começam a interagir uma com a outra, podendo provocar oscilação em ambas.

A razão para esse fenômeno é que os dois controladores atuam num mesmo ponto do processo e com frequências de ressonância coincidentes. Por exemplo, uma malha de controle de pressão e vazão numa mesma linha, com tempos de acomodação similares. Se a interação não é muito severa, a estabilidade pode ser restaurada simplesmente desintonizando um dos controladores de maneira a “afastar” suas frequências de ressonância. Uma regra prática é selecionar qual das malhas deve ser mais rápida (de acordo com a estratégia de controle adotada), sintonizá-la para uma frequência de corte máxima. Em seguida, dessintonizar a malha mais lenta de maneira que sua frequência de corte seja de 3 a 5 vezes menor que da malha mais rápida. Em outros casos, no entanto, pode ser impossível operar com todos os controladores em automático ao mesmo tempo. Isso indica que a estrutura de controle é inadequada.

#### **E. Procedimento interativo para diagnóstico de causa raiz**

O diagnóstico da causa raiz da oscilação torna-se bastante simples se for possível observar o sistema após chavear uma ou mais malhas para a operação em modo manual.

A Figura 3.15 mostra um diagrama adaptado de Hägglund (1995) resumindo as etapas do teste de causa raiz. Inicialmente, o controlador da malha oscilatória a ser investigada é colocado em modo manual. Se o comportamento oscilatório cessar, está confirmado que a origem da oscilação é interna, podendo ser causada por não-linearidade no atuador ou por má sintonia do controlador. A distinção entre esses dois possíveis problemas pode ser realizada observando-se o gráfico de tendência ou o espectro de potência do sinal. Um perfil de oscilação aproximadamente senoidal, ou com um único pico no espectro, é indicativo de oscilação por sintonia. Caso haja

suspeita de que este problema é causado por interação com outra malha, então uma forma de averiguar é retornar o controlador para automático após chavear essa outra malha para manual. Se a oscilação não voltar, então é provável que haja um problema de interação.

No caso da malha persistir oscilando mesmo após o controlador ter sido chaveado para manual, então está confirmado que a oscilação é causada por um distúrbio oscilatório que a malha não consegue rejeitar. Uma exceção é apenas quando a saída de controle é referência de controle para uma malha interna que opera de maneira oscilatória (estratégia cascata). Por exemplo, uma válvula de controle com agarramento e com um posicionador com ação integral pode resultar num controle de posição oscilatório e, como consequência, causar oscilação na vazão controlada pela malha mestre.

Se a oscilação é realmente causada por carga, então o caminho é primeiramente tentar detectar a origem da oscilação realizando testes em outras malhas e tentar eliminar sua causa. Caso isso não seja possível, a oscilação somente poderá ser compensada usando *feedforward*, usando uma sintonia mais agressiva ou ainda por meio da inclusão de uma malha cascata que permita a rápida detecção e compensação do distúrbio.

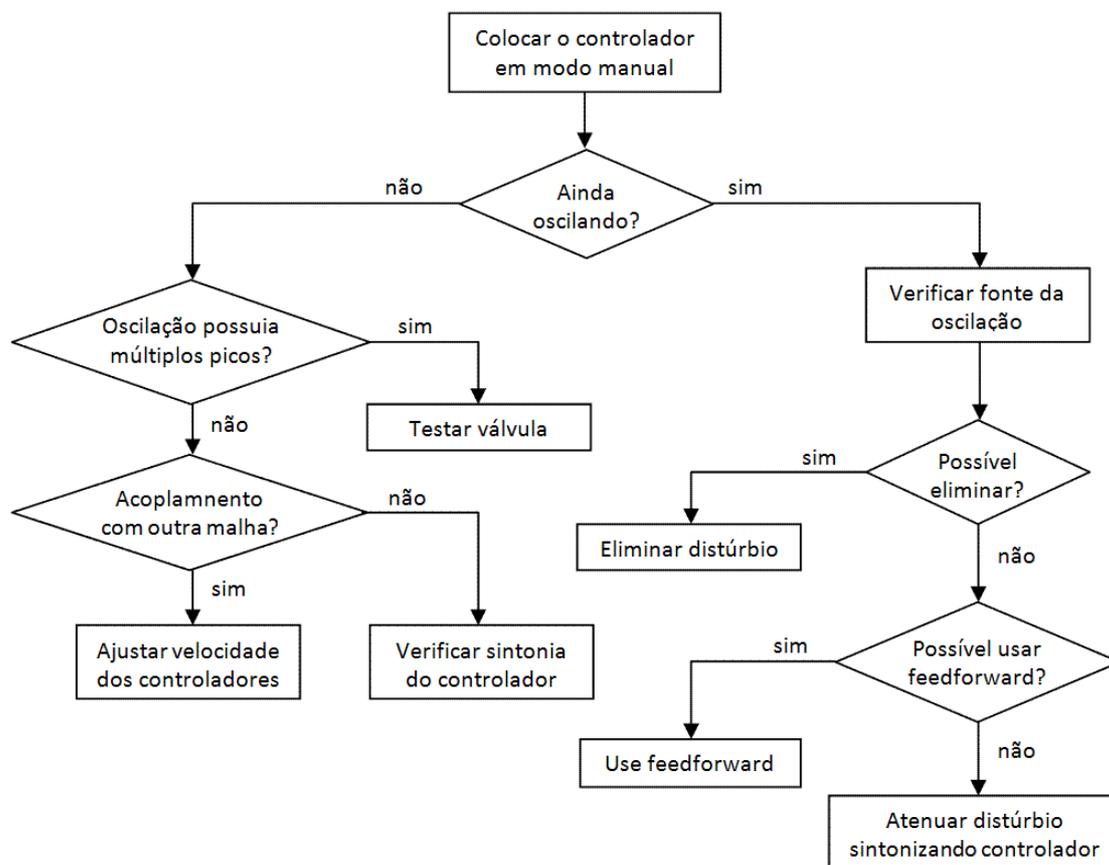


Figura 3.15 – Diagnóstico de oscilação com chaveamento para modo manual. Adaptado de Hägglund, 1995.

### 3.4 OTIMIZAÇÃO E AÇÕES CORRETIVAS (FASE III)

Neste trabalho, o termo otimização é utilizado com um enfoque de redução da variabilidade de malhas de controle. Conforme mencionado, a variabilidade de uma malha é o resultado da combinação de diversos distúrbios internos e externos e, por isso, o primeiro passo da otimização é identificar e eliminar a causa desses distúrbios.

Os distúrbios internos são eliminados pela correção da falha onde eles se originam. Já as perturbações externas dificilmente podem ser eliminadas, mas ações podem ser tomadas para minimizar seu impacto no processo. Distúrbios externos, e.g. podem ser atenuados por filtros naturais, tais como tanques reservatórios ou balões de gás. Mudanças de referência de controle podem ser suavizadas por meio de rampas ou filtros. Outras intervenções operacionais, tal como o acionamento de um conjunto de equipamentos, podem ter seu impacto minimizado se executadas seqüencialmente ao invés de serem executadas de uma única vez. Ainda assim, as malhas de controle sempre estarão sujeitas às perturbações e o principal papel de um sistema de controle regulatório é reduzir, por meio de ações corretivas, o impacto delas para variáveis de menor interesse, no caso, as variáveis manipuladas. A eficácia com que esta tarefa é realizada depende da estratégia de controle utilizada, das condições dos instrumentos e da correta implementação dos controladores.

Entre as ações executadas durante a otimização, destacam-se:

- Revisão da estratégia de controle: aplicação de técnicas de controle avançado (ex.: compensação direta, controle seletivo, controle em cascata, controle por faixa, etc.).
- Revisão de implementação: verificar se a implementação do controlador no CLP ou SDCD e das telas de operação das malhas estão corretas.
- Automatização das operações manuais: substituição de intervenções feitas manualmente por operadores, por operações feitas automaticamente pelo sistema de controle. Isso facilita a programação de técnicas compensatórias para reduzir o impacto dessas intervenções.
- Substituição e manutenção de sensores e atuadores.
- Sintonia de controladores: revisão da estrutura do controlador e otimização dos parâmetros de sintonia para melhoria de desempenho.

Em unidades pequenas, com até algumas dezenas de malhas, é interessante considerar a aplicação das ações corretivas a todas as malhas de controle. Já em unidades grandes, com centenas ou milhares de malhas, propõe-se que as ações sejam

priorizadas, de acordo com sua importância para o processo e de acordo com os diagnósticos obtidos na Fase II.

A sintonia de controladores é uma tarefa fundamental por oferecer ganhos apenas com a atualização de parâmetros. No entanto, o projeto de controladores requer um modelo matemático que descreva o comportamento dinâmico dominante do processo a ser controlado. Este pode ser obtido, basicamente, usando uma abordagem fenomenológica (ou *caixa branca*) ou por meio da análise da relação de causa e efeito entre a entrada e a saída do processo (modelo *caixa preta*). Existem técnicas para obtenção de modelos *caixa preta* tanto em malha fechada como em malha aberta. Uma discussão sobre modelagem matemática é apresentada em Aguirre (1999) e Coelho (2004).

Em comum, todas as técnicas de modelagem necessitam da prévia seleção de uma estrutura para o modelo e um bom planejamento para o experimento. Deve-se garantir que a coleta de dados seja confiável, com uma frequência de amostragem adequada e sem distorções causadas por algoritmos de compressão de dados, falseamento ou intervalos entre amostragens irregulares. Além disso, os testes devem ser realizados sob o mínimo de influência de perturbações e nos pontos de operação corretos, em que o processo costuma opera.

Nas subseções seguintes são apresentadas recomendações para o planejamento do experimento e para os testes em malha aberta e malha fechada.

---

#### 3.4.1. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Antes de iniciar os testes para modelagem matemática de uma malha de controle visando a sintonia de seu controlador, recomenda-se as seguintes considerações:

- a. Definir mecanismo de aquisição de dados e ferramentas para supervisão dos testes: Nos testes realizados nesta fase, algumas variáveis de processo precisam ser acompanhadas por meio de gráficos de tendência e registradas em arquivo de dados. Dados disponibilizados em estações de operação ou por meio de plataforma OPC podem ser utilizados para acompanhar o processo, porém nem sempre são adequados para a identificação, pois o período de amostragem pode ser insuficiente ou irregular. Neste caso, a solução pode ser o uso de um sistema de aquisição com conversor A/D conectado diretamente no painel de instrumentação ou cartões de E/S do CLP.
- b. Identificar variáveis para monitoramento: Buscar pelos diagnósticos de acoplamentos e correlação cruzada aquelas variáveis que podem afetar ou serem afetadas durante os testes. As mais críticas deverão ser

acompanhadas por meio de gráficos de tendência durante os testes. É interessante ajustar a escala do gráfico de tendência de forma que sua faixa corresponda aos limites toleráveis da variável durante os testes.

- c. Identificar controladores que devem ser mantidos em manual: Num conjunto de malhas acopladas, durante a realização de testes em uma malha, as demais malhas devem ser mantidas em manual. Exemplos, num esquema de controle em cascata, durante os testes de uma malha interna, todas as malhas externas a ela devem permanecer em manual. Durante testes em malhas de pressão, todas as malhas de vazão instaladas na mesma linha ou em linhas derivadas devem ser mantidas em manual.
- d. Definir ações de contingência para cada etapa do teste: Considerando a possibilidade de imprevistos, é recomendável pensar, antecipadamente, no procedimento mais adequado caso seja necessário abortar os testes.
- e. Levantamento dos pontos de operação da malha: Essa informação pode levar em conta a faixa de operação histórica da variável de processo (PV) e a saída do controlador, assim como os limites de alarme e limites toleráveis durante os testes.

Recomenda-se sumarizar os itens *a*, *b*, *c* e *d* no documento “Planejamento de Experimentos”, conforme modelo mostrado no anexo B, enquanto que o item *e* pode ser registrado no “Descritivo de Malhas”, vide Anexo A.

---

#### 3.4.2. TESTE EM MALHA FECHADA

Este teste possui a vantagem de ser realizado mantendo-se o controlador em automático (Teste em Malha Fechada), com menor risco para o processo que o teste em malha aberta. Possui, no entanto, algumas limitações, tais como:

- i. Muitos métodos de modelagem que funcionam em malha aberta, falham com dados em malha fechada devido à correlação entre o ruído não medido e a entrada (Forssell e Ljung, 1999);
- ii. O modelo do processo considera conjuntamente a dinâmica do processo, do atuador e do instrumento de medição. Isso dificulta a identificação de problemas, tais como filtro excessivo no transmissor, sobresinal no posicionador da válvula, histerese e não-linearidades.

Sugere-se, por outro lado, a utilização de dados em malha fechada para a avaliação do desempenho da malha usando índices determinísticos e para a identificação do ganho estático do processo, parâmetro útil no planejamento do teste em malha aberta. A seguir, um procedimento sugerido para este teste em malha fechada.

- a. Realizar mudança em degrau na referência de controle e, após estabilização, novo degrau em sentido oposto para o valor original. Caso não seja possível modificar a referência de controle, uma alternativa é realizar um teste que simule uma mudança de carga: O controlador é chaveado para manual, a saída de controle é modificada e, logo em seguida, o controlador é chaveado de volta para o modo automático.
- b. Depois de realizado o teste, medir o tempo de acomodação e o percentual de *overshoot* em cada degrau. Verificar simetria (resposta a um degrau equivale à resposta ao degrau em sentido oposto?).
- c. Fazer estimativa do ganho estático e verificar se o processo possui característica integradora, ou seja, se a variável manipulada retorna ao valor original após cada degrau.

#### 3.4.3. TESTE EM MALHA ABERTA

Já para o teste em malha aberta, usado para a modelagem matemática das dinâmicas dominantes e para quantificação da banda de ruído e das limitações do atuador, sugere-se a seguinte seqüência:

- a. Definir o tipo e a amplitude do sinal de “excitação”. Devido a sua praticidade, o teste com degrau na entrada é o mais comumente utilizado. Em outros casos, o teste com pulso ou duplo-pulso também são interessantes. A amplitude do sinal de teste deve ser suficientemente grande para obter uma resposta com uma boa relação sinal-ruído e com o mínimo de influência de perturbações de carga. Não deve, por outro lado, ser excessivo, para evitar que o processo saia da sua faixa de linearidade. O conhecimento prévio sobre o ganho estático do processo auxilia nessa definição.
- b. Chavear o controlador para manual.
- c. Remover filtro no transmissor.
- d. Aguardar até que o processo esteja operando em regime permanente e com o mínimo de influência de perturbações. Durante este período também é possível registrar o espectro de potência da variável controlada sem a influência da ação do controlador.
- e. Aplicar a seqüência de sinais de excitação para modelagem matemática. Caso a malha opere com válvula de controle, incluir algum teste para quantificar o agarramento e histerese da válvula, por exemplo, o teste mostrado na seção 3.3.4. O uso de um sinal de medição real da posição da válvula ou inspeção visual torna o teste mais confiável. No caso do atuador

se tratar de um motor ou bomba acionado por inversor de frequência, deve-se verificar as limitações de velocidade programadas. A Figura 3.16 mostra uma seqüência sugerida para os testes em processos auto-regulatórios. Outras seqüências são mostradas no Anexo B2.

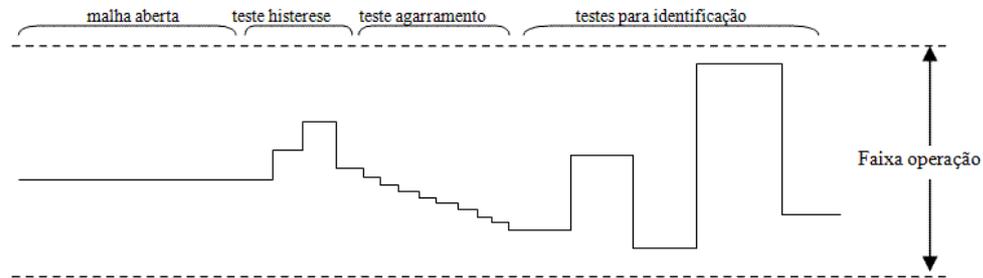


Figura 3.16 – Seqüência sugerida para testes em malhas abertas

Após a realização dos testes, modelos matemáticos para o processo são obtidos por meio de métodos de identificação. Vários deles são discutidos em Aguirre (2001). Com os testes realizados nos atuadores, é possível calcular qual é a variabilidade mínima causada por defeito no atuador.

Como forma de validar o modelo matemático obtido e, ao mesmo tempo, verificar a estrutura da função de transferência do controlador, sugere-se realizar uma simulação da resposta em malha fechada com os dados obtidos. O tempo de acomodação e percentual de overshoot devem ser compatíveis com aqueles observados durante os testes iniciais em malha fechada.

#### 3.4.4. REPROJETO DO CONTROLADOR

Como, nesta etapa, considera-se a disponibilidade de um modelo matemático para o processo, o reprojeto do controlador pode ser realizado utilizando algum método baseado em modelo e que atenda aos requisitos de desempenho traçados.

Após a escolha do método de sintonia, sugere-se o seguinte procedimento para a atualização do controlador:

- a. Verificar o tipo de algoritmo do controlador (paralelo, série ou dependente), as unidades utilizadas e os recursos disponíveis (transição suave, filtro de PV, etc.).
- b. A partir da função de transferência do processo, banda de ruído e espectro do distúrbio, definir valores ótimos para o tempo de amostragem e filtro da PV. Critérios para o dimensionamento de filtros são apresentados por Ruel, 2003.
- c. Definir frequência de corte e tempo de acomodação desejado verificando restrições de robustez e acoplamento com outras malhas. Sugere-se

sintonias conservadoras, por exemplo, com uma constante de tempo de malha fechada próximo do valor da constante de tempo em malha aberta (Olsen e Bialkowski, 2002).

- d. Se o objetivo da malha é regulação, mas, também, capacidade de atendimento a eventuais mudanças em degrau na referência de controle, então considerar o uso de um controlador com dois graus de liberdade. Isso pode ser realizado, simplificarmente, pré-processando o sinal da referência de controle para remoção de altas frequências.
- e. Após a atualização dos parâmetros de sintonia, verificar operação em automático. Caso a variabilidade do erro ainda seja excessiva, verificar a possibilidade do uso de compensação direta. Caso não seja possível, reprojeter o controlador com uma frequência de corte menor. Se o desempenho ainda não for satisfatório, uma nova estratégia de controle deverá ser proposta.

### 3.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Na metodologia para auditoria proposta, a identificação de acoplamentos entre malhas de controle é colocada como passo essencial para identificar quais são as causas raízes de oscilações que se propagam pelo processo, aumentando a variabilidade das malhas de controle.

Apresentaram-se duas metodologias que podem ser utilizadas de maneira complementar. Uma delas, bem difundida na literatura científica, propõe detectar as malhas oscilatórias, processo que pode ser realizado automaticamente com métodos citados na seção 3.3.2. Em seguida, a causa da oscilação é diagnosticada utilizando métodos específicos para diferentes tipos de problemas, conforme citados na seção 3.3.4.

Esta metodologia, porém, fica limitada diante da complexidade de um sistema de controle em que as malhas interagem entre si. Diferentes causas de oscilação se sobrepõem e os métodos em geral não estão preparados para lidar com situações onde as malhas de controle oscilam com múltiplas causas.

Daí a importância da utilização, em paralelo, dos métodos de Análise de Ciclos Comuns e ACP Espectral, citados na seção 3.3.3. Estas ferramentas são capazes de detectar acoplamentos com múltiplas causas, e fornecem informações sobre em qual faixa de frequência os acoplamentos ocorrem com maior intensidade. A partir dessas informações, os métodos para detecção e diagnóstico de oscilação podem ser aplicados separadamente para cada uma dessas faixas de frequências se os sinais forem previamente tratados por filtros capazes de evidenciar apenas os efeitos de uma das causas da oscilação.

Conforme foi mostrado, as vantagens desses métodos que operam no domínio da frequência são notáveis na aplicação em séries oscilatórias. No entanto, para acoplamentos não-oscilatórios é preferível a utilização das técnicas no domínio do tempo, tal como função de correlação cruzada. A razão é que distúrbios dessa natureza normalmente apresentam-se como séries não-estacionárias, por exemplo, mudanças de patamar. No domínio da frequência, tais distúrbios possuem boa parte do espectro concentrado em baixas frequências sem nenhuma associação com o momento em que eles ocorrem no domínio do tempo, o que torna difícil a distinção entre eles.

## CAPÍTULO 4: AUDITORIA DAS MALHAS DE CONTROLE DE UMA CALDEIRA – ESTUDO DE CASO

Apresenta-se um estudo de caso de Auditoria das Malhas de Controle, aplicado a uma usina termelétrica, conforme metodologia proposta no capítulo 3. A aplicação de grande parte das técnicas discutidas é exemplificada, utilizando dados reais deste processo industrial.

Uma termelétrica possui malhas de controle distribuídas ao longo de praticamente todo o processo, porém este trabalho focou na unidade de geração de vapor, a Caldeira. Além de concentrar boa parte das malhas, esta área pode ser considerada uma unidade autônoma, responsável por suprir a demanda de vapor de seu único cliente, a turbina.

O capítulo é dividido em seis subseções, as três primeiras correspondem ao estudo do processo e levantamento de campo, primeira fase do procedimento de auditoria, enquanto que as subseções 4.4, 4.5 e 4.6, cobrem as fases II, III e IV, respectivamente.

### 4.1. A CALDEIRA E SEU SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

A caracterização física da caldeira e o levantamento de informações sobre seu sistema de controle e sua operação foram realizados a partir de documentos fornecidos pela CEMIG e a partir da consulta a trabalhos de pesquisa realizados anteriormente na usina. Entre os documentos consultados, pode-se citar: trabalhos de mestrado e graduação (Maciel, 2004; Gomes, 2008; Caldas, 2005), fluxogramas do processo, diagrama de instrumentação, telas de supervisor, programa do SDCD, descritivo funcional das malhas e manuais de operação. Além disso, diversas visitas realizadas à usina e conversas com operadores foram essenciais para obter informações adicionais e esclarecimento de dúvidas.

#### 4.1.1. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO

A caldeira em estudo é parte da usina termelétrica do Barreiro (UTE/Barreiro), localizada nas dependências da siderúrgica Vallourec & Mannesmann Tubes – V&M do Brasil S.A e operada pela CEMIG. Uma usina termelétrica (UTE) tem como finalidade a conversão da energia química de combustíveis em energia elétrica e/ou calor para ser utilizado em diversas operações do processo. Este processo de conversão opera em um ciclo convencional de Rankine, em que se emprega uma caldeira para gerar vapor d'água, seguida de uma turbina a vapor, condensador, regeneradores e bombas de circulação de condensado.

A UTE/Barreiro, especificamente, funciona num sistema de co-geração, utilizando como combustível o gás de alto do forno e o alcatrão, que são resíduos do processo siderúrgico da V&M e, por sua vez, fornecendo toda a energia elétrica produzida para unidades da própria siderúrgica. Cerca de 30% da demanda da siderúrgica é suprida pela usina térmica, sendo o restante coberto pela rede da concessionária.

A Figura 4.1 mostra um fluxograma de engenharia simplificado do processo. Na caldeira, o calor produzido pela combustão dos gases na fornalha é transferido para o fluido de trabalho (água) armazenado no tubulão. Como resultado, tem-se o vapor, que após ser superaquecido, é conduzido à turbina. A turbina funciona como um motor térmico, em que o vapor sofre uma expansão isentrópica exercendo uma força sobre as pás rotativas. Assim, esta energia potencial do vapor é transformada em energia mecânica de rotação que é, por sua vez, usada para acionar o gerador elétrico.

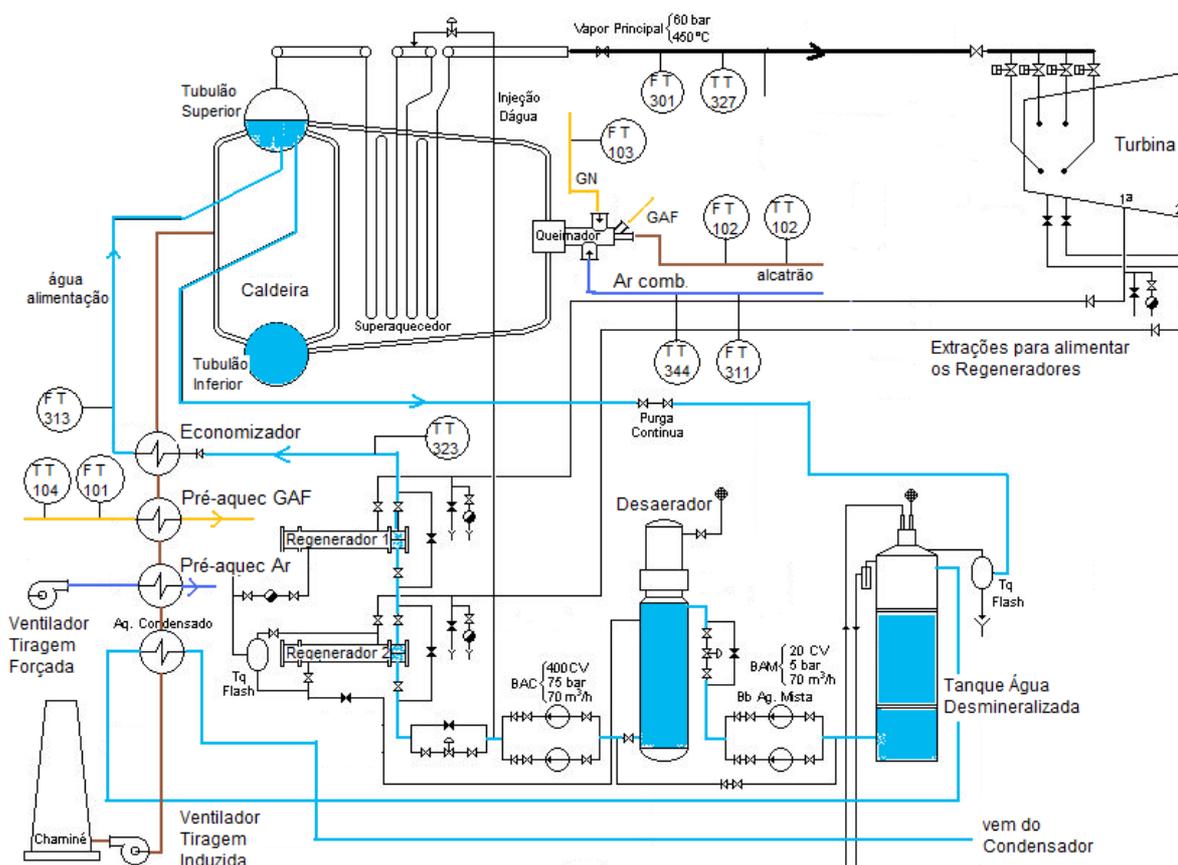


Figura 4.1 – Fluxograma simplificado da caldeira de uma usina termelétrica. Baseado em fluxograma fornecido pela UTE/Barreiro

Enquanto isso, o vapor de exaustão da turbina passa pelo condensador e torre de resfriamento, onde é convertido em líquido saturado. E o ciclo se fecha quando o condensado acumulado na parte inferior do condensador é bombeado para o sistema de aquecimento regenerativo, através da bomba de condensado (BAC) e, em seguida, este líquido comprimido retorna para a caldeira.

A caldeira da UTE Barreiro é do tipo aquatubular, ou seja, em sua fornalha, o vapor é produzido dentro de tubos, enquanto que os gases de combustão circulam externos a eles. Resumidamente, a fornalha consiste numa câmara com queimadores, em que ar e combustíveis são misturados e queimados. Ao entrar em contato com as paredes tubulares de um sistema de água, os gases da queima transferem parte do calor para a água, fazendo com que ela aqueça e vaporize (Maciel, 2004).

Fabricada pela EQUIPALCOOL, modelo V2GAF/60, tem capacidade de produção de cerca de 60 ton/h de vapor de água, a 60 bar, superaquecido a 450 °C. É provida de economizador, pré-aquecedor de ar e GAF (gás de alto forno), selos hidráulicos para GAF, e chaminé. Além disso, a caldeira é de circulação natural, e trabalha com fornalha balanceada (tiragem balanceada do ar e gases de combustão), e foi projetada especialmente para queima de combustíveis líquidos e gasosos. Seus queimadores podem ser alimentados simultaneamente com gás de alto forno (GAF), gás natural (GN) e alcatrão.

Conforme ilustrado na Figura 4.1, os principais componentes da caldeira da UTE Barreiro são:

- Tubulão superior, ou tambor separador: é um tanque cilíndrico que recebe a água de alimentação. Tem como função acumular um volume de água para acomodar variações de carga e separar o vapor do líquido, permitindo que apenas vapor saturado saia para o superaquecedor;
- Tubulão inferior: tanque cilíndrico de aço, de menor diâmetro que o tubulão superior, com a função de distribuir a água pelos tubos da caldeira e garantir a pureza do vapor mediante extrações de sólidos (purgas);
- Paredes de água: tubos que interligam os tambores, superior e inferior, revestindo a parte interior das paredes da fornalha, onde ocorrem as trocas de calor e a conseqüente mudança de fase da água líquida para vapor. A troca de calor ocorre por radiação e convecção com os gases de combustão.
- Fornalha: local da caldeira onde acontece a queima do combustível. Possui um conjunto de queimadores que introduzem a mistura de combustível e ar na câmara de combustão. A caldeira possui um queimador projetado com caracol para queima de GAF, lança para queima de alcatrão e anel para queima do gás natural como combustível reserva.
- Superaquecedor: é um trocador de calor localizado após a câmara de combustão que tem a função de superaquecer o vapor proveniente do tubulão superior. Os tubos do superaquecedor trabalham em condições mais severas que os demais tubos da caldeira, uma vez que a capacidade de refrigeração do vapor é menor que a da água. Além disso, ele recebe o

fluido de trabalho, o vapor, em sua maior temperatura. Na UTE Barreiro, o superaquecedor possui duas partes, sendo uma convectiva e uma radiante. A primeira etapa é localizada no duto vertical de saída dos gases em que predomina a troca de calor por convecção e uma etapa final na saída da fornalha, onde os tubos entram em contato direto com as chamas, prevalecendo à troca por radiação.

- Ventiladores de ar: são responsáveis pelo suprimento de ar necessário para o processo de combustão. Os ventiladores também são usados para a movimentação dos produtos da combustão através das superfícies de transferência de calor até a sua saída pela chaminé. São dois ventiladores centrífugos, controlados por inversores de frequência. Um de tiragem forçada (soprador) instalado no início da tubulação de ar e outro de tiragem induzida (exaustor) instalado na base da chaminé. Este tipo de configuração é denominado tiragem balanceada.

As maiores perdas de calor em caldeiras resultam da saída de gases quentes pela chaminé. Assim, para melhorar a eficiência energética, Economizadores e Pré-Aquecedores são utilizados para recuperar parte deste calor, transferindo-o para a água de alimentação e para os gases de combustão, respectivamente. O Pré-aquecedor de ar de combustão, por exemplo, consiste num trocador de calor em que os gases provenientes da combustão circulam pelo interior dos tubos e o ar externamente.

O sistema também conta com um par de Regeneradores para pré-aquecimento da água de alimentação. Neste equipamento, um motor faz girar uma superfície de transferência de calor entre a água e vapor superaquecido extraído da turbina. Diferentemente do Economizador, em que o objetivo principal é recuperar o calor perdido pela chaminé, o objetivo do regenerador é garantir uma maior temperatura da água (superior a 200 °C) para melhorar a estabilidade da caldeira.

Completando a descrição do sistema, tem-se o sistema responsável por tratar e bombear a água de alimentação da caldeira. É um sistema que opera em circuito fechado, com reposição de perdas a partir de um tanque reservatório com água desmineralizada. A razão da retirada de minerais é evitar a formação de depósito de sólidos na caldeira e nas tubulações. A água também passa permanentemente por um “Desaerador Térmico”, cujo objetivo é retirar o ar da água e evitar corrosão devido à presença de oxigênio com água pouco alcalina.

## 4.1.2. LISTA DE MALHAS DE CONTROLE E OUTRAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

A Tabela 4.1 relaciona as malhas de controle consideradas para a validação, com informações sobre seus sensores e atuadores, bem como suas faixas de medição/operação. Destaca-se que os atuadores são do tipo válvula proporcional ou motores acionados por inversores de frequência. Inversores geralmente possuem limitação de *variação* de velocidade (rampas de aceleração), que podem inserir não-linearidade nas malhas. Nas tubulações com diâmetros grandes, caso da linha de GAF e Ar de Combustão, são utilizados válvulas do tipo borboleta, por ser a opção mais viável para este diâmetro. Porém, esta é uma opção ruim para controle por ter uma curva estática bastante não linear nas extremidades.

Tabela 4.1 – Relação das malhas de controle e dados sobre instrumentação

TAG	Descrição	Modo de operação Normal	PV min	Pv max	Unid. Eng.	Sensor	Atuador	Comentários
PIC341	Pressão do Ar de Combustão	Local	0	750	mmH2O	Diafragma Capacitivo c/ garrafa de proteção	Ventilador com controle de velocidade por inversor	Sensor instalado à cerca de 10m das tomadas
FIQ311	Vazão do Ar de Combustão	Cascata	0	50000	Nm3/h	Tipo venturi instalado na sucção de ar do ventilador	Ventilador com velocidade controlada por inversor de frequência	Tubulação de 60". Necessita revisão no cálculo de compensação temp./pressão
PIC135	Pressão do Ar de Atomização	Local	0	5	Bar	Diafragma Capacitivo	Válvula esfera	
PIC137	Pressão Bombeamento Alcatrão	Local	0	10	Bar	Diafragma Capacitivo	Bomba com velocidade controlada por inversor de frequência	
FIQ103	Vazão de Alcatrão	Local	0	1500	kg/h	Coriolis Mássico	Válvula tipo gaiola com retorno de posição	
PIC342	Pressão do Gás de Alto Forno	Local	0	1200	mmH2O	-	Válvula borboleta com retorno de posição	Sensor instalado à cerca de 10m das tomadas
FIQ101	Vazão do Gás de Alto Forno	Cascata	0	70000	Nm3/h	Anubar instalado 20m antes da válvula	Válvula borboleta pneumática com retorno de posição	Tubulação de 60"
FIQ102	Vazão de Gás Natural	Cascata	0	5400	Nm3/h	Vórtex, instalado à 4m. antes da válvula	Válvula esfera Valtek	Tubulação de 5". Controle de pressão por válvula auto-pilotada entre o sensor e o atuador
LIC302	Nível Água no Tubulão	Local	0	100	%	Pressão diferencial em coluna com filtro natural	Malha mestre da alimentação de água	A medição é realizada por dois sensores LT302A e LT302B
FIQ313	Vazão de Água Alimentação	Cascata	0	108000	m3/h	Placa de Orifício	Válvula	
PIC313	Pressão Água Alimentação	SP Remoto	0	75	Bar	Diafragma Capacitivo	Bomba com velocidade controlada por inversor	
PIC322	Pressão no Superaquecedor	Local	0	80	Bar	Diafragma Capacitivo c/ garrafa de proteção	Malha mestre do sistema de combustão	Sensor instalado à cerca de 10m das tomadas
PIC323	Pressão Câmara de Queima	Local	-30	30	mmH2O	Diafragma Capacitivo	Exaustor com velocidade controlada por inversor	
TIC327	Temperatura no Super Aquecedor	Local	0	600	°C	Termopar	Válvula	

Em relação aos sensores, destaca-se a posição onde estão instalados. A medição de vazão de GAF está instalada a 20 metros a montante da válvula e no caso

dos medidores de pressão existe uma longa distância, superior a 10 metros, entre o sensor e as tomadas de pressão, além de reservatórios protetores instalados neste caminho. Estes fatores inserem atrasos dinâmicos na medição (atraso de transferência de fluido), o que também é ruim para o controle.

Outras variáveis de processo foram selecionadas para serem monitoradas e avaliadas durante a auditoria. Algumas são usadas para compor o cálculo de eficiência e qualidade de geração, outras para medição de distúrbios externos e diagnósticos de atuadores. A relação dessas variáveis é mostrada na Tabela 4.2.

*Tabela 4.2 – Variáveis monitoradas durante a auditoria*

Tag	Descrição	Utilização
ZI101	Retorno de posição da válvula FCV101	Diagnóstico de falha na válvula
ZI103	Retorno de posição da válvula FCV103	Diagnóstico de falha na válvula
ZI311	Retorno de posição da válvula FCV311	Diagnóstico de falha na válvula
ZI342	Retorno de posição da válvula PCV342	Diagnóstico de falha na válvula
AIC301	Medição de concentração de oxigênio na chaminé	Estequiometria
FY301	Vazão de vapor na saída da caldeira	Cálculo de eficiência energética e qualidade da geração
PI101	Pressão do GAF na saída do Gasômetro	Distúrbios externos
TI323	Temperatura da água após regeneradores	Condição operacional
TI331	Temperatura da água na entrada da caldeira	Cálculo de eficiência energética
TI104	Temperatura do GAF	Cálculo de eficiência energética
TI102	Temperatura do GN	Cálculo de eficiência energética
TI601	Temperatura do vapor na entrada da turbina	Cálculo de eficiência energética e qualidade da geração
TI329	Temperatura no canal de fumos	Perdas Térmicas
PCI_GN	Poder calorífico do GN	Distúrbio externo e cálculo de eficiência energética
PCI_GAF	Poder calorífico do GAF	Distúrbio externo e cálculo de eficiência energética
PCI_ALC	Poder calorífico do alcatrão	Distúrbio externo e cálculo de eficiência energética
POT_GER	Potência gerada pela usina	Qualidade de geração
POT_GER_REF	SP para geração da usina	Qualidade de geração

#### 4.1.3. PRINCIPAIS CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Foram identificadas na caldeira condições operacionais relacionadas com sua carga, com sua potência gerada, com os tipos de combustíveis a serem queimados e com o estado de funcionamento de alguns equipamentos. O conhecimento dessas condições é importante durante o planejamento dos testes para modelagem matemática das malhas de controle.

Uma dessas condições operacionais é determinada pela referência de potência elétrica a ser gerada pela usina. O valor dessa variável determina o ponto de operação da maioria das malhas de controle da caldeira, tais como vazões de combustíveis, de ar de combustão e de água de alimentação. E a variação nas vazões, por sua vez, causa impacto em seus respectivos controles de pressão.

Outra importante condição operacional é a escolha do tipo e das proporções de combustíveis a serem queimados. O ponto de operação das malhas do sistema de

combustão e o controle estequiométrico dependem dessa combinação. A Tabela 4.3 relaciona as combinações mais comuns e os níveis de vazão médios de combustíveis em cada uma delas. O modo mais comum é o segundo, com o GAF sendo consumido no máximo de sua disponibilidade, enquanto o alcatrão é queimado numa vazão constante de 500 kg/h. O GN é utilizado como complemento, quando a disponibilidade dos outros combustíveis não é suficiente para atender à demanda térmica ou, de maneira arbitrária, quando a gerência de operação da CEMIG julgar ser esta a melhor condição custo/benefício, considerando-se as regras de contrato de concessão de energia com a V&M.

*Tabela 4.3 – Combinações típicas de mistura de combustível utilizadas*

Modos	GAF (Nm <sup>3</sup> /h)	Alcatrão (kg/h)	GN (Nm <sup>3</sup> /h)
1 - Somente GAF	38000	X	X
2 - GAF + Alcatrão	38000	500	X
3 - GAF + Alcatrão + GN	28000	500	1200
4 - GAF + GN	20000	X	1500
5 - GN + Alcatrão	X	500	2500

#### 4.1.4. ASPECTOS ECONÔMICOS E DE QUALIDADE

O desempenho de uma caldeira pode ser avaliado, basicamente, pela qualidade do vapor produzido e pela sua eficiência na conversão de energia. Produzir com qualidade significa atender à demanda de carga em tempo hábil, gerando um vapor com pressão e temperatura dentro de limites toleráveis e adequados. Já a eficiência de conversão está relacionada com o custo de operação da caldeira. O monitoramento contínuo desses dois aspectos será discutido nas subseções seguintes.

Outros aspectos importantes são a disponibilidade de equipamentos e os custos com paradas. Este trabalho, no entanto, não aborda a análise dos mesmos.

##### Eficiência energética

A eficiência de uma caldeira, de forma simplificada, é determinada pelo percentual de calor liberado pelos combustíveis que é transferido para a água enquanto o vapor é gerado. No ponto de vista da eficiência da queima, um cálculo mais acurado deve também levar em conta os créditos de calor nos fluídos que entram na caldeira (água, combustíveis e ar de combustão), antes desses passarem pelos economizadores ou pré-aquecedores.

A Figura 4.2 mostra a caldeira da UTE do ponto de vista de fluxos de energia, segundo modelo de cálculo de eficiência desenvolvido por Braga et al, 2006. À esquerda, são mostrados os fluxos de entrada de combustível (91, 92 e 93), abaixo os fluxos de entrada de água e ar (51 e 52), à direita os fluxos de saída de vapor (11 e 12) e, por fim, os fluxos de perdas de calor pelo canal de fumos (13), pelos drenos do tubulão (14) e as demais perdas de calor para o ambiente externo (10).

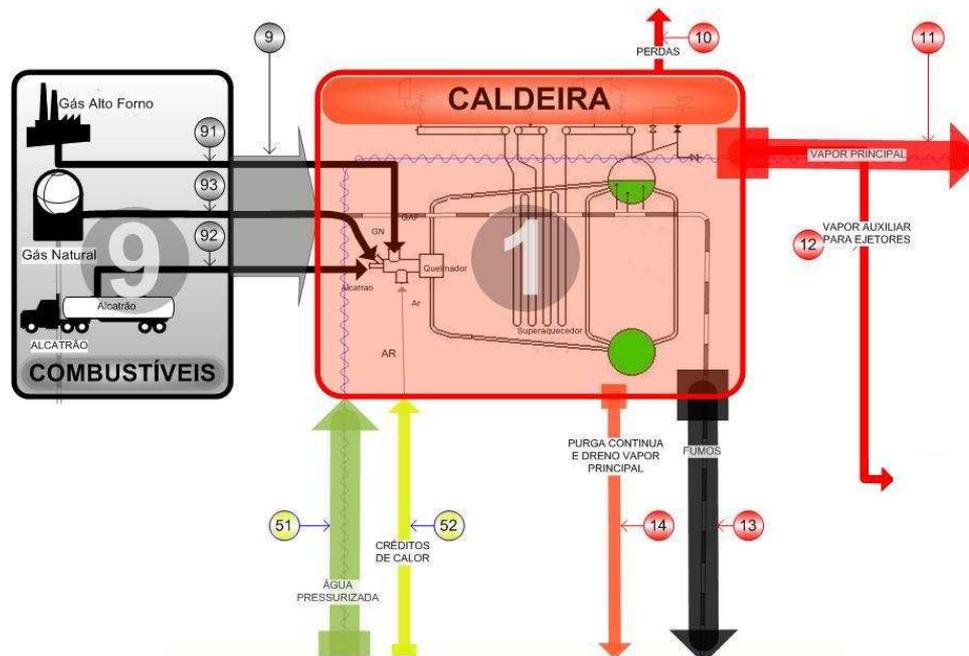


Figura 4.2 – Fluxos de energia numa caldeira. FONTE: Braga et al, 2006

O cálculo utilizado neste trabalho foi uma adaptação da equação utilizada no SECE, ferramenta desenvolvida pelo LVAS/UFMG em parceria com a CEMIG para cálculo da eficiência energética da caldeira em tempo real (Caldas, 2005; Araújo, 2004). Ele leva em conta a razão entre os créditos de calor (energia transportada por unidade de tempo) que saem da turbina na forma de energia útil ( $w_{11}$  e  $w_{12}$ ) e os créditos de energia (kj/h) adicionados na caldeira ( $w_{91}$ ,  $w_{92}$ ,  $w_{93}$ ,  $w_{51}$  e  $w_{52}$ ) somados com a energia contida nos combustíveis, indicada por  $w_9$ . Este cálculo é mostrado na equação 1

$$\eta = \frac{100 (w_{11} + w_{12})}{w_9 + w_{91} + w_{92} + w_{93} + w_{51} + w_{52}} \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

$$w_{11} = \text{vazão de vapor} \times \text{entalpia de vapor}$$

$$w_{91} = \text{vazão de GAF} \times \text{temperatura do GAF} \times \text{calor específico do GAF}$$

$$w_{92} = \text{vazão de alcatrão} \times \text{temperatura do alcatrão} \times \text{calor específico do alcatrão}$$

$$w_{93} = \text{vazão de GN} \times \text{temperatura do GN} \times \text{calor específico do GN}$$

$$w_{51} = \text{vazão de água} \times \text{temperatura da água} \times \text{calor específico da água}$$

$$w_{52} = \text{vazão de ar de combustão} \times \text{temperatura do ar} \times \text{calor específico do ar}$$

$$w_9 = (\text{vazão de GAF} \times \text{PCI do GAF} \times \text{densidade do GAF}) \\ + (\text{vazão de GN} \times \text{PCI do GN} \times \text{densidade do GN}) \\ + (\text{vazão de ALC} \times \text{PCI do ALC} \times \text{densidade do ALC})$$

Segundo Dukelow, 1991, a eficiência da caldeira pode ser melhorada com as seguintes ações: (1) modificações estruturais (utilização de mais pré-aquecedores para recuperar o calor perdido pela chaminé); (2) manutenção dos equipamentos (limpeza dos tubos da caldeira, vedação contra infiltrações); (3) operação com a caldeira na

capacidade que corresponde ao seu ponto de eficiência máxima ou (4) melhora do funcionamento do sistema de combustão (relação ar/combustíveis).

Entre as ações citadas, a última é a que pode ser explorada durante um trabalho de otimização de malhas de controle. Um bom funcionamento do sistema de combustão depende, entre outras coisas, da manutenção da relação estequiométrica da queima, de um bom ajuste do fator de excesso de ar e de uma estratégia para compensação de variações do PCI (Poder Calorífico Inferior) dos combustíveis.

#### Qualidade na geração da energia

A UTE/Barreiro opera numa configuração convencional Caldeira-Segue-Turbina, ou seja, a turbina é o elemento mestre e a caldeira é o elemento escravo. Nessa configuração, é estabelecido um valor de referência para geração de energia e, para atender a essa demanda, o controle da turbina mantém regulação de velocidade das pás e atende ao torque exigido no eixo do gerador, atuando na abertura das válvulas de alimentação de vapor do equipamento. A mudança de abertura destas válvulas causa impacto imediato na pressão do tubulão superior que, por sua vez, é regulada pelo controle da caldeira. Essa regulação é feita, automaticamente, atuando-se na taxa de combustão e na taxa de alimentação de água, proporcionalmente à nova demanda.

Portanto, o tempo necessário para uma usina atender a uma nova demanda de geração depende do tempo de resposta da caldeira a uma mudança de carga. Mas mesmo quando esta demanda é constante, distúrbios produzidos pelo sistema de combustão ou alimentação de água, tais como variações no poder calorífico do combustível ou problemas de regulação, afetam o balanço térmico da caldeira, produzindo variações na pressão e, conseqüentemente, variações na potência gerada.

Neste trabalho, apenas os problemas relacionados com o sistema de controle regulatório são considerados. A variabilidade da geração é correlacionada com a variabilidade da pressão do tubulão superior e da temperatura do vapor.

---

#### 4.1.5. SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E RECURSOS UTILIZADOS PARA A AUDITORIA

O sistema de automação da usina utiliza equipamentos de diferentes fornecedores. O sistema principal, responsável pela supervisão e operação da planta e pelo controle da caldeira é um SDCD (Sistema Distribuído de Controle Digital) fornecido pela Yokogawa, modelo CS3000. Este sistema é composto por duas estações de operação (HIS), instalados na sala de controle e interligadas entre si e com os módulos de aquisição e controle por uma rede de comunicação proprietária com redundância, padrão VL-NET, da própria Yokogawa. Os dois módulos de aquisição e controle, denominados PFCS1 e PFCS2 são compostos por um controlador com redundância (*hot stand by*) e módulos E/S analógicos e digitais para interligação com os instrumentos de campo.

O controle dos queimadores é realizado por um equipamento dedicado, fornecido pela PILZ, enquanto que o controle da turbina e condensador é realizado por um CLP da Rockwell, modelo SLC500. Estes dois equipamentos se comunicam com o SDCD da Yokogawa, via rede serial RS232.

A Figura 4.3 mostra um esquema da arquitetura de controle. Além do sistema de controle citado, existe uma terceira máquina, denominada SECE, onde é executado o aplicativo para o monitoramento *on-line* da eficiência energética da usina. Esta máquina se comunica via Ethernet com a máquina HIS-2, onde foi instalado um servidor OPC, que disponibiliza, para leitura, todas as variáveis do sistema Yokogawa.

Para o trabalho de auditoria, o software Ellipse®, instalado na máquina do SECE, foi utilizado como plataforma para aquisição de dados (via conexão OPC) e para historiar todos os dados relativos às malhas de controle.

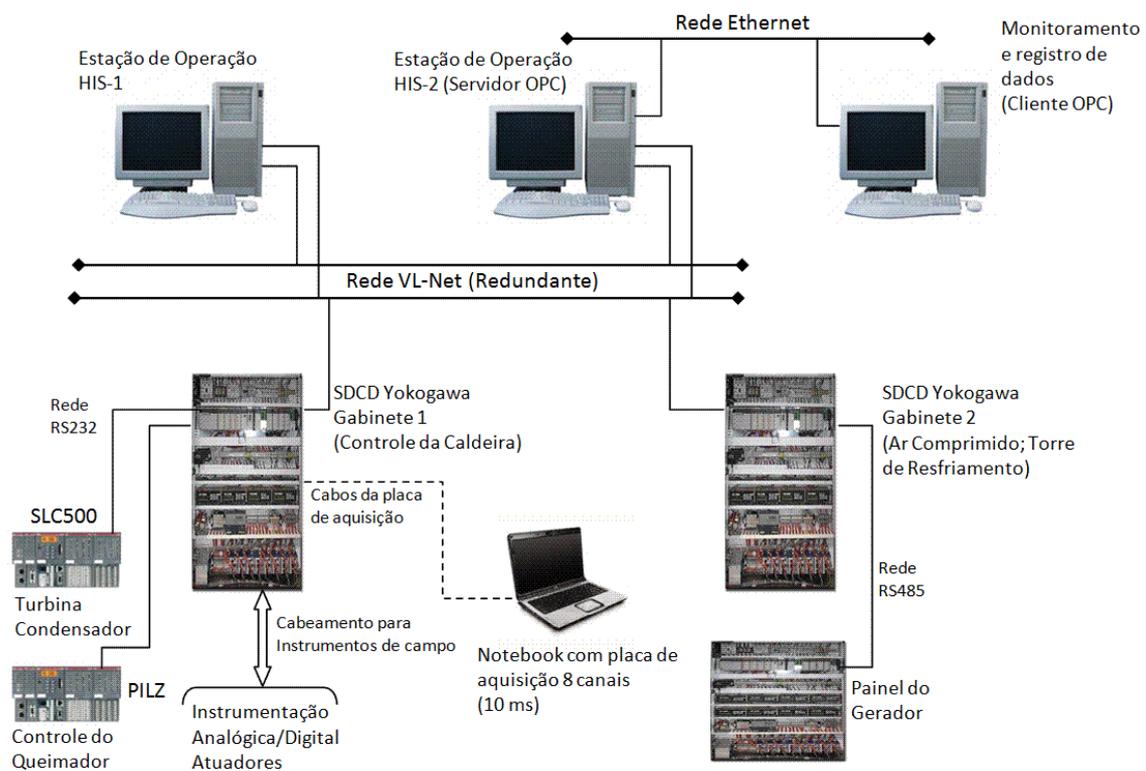


Figura 4.3- Arquitetura do Sistema de Automação da usina

Como a auditoria envolve a modelagem matemática do processo, uma questão importante é a forma como as informações são coletadas. Acompanhando a Figura 4.3, observa-se que uma informação proveniente de um instrumento de medição (sinal 4-20 mA), após passar pelo módulo de aquisição do CS3000, onde é digitalizada, precisa ainda passar pela rede VS-NET e pela rede Ethernet até chegar a uma aplicação no SECE. Neste caminho, os dados, que já carregam ruídos de transmissão, sofrem efeito de sub-amostragem, já que existe limitação na taxa de transferência de dados na rede VL-NET e na conexão OPC, sofrem efeito de falseamento devido à presença de

componentes de alta frequência e ainda sofrem efeito de atrasos de transporte, devido ao fato das frequências de amostragens não serem múltiplas uma das outras.

Devido a essas questões, os dados coletados na máquina SECE são impróprios para tarefas de modelagem, principalmente para variáveis relacionadas com processos de dinâmica rápida. Para contornar este problema, durante os testes para modelagem de malhas mais críticas (pressão e algumas vazões), a coleta de dados foi realizada com um *notebook* equipado com placa de aquisição com conversor A/D com resolução de 12 bits da National Instruments.

## 4.2. REVISÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

O sistema de controle de uma caldeira tem como principais objetivos: regular a pressão e temperatura do vapor produzido, garantir que o nível de água no tubulão superior permaneça entre limites seguros e garantir que a queima dos combustíveis ocorra de maneira segura e eficiente. Diversos outros controles são realizados, mas podem ser considerados como suportes a estes controles principais.

Nesta subseção, apresentam-se cada um destes controles e, baseado numa extensa revisão bibliográfica e em estudos realizados na própria caldeira, são apresentadas alternativas que se mostram bem sucedidas para cada caso. É importante esclarecer que não fez parte deste trabalho a implementação das modificações sugeridas.

### 4.2.1. DESCRIÇÃO GERAL DAS MALHAS DE CONTROLE DE CALDEIRA

O sistema de controle regulatório da caldeira é composto por 15 malhas que são mostradas na Figura 4.4 num esquema simplificado. Elas podem ser divididas em dois grupos principais:

- Malhas do circuito de água: Composto por LIC302 (nível do tubulão superior), FIQ313 (vazão de alimentação), PIC313 (pressão de bombeamento de água) e TIC327 (temperatura de saída do vapor superaquecido);
- Malhas do sistema de combustão: Composto por PIC323 (pressão no interior da câmara de combustão), AIC302 (concentração de O<sub>2</sub> na chaminé), PIC322 (pressão no tubulão superior) e mais oito malhas de controle de vazão/pressão de combustíveis e ar de combustão.

Nesse contexto, a caldeira pode ser vista como um enorme trocador de calor, que transfere energia do sistema de combustão para o circuito de água. Nas subseções seguintes, cada malha de controle é descrita em detalhes.

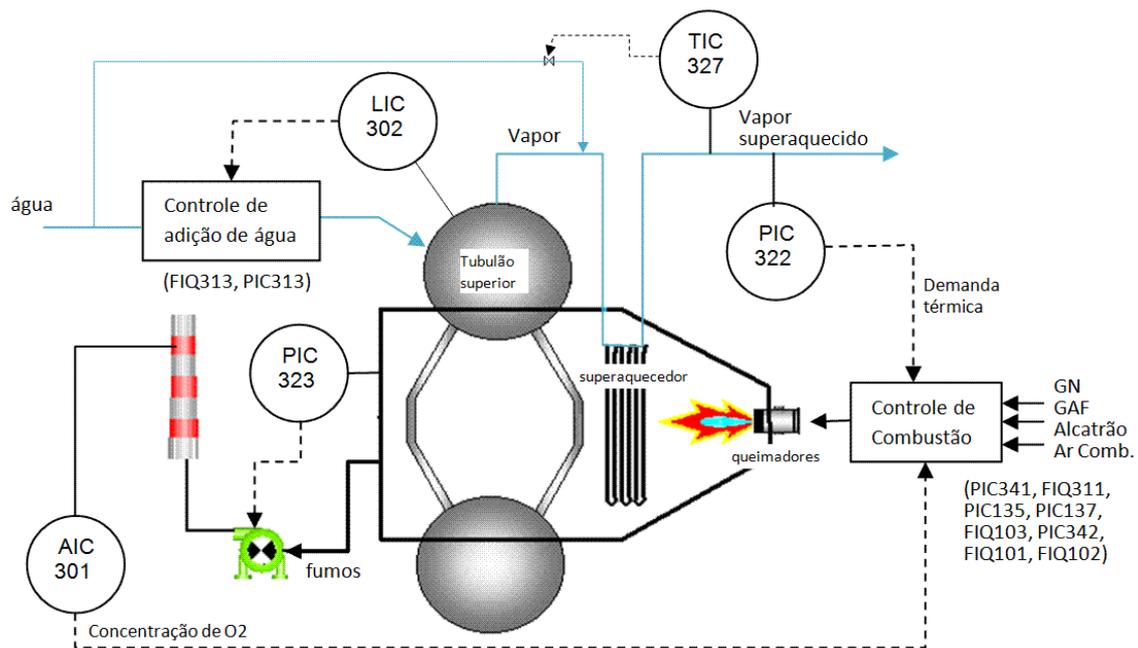


Figura 4.4 – Esquema simplificado das malhas de controle da caldeira

#### 4.2.2. PIC322 - CONTROLE DE PRESSÃO DE VAPOR

Este controle, considerado o principal da caldeira, é responsável por regular a pressão do vapor produzido, respondendo tanto a mudanças de carga (demanda de vapor da turbina) quanto a mudanças no poder calorífico dos combustíveis. Usualmente, um bom controle de pressão de caldeira, deve manter a pressão entre  $\pm 1\%$  do valor desejado independente de perturbações ou mudanças de carga (Lipták, 1999).

A pressão é regulada atuando-se na vazão de combustível. Se, por exemplo, a turbina aumentar o consumo de vapor, a pressão no tubulão irá cair e o controle deverá, então, aumentar o volume de combustível queimado para produzir este acréscimo de vapor. Se, por outro lado, o PCI do GAF aumentar, o sistema de combustão tenderá a liberar mais potência, produzindo mais vapor por unidade de tempo, isso acarretará um aumento de pressão e o sistema de controle deverá, então, requisitar uma menor vazão de combustíveis para que a pressão retorne ao valor desejado.

Em relação à resposta dinâmica, o tempo morto no controle de pressão é um aspecto chave na controlabilidade do processo<sup>1</sup>. Na caldeira, ele é o resultado da combinação de atrasos de transporte de fluidos, atrasos na mistura do combustível na fornalha e atrasos relacionados com a posição e tempos de resposta de instrumentos. Sendo que o primeiro deles varia em função da carga na caldeira. A regra usual é

<sup>1</sup> Se a resposta dinâmica de um processo for aproximada por um modelo de primeira ordem, com constante de tempo " $\tau$ " e com um tempo morto " $\theta$ ", sabe-se que o sistema é tão mais fácil de ser regulado quanto menor for à razão  $\theta/\tau$ .

manter o tempo morto abaixo de 10% do valor da constante de tempo. No caso do controle de pressão da caldeira, onde a constante de tempo é geralmente inferior a um minuto, o limite aceitável para o tempo morto é de poucos segundos.

Além disso, como o controle de pressão atua como mestre de um sistema de combustão, um aspecto importante para sua resposta dinâmica é o tipo de estratégia que é utilizada para a manutenção da relação estequiométrica e a garantia do excesso de ar. Conforme discutido adiante, o tempo de resposta do sistema de combustão e, conseqüentemente, do controle de pressão dependem de como essa estratégia é implementada e da sintonia de seus controladores.

Por isso, durante o projeto de uma caldeira, a escolha dos instrumentos, a posição onde eles devem ser instalados e o dimensionamento dos demais equipamentos devem ser realizados de maneira a minimizar ao máximo os atrasos que podem acarretar em tempo morto para o controle. No caso de uma caldeira já em operação, os esforços podem ser direcionados para um adequado ajuste dos controladores e para a escolha de uma estratégia que consiga reduzir o tempo de resposta até próximo do limite mínimo imposto pelo tempo morto natural do processo e pela dinâmica de transferência de calor.

Neste contexto, uma estratégia muito utilizada é o controle em compensação direta (ou *feedforward*). Esta estratégia cria um elo que antecipa respostas corretivas às perturbações de carga antes mesmo delas serem percebidas pelo elo de realimentação. Para o controle de pressão da caldeira, como se trata de uma configuração caldeira-segure-turbina, o ideal é utilizar informações que antecipam uma variação na demanda de vapor. Em ordem decrescente em relação ao tempo de antecipação, temos: referência de potência a ser gerada, torque do gerador, velocidade da turbina e comando de abertura das válvulas de admissão na turbina.

Shinskey (1998) propõe uma forma de antecipação com a vantagem de requerer apenas medições da própria caldeira. Ele parte da consideração que a energia térmica requerida por uma caldeira está relacionada com a raiz quadrada da razão  $h/p$ , onde “ $h$ ” é a pressão diferencial através de um elemento Venturi (que também é proporcional a vazão) e “ $p$ ” é pressão de vapor. Enquanto a medida de pressão do tubulão (PT322), isoladamente, é um bom indicador do balanço entre o calor gerado pela queima e a demanda de vapor, a resposta dessa pressão a uma mudança de carga (ou taxa de queima) é mais lenta que a resposta da variável “ $h$ ”. Portanto, a adição de um elo *feedforward* à saída do controlador de pressão (PIC322), irá diminuir o tempo de resposta da malha às mudanças de carga. A estratégia proposta é mostrada, em linhas pontilhadas, na Figura 4.5. Além de blocos (FY301) de divisão e extração de raiz quadrada, um terceiro (*Lead/Lag*) pode ser necessário para simular o atraso de tempo entre uma mudança na taxa de queima e sua conseqüente mudança na taxa de geração de vapor.

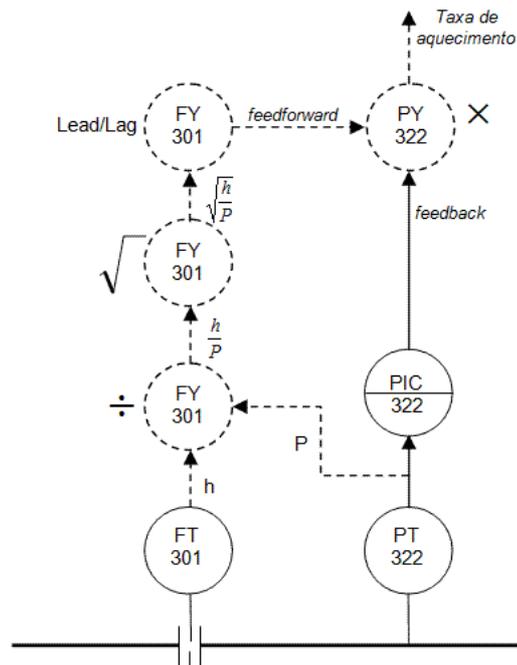


Figura 4.5 – Esquema de controle de pressão no tubulão. Em linha pontilhada, proposta para controle com compensação direta. Baseado em Lipták, 1999.

Nesse esquema de controle, sempre quando ocorre um aumento na carga (demanda de vapor), ocorre simultaneamente aumento da vazão ( $h$ ) e queda na pressão ( $P$ ). Ambos os efeitos aumentam a razão  $h/P$ , e o elo de compensação direta (*feedforward*) força um aumento na taxa de queima. Já no caso de variação no poder de queima dos combustíveis, por exemplo, adição de alcatrão, teria um aumento na produção de vapor e na pressão da caldeira. Com o aumento em ambos os sinais ( $h$ ) e ( $P$ ), a ação *feedforward* seria inexpressiva. A correção desse distúrbio é realizada nesse caso pelo controlador PIC322, atuando pelo elo de realimentação.

O multiplicador (PY322) também possui a utilidade de ajustar o ganho da malha de controle em proporção com a carga ( $h$ ). Esta é uma característica desejável já que com uma carga baixa, o ganho do processo torna-se mais elevado (uma grande área de troca de calor é utilizada para uma pequena quantidade de calor) e, portanto, para tornar o ganho da malha mais constante, o ganho do controlador deve ser reduzido.

#### 4.2.3. CONTROLE DE PRESSÃO DA CÂMARA DE QUEIMA E PRESSÃO DE AR DE COMBUSTÃO

Em caldeiras com tiragem balanceada, a corrente de ar que circula desde o duto de ar de combustão, passando pela fornalha, superaquecedores, tubulões, até ser expelido pela chaminé, é controlada simultaneamente pelos ventiladores de tiragem forçada (na entrada de ar) e tiragem induzida (ventilador na saída do canal de fumos). A Figura 4.6 mostra o esquema atual de controle. O ventilador de tiragem forçada (VT-002) tem o papel de pressurizar o duto de ar de combustão, permitindo o controle da vazão de ar por FIQ311, que atua na posição da válvula FCV311. Já o ventilador de

tiragem induzida (Exaustor) é usado para controlar a pressão no interior da câmara de combustão. Essa pressão, medida de forma manométrica, deve ser mantida com um valor levemente negativo de maneira que a existência de orifícios na câmara resultará em ar atmosférico entrando para o interior da câmara (ao invés de gases escapando por eles para o exterior da caldeira).

A pressão no interior da câmara de queima depende essencialmente da vazão dos gases combustíveis e da vazão de ar de combustão. Como essas vazões são escravas do controle de combustão, a pressão na fornalha é constantemente perturbada. O papel de PIC323 é restabelecer o balanço, com uma variação correspondente na vazão de saída (ar pela chaminé). Este controle também pode ser melhorado adicionando-se um elo de compensação direta a saída de PIC323, conforme proposto na Figura 4.6 em linhas pontilhadas. A idéia é antecipar variações na pressão da câmara a partir da saída de FIQ311, que é a melhor estimativa para o volume de gases que estão sendo inseridos na fornalha.

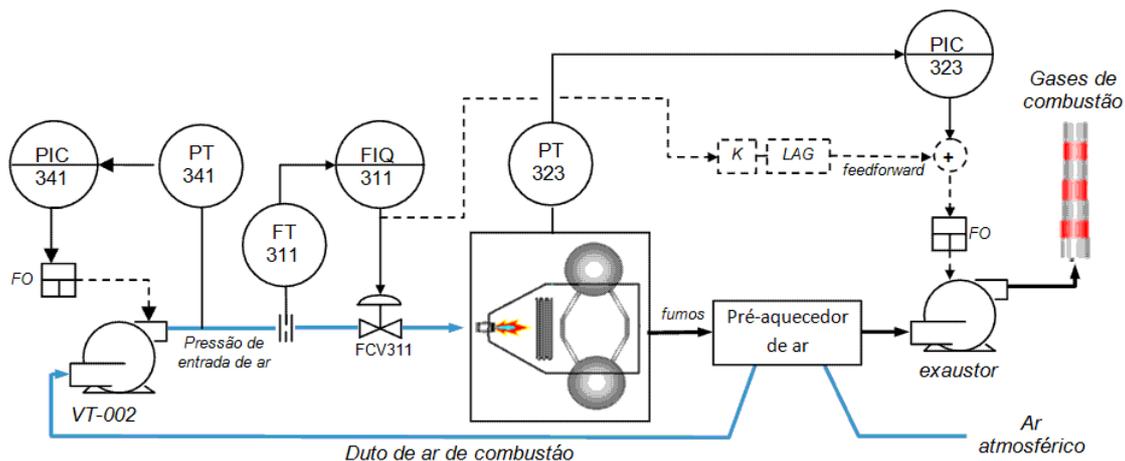


Figura 4.6 – Esquema de controle da pressão no interior da fornalha. Em linha pontilhada, proposta de controle com compensação direta.

Em relação à sintonia, o controlador PIC341 deve proporcionar um tempo de acomodação de 3 a 5 vezes menor que FIQ311, a fim de evitar sobrecarga no ventilador e interação entre os controladores.

#### 4.2.4. CONTROLE DE TEMPERATURA DO VAPOR SUPERAQUECIDO

A temperatura do vapor superaquecido não deve exceder a temperatura máxima aceitável para operação da turbina, pois temperaturas elevadas comprometem a vida útil das pás. Uma temperatura muito baixa, por outro lado, compromete a eficiência do sistema. A estratégia original, mostrada em linhas contínuas na Figura 4.7, utiliza apenas um elo de realimentação. O controlador (TIC327) mede a temperatura do vapor logo após o superaquecedor (TI327) e adiciona a água necessária para resfriá-lo até um valor seguro por meio da válvula TCV327.

Como o controle de temperatura atua diretamente na válvula, se a pressão na linha de onde a água é extraída por qualquer motivo variar, a vazão de água de resfriamento será função da pressão atual da linha, e não somente da abertura da válvula. E, no caso da caldeira da UTE, a pressão da linha é variável, sendo função da pressão no tubulão (ver esquema de controle de PIC313). Se esta perturbação é significativa, recomenda-se a adição de uma malha escrava para o controle de vazão de água (não indicada na Figura 4.7).

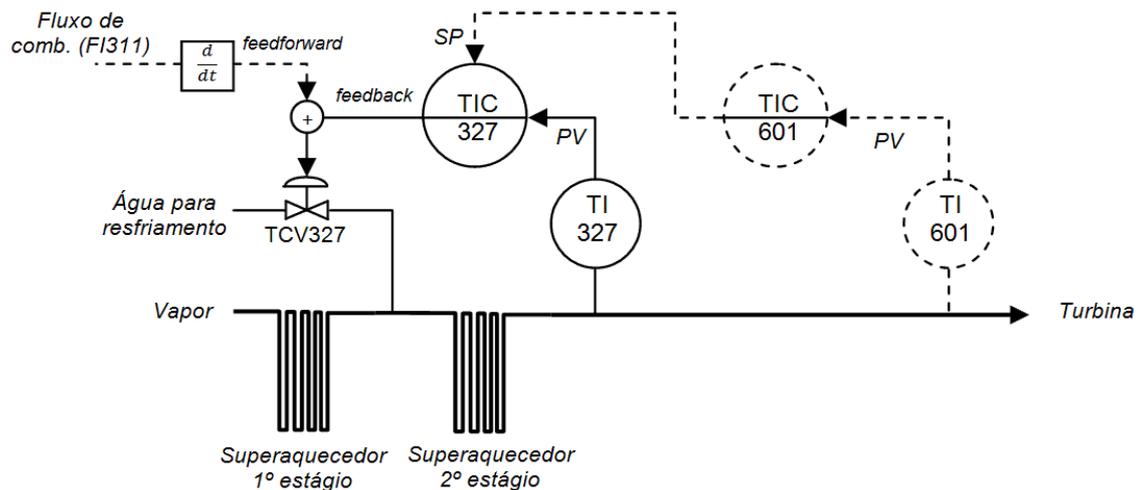


Figura 4.7 – Esquema de controle da temperatura do vapor. Em linha pontilhada, a modificação proposta (inclusão de uma malha mestre e de um elo “feedforward”)

Outra melhoria no controle de temperatura pode ser alcançada com o emprego de um elo de compensação direta (em linha pontilhada), a partir do cálculo da variação da vazão de ar de combustão (FI311). A análise de gráficos de tendência histórica, tanto da temperatura do vapor quanto da carga na caldeira, revelou que o impacto deste último na temperatura pode ser antecipado em até 3 minutos a partir da variação na vazão do ar de combustão.

Na Figura 4.7 também é indicada a posição de um segundo medidor de temperatura (TI601), instalado logo antes da turbina. Como o objetivo principal é controlar a temperatura que chega à turbina, a realimentação deveria, de fato, ser feita com TI601. Entretanto, esta estratégia teria um pior desempenho, pois a longa distância física entre este medidor e o ponto de adição de água resultaria num atraso de transporte adicional de 29 segundos (segundo estimativa realizada pela correlação cruzada entre TI327 e TI601). Por isso, na estratégia atual, optou-se por um controle semi-automático, em que o controle realimentado com TI327 atua automaticamente compensando as variações na temperatura, enquanto os operadores ficam responsáveis em atuar manualmente no sistema caso o valor medido por TI601 atinja algum limite de alarme.

Uma alternativa para tornar esse controle totalmente automático, conforme mostrado na Figura 4.7, em linhas pontilhadas, é o emprego de um segundo

controlador (TIC601) com o papel de ajustar a temperatura logo antes da turbina atuando como mestre de TIC327. Este último, podendo ter apenas ação proporcional, continuaria com o papel de atenuar, prontamente, as variações de temperatura provenientes da caldeira.

#### 4.2.5. CONTROLES DE ADIÇÃO DE ÁGUA NO TUBULÃO

O nível de água do tubulão superior deve ser mantido em torno de 50% da capacidade do reservatório, com uma tolerância de variação de  $\pm 15\%$ , segundo manual de operação do fabricante. Uma queda no nível acima deste valor pode danificar a caldeira, pois uma parte dos tubos ficaria descoberta (sem água no interior) e seriam sobreaquecidos. Já um nível de água elevado poderia resultar em partículas de água deixando o tubulão superior e chegando à turbina, o que traria prejuízos para este equipamento.

Em relação à dinâmica de variação de nível, as caldeiras apresentam uma característica de fase não-mínima bem peculiar. O nível de água aparente e o nível teórico calculado a partir da massa de água presente em seu interior não coincidem. Devido aos fenômenos conhecidos como “inchamento” e “têmpera”, variações na demanda de vapor provocam, quase imediatamente, uma variação no nível a princípio invertida ao que corresponderia ao equilíbrio normal. No fenômeno de “inchamento”, o vapor em emulsão, na interface líquido/vapor, está diretamente relacionado com a demanda de vapor. Uma queda abrupta nessa demanda, por exemplo, causa uma redução no volume do vapor em emulsão, causando queda no nível. Em resposta a queda no nível, o controlador aumenta a vazão de água de alimentação. Como esta água possui temperatura bem inferior aquela no interior do tubulão, sua chegada nos tubos de vaporização atrasa a formação de bolhas de vapor e isso causa uma nova diminuição no nível (fenômeno de têmpera).

A Figura 4.8 exemplifica a seqüência desses fenômenos, após um aumento na demanda de vapor, num controle de nível regulado por um controlador PI.

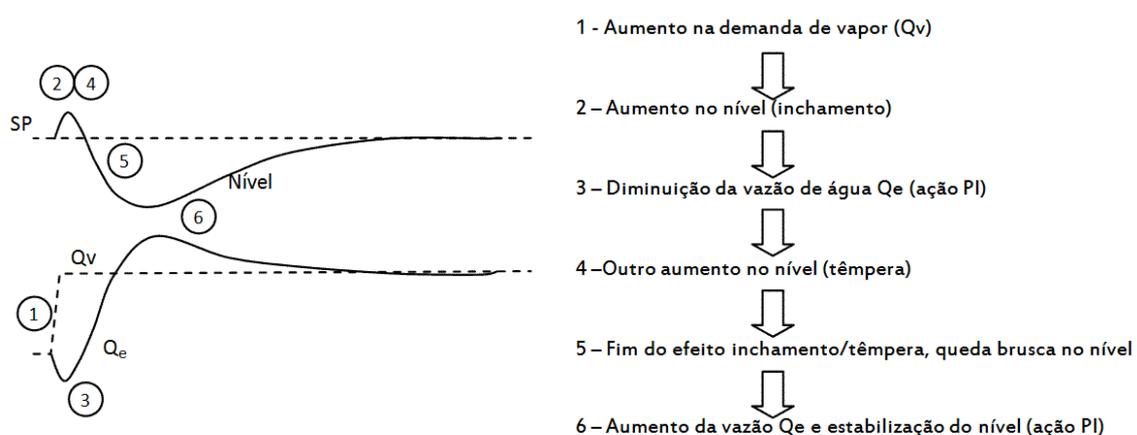


Figura 4.8 – Efeito de fase não-mínima no controle de nível da caldeira

Na nomenclatura de controle, chama-se esse comportamento, em que o processo responde inicialmente numa direção invertida, de uma resposta de fase não-mínima. É um fator que dificulta o controle, tendendo a deixá-lo oscilatório. A Figura 4.9 mostra um exemplo extraído da operação da caldeira da UTE. Conforme esperado, um súbito aumento na demanda de vazão (terceiro gráfico) causa, a princípio, um aumento no nível (efeito de inchamento) e, como consequência, a resposta passa por um transitório longo e oscilatório até retornar ao regime inicial.

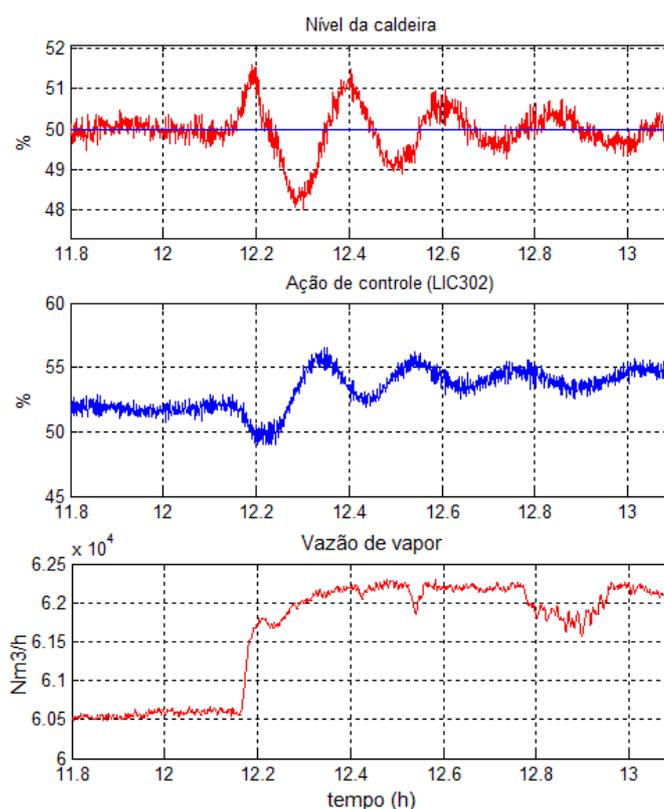


Figura 4.9 – Exemplo de efeito de fase não-mínima causado por “inchamento” após aumento na demanda de vapor

Não se observou, no entanto, um efeito significativo do efeito de “têmpera”. Este fato também era esperado, em decorrência do uso de regeneradores. Estes equipamentos utilizam uma extração de vapor superaquecido para aumentar a temperatura da água de alimentação, tornando-a mais próxima da temperatura da água no interior do tubulão. Com isso tem-se uma redução na fase não-mínima do processo. Este efeito é tão notável que o desligamento do regenerador pode até mesmo instabilizar o controle de nível se o controlador não for reajustado (o tempo integral não pode ser inferior ao tempo de reversão da fase não-mínima). A Figura 4.10 mostra um período em que o controle de nível, que era oscilatório enquanto o regenerador estava desligado, se estabiliza após seu religamento.

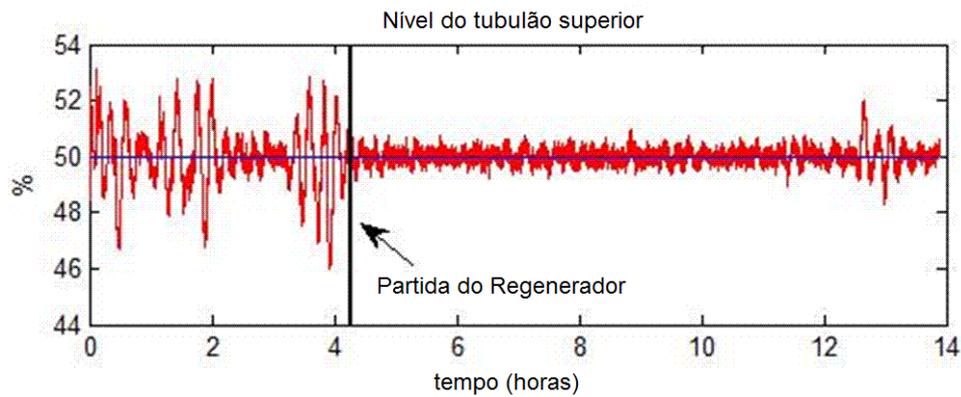


Figura 4.10 – Mudança no comportamento do controle de nível após ligamento do regenerador

A estratégia atual para o controle do nível do tubulão, assim como das outras malhas do circuito de alimentação são mostradas na Figura 4.11 em linhas contínuas. A medição do nível do tubulão superior é obtida a partir da seleção entre dois sensores (LIT302A e LIT302B). LIC302 recebe este sinal e controla o nível atuando sobre a vazão de alimentação. Por meio de uma estratégia mestre-escravo, a saída de LIC302 é referência de controle para a malha FIQ313, responsável pelo controle da vazão. Já a malha PIC313, por sua vez, controla a pressão de entrada da linha de água. Para garantir um fluxo circulante de água estável em toda a usina, a referência de controle desta malha deve ser sempre ligeiramente superior (em torno de 5 Bar) a pressão no interior do tubulão, medida por PT343.

A Figura 4.11 também mostra, em linhas pontilhadas, dois elos de compensação direta propostos. O primeiro, adicionado na saída de LIC302, busca reduzir o tempo de reação às mudanças de carga, que, neste caso, corresponde ao tempo gasto pelo controlador para restabelecer o balanço de massa após uma variação na vazão de saída de vapor<sup>2</sup>.

Outra compensação possível é para o efeito de “inchamento”. Com o objetivo de evitar que o controlador perceba este efeito, é somada a referência de controle de LIC302, um termo proporcional à variação na vazão de vapor em relação ao seu valor médio histórico. Se a constante K for bem ajustada, um aumento na vazão, por exemplo, irá causar um aumento na referência de controle com a mesma amplitude do aumento de nível que é causado pelo “inchamento”. Assim, o erro de controle é menor e o efeito da fase não-mínima é minimizado.

<sup>2</sup> Na bibliografia sobre caldeiras, este esquema de controle é comumente denominado de controle a três elementos.

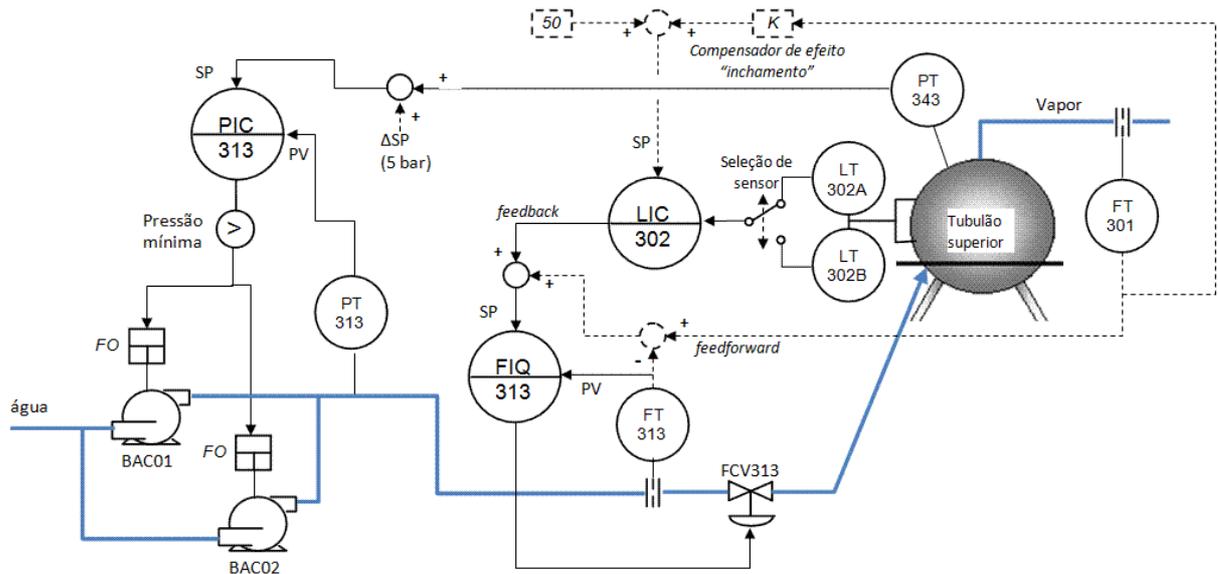


Figura 4.11 – Esquema de controle para alimentação de água. Em linha pontilhada, propostas de melhoria.

#### 4.2.6. CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO DE GAF

A Figura 4.12 mostra o esquema de controle atual da linha de alimentação de GAF. A vazão de combustível, proveniente do gasômetro da siderúrgica é controlada por FIQ101, enquanto que a pressão de entrada da linha é controlada pela malha PIC342.

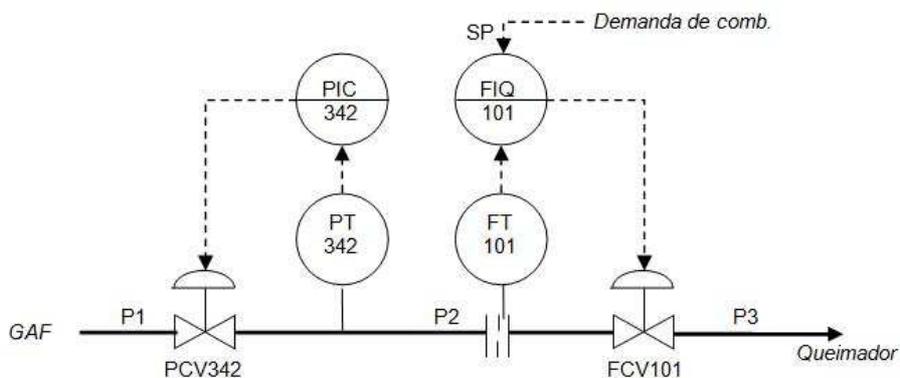


Figura 4.12 – Esquema do controle de alimentação de GAF

Em relação à sintonia dos controladores, a razão entre o tempo de resposta de um controlador em relação ao outro deve ser superior a 3, a fim de evitar interação entre os controladores (Shinskey, 1998). E o controlador de pressão, especificamente, pode ser sintonizado apenas com ação proporcional, visto que um deslocamento em relação a referência de controle não é um fator crítico.

Outra consideração diz respeito ao tipo das válvulas. Com o aumento da vazão, tem-se um maior valor da pressão após FCV101 (P3), o que torna menor a queda de

pressão sob esta válvula. Se esta variação é superior a duas vezes seu valor com carga mínima, então uma válvula igual-porcentagem deve ser utilizada.

#### 4.2.7. CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO DE ALCATRÃO

Na caldeira da UTE, a adição de alcatrão é feita numa taxa constante de 500 kg/hora. Portanto o controlador de vazão FIQ103 opera com referência de controle constante, independente da carga de operação da caldeira. O bombeamento é feito com pressão controlada por PIC137, que atua na velocidade da bomba por meio de um inversor de freqüência. O esquema de controle é mostrado na Figura 4.13.

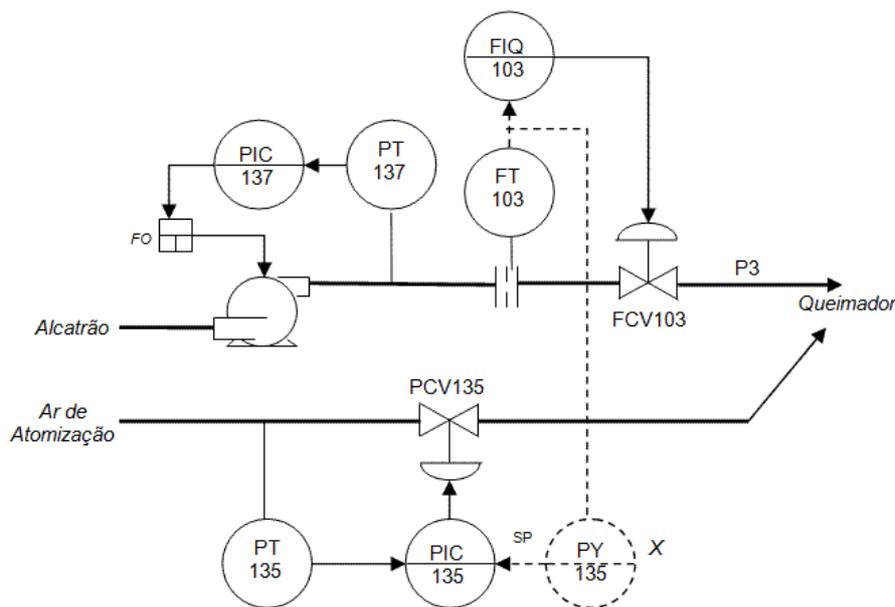


Figura 4.13 – Esquema de controle da alimentação de alcatrão. Em linha pontilhada, proposta de controle em razão para ar de atomização.

A fim de garantir uma boa mistura com o ar de combustão, o alcatrão, que se trata de um combustível líquido, precisa ser atomizado. A pressão do ar de atomização é controlada por PIC135, que também opera com referência de controle constante e atua na válvula de controle PCV135. Como a pressão de ar de atomização deve ser proporcional a vazão de alcatrão, uma melhoria nesta estratégia seria utilizar um controle de razão, com a referência para o controlador PIC135 sendo calculada automaticamente a partir da medição de vazão, conforme proposto, em linha pontilhada, na Figura 4.13. Isso também evitaria a adição de ar no queimador em momentos em que o alcatrão estivesse indisponível.

Em relação à sintonia dos controladores, o controle de pressão PIC137 deve ter um tempo de acomodação pelo menos três vezes menor que o controle de vazão FIQ103. Caso contrário, variações rápidas na vazão podem causar sobre-elevação na pressão e desarmar o sistema. Já no caso do controle de pressão do ar de atomização,

este deve ter a mesma velocidade de FIQ103 para que o controle de razão fique sincronizado.

#### 4.2.8. FIQ102 - CONTROLE DE ALIMENTAÇÃO DE GN

Diferente do alcatrão e GAF, a linha de alimentação de GN não possui um controle de pressão de entrada, visto que os cilindros reservatórios possuem pressão estável. A vazão do combustível é controlada por FIQ102 que atua na válvula FCV102, conforme esquema mostrado na Figura 4.14.

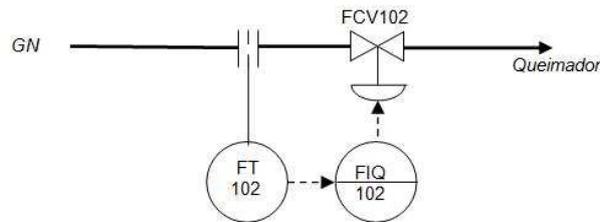


Figura 4.14 – Esquema do controle de adição de GN

#### 4.2.9. CONTROLE DE COMBUSTÃO

Conforme já apresentado, o sistema de combustão é composto por três linhas de alimentação de combustíveis (GAF, GN e Alcatrão) e uma linha de alimentação de ar para combustão. A Figura 4.15 mostra o esquema de limites cruzados utilizado para o cálculo das referências de controle das malhas de vazão na caldeira da UTE.

O controle de combustão consiste em se determinar a proporção correta de vazão de combustível e de ar para combustão. No caso de um desequilíbrio, porém, é muito mais danosa a falta de ar do que a falta de combustível. Por isso, deve-se privilegiar o excesso de ar nos distúrbios. Na estratégia de limites cruzados o controlador de vazão de ar (FIQ311) recebe como referência de controle o maior valor entre a soma das vazões de combustíveis (“Ar Requerido Total”) e a demanda térmica. Os controladores de vazão de combustíveis (FIQ101, FIQ102 e FIQ103), por sua vez, recebem como referência de controle o menor valor entre a demanda térmica e a vazão de ar. Daí o nome da estratégia. No caso de uma demanda térmica ascendente (aumento na saída de PIC322), o comparador “maior que” de FIQ311 garante que a vazão de ar será solicitada a subir antes do combustível. Na demanda térmica decrescente, o comparador “menor que” garante que a vazão de gás será solicitada a descer primeiro, garantindo o excesso de ar nas manobras ou distúrbios do sistema.

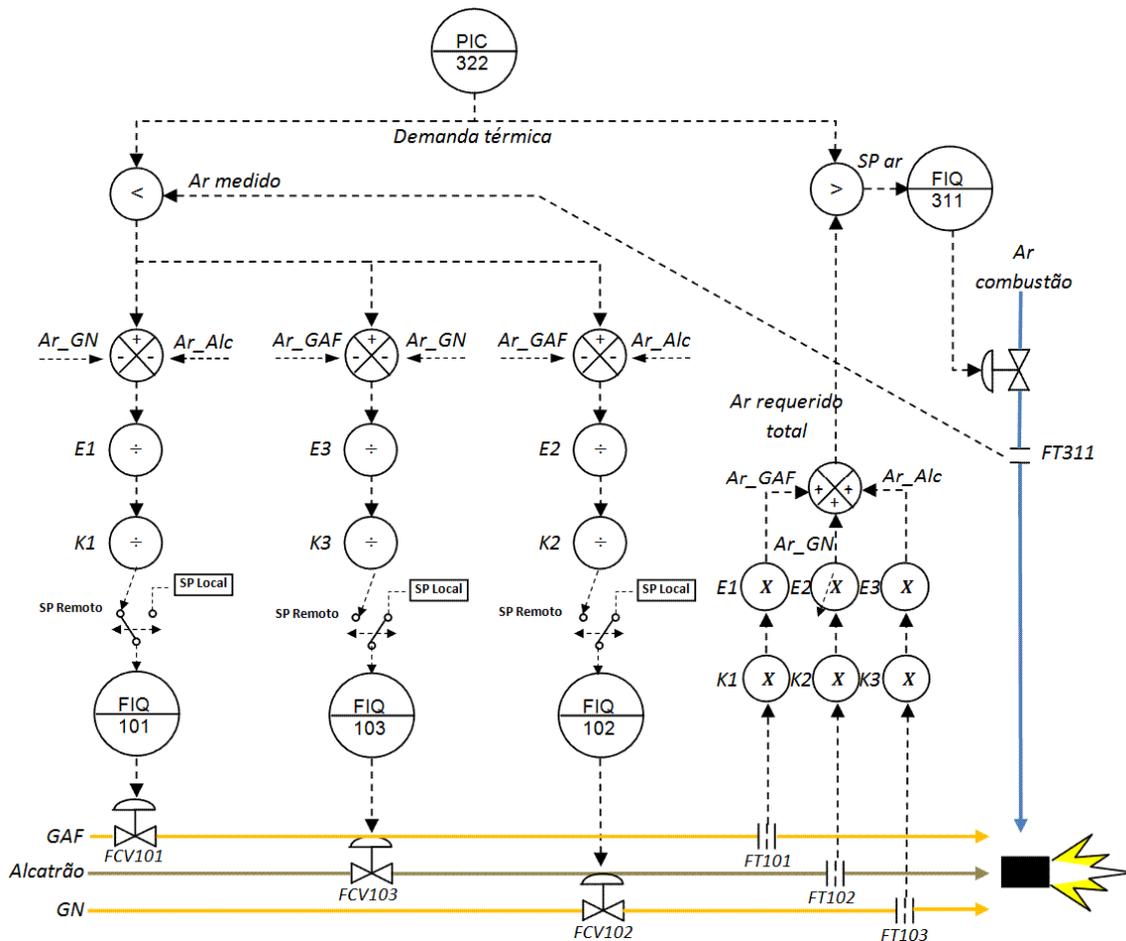


Figura 4.15 – Esquema do controle de vazão de combustíveis e vazão de ar por limites cruzados

Além disso, o controle de combustão deve garantir, para cada combustível, a proporção estequiométrica correta para mistura de ar. Por convenção, nessa estratégia a demanda térmica e os comparadores utilizam a mesma escala de medição do ar de combustão. Por isso, os sinais relativos a vazões de combustível precisam ser convertidos antes e após serem comparados com a demanda térmica.

O cálculo das referências de controle de vazão de combustíveis corresponde ao valor da demanda térmica global descontada a demanda de ar dos outros combustíveis. Como estes valores estão quantificados em termos de “demanda de ar”, os fatores K1, K2 e K3 são então utilizados para converter as referências de controle de vazão de GAF, GN e Alcatrão, respectivamente, para a proporção estequiométrica adequada para cada um deles. Outros fatores (E1, E2 e E3) são utilizadas para garantir um excesso de ar em relação ao valor teórico estequiométrico. A mesma conversão é aplicada, porém de maneira invertida, nas medições de vazão dos combustíveis, antes dessas medidas serem somadas e comparadas com a demanda de ar requerida pelo sistema.

#### 4.2.10. PROPOSTA DE MELHORIA PARA O CONTROLE DE COMBUSTÃO

Outra importante limitação observada na estratégia de controle de combustão apresentada diz respeito à seleção manual do *mix* de combustíveis. Uma seleção automática poderia ser usada para dosar os combustíveis privilegiando, de acordo com a disponibilidade de cada um, aqueles que tivessem menor custo ou alguma vantagem para a operação da planta. Esse tipo de estratégia é denominado Controle de Combustão com Combustível Preferencial. No caso da UTE, é interessante privilegiar o uso do GAF, combustível residual, em detrimento do combustível adquirido externamente (GN). Esta estratégia deve, no entanto, respeitar um limite superior para o uso do GAF, já que nem sempre é desejável utilizá-lo em toda sua disponibilidade.

A Figura 4.16 mostra uma nova estratégia proposta para o controle de combustão. Em relação à estratégia original, foram propostas três modificações: (1) um comparador “menor que” (FY101B) foi inserido antes de FIQ101 para que a referência de controle não ultrapasse o valor estabelecido como limite superior para o GAF. (2) um comparador “maior que” (FY102B) foi inserido antes de FIQ102 para que a referência de controle não seja inferior ao limite mínimo para a vazão de GN. (3) na composição das referências de controle de GAF e GN (FY101A e FY102A), um fator de desequilíbrio foi inserido para “conduzir” as proporções de combustíveis para um ponto que privilegie ao máximo o uso do GAF. Nenhuma alteração foi proposta para o controle de alcatrão, pois, apesar de poder operar em cascata, na prática ele opera apenas em modo local, ou seja, a referência de controle é determinada pelo operador.

Esta proposta tem o seguinte funcionamento: O fator de desequilíbrio é um valor que varia de 0 a 1, decrescendo com o aumento da vazão de GAF (seu valor é nulo quando a vazão de GAF for máxima). Este fator é, então, multiplicado por uma constante de escala  $\alpha$  (FY322C) e o resultado é somado em FY101A e subtraído de FY102A. Esta operação faz com que a referência de controle do GAF seja ligeiramente superior à demanda proveniente de PIC322, enquanto a referência de controle do GN fica ligeiramente inferior. Este decréscimo na vazão de GN faz com que a variável “Ar\_GN” decresça, aumentando ainda mais a referência de controle de GAF calculado por FY101A. Por sua vez, o aumento na vazão de GAF faz com que “Ar\_GAF” aumente, o que causa uma redução ainda maior na referência de controle de GN calculado por FY102A. Este processo acontece, então, de maneira interativa até que a vazão de GAF atinja seu limite superior (FY101B) e a vazão GN atinja um valor mínimo necessário para que a demanda de PIC322 seja atendida.

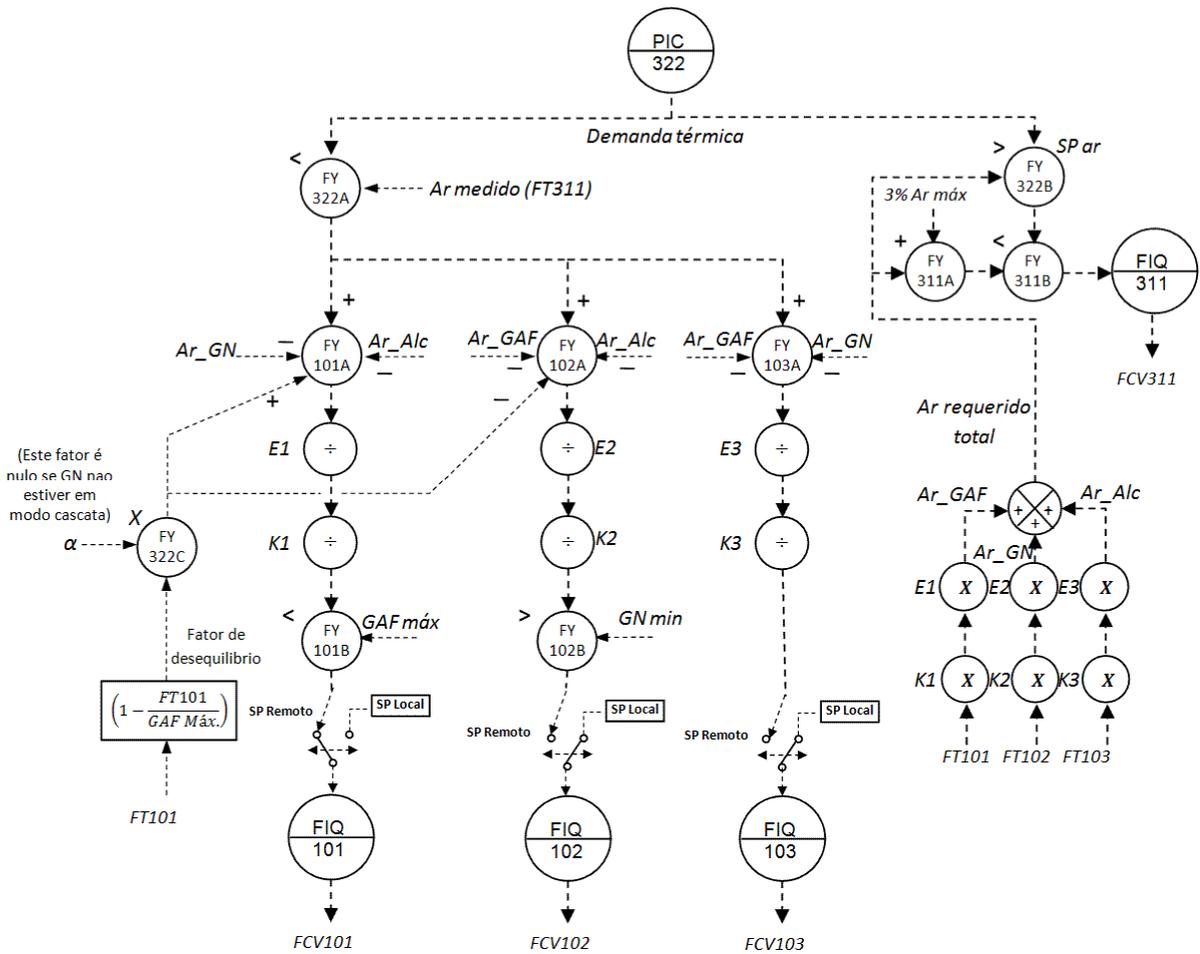


Figura 4.16 – Estratégia para controle de combustão com combustível preferencial

A estratégia atual também possui uma limitação que causa problemas sempre que a usina opera com carga máxima e queimando apenas GAF. Durante perturbações de carga que causam queda na pressão do tubulão, o controle de pressão aumenta rapidamente a demanda térmica. Como a disponibilidade de GAF é limitada, isso faz com que a malha de vazão de GAF sature (com 100% de abertura da válvula). A vazão de ar de combustão, por outro lado, acompanha essa demanda fazendo com que o excesso de ar fique cada vez maior. Este efeito é conhecido como *integral wind up* e ocorre sempre que um controle mestre exige uma demanda que o controle escravo não é capaz de atender.

Para solucionar este problema, foi proposta uma versão simplificada de uma estratégia conhecida como Duplo-Limites-Cruzados. A sua utilização pressupõe que a proporção da mistura é fundamental em detrimento da variável mestre. Assim, se ocorre saturação do combustível, por exemplo, a vazão de ar também fica limitada. Na Figura 4.16, esta modificação é implementada com a adição das funções FY311A e FY311B. A demanda de ar que anteriormente tinha apenas que ser superior ao valor "Ar\_Comb\_Total", agora também tem que ser inferior a este mesmo valor acrescido de uma tolerância de 3% do valor máximo para a demanda. Dessa forma a vazão de ar irá sempre respeitar a limitação e velocidade das malhas de vazão de combustíveis.

Além disso, para evitar que a demanda térmica continue crescendo no caso de limitação nas vazões, é necessário congelar a saída do controlador mestre. Para isso, sua saída (PIC322.OUT) é comparada com a vazão total de combustíveis convertida para a escala de ar e, se for maior, o limite superior para a saída é igualado ao seu valor corrente, evitando-se assim que ele cresça. O pseudocódigo para esta operação é mostrado abaixo:

```
SE PIC322.OUT > FY311A.OUT
  ENTAO PIC322.MH = PIC322.OUT
SENAO PIC322.MH = 100
```

É importante esclarecer que uma solução mais efetiva e elegante para todas as questões levantadas para o controle de combustão seria a implementação de um controlador preditivo multivariável. No entanto, esse controlador requer um *hardware* específico e uma nova arquitetura de controle.

#### 4.2.11. OTIMIZAÇÃO DO EXCESSO DE AR

Uma terceira limitação observada na atual estratégia de controle diz respeito aos valores utilizados para as constantes “K” e “E”. A constante K, chamada fator estequiométrico, equivale ao volume de ar necessário para a queima completa de um metro cúbico (normalizado) de gás ou um quilo de alcatrão. É obtido a partir dos dados de poder calorífico (PCI) dos combustíveis (0,81 para o GAF; 4,12 para o alcatrão e 10,38 para o GN). Esses valores são razoavelmente constantes no caso do GN e Alcatrão, porém podem variar até 20% no caso do GAF. Isso significa que um aumento no PCI do gás irá resultar numa queima incompleta, o que é altamente indesejável devido à formação de CO, fuligem e fumaça, além de possibilitar a acumulação de combustível não queimado, causando risco de explosão. Para considerar essa incerteza, a constante K é “dilatada” pelo fator “E”, chamado “fator de excesso de ar”.

Esse volume “extra” de ar é necessário para garantir uma combustão completa, porém, um valor muito grande é indesejável, pois diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas do calor que é “carregado” para a chaminé pelos gases efluentes. A Figura 4.17 mostra a relação entre a eficiência ( $\eta$ ) da queima, as perdas de calor por gases efluentes (Q2) e as perdas de calor por queima incompleta (Q3) em função do coeficiente de excesso de ar. Um coeficiente de 1,1, por exemplo, significa um excesso de ar de 10%.

O resultado da combinação das perdas (Q2 e Q3) é uma curva de eficiência que possui um ponto de máximo global. Um processo que opera dessa forma é candidato a receber estratégias de otimização que garantam uma operação próxima deste ponto.

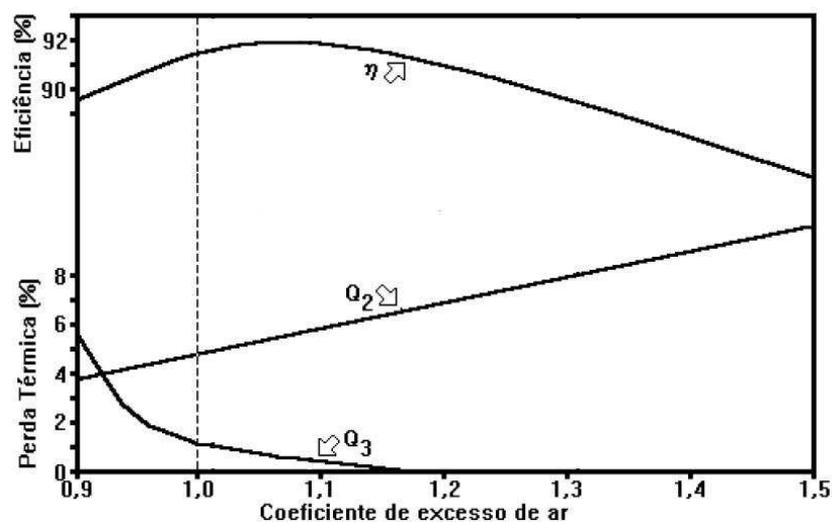


Figura 4.17 – Perfil típico das curvas de perdas em função do excesso de ar. Fonte: Pinheiro e Valle, 1999

É importante salientar que para cada combinação de combustível e carga, as curvas são diferentes e tem-se um valor diferente de excesso de ar necessário para uma queima com eficiência máxima. Por isso, para manter a caldeira operando próximo deste ponto é necessário o uso de um analisador continuamente medindo a composição do gás no canal de fumos e ajustando o excesso de ar para que essa composição corresponda a aquela esperada para uma queima eficiente. Essa estratégia é mostrada na Figura 4.18. Propõe-se o uso do controlador AIC301 para ajustar, automaticamente, os fatores de excesso de ar dos combustíveis (E1, E2 e E3) de acordo com as informações providas pelo analisador AT301.

A sintonia do controlador AIC301 deve resultar num tempo de acomodação pelo menos 5 vezes superior ao apresentado pela malha mais lenta do sistema de combustão, no caso PIC322. Caso contrário existe o risco de interação entre essas malhas, o que desestabilizaria todo o sistema de controle. Devido à sua limitação de velocidade, o papel de AIC301 é de apenas adaptar automaticamente os fatores de excesso de ar para corrigir incertezas no cálculo dos fatores estequiométricos (K1, K2 e K3), ou mudanças na configuração da caldeira (desligamento dos regeneradores, grandes variações na carga, etc.). Esta malha não possui velocidade, por exemplo, para tratar as flutuações no PCI do GAF. Neste caso, seu fator estequiométrico (K1) precisa ser corrigidos a partir de uma estimativa da variação do PCI, conforme também mostrado na Figura 4.18.



### 4.3. AVALIAÇÃO INICIAL DE DESEMPENHO DAS MALHAS DE CONTROLE

Depois de realizado o Levantamento de Campo, a segunda fase do procedimento de auditoria de malhas é a avaliação inicial de desempenho das malhas de controle.

A Figura 4.19 apresenta a rotina Matlab® utilizada para o cálculo dos índices. O primeiro índice, variabilidade relativa (linha 6) é um indicativo da dispersão total da variável de processo ( $6\sigma$ ), em relação aos limites de alarme. Um valor de 100% indica que a variável controlada ocupa, praticamente, toda a faixa de tolerância entre os limites aceitáveis. Em seguida, aparecem os cálculos do desvio padrão (linha 7) e da integral do erro de controle (linha 8). Essas medidas representam a dispersão e a média do percentual de erro e são úteis para quantificar o erro de estado estacionário (integral do erro) e a eficácia com que o controlador consegue rastrear a referência e atenuar perturbações (desvio padrão do erro). Representando o esforço de controle, ou nível de desgaste do atuador, utilizou-se o somatório de incrementos da saída de controle durante 1 hora de operação (Excursão CO, linha 9). Se, por exemplo, o atuador for uma válvula, uma excursão de 1000% indica que a válvula se movimentou o equivalente a dez aberturas completas em uma hora. Sabe-se que parte desses incrementos (aqueles de pequena amplitude e alta frequência) é um efeito do ruído de medição que se propaga na saída de controle e não causa, necessariamente, a movimentação do atuador. Por isso, na linha 5, a saída de controle (CO) é previamente filtrada, eliminando-se o conteúdo de alta frequência. Por último, é incluído na tabela o percentual de tempo em que a saída de controle permanece limitada (Saturação, linha 12) e, também, uma medida do dimensionamento do processo (linha 13).

```
* %PVnorm : Vetor variável controlada normalizada de 0 a 100% em relação a
* %
* %PVnorm_AL : Vetor variável controlada normalizada de 0 a 100% em relação
* %
* %PVnorm : Vetor referência de controle normalizada de 0 a 100% em relação
* %
* %CO : Vetor saída de controle
* %COF : Vetor saída de controle filtrado
* %PAval: Período de Avaliação (segundos)
* %Ta: Tempo de amostragem (segundos)
01 PVnorm = 100*(PV-PVmin)/(PVmax-PVmin);
02 PVnorm_AL = 100*(PV-AlarmeL/(AlarmeH-AlarmeL));
03 SPnorm = 100*(SP-PVmin)/(PVmax-PVmin);
04 ERRO = SPnorm-PVnorm;
05 COF = low_filter(CO); %filtro passa-baixa de ordem 1
06 variabilidade = 6*std(PVnorm_AL);
07 desvio_erro = std(ERROnorm);
08 IE = sum(ERRO)/length(ERRO);
09 excursaoCO = sum(abs(diff(COF)))*PAval/(length(CO)*Ta);
10 aux1 = find(CO<=1.05*CO_Low);
11 aux2 = find(CO>=0.95*CO_High);
12 saturacao = 100*(length(aux1)+length(aux2))/length(CO);
13 dimensionamento = std(PVnorm)/std(CO);
```

Figura 4.19 – Algoritmo Matlab® para cálculo dos índices de desempenho de uma malha durante um período de avaliação.

A Tabela 4.4 mostra os alguns índices calculados numa base de dados de 14 horas de operação da caldeira, num momento em que ela operava de maneira estável, com carga máxima, e queimando GAF e Alcatrão.

Em destaque na tabela aparecem as malhas PIC322, TIC327 e LIC302. Essas três malhas possuem uma variabilidade relativamente alta e são malhas críticas, com restrições de operação que, quando violadas, ocasionam a parada do processo. Também se destaca na tabela indicação de erro de estado estacionário (Integral do Erro) nas malhas FIQ313 e PIC342 e um dimensionamento inadequado das malhas FIQ101, PIC342 e TIC327. Essas três malhas operam com válvulas borboletas e deveriam ser dimensionadas para operar apenas na faixa central, onde se tem uma maior linearidade. Entretanto são subdimensionadas (ganho muito menor que 1), e isso ocasiona operação nas extremidades e saturação no caso de FIQ101 e PIC342.

*Tabela 4.4 – Índices de desempenho das malhas*

	Descrição	Variabilidade relativa (%)	Desvio Padrão Erro (%)	Integral do Erro (%)	Excursão CO (%)	Saturação (% tempo)	Dimensionamento
FIQ101	Vazão GAF	29.53	1.39	0.1	1717	<b>4.3</b>	<b>0.18</b>
FIQ102	Vazão GN	46.66	0.68	-09	528	0	1.38
FIQ103	Vazão Alcatrão	14.35	2.39	04	1736	0.8	0.22
FIQ311	Vazão Ar Comb.	21.71	0.75	0	1550	0	1.14
PIC341	Pressão Ar Comb.	2.45	0.27	0	435	0	0.32
FIQ313	Água Alimentação	15.75	0.82	<b>-0.72</b>	<b>2263</b>	0	1.43
PIC313	Pressão Água	4.39	0.14	0	424	0	1.07
PIC322	Pressão Tubulão	<b>55.98</b>	0.7	04	600	0	0.35
LIC302	Nível Tubulão	<b>53.57</b>	1.79	0	2516	0	0.57
PIC342	Pressão GAF	31.7	2.64	<b>0.82</b>	1278	<b>19.4</b>	<b>0.11</b>
PIC323	Pressão Forno	3.15	0.47	0	864	0	0.21
TIC327	Temp. Vapor	<b>62.8</b>	0.61	-0.1	502	0	<b>0.13</b>
PIC135	Pressão Ar Atom.	28.77	0.67	01	1594	0	0.21
PIC137	Pressão Alcatrão	22.39	1.31	0	1286	0	0.45

#### 4.4. DIAGNÓSTICOS PRELIMINARES

Continuando o procedimento de auditoria, a próxima etapa é a fase IIb. Conforme discutido no capítulo 3, antes de iniciar esforços para a otimização do desempenho das malhas de controle, é importante identificar e classificar quais são as principais ações perturbadoras as quais o processo é submetido. Com o estudo sobre o funcionamento da caldeira e com as informações obtidas com operadores da planta, chegou-se a um modelo para as principais perturbações das malhas de controle, mostrado na Figura 4.20.

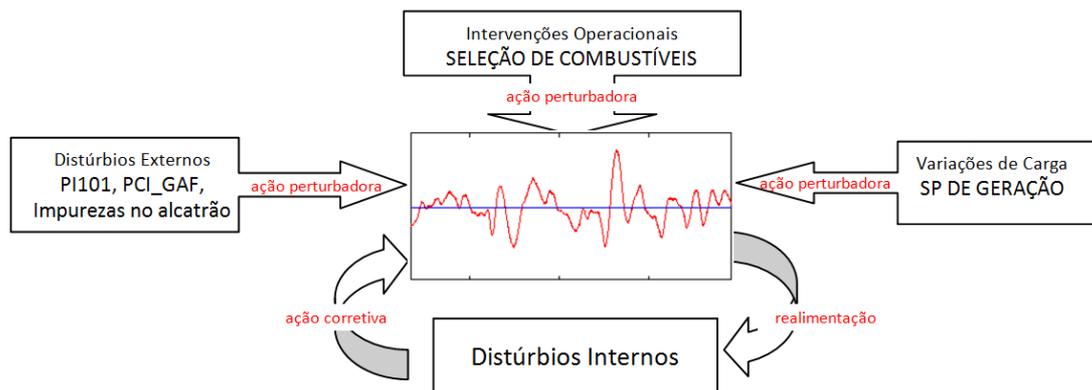


Figura 4.20 – Modelo para perturbações nas malhas de controle da caldeira

Devido à simplicidade do processo, a única intervenção operacional identificada foi a escolha da combinação de combustíveis a serem queimados. Outras ações, tais como operação de controladores em modo manual, são realizadas, porém apenas eventualmente para contornar mal desempenho de algumas malhas.

Em relação aos distúrbios externos, identificaram-se, principalmente, perturbações relacionadas com as características dos combustíveis. Impurezas no alcatrão, por exemplo, causam problemas em seu bombeamento e variações no poder calorífico e pressão do GAF causam variações térmicas. Os outros insumos, a água potável e o gás natural, têm qualidade garantida pelos fornecedores. Já o sistema de utilidades (ar de instrumento e tensão elétrica dos equipamentos) não foi verificado.

A outra fonte de variação do processo, e a que causa impacto mais amplo, é o SP de geração da usina. Na próxima seção serão estudados os impactos dessas perturbações no sistema de controle regulatório.

##### 4.4.1. IDENTIFICAÇÃO DE ACOPLAMENTOS NÃO-OSCILATÓRIOS

A análise de componentes principais (ACP) foi, inicialmente, utilizada com o objetivo de “medir” o impacto das perturbações no sistema de controle regulatório. O tamanho das barras indica o percentual de participação de cada variável na componente que captura os efeitos desse distúrbio. A fim de verificar a capacidade de regulação das malhas, os distúrbios foram correlacionados com os sinais da variável

manipulada (MV) e o erro de controle, mostrados no eixo vertical. Dessa forma, se o sistema de controle é capaz de cumprir bem o seu papel, as perturbações externas serão refletidas apenas nas variáveis manipuladas.

A Figura 4.21A mostra o resultado dessa análise durante mudança no SP de geração elétrica. Um impacto significativo é verificado no erro da malha PIC322 que, possivelmente, não tem velocidade suficiente para rejeitar totalmente as variações na vazão de vapor (FY301). Nas outras malhas, o impacto aparece apenas nas variáveis manipuladas das malhas. Por sua vez, a atuação reguladora da pressão no tubulão (PIC322.MV) comanda a demanda térmica e o impacto é mostrado na ACP da Figura 4.21B. Entre as malhas afetadas, apenas a pressão do GAF (PIC342) sofre reflexos no erro de controle, possivelmente por problemas de dimensionamento, conforme apontado na avaliação inicial (Tabela 4.4).

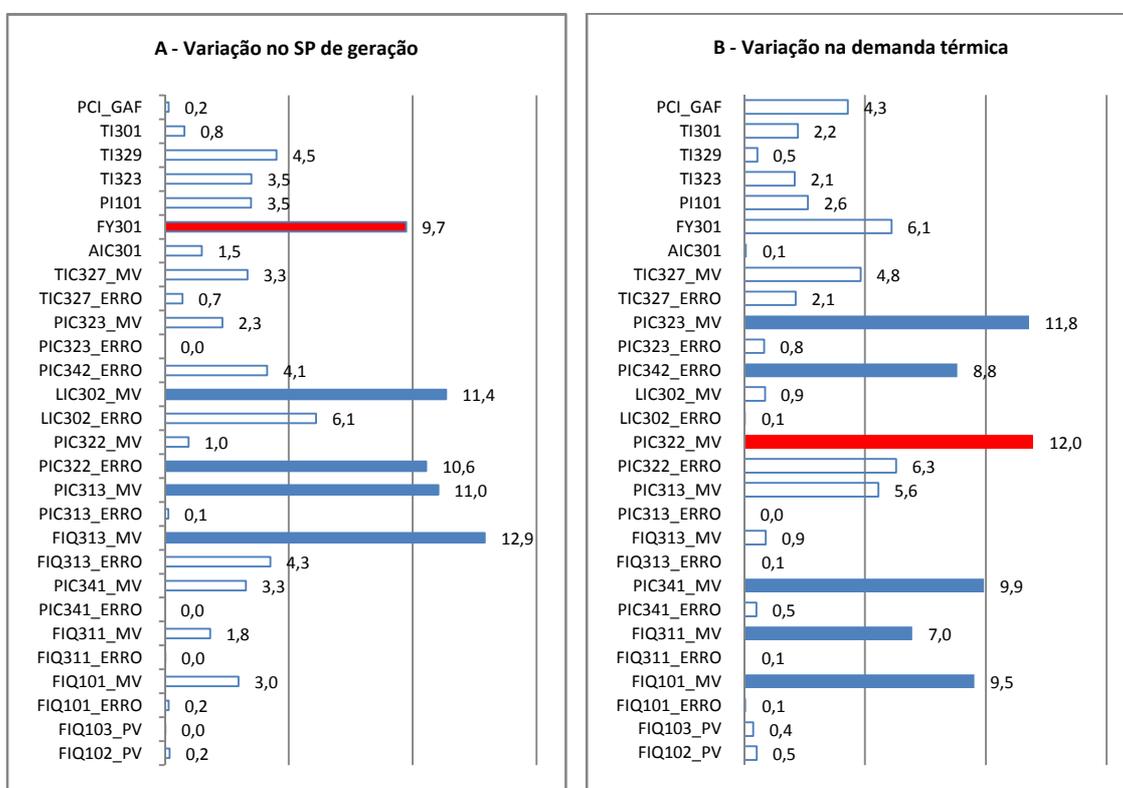


Figura 4.21 – Análise de componentes principais durante variações de carga

A Figura 4.22 mostra a ACP durante ocorrência de distúrbios externos no sistema regulatório. Conforme resultados mostrados no gráfico do lado esquerdo, distúrbios no PCI do GAF refletem-se apenas na temperatura dos gases no canal de fumos (TI329) e na concentração de oxigênio dos gases de combustão (AIC301). Este resultado mostra o impacto de variações do PCI na qualidade da queima, fato já esperado, visto que a estratégia de combustão utiliza fatores de conversão fixos.

Já o reflexo da variação na pressão do GAF medida na saída do gasômetro (PI101), é mostrado no lado direito da figura. Esta variação não é absorvida pelo

controle de pressão de entrada do GAF (PIC342.MV) e acaba refletindo na variável manipulada do controle de vazão de GAF (FIQ101.MV). Isso ocorre pelo fato da malha de pressão não ter um dimensionamento adequado.

A Figura 4.23, por sua vez, mostra o reflexo de distúrbios causados por impurezas no Alcatrão. O impacto ocorre no erro das malhas da linha de alcatrão (PIC137, PIC135 e FIQ103) e na linha de ar de combustão (FIQ311). Observando a Figura 4.24, observa-se que se trata de um distúrbio com componentes de alta frequência e isso explica o fato do sistema regulatório não conseguir rejeitá-lo.

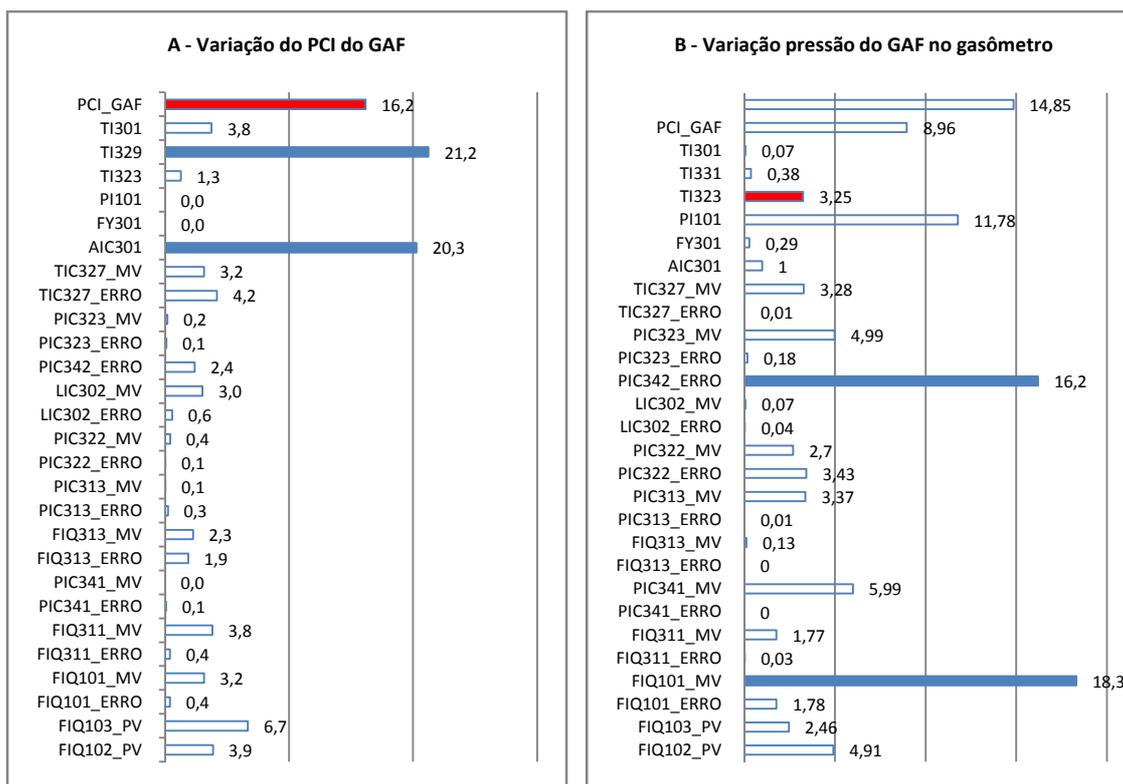


Figura 4.22 – Análise de componentes principais durante distúrbio no PCI do GAF (à esquerda) e distúrbio na pressão do gasômetro (à direita)

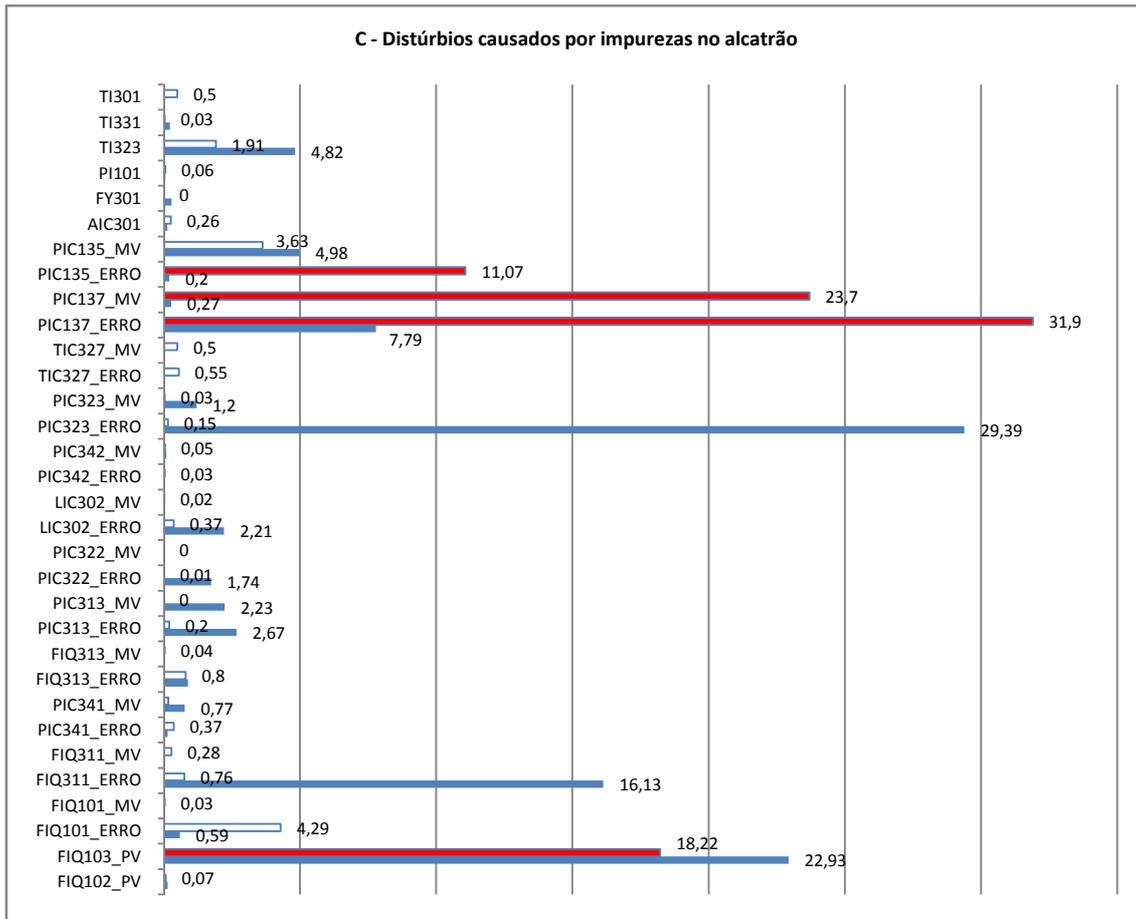


Figura 4.23 – Análise de componentes principais durante variação na qualidade do Alcatrão

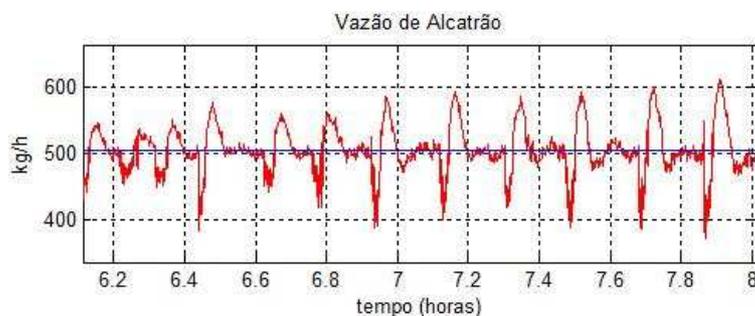


Figura 4.24 – Distúrbios causados por impurezas no alcatrão

Por último, utilizou-se a análise de correlação cruzada entre os sinais das perturbações e as variáveis correlacionadas para identificar os atrasos de propagação. Este estudo é útil para avaliar a possibilidade do uso de compensação direta. A Tabela 4.5 mostra, na coluna *Lag*, os intervalos de tempo entre a ocorrência dos distúrbios externos e seu impacto nas variáveis com que eles se correlacionam. A análise mostra, por exemplo, que a variação no *SP* de geração irá impactar no nível da caldeira após aproximadamente 4 minutos e que variações no *PCI* irão afetar a concentração de  $O_2$  após 7 minutos.

Tabela 4.5 – Correlação cruzada entre os principais distúrbios e o sistema regulatório

	SP de geração		PCI do GAF		Pressão GAF - PI101	
	Coefficiente	Lag	Coefficiente	Lag	Coefficiente	Lag
TAGS						
FIQ101_MV					-71	-19
FIQ311_MV	81	72				
FIQ313_MV	86	-249				
PIC322_MV	85	-110				
LIC302_MV	88	-235				
PIC342_ERRO					-86	-8
AIC301			-79	-440		
FY301	97	-20				
PI101					X	X
TI329			-76	-210		
PCI_GAF			X	X		
SP GERAÇÃO	X	X				

#### 4.4.2. DETECÇÃO DE OSCILAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE CAUSA RAZIZ

Além das perturbações associadas a distúrbios externos e intervenções operacionais, uma parte da variabilidade das malhas está relacionada com distúrbios internos, criados pelo próprio sistema de controle. Conforme discutido no capítulo 3, uma abordagem para tratar o assunto é a aplicação de métodos automáticos para detecção e diagnóstico de causa raiz das oscilações e de métodos para identificar acoplamentos oscilatórios entre as malhas. O procedimento utilizado nesta seção corresponde às etapas 2 a 5 no fluxograma mostrado na figura 3.2, do capítulo 3.

O primeiro passo é a seleção das faixas de estudo no domínio da frequência, que foi realizada baseando-se no conhecimento do processo. A caldeira possui malhas de controle rápidas, com ordem de grandeza em segundos (vazões e pressão de fluídos) e malhas lentas com ordem de grandeza em minutos (nível e pressão do tubulão e malhas de temperatura). Considerando que malhas de controle produzem oscilações com períodos compatíveis com a dinâmica do processo, optou-se por dividir o espectro em duas partes, frequências altas para períodos inferiores a 100 segundos e uma faixa de frequências baixas com períodos superiores a 100 segundos.

Para a detecção automática de padrão oscilatório e diagnóstico de oscilação causada por agarramento em válvula, implementou-se rotinas em Matlab® conforme alguns métodos apresentado nas seções 3.3.2 e 3.3.3, sendo:

- Método 1: Detecção de oscilação proposto por Thornhill et al. (2003). Foi aplicado separadamente aos sinais de SP, PV, MV e ERRO.
- Método 2: Detecção de oscilação proposto por Miao e Seborg (1998), aplicado ao sinal de erro das malhas.
- Método 3: Detecção de oscilação proposto por Forsman e Statin e aplicado ao sinal de erro das malhas.

- Método 4: Detecção de oscilação por agarramento de válvula proposto por Horsch (1999).
- Método 5: Detecção de oscilação por agarramento de válvula proposto por Singhal et al. (2005).

A Figura 4.25 mostra a implementação dos métodos 1, 2 e 3, usados para detecção de padrão oscilatório em séries temporais. Os algoritmos seguem exatamente os procedimentos propostos nos artigos e apresentados na seção 3.3.2. Antes da aplicação de cada método, porém, é necessário realizar a pré-filtragem dos dados para selecionar a faixa de frequência (com ciclos acima ou abaixo de 100 segundos). No caso do método 3, também foi necessário a remoção de cruzamentos espúrios de curta duração e o critério utilizado foi eliminar aqueles cujo intervalo é menor que 20% do maior intervalo de cruzamento (método 3, linha 10).

A implementação Matlab® dos dois métodos para detecção de oscilação causada por agarramento de válvula são mostrados na Figura 4.26. Seguiram-se os mesmos procedimentos propostos nos artigos. Em ambos, porém, foi necessário um pré-processamento para minimizar o efeito de ruído de medição, principalmente no método 5, que opera diretamente com os dados da série temporal.

	<pre> <b>% Metodo 1 (Thornhill at all, 2003)</b>  01 ERRO = ERRO - mean(ERRO); % remoção do valor médio 02 ACF=xcorr(ERRO,ERRO); % cálculo da FAC    %considerando apenas a segunda parte da FAC 03 ACF = ACF(round(length(ACF)/2):end); 04 aux = diff(sign(ACF)); 05 zero_cross = find(aux~=0); % detecção de cruzamento por zero 06 last_cross = min(length(zero_cross),12); 07 intervalo = diff(zero_cross(2:last_cross)); %considera-se apenas do    segundo ao décimo-segundo cruzamento 08 Tp=2*mean(intervalo); % período médio da oscilação    Sp = std(intervalo); %desvio padrão dos intervalos entre cruzamentos 09 if ((1/3)*Tp/Sp)&gt;1, ind_osc = 1; end </pre>
	<pre> <b>% Metodo 2 (Miao e Seborg, 1999)</b>  01 ERRO = ERRO - mean(ERRO); % remoção do valor médio 02 ACF = xcorr(ERRO,ERRO,'coeff'); %cálculo da função de autocorrelação 03 ACF = ACF(round(length(ACF)/2):end); %considerando apenas segunda metade    % cálculo dos parâmetros do índice de detecção (ver seção 3.3.2) 04 max1 = 1; % instante de tempo onde ocorre o primeiro máximo 05 ACFr = ACF; 06 min1 = find(ACFr==min(ACFr)); % instante onde ocorre o primeiro mínimo 07 ACFr = ACF(min1:end); 08 max2 = (min1-1)+ find(ACFr==max(ACFr)); % instante onde ocorre o segundo    máximo     % cálculo do fator R 09 R = (ACF(max2)-ACF(min1))/(ACF(max1)-ACF(min1));    % se R&gt;0.5, então existe oscilação nos dados da janela 10 if R&gt;0.5, ind_osc = 1; end </pre>
	<pre> <b>% Metodo 3 (Forsman Stattin, 1999)</b>  01 ERRO = ERRO - mean(ERRO); % remoção do valor médio    %%%identificação dos pontos de cruzamento por zero%% 02 aux = find(ERROf&gt;0); </pre>

```

03 aux2 = diff(aux);
04 aux3 = find(aux2~=1);
05 crosspoints = [1;1];
06 for i=1:length(aux3)
07     crosspoints = [crosspoints;aux(aux3(i));aux(aux3(i)+1)];
08 end
09 %%%eliminação de grupo de cruzamentos de curta duração
10 if min(diff(crosspoints))<0.2*max(diff(crosspoints))
11     yy = find(diff(crosspoints)>=0.2*max(diff(crosspoints)));
12     crosspoints = crosspoints(yy);
13 end
14 %%% cálculo dos parâmetros do índice (ver seção 3.3.3)
15 % cálculo das áreas acima (A) e abaixo (B) da linha central e dos
16 respectivos intervalos entre cruzamentos por zero (delta_A e delta_B)
17 for i=1:floor(length(crosspoints)/2)-1
18     delta_A(i) = crosspoints(2*i+1)-crosspoints(2*i);
19     A(i) = sum(abs(erro(crosspoints(2*i):crosspoints(2*i+1))));
20     delta_B(i) = crosspoints(2*i+2)-crosspoints(2*i+1);
21     B(i) = sum(abs(erro(crosspoints(2*i+1):crosspoints(2*i+2))));
22 end
23 if length(A)==1, rA = 0;end
24 if length(B)==1, rB = 0;end
25 % cálculo das relações binárias
26 for i=1:length(A)-1
27     rA(i) = (((A(i+1)/A(i))>a)&&((A(i+1)/A(i))<(1/a)))||...
28     (((delta_A(i+1)/delta_A(i))>b)&&((delta_A(i+1)/delta_A(i))<(1/b)));
29 end
30 for i=1:length(B)-1
31     rB(i) = (((B(i+1)/B(i))>a)&&((B(i+1)/B(i))<(1/a)))||...
32     (((delta_B(i+1)/delta_B(i))>b)&&((delta_B(i+1)/delta_B(i))<(1/b)));
33 End
34 % cálculo do índice de oscilação
35 if (mean(rA)+mean(rB))/2 > threshold
36     ind_osc = 1;
37     Tpmedio = (mean(delta_A)+mean(delta_B))/2;
38 end

```

Figura 4.25 – Algoritmos Matlab® para detecção automática de oscilação numa série temporal.

```

% Metodo 4 (Horch, 1999)
01 CO = CO-mean(CO); % remoção do valor médio
02 PV = PV-mean(PV); % remoção do valor médio
03 % pré-filtragem para remoção de ruído de alta frequência
04 PVf = low_filter(PV);
05 COf = low_filter(CO);
06 FCC = xcorr(PV,CO,'coeff'); % cálculo da função de correlação cruzada
07 lag = 1:length(FCC);
08 lag = lag - round(length(FCC)/2);
09 lagzero = round(length(FCC)/2);
10 %localizacao dos cruzamentos por zero
11 aux = find(FCC>0);
12 aux2 = diff(aux);
13 aux3 = find(aux2~=1);
14 crosspoints = [];
15 for jj=1:length(aux3)
16     crosspoints = [crosspoints;aux(aux3(jj));aux(aux3(jj)+1)];
17 end
18 % calculo dos critérios do índice de detecção
19 aux_p = find(crosspoints>lagzero);
20 tr = crosspoints(aux_p(1))-lagzero;
21 aux_p = find(crosspoints<lagzero);
22 t1 = lagzero - crosspoints(aux_p(end));
23 delta_t = abs(t1-tr)/(t1+tr);
24 r0 = FCC(lagzero);
25 if sign(r0)==1, rmax = max(FCC);
26 else rmax = min(FCC); end;
27 delta_q = abs(r0-rmax)/abs(r0+rmax);

```

25 26 27 28 29 30 31 32 33	<pre> % comparação dos índices com valores "threshold" para detecção if (delta_q&gt;=0) &amp;&amp; (delta_q&lt;=((2-sqrt(3))/(2+sqrt(3)))) &amp;&amp;...     (delta_t&gt;=0) &amp;&amp; (delta_t&lt;(1/3))     ind_osc(i) = 0; %#ok&lt;AGROW&gt; elseif (delta_q&gt;(1/3)) &amp;&amp; (delta_q&lt;1) &amp;&amp;...     (delta_t&gt;(2/3)) &amp;&amp; (delta_t&lt;1)     ind_osc(i) = 1; %#ok&lt;AGROW&gt; else     ind_osc(i) = 0.5; %#ok&lt;AGROW&gt; end </pre>
01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 26 27 28 29 30 31 32 33	<pre> % Metodo 5 (Singhal, 2001) % pré-filtragem para remoção de ruído de alta frequência ERROf = low_filter(ERRO); %localizacao dos cruzamentos por zero aux = find(erroaux&gt;0); aux2 = diff(aux); aux3 = find(aux2~=1); crosspoints = []; % abscissa dos pontos de cruzamento for jj=1:length(aux3)     crosspoints = [crosspoints;aux(aux3(jj));aux(aux3(jj)+1)]; end % eliminação de cruzamentos espúrios if min(diff(crosspoints))&lt;0.2*max(diff(crosspoints))     yy = find(diff(crosspoints)&gt;=0.2*max(diff(crosspoints)));     crosspoints = crosspoints(yy); end % estudo dos dados entre cruzamentos % "setor" corresponde aos dados contidos entre dois pontos de cruzamento for jj=1:length(crosspoints)-1     setor = ERROf(crosspoints(jj):crosspoints(jj+1)); % localização do vértice. Os dados são filtrados até que se tenha % no máximo duas mudanças de sinal na derivada (diff) dos dados     setorf = setor;     sinal = sign(diff(setorf)); % sinal da derivada em cada ponto     while sum(abs(diff(sinal)))&gt;4 % cada mudança de sinal tem valor 2         setorf = filter(ones(1,2)/2,1,setorf); %filtro média-móvel         sinal = sign(diff(setorf));     end     if sum(abs(diff(sinal)))==0, continue; end; % localização do vértice     pp = find(diff(sinal)~=0);     if length(pp)==2, vertice = pp(end)-pp(1);     else vertice = pp+1;end; % cálculo do índice (ver seção 3.3.3). %Se A1/A2&gt;1, a malha tem agarramento     A1 = sum(setor(1:vertice-1));     A2 = sum(setor(vertice:end));     if (A1/A2)&gt;1.2, R(jj)=1; %#ok&lt;AGROW&gt;     else R(jj)=0; end; %#ok&lt;AGROW&gt; end % se pelo menos metade dos setores forem positivos, então os dados % dessa janela são considerados como com agarramento if mean(R)&gt;0.5, R_Per(i)=1; %#ok&lt;AGROW&gt; else R_Per = 0; end; </pre>

Figura 4.26 – Algoritmos Matlab® para detecção automática de agarramento em válvula de controle.

A Tabela 4.6 exibe os resultados da aplicação destes métodos nos dados da caldeira. Utilizou-se 14 horas de dados coletados durante operação normal da caldeira, com intervalo de amostragem de 1 segundo. Os algoritmos foram executados, repetidamente, com janelas de 2 em 2 horas. Para o resultado final, considerou-se a média do índice de oscilação calculado para cada janela. Os métodos de detecção de oscilação geralmente são aplicados ao sinal de ERRO das malhas. Porém, o método 1

foi selecionado para ser aplicado também ao sinal da PV, MV e SP. O objetivo é fornecer informações que apontem para casos de malhas com referência de controle oscilatória ou malhas que oscilam mesmo com a saída saturada ou operando em modo manual. Os métodos 4 e 5 foram aplicados apenas no caso de malhas que operam com válvulas e onde foi detectada presença de oscilação.

Os diagnósticos são mostrados na linha “Detecção” com valores de 0 a 1. Quanto maior o valor, maior a certeza sobre a presença da oscilação. E no caso de um diagnóstico positivo, alguns métodos fornecem uma estimativa sobre o período da oscilação, que é mostrado na linha “Período”. As colunas referentes à “função de sensibilidade” são estimativas de alguns pontos do módulo da função de sensibilidade da malha fechada. Identificou-se a faixa de períodos que são amplificados pela malha, o período em que ocorre a amplificação máxima e o período em que ocorre atenuação de 90% (-20dB). O período onde ocorre o pico da função de sensibilidade serve de estimativa para o período de ressonância da malha. Estes dados foram obtidos a partir da função de transferência do controlador e do processo, conforme será mostrado adiante.

Com todo esse conjunto de informações, é possível determinar quais malhas estão oscilando, assim como a causa provável da oscilação. Como critério, considerou-se que valores maiores que 0.5 representam um diagnóstico positivo e, como os métodos nem sempre dão o mesmo diagnóstico, a malha foi considerada oscilatória quando fosse assim classificada por pelo menos um dos métodos. Dessa forma, pelos dados da tabela, conclui-se que FIQ313, PIC313 e LIC302 apresentam oscilação tanto de baixa frequência (período em torno de 800 segundos) como oscilação de alta frequência (em torno de 20 segundos), sendo que, em FIQ313, a oscilação também é detectada no SP. Já em PIC137, detectou-se uma oscilação de alta frequência com período em torno de 95 segundos. Em nenhum dos quatro casos foi diagnosticada oscilação causada por agarramento de válvula.

Observando os dados da função de sensibilidade, dos quatro casos de oscilação, apenas em LIC302 o período da oscilação de baixa frequência é próximo do valor estimado para o período de ressonância da malha. Esta é, portanto, uma malha suspeita de estar oscilando devido a uma sintonia inadequada do controlador, enquanto que, por exclusão, as outras provavelmente estão oscilando por carga.



#### 4.4.3. DETECÇÃO DE ACOPLAMENTOS OSCILATÓRIOS

Nesta seção, uma nova análise de acoplamentos oscilatórios é realizada, porém, de maneira alternativa, utilizando-se os métodos propostos na seção 3.3.1. Nesta abordagem, os acoplamentos causados por distúrbio internos no sistema de controle são identificados utilizando-se ferramentas de Análise de Componentes Principais Espectral (ACP Espectral) e Análise de Ciclos Comuns. Já a causa da oscilação é detectada por meio de testes intrusivos, requerendo assim pouca ou nenhuma informação *a priori* sobre o processo e sobre o controlador.

A Tabela 4.7 mostra o resultado da aplicação da ACP Espectral às duas faixas de freqüência (as mesmas utilizadas na seção anterior) numa massa de dados de 14 horas logo no início dos trabalhos. Dentro de cada faixa, o espectro foi subdividido em subfaixas para facilitar a localização no espectro de cada componente principal da ACP. Na faixa de alta freqüência (tabela da esquerda) identificaram-se duas componentes com acoplamentos oscilatórios com períodos em torno de 20 segundos. Eles incluem as malhas LIC302, FIQ313 e PIC313. Já na faixa de baixa freqüência as malhas FIQ311, PIC323, LIC302, FIQ313 e PIC313 aparecem acopladas com ciclos em torno de 800 segundos.

Tabela 4.7 – ACP das malhas da caldeira

Variáveis	Alta Freqüência			Baixa Freqüência			
	CP3	CP2	CP1	CP4	CP3	CP2	CP1
FIQ102_PV	0,2	0,3	0,8	0	9,5	3,9	1,9
FIQ103_PV	0,3	0,4	3,8	0,1	0,8	3,5	3,0
FIQ101_ERRO	3,0	0,3	3,0	3,0	0	3,7	3,0
FIQ101_MV	0,1	0,3	4,2	1,0	0,1	1,8	4,8
FIQ311_ERRO	17,4	3,0	2,1	18,8	0,2	3,4	0,8
FIQ311_MV	15,4	1,6	3,4	0,3	3,2	0,3	5,7
PIC341_ERRO	13,5	1,0	3,9	12,7	0,3	4,9	2,3
PIC341_MV	9,1	0,2	4,8	0,3	3,9	0,3	5,5
FIQ313_ERRO	2,7	14,7	0,6	2,4	3,1	7,5	2,3
FIQ313_MV	2,9	14,2	0,9	2,2	2,9	7,6	2,4
PIC313_ERRO	2,1	12,0	1,2	2,5	3,0	7,4	2,2
PIC313_MV	2,4	10,4	1,8	4,1	0,3	4,4	3,9
PIC322_ERRO	1,4	1,3	4,3	2,0	13,9	0,6	3,2
PIC322_MV	1,0	1,3	4,0	0,4	2,4	0,2	6,0
LIC302_ERRO	2,8	13,0	1,2	2,0	3,2	7,8	2,2
LIC302_MV	2,6	13,8	0,6	2,3	3,0	7,6	2,4
PIC342_ERRO	0,5	0,9	3,8	1,0	0,3	1,8	4,6
PIC342_MV	1,5	2,1	5,6	1,2	0,1	0	1,9
PIC323_ERRO	5,4	0,1	4,7	15,7	0,5	3,7	1,9
PIC323_MV	3,9	0,0	5,0	2,7	0,6	1,2	5,4
TIC327_ERRO	1,3	1,2	3,6	0,9	0,3	1,9	4,2
TIC327_MV	0,8	1,1	4,8	4,0	0	2,1	2,9
PCI_GAF	0,9	0,7	3,7	2,9	5,5	3,9	2,8
informação	8,1	18,3	39,1	5,2	8,4	23,4	44,3
amplitude	0,6	0,8	0,8	0,3	0	0,6	0,3
período	21,2	21,2	99,0	832,2	0	801,7	801,7

Já na Análise de Ciclos Comuns, foram identificadas, no espectro de baixa e alta freqüência das variáveis, as três regiões (ou núcleos) com maior participação no espectro. Na ferramenta gráfica mostrada na Figura 4.27, que considera apenas os núcleos com maior representatividade (Amp>0.2), os resultados são parecidos com aqueles obtidos com a ACP Espectral, com um grupo de acoplamentos em torno de 20

segundos (FIQ313, PIC313 e LIC302) e outro em torno de 800 segundos (LIC302, FIQ313 e TIC327).

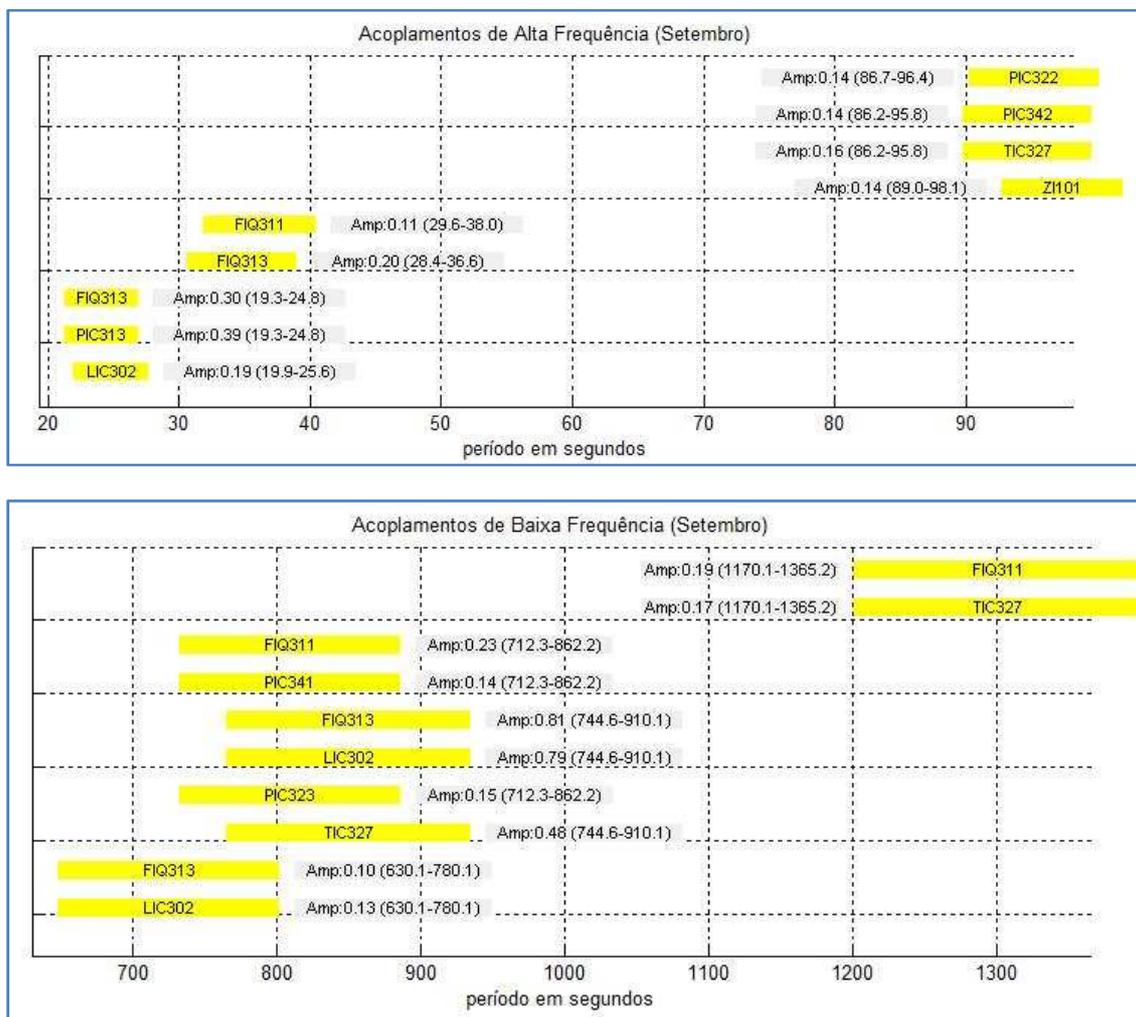


Figura 4.27 – Acoplamentos oscilatórios de alta frequência (A) e de baixa frequência (B)

O próximo passo é buscar identificar a causa raiz para as oscilações identificadas, realizado por meio de testes intrusivos.

#### Diagnóstico de causa raiz para acoplamento de baixa frequência

A Figura 4.28 mostra a tendência dos sinais de SP e PV das malhas LIC302, FIQ313 e TIC327, onde ocorre o acoplamento de baixa frequência. Nas duas primeiras, o ciclo de aproximadamente 800 segundos é bem visível no gráfico de tendência (gráficos A e B), mas não é em TIC327 (gráfico C). A razão é que esta malha apresenta outros ciclos de oscilação sobrepostos. Na Figura 4.29, parte inferior, é mostrado o espectro de frequência de TIC327. As marcações, que indicam a intensidade e posição dos três principais picos no espectro de frequência, revelam a existência de um ciclo em torno de 800 segundos. Já na parte superior, a tendência de TIC327 é reconstituída no domínio do tempo (transformada inversa de Fourier) a partir do espectro contido em torno desses três picos. Nesta versão “filtrada” de TIC327, seu acoplamento com

LIC302 fica bem mais claro. Este caso é um bom exemplo da limitação da detecção de acoplamentos usando inspeção visual e mostra a importância do uso de ferramentas no domínio da frequência.

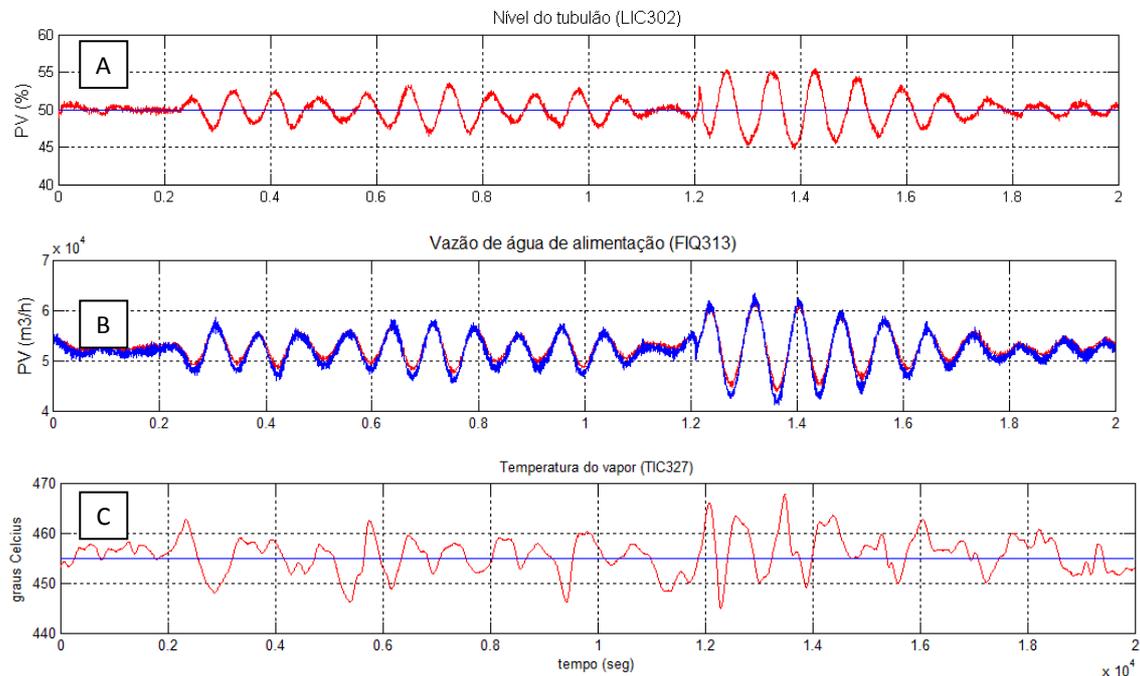


Figura 4.28 – Acoplamento de baixa frequência. Oscilação aproximadamente senoidal na PV de LIC302 (A) e no SP de FIQ313 (B). Em (C), é mostrada a tendência de TIC327 com múltiplos ciclos.

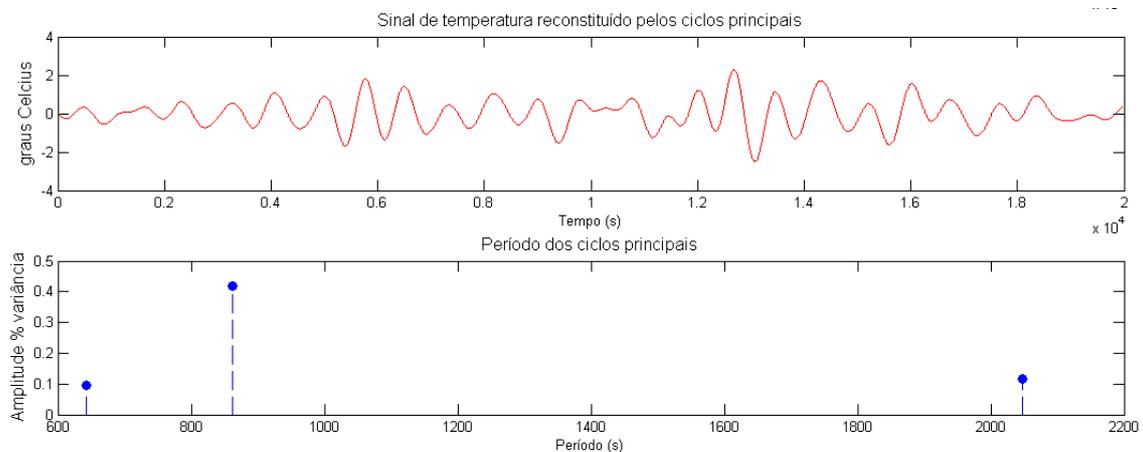


Figura 4.29 – Reconstituição do sinal de TIC327 no domínio do tempo a partir dos três principais núcleos no espectro de frequência

Em relação à origem da oscilação, tem-se que o núcleo em torno de 800 segundos corresponde a mais de 90% do espectro de LIC302 e FIQ313 (soma das intensidades dos núcleos na Figura 4.27), enquanto que corresponde a cerca de 50% do espectro de TIC327. Isso significa que se esta oscilação é causada por uma dessas malhas, é mais provável que tenha origem em uma das duas primeiras. E levando-se em conta que FIQ313 é uma malha de vazão de água, processo que, tipicamente,

possui freqüência de ressonância inferior a 100 segundos, então LIC302 é a principal suspeita.

Para confirmar este diagnóstico, a malha suspeita deve ser submetida a um teste. Conforme discutido, uma forma de saber se uma oscilação é originada em uma malha é chavear seu controlador para modo manual. A Figura 4.30 mostra o resultado deste teste em LIC302. A malha não apresenta a oscilação quando opera em modo manual, confirmando que ela é a causadora da oscilação.

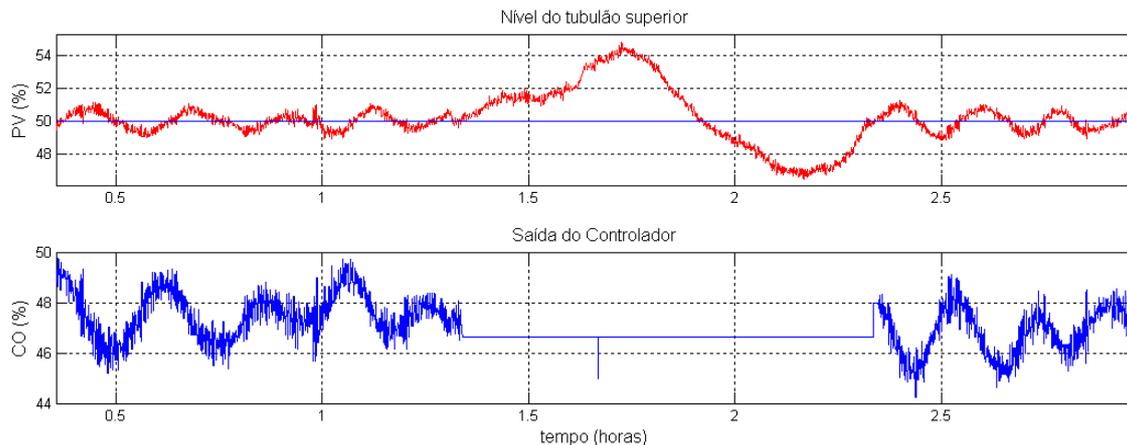


Figura 4.30 – Oscilação de 800 segundos em LIC302 desaparece após chavear controlador para modo manual

#### Diagnóstico de causa raiz para acoplamento de alta freqüência

A Figura 4.31 mostra a tendência das três malhas de controle que oscilam com uma freqüência em torno de 20 segundos. Existem duas hipóteses para a causa da oscilação. A primeira é que existe uma oscilação natural no nível do tubulão que é transmitida pelo controlador de nível para a malha de vazão (lembrando que a referência de controle de FIQ313 corresponde à saída do controlador LIC302) e, a oscilação na vazão, por sua vez, provoca a oscilação na pressão da linha (PIC302). A segunda hipótese é que a oscilação é causada por uma interação entre as malhas de pressão e vazão que possuem velocidades de resposta parecidas. E, esta oscilação na vazão provoca as flutuações no nível do tubulão.

Uma forma de verificar a segunda hipótese seria chavear a malha PIC313 para modo manual e observar se a oscilação desaparece. Porém, optou-se por chavear a malha LIC302 para modo manual, o que fez a oscilação desaparecer e confirmou a primeira hipótese. De fato, o controlador de nível estava operando com um valor elevado de ação derivativa. Esta estava reproduzindo, na saída de controle, as oscilações naturais do nível do tubulão e perturbando as malhas de vazão e pressão de água.

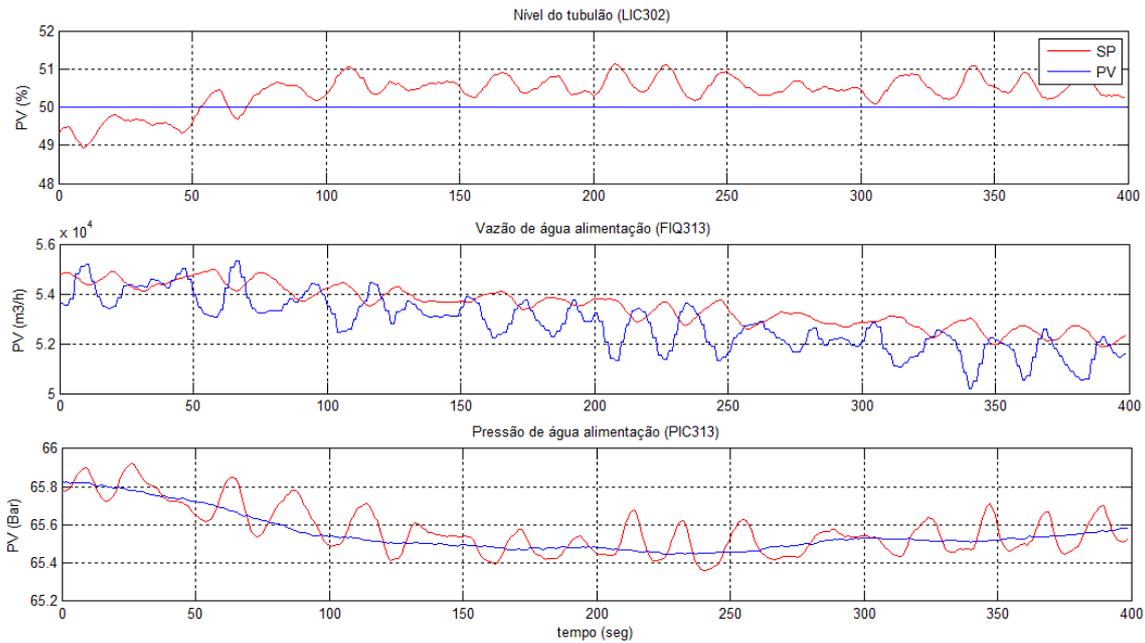


Figura 4.31 – Gráficos de tendência do acoplamento de alta frequência entre LIC302, FIQ313 e PIC313

#### 4.5. OTIMIZAÇÃO E AÇÕES CORRETIVAS

A partir das conclusões obtidas com o desenvolvimento das fases I e II é possível pontuar quais são as principais deficiências e melhorias potenciais no funcionamento do sistema de controle regulatório. Combinando-se as informações obtidas com o levantamento de campo, a avaliação inicial de desempenho e os diagnósticos de acoplamentos oscilatórios, chega-se a diversas propostas de melhoria para os sistema. Resumidamente, destacam-se:

1. **Melhoria no controle de pressão da caldeira:** Este controle é determinante na qualidade do vapor produzido e opera com desempenho apenas razoável, com variabilidade relativa inicial de 56%. Por isso, a melhoria de seu desempenho deve ser priorizada. Uma forma de aperfeiçoar-lo é reduzir ao máximo os tempos de resposta dos controles de vazão de combustíveis e do ar de combustão e, em seguida, realizar um ajuste de sintonia do controlador PIC322 para rejeitar ao máximo as perturbações de carga. Outra possibilidade é a antecipação de variações de carga utilizando um elo de compensação direta para a demanda do sistema de combustão conforme mostrado na Figura 4.5;
2. **Melhoria no controle estequiométrico:** Na seção 4.2.9 foram identificadas algumas limitações na estratégia de combustão que causam incoerências na razão estequiométrica. O aumento no excesso de ar, no caso de saturação do combustível, e o uso de fatores estequiométricos constantes, em contraste com o uso de um combustível cujo poder calorífico é variável (gás de alto forno). As soluções sugeridas na seção 4.2.10 são alterações na estratégia de controle com

o uso parcial de duplo-limites cruzados e correção automática de fatores estequiométricos;

3. Seleção automática da mistura de combustíveis: A eficiência energética pode ser melhorada com a uso de uma estratégia que minimize automaticamente o uso de combustíveis mais caros, no caso, o gás natural;
4. Eliminação das oscilações no circuito de água: Boa parte da variabilidade medida nas malhas do circuito de água (LIC302, FIQ313 e PIC313) é resultado de oscilações produzidas por ajuste inadequado do controle de nível (LIC302), problema que pode ser corrigido com um ajuste de sintonia do controlador e a filtragem da medição de nível para eliminar do sinal as variações de alta frequência em decorrências das ondulações do líquido no tubulão. Vale ressaltar que uma melhor regulação dessas malhas pode, indiretamente, reduzir a variabilidade de outras malhas importantes, tais como PIC322 e TIC327;
5. Estratégia avançada para controle de nível do tubulão: Conforme citado na seção 4.2.5, o controle de nível pode ser melhorado com adição de elos de compensação direta para variação de carga e para compensação do efeito de “inchamento”. Outra estratégia interessante seria o uso de ajustes diferentes para o controlador de nível, dependendo da condição de operação do regenerador;
6. Melhoria no controle de temperatura do vapor: Este controle é crítico, podendo causar paradas na planta dependendo da amplitude da temperatura, e opera com desempenho ruim (variabilidade relativa inicial de 62.8%). Uma melhoria imediata seria um novo ajuste de sintonia do controlador com objetivo de maximizar seu desempenho regulatório. Outras melhorias dependeriam de alterações na atual estratégia de controle, incluindo o emprego de compensação direta para variação de carga, adição de uma malha escrava para controle da vazão de água e adição de um segundo controlador para regulação da temperatura logo antes da turbina;

Infelizmente neste trabalho, ações que demandassem alterações na programação do SDCD não foram possíveis. Por isso, entre as ações acima citadas, apenas a primeira e a quarta foram exploradas. Assim, o trabalho nesta fase consistiu no ajuste de sintonia de quase todos os controladores, redimensionamento das constantes de tempo dos filtros e dos tempos de amostragens e testes em atuadores do tipo válvula para estimar a variabilidade causada por não-linearidades.

#### 4.5.1. PREPARATIVOS PARA TESTES

Boa parte do trabalho consistiu na realização de testes em malha aberta para modelagem matemática e avaliação de atuadores. Realizou-se uma série de preparativos, de acordo com o que foi proposto na seção 3.4.1.

A coleta de dados foi realizada por meio de conexão OPC, cujo tempo de amostragem mínimo é de 1 segundo, ou por meio de aquisição direta de dados usando um *notebook* equipado com placa de aquisição de 12 bits e tempo de amostragem de 10 ms. A conexão da placa de aquisição diretamente aos cartões de E/S do SDCD foi viabilizada com o uso de cabos blindados e pinças especiais. As pinças, fornecidas pela Fusibrás, por serem flexíveis nas extremidades, permitiram a conexão dos cabos nos parafusos dos bornes sem nenhuma interferência nas conexões do painel. Uma ilustração do tipo de pinça utilizada é mostrada na Figura 4.29..



*Figura 4.32 – Ponto de prova de pinça utilizada para a conexão com o painel. FONTE: Fusibrás*

A decisão pelo uso da placa de aquisição foi determinante para o projeto de alguns controladores. A Figura 4.33 exemplifica a coleta de dados utilizando OPC (linha grossa) e a aquisição direta (linha fina), com período de 10 milissegundos, durante um teste realizado com uma malha de pressão. Aparentemente elas se diferenciam apenas pela presença de um ruído de alta frequência presente no sinal de aquisição direta. No entanto, após a aplicação de técnicas de identificação aos dois sinais (ver Figura 4.34), modelos completamente distintos foram obtidos. A explicação é que para capturar a dinâmica real do processo, os dados devem ser amostrados com um período com pelo menos uma ordem de grandeza menor que a dinâmica dominante do processo. Como tal processo responde com apenas uns poucos segundos, a coleta via OPC foi inadequada.

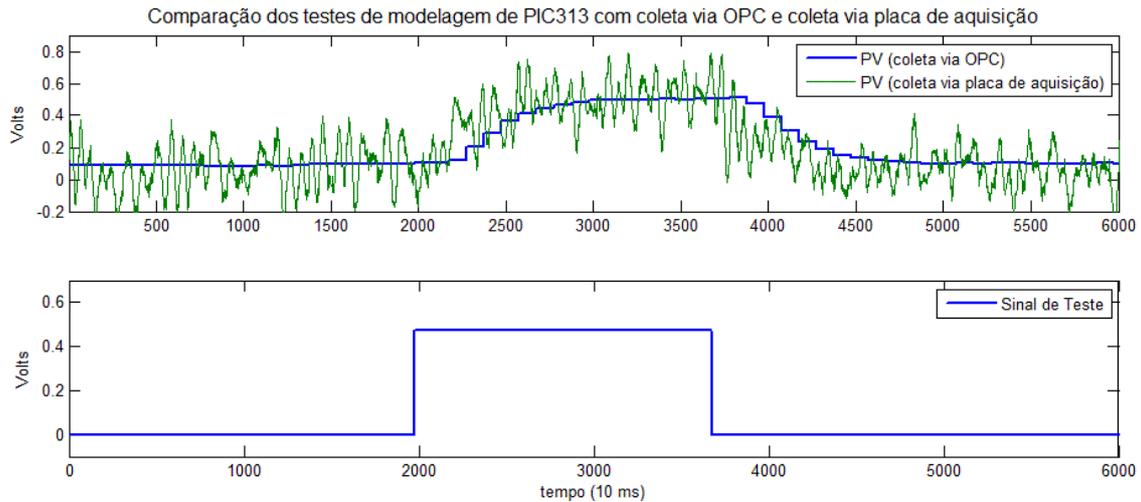


Figura 4.33 – Comparação da coleta de dados utilizando OPC (linha grossa) e a aquisição direta (linha fina)

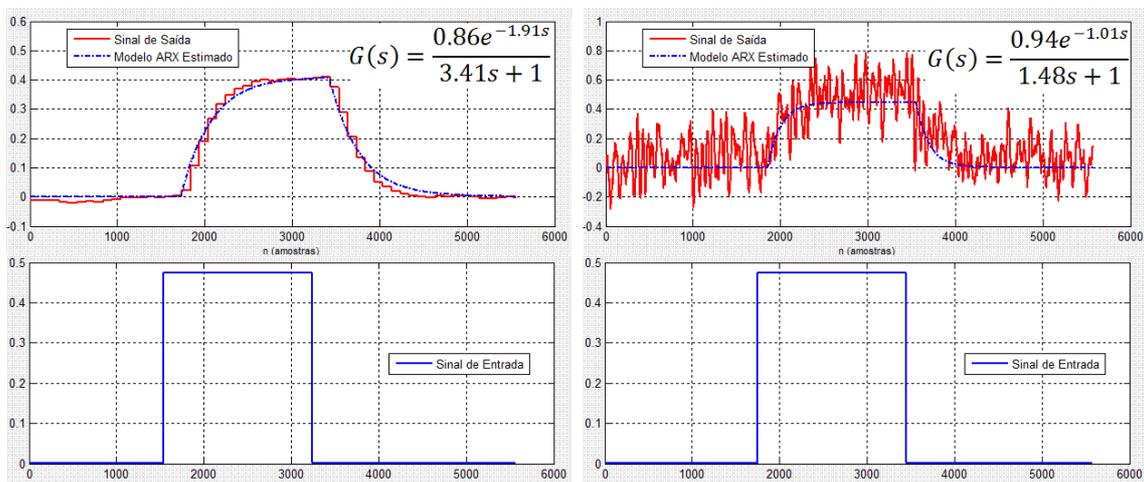


Figura 4.34 – Aplicação de técnicas de identificação para modelagem dos dados mostrados na figura anterior.

Outro item importante durante os testes é a supervisão das tendências de todas as malhas que estão operando em modo manual ou outras variáveis críticas que podem ser afetadas ou que podem afetar os testes. Esta supervisão foi realizada com uma ferramenta OPC Trend, da CanaryLabs®, que coleta dados em tempo real e registra em tela as tendências de diversas variáveis simultaneamente. A Figura 4.35 mostra a supervisão dos testes na malha de pressão de bombeamento de água (PIC313). Além dos *tags* de PIC313, foram incluídos os *tags* das malhas que foram chaveadas para operação em modo manual (LIC302 e FIQ313). A pressão do tubulão, que deve ser sempre menor que a pressão de bombeamento, também foi incluída. Se qualquer uma dessas variáveis tendesse a sair de uma determinada faixa de segurança, os testes poderiam ser imediatamente abortados, sem risco de danos. Todos os preparativos dos testes, assim como das ações de contingência foram previamente determinados e descritos no documento “Planejamento de Experimentos”, mostrado parcialmente no Anexo B.

Outra ferramenta utilizada no trabalho foi um banco de dados temporal, implementado em Microsoft Access® e manipulado por uma aplicação Elipse®. Este banco registrou, com amostragem de 1 segundo, os *tags* de todas as malhas e de diversas outras variáveis de interesse durante os 3 meses de execução do projeto.

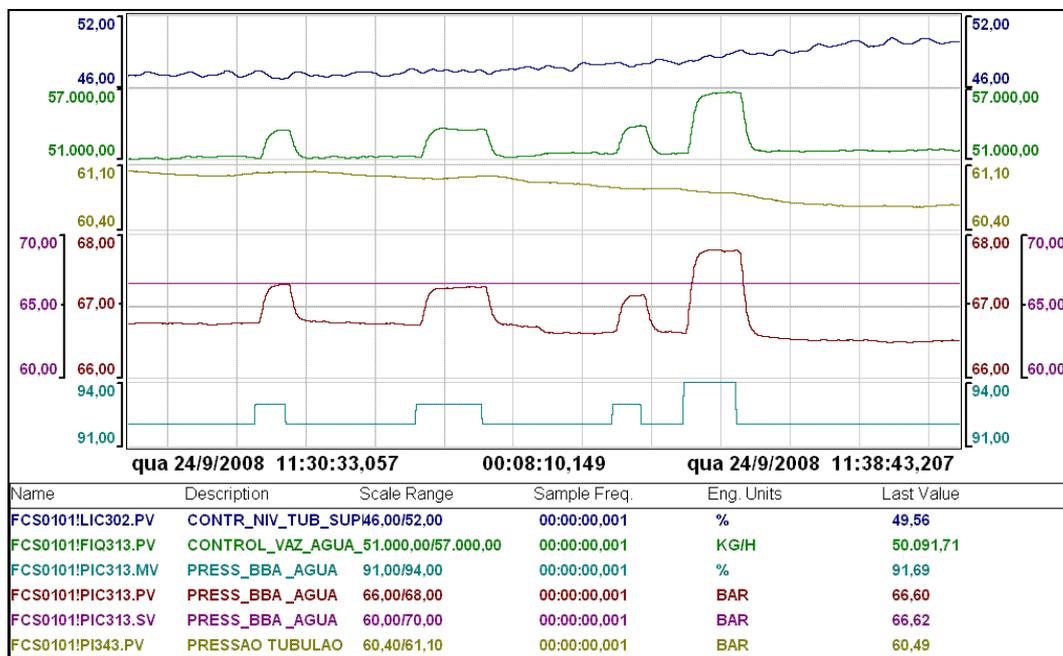


Figura 4.35 – Ferramenta utilizada para supervisão dos testes

Após os testes de modelagem, a estrutura do modelo foi definida de acordo com o controlador a ser utilizado, com modelo matemático de primeira ordem com tempo morto para controladores PI e modelos de segunda ordem com tempo morto para controladores PID. A identificação dos parâmetros de cada modelo foi realizada utilizando o método de Mínimos Quadrados Múltiplos Modelos (Niu e Ljung, 1994). Para agilizar a manipulação dos dados, uma interface gráfica amigável foi criada por um estudante do laboratório para a manipulação do algoritmo (Michel, 2008). Uma tela desta *interface* é mostrada na Figura 4.36.

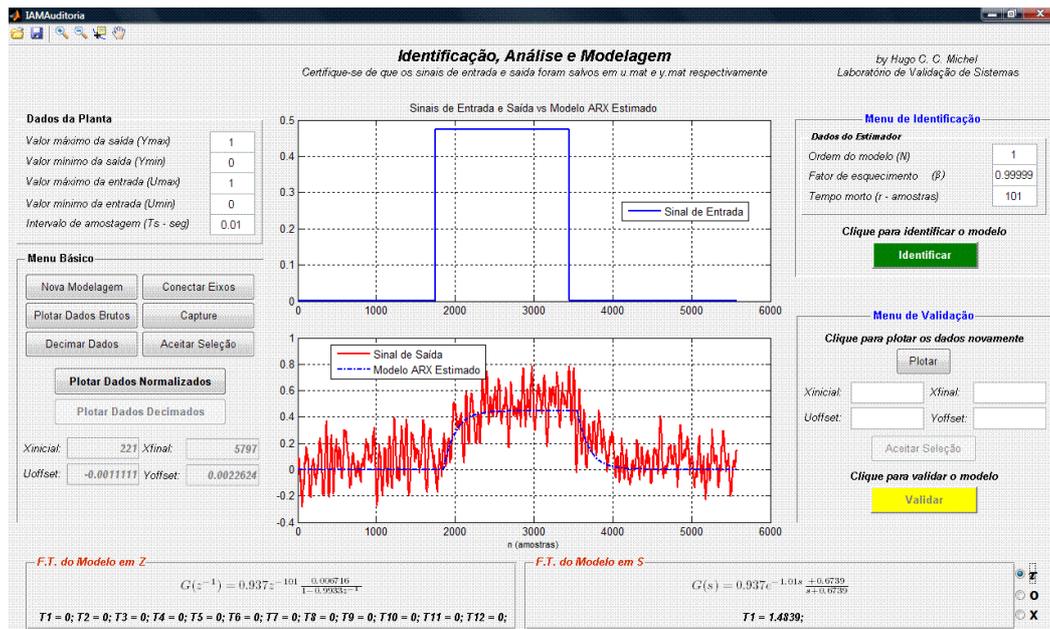


Figura 4.36 – Interface gráfica para manipulação do algoritmo de identificação utilizando mínimos quadrados múltiplos modelos.

O algoritmo PID do controlador utilizado, Yokogawa CS3000, é mostrado na equação 1, onde  $\Delta T$  corresponde ao período de amostragem, TI é o tempo integral em segundos, TD é o tempo derivativo em segundos, PB é a banda proporcional,  $E_n$  corresponde ao erro de controle na atual amostragem e  $K_S$  é um fator de normalização para que o erro, originalmente em escala de engenharia, opere numa escala de 0 a 100. Trata-se de um algoritmo incremental, onde se computa, a cada amostragem, um incremento para ser somado na atual ação de controle (MV) e com uma estrutura dependente (ganho proporcional em evidência).

$$\Delta MV_n = \frac{100}{PB} \times K_S \left[ \Delta E_n + \frac{\Delta T}{TI} E_n + \frac{TD}{\Delta T} \Delta(\Delta E_n) \right] \quad \text{Equação 1}$$

Para o ajuste dos parâmetros de sintonia do controlador (PB, TI e TD), foi desenvolvida uma rotina de cálculo baseada em métodos de sintonia clássicos, tais como **Síntese Direta** para modelos de primeira e segunda ordem e **Lambda Tuning** para processos integradores. Uma breve descrição desses dois métodos de sintonia encontra-se no anexo D. Este métodos também se baseiam num controlador com estrutura dependente, assim os resultados podem ser utilizados diretamente após as devidas conversões de unidade, ou seja, unidade de tempo em segundos, ganho do processo em escala normalizada e ganho do controlador em banda proporcional.

Como não foi realizada uma análise efetiva de robustez, o valor mínimo para o tempo de acomodação das malhas foi restringido para obtenção de respostas aproximadamente sobreamortecidas. Outro critério utilizado foi escolher, entre os modelos obtidos para determinado processo, aqueles parâmetros que representassem o “pior caso”. Isso significa considerar no projeto do controlador o maior tempo morto, o maior ganho e a menor constante de tempo, entre aqueles identificados. Assim,

buscou-se evitar respostas oscilatórias ou até mesmo instáveis, mesmo na ocasião de variações no comportamento do processo.

A seguir são descritos os procedimentos adotados em todas as malhas de controle. O trabalho foi dividido em duas etapas. Iniciou-se com o ajuste de sintonia das malhas do circuito de água e foi finalizado com o ajuste das malhas do sistema de combustão.

---

#### 4.5.2. MALHAS DO CIRCUITO DE ÁGUA

A descrição completa das malhas do circuito de água encontra-se nas seções 4.2.4 e 4.2.5. Resumidamente, LIC302 controla o nível de água do tubulão da caldeira atuando na malha que controla a vazão de alimentação de água (FIQ313). A pressão da água que alimenta este sistema é controlada por PIC313 que controla a velocidade de bombeamento de água. TIC327, por sua vez, controla a vazão de uma extração de água dessa mesma linha para resfriamento do vapor após o superaquecedor.

A estratégia adotada para a sintonia dessas malhas foi, primeiramente, ajustar as malhas PIC313, FIQ313 e LIC302 com velocidades diferentes para evitar interações entre elas. A malha PIC313 foi ajustada para ser a mais “rápida” (com o menor tempo de acomodação). FIQ313 foi, em seguida, ajustada com um tempo de acomodação pelo menos 4 vezes maior que PIC313 e, por último, LIC302 com tempo de acomodação pelos menos 4 vezes maior que FIQ313. Esta seqüência é necessária já que LIC302 depende do estabelecimento do controle de vazão que, por sua vez, depende do estabelecimento da pressão na linha. Já a malha TIC327 foi sintonizada para ter o menor tempo de acomodação possível.

##### PIC313 - Controle da Pressão de Bombeamento de Água

No PIC313 adotou-se a seqüência de testes simplificada, apenas com uma série de degraus em sentidos alternados, conforme mostrado na Figura 4.37. Durante os testes, as malhas FIQ313 e LIC302 foram mantidas em modo manual para evitar perturbações.

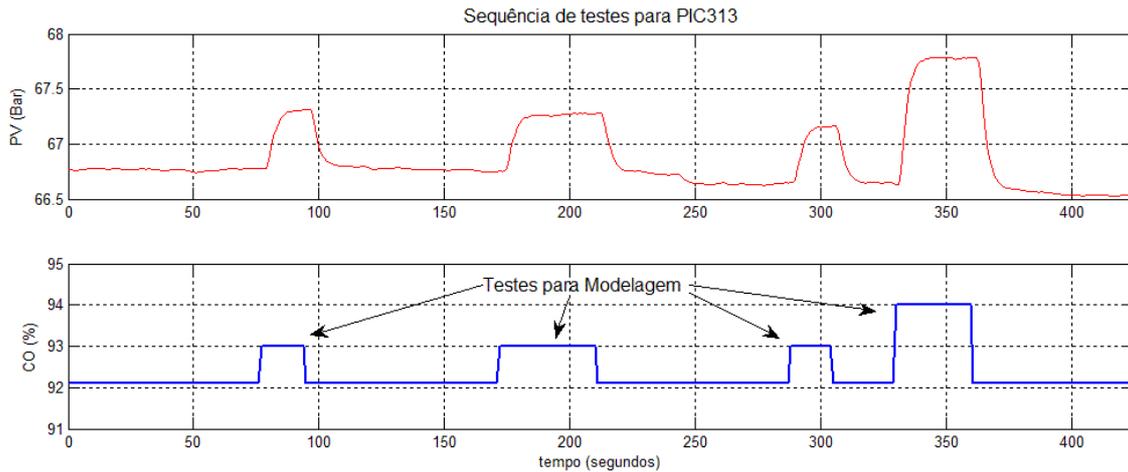


Figura 4.37 – PIC313. Seqüência de teste em malha aberta

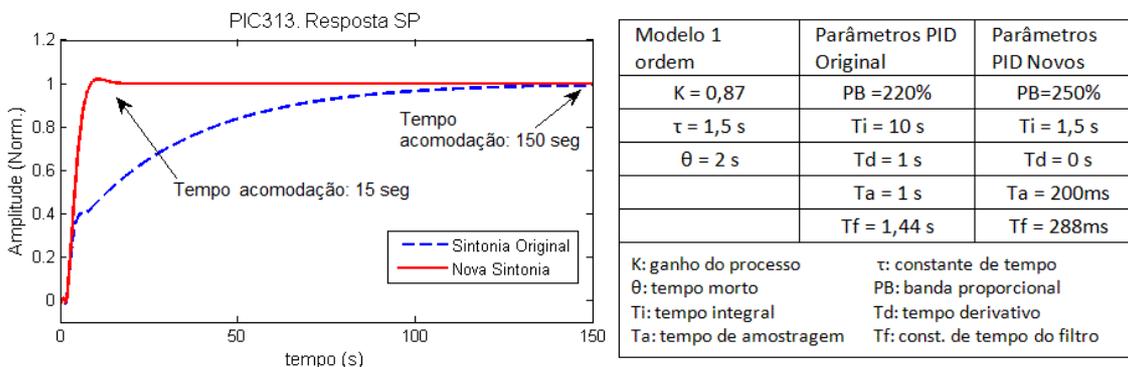


Figura 4.38 – PIC313. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.

O modelo considerado e os antigos e novos parâmetros de sintonia são mostrados na Figura 4.35, juntamente com a simulação mostrando a resposta à mudança de SP antes e depois. O tempo de amostragem desta malha também foi reduzido de 1 segundo para 200 milissegundos. Observa-se que, com o novo ajuste, o tempo de acomodação em malha fechada foi reduzido em aproximadamente dez vezes.

FIQ313 – Vazão de alimentação de água para a caldeira

Durante os testes nesta malha, o controle de nível da caldeira foi mantido em manual, enquanto que o controle de pressão de bombeamento (PIC313) foi mantido em automático, já com seus novos parâmetros de sintonia. A Figura 4.39 mostra os testes realizados. Adotou-se uma seqüência completa de teste, incluindo os testes para modelagem e testes específicos para a válvula de controle FCV313.

O teste de histerese é utilizado para medição do percentual de folga mecânica e é realizado com uma seqüência de três degraus, dois num sentido e o terceiro em sentido oposto. O primeiro é utilizado para posicionar a válvula numa condição livre de folgas. O segundo é utilizado para calcular o ganho real do sistema. No terceiro, realizado em sentido oposto, o percentual de deslocamento real do processo é

comparado com aquele teórico, que seria obtido com uma válvula isenta de folgas. Este cálculo foi realizado e revelou uma histerese de aproximadamente 0.15%, que é considerado desprezível.

Já o teste de agarramento revelou variação na vazão apenas após o terceiro degrau de 0.1%, ou seja, um agarramento inferior a 0.3%. Pela equação 7, da seção 3.3.4, este agarramento seria responsável em produzir uma variabilidade de aproximadamente 0.18%, que também é considerado desprezível para esta malha.

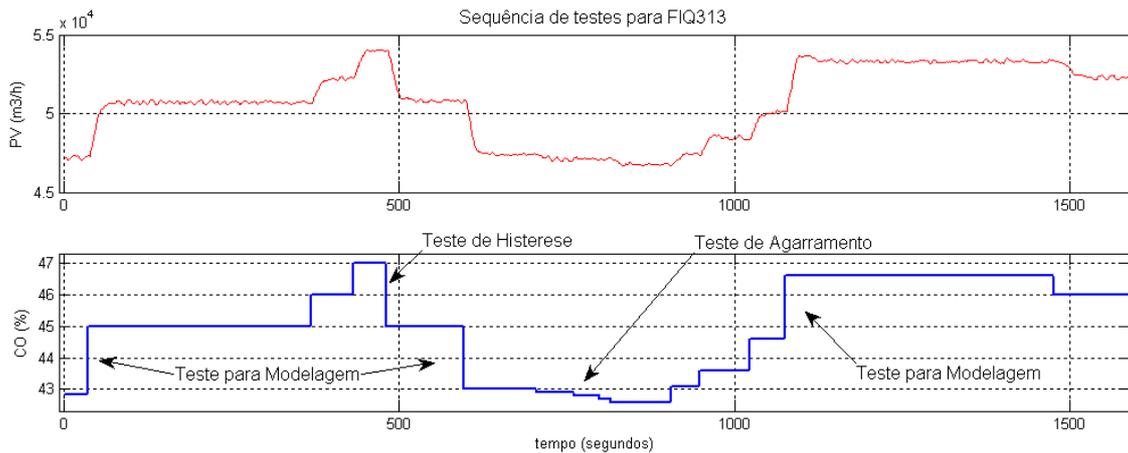
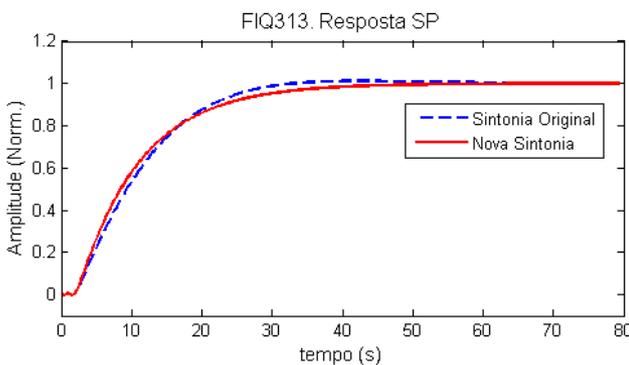


Figura 4.39 – FIQ313. Seqüência de teste em malha aberta

Os parâmetros do modelo de primeira ordem são mostrados numa tabela na Figura 4.40, juntamente com os parâmetros de sintonia originais e os novos parâmetros calculados utilizando o método de síntese direta para função de transferência de 1ª ordem. A figura também mostra uma simulação da resposta à mudança de SP antes e após a modificação nos parâmetros. O tempo de acomodação é praticamente o mesmo, em torno de 60 segundos. Entretanto a nova sintonia apresenta maior robustez, com uma resposta mais sobreamortecida.



Modelo 1 ordem	Parâmetros PID Original	Parâmetros PID Novos
K = 1,76	PB = 270%	PB = 217%
$\tau = 9,1$ s	Ti = 7 s	Ti = 9,1 s
$\theta = 2$ s	Td = 1 s	Td = 0 s
	Ta = 1 s	Ta = 1 s
	Tf = 1,44 s	Tf = 1,44 s

K: ganho do processo	$\tau$ : constante de tempo
$\theta$ : tempo morto	PB: banda proporcional
Ti: tempo integral	Td: tempo derivativo
Ta: tempo de amostragem	Tf: const. de tempo do filtro

Figura 4.40 - FIQ313. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.

### LIC302 – Controle de nível do tubulão

Um processo de controle de nível é considerado integrador se, a partir de uma diferença entre as vazões de entrada e saída, o nível (variável controlada) varia em relação ao tempo com uma taxa constante até que um limite seja atingido (tanque totalmente cheio ou tanque vazio). No caso do tubulão da caldeira, além da característica integradora, também pode existir uma dinâmica de fase não-mínima resultado dos fenômenos de têmpera e “inchamento”, conforme discutido na seção 4.2.5.

A Figura 4.41 mostra a seqüência de testes em malha aberta efetuada em LIC302. Realizou-se quatro mudanças na vazão de alimentação, indicados na figura por D1, D2, D3 e D4. Entre um degrau e outro se nota uma tendência aproximadamente linear no nível do tubulão, cujas inclinações são indicadas por S1 a S5, o que caracteriza este processo como sendo realmente integrador. Observa-se também que a mudança na inclinação não ocorre imediatamente após a mudança na alimentação. Existe um atraso possivelmente relacionado com efeito de “inchamento”.

A estrutura escolhida para o modelo é o de uma função de transferência com ganho, K, um pólo na origem e um atraso puro de tempo,  $\theta$ , (equação 2). Apesar de ser um modelo matemático bastante simples para representar este processo, ele é suficiente para o projeto de um controlador tipo PI.

$$G(S) = \frac{K e^{-\theta s}}{s} \quad \text{equação 2}$$

Com o valor das inclinações, calculadas utilizando regressão linear, o ganho, K, foi obtido utilizando a relação mostrada na equação 3. Já o tempo morto foi estimado visualmente.

$$K = \frac{\left(\frac{S2-S1}{D1}\right) + \left(\frac{S3-S2}{D2}\right) + \left(\frac{S4-S3}{D3}\right) + \left(\frac{S5-S4}{D4}\right)}{4}, \quad \text{equação 3}$$

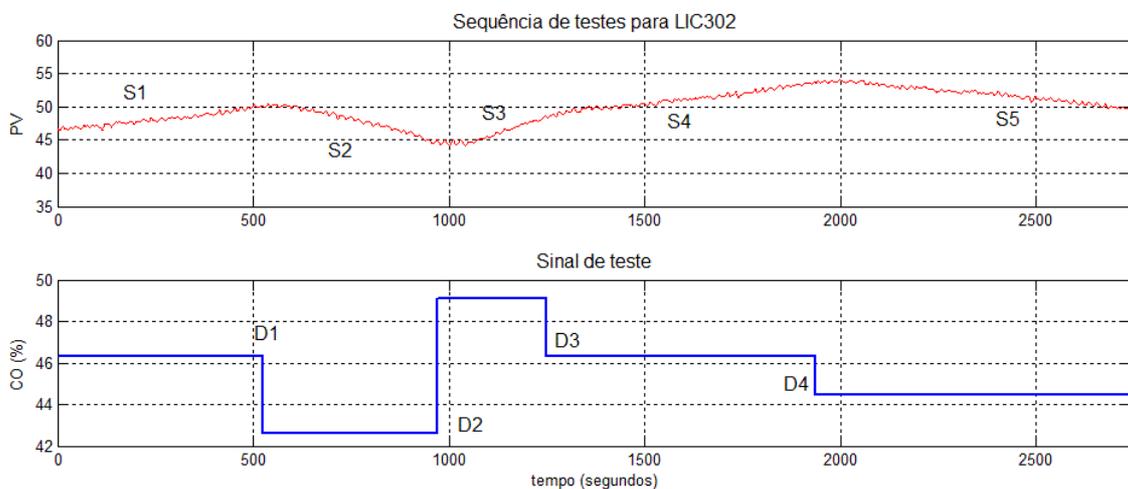


Figura 4.41 – LIC302. Seqüência de teste em malha aberta

Os parâmetros calculados para o modelo são mostrados na tabela exibida na Figura 4.39, juntamente com os parâmetros de sintonia originais e os novos parâmetros calculados utilizando “*lambda tuning*” para processo integrador. A figura também mostra uma simulação da resposta à mudança de SP antes e após a modificação nos parâmetros. Destaca-se que a resposta original era instável, com oscilação com período próximo de 800 segundos, confirmando todos os diagnósticos preliminares.

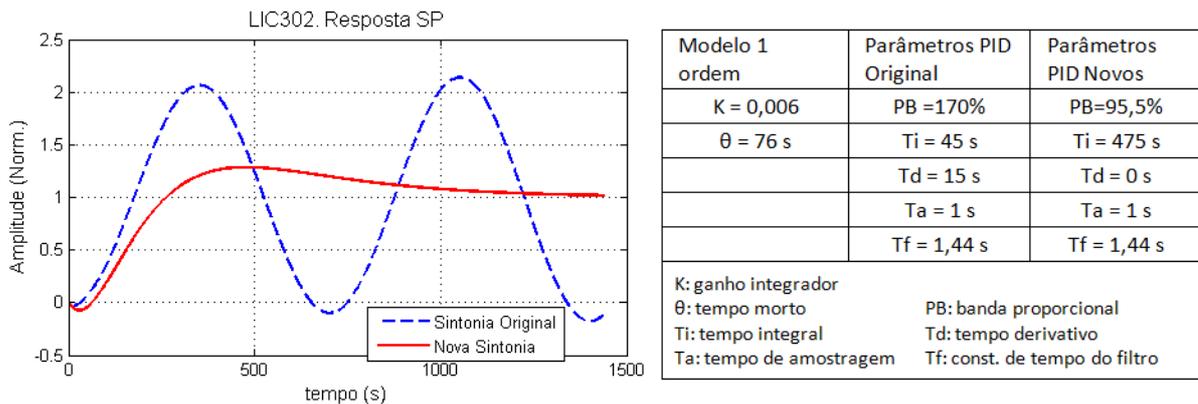


Figura 4.42 – LIC302. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.

### TIC327 – Controle da temperatura do vapor superaquecido

A modelagem matemática desta malha foi a mais desafiadora. Mesmo operando o sistema de combustão em modo manual para evitar variações na temperatura do vapor gerado, a malha é submetida a constantes perturbações de carga relacionadas com variações na vazão do vapor produzidas pelo controle da turbina. Além disso, os testes eram demorados, devido à dinâmica lenta do processo (tempo do transitório superior a 500 segundos). Foram realizadas diversas tentativas com testes ao degrau, testes duplo-pulso e até mesmo utilizando sinal de teste do tipo PRBS<sup>3</sup>. Este último foi realizado com uma seqüência que durou duas horas, mas ficou inadequado para modelagem, pois necessitaria de seqüência bem mais extensa para ser capaz de relevar os efeitos da perturbação.

A Figura 4.43 mostra uma seqüência de testes ao degrau, realizada num momento em que o processo operava de maneira bastante estável. Nela foram considerados 5 testes como sendo passíveis de modelagem, pelo fato da perturbação não ter sido excessiva. Em destaque na figura estão momentos em que, notadamente, ocorreram perturbações de carga com amplitude comparáveis àquelas produzidas pelos testes.

<sup>3</sup> Sinal binário pseudo-aleatório

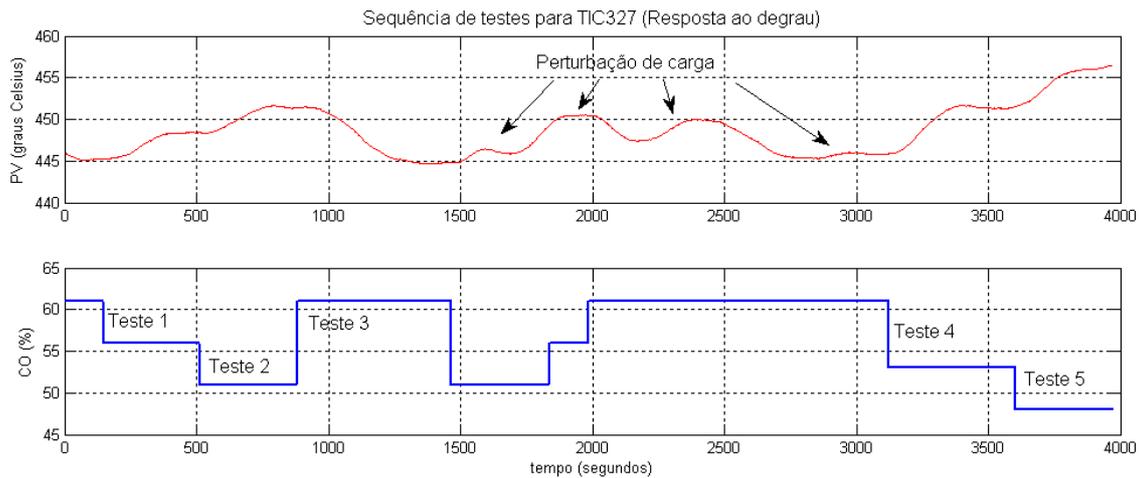


Figura 4.43 – TIC327. Seqüência de teste em malha aberta

Diferentemente das outras malhas, onde o modelo matemático escolhido é aquele que resultaria num controlador mais “conservador”, em TIC327, o modelo considerado foi obtido pela média dos parâmetros de todos os modelos. Com isso esperou-se que os efeitos das perturbações presentes durante todos os testes fossem minimizados. Em seguida, um teste em duplo-pulso foi realizado na malha para validação do modelo obtido. A Figura 4.44 mostra a comparação dos dados reais com a simulação a partir do modelo médio. O resultado foi considerado satisfatório e o modelo aprovado.

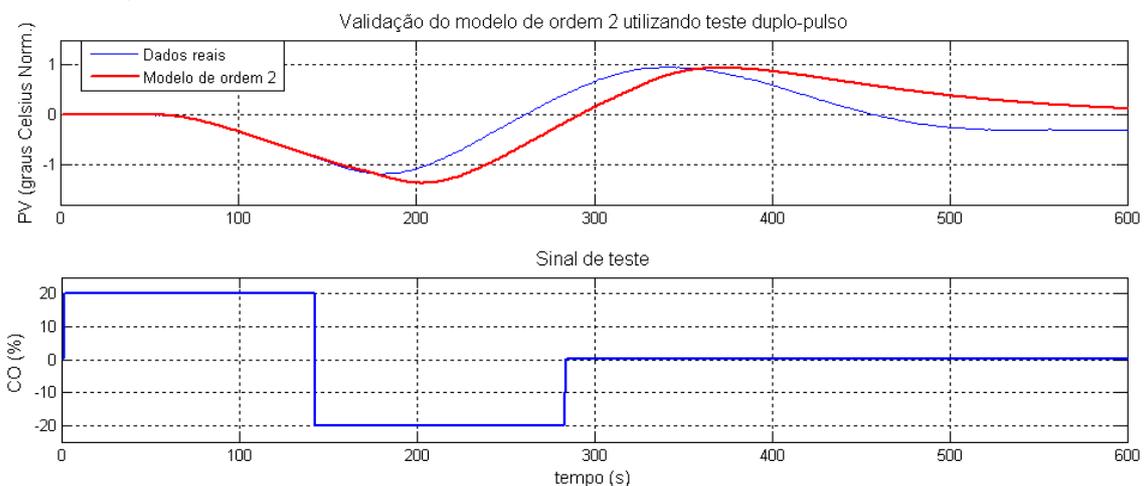


Figura 4.44 – TIC327. Teste em malha aberta do tipo duplo-pulso para validação

Os parâmetros do modelo de segunda ordem são mostrados numa tabela na Figura 4.45, juntamente com os parâmetros de sintonia originais e os novos parâmetros calculados utilizando o método de síntese direta para função de transferência de 2 ordem. A figura também mostra uma simulação da resposta à mudança de SP antes e após a modificação nos parâmetros. Nota-se que a malha operava praticamente em malha aberta, com tempo de acomodação 10 vezes maior que o obtido com o novo ajuste.

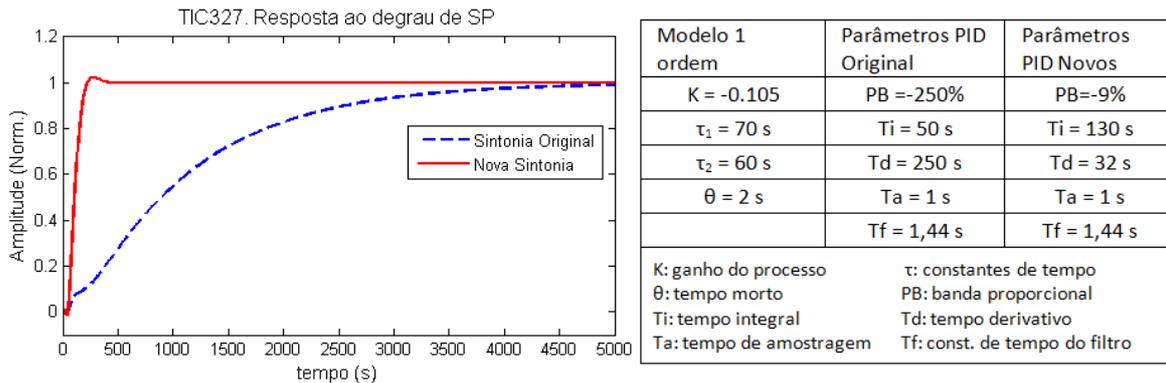


Figura 4.45 – TIC327. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia.

#### 4.5.3. OTIMIZAÇÃO DAS MALHAS DO SISTEMA DE COMBUSTÃO

A descrição completa das malhas do sistema de combustão foi apresentada nas seções 4.2.6, 4.2.7 e 4.2.8. Resumidamente, PIC322 é a malha mestre do sistema, determinando a demanda térmica, ou seja, a referência de controle para a vazão de ar de combustão (FIQ311) e vazão dos combustíveis (FIQ101, FIQ102 e FIQ103). As linhas de GAF, Alcatrão e Ar de combustão possuem também controladores de pressão na alimentação (PIC342, PIC137 e PIC341, respectivamente), enquanto que o controle de pressão da linha de GN opera com uma válvula auto-pilotada.

A estratégia adotada para a sintonia das malhas foi a realização de testes em malha aberta em todas as linhas. Primeiramente as malhas de pressão são modeladas com as malhas de vazão operando em manual para evitar que esta última provoque perturbações. Em seguida, as malhas de vazão são modeladas com as malhas de pressão operando em automático e já com os novos parâmetros de sintonia.

Em relação à velocidade das malhas (medida pelo tempo de acomodação), existem regras importantes a serem seguidas. Para evitar interação entre as malhas de pressão e vazão, uma delas deve ser sintonizada para ser em torno de 4 vezes mais rápida que a outra. Nas linhas de alcatrão e ar de combustão, a malha de pressão foi escolhida para ser a mais rápida, pois isso elimina a possibilidade do elemento ativo (ventilador ou bomba) sofrer sobrecarga por conta da atuação da malha de vazão. Além disso, uma pressão a montante estável e independente da vazão é uma condição desejável para uma boa operação da válvula de controle. Já na linha de gás de alto forno, onde tanto o controle de pressão como o de vazão atuam sobre elementos passivos (válvula), a malha de vazão foi escolhida para ser a mais rápida, pois sua velocidade é determinante para o desempenho de todo controle de combustão. Esta escolha não traz tanto prejuízo à malha de pressão, pois sua função é compensar variações lentas e de grande amplitude na pressão do gasômetro.

A outra regra é garantir um sincronismo entre as malhas de vazão de ar e de vazão de combustíveis que operam como escravas do controle de pressão da caldeira. Se as malhas operam com velocidades semelhantes, a razão estequiométrica será

mantida, mesmo durante a transição de um ponto de operação para outro. Como na prática apenas as linhas de GAF e GN operam no modo cascata, então estas malhas foram ajustadas para responder com um tempo de acomodação semelhante ao da malha de controle de vazão de ar de combustão.

### Linha de ar de combustão (PIC341 e FIQ311)

As seqüências de testes para modelagem de PIC341 e FIQ311 são mostradas nas figuras Figura 4.46 e Figura 4.47. A malha de pressão PIC341 foi sintonizada para um tempo de acomodação de 10 segundos e a malha de vazão FIQ311, para um tempo de acomodação de 40 segundos. Simulações comparando as respostas à mudança de SP antes e após a mudança de sintonia são mostradas na Figura 4.48 e na Figura 4.49. Observa-se que o tempo de acomodação de PIC341 foi drasticamente reduzido de 160 para 10 segundos. Essa alteração, além de garantir maior proteção do ventilador, irá uniformizar as condições de operação da válvula FCV311 em diferentes pontos operacionais. Já na malha de vazão, FIQ311, não houve modificação no tempo de acomodação.

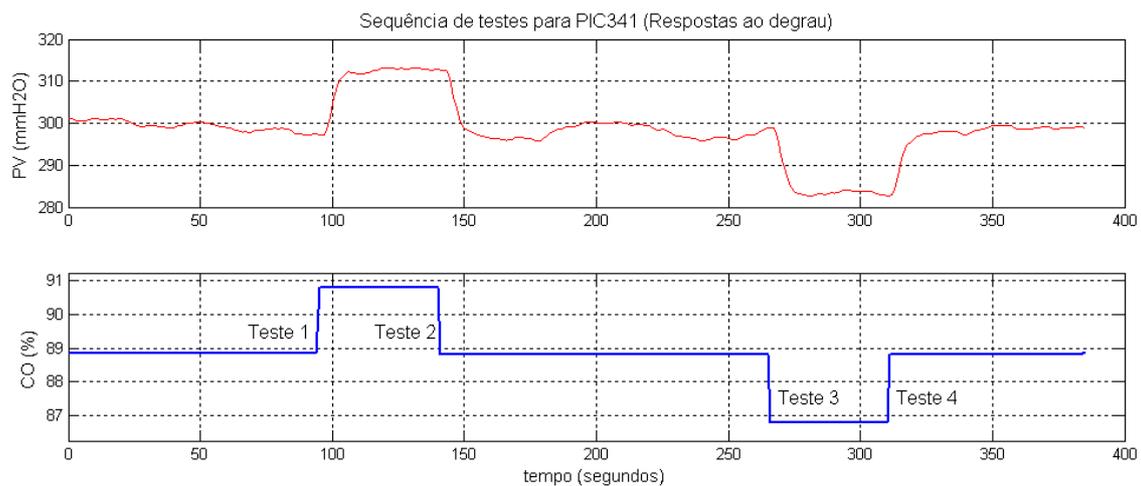


Figura 4.46 – PIC341. Seqüência de teste em malha aberta

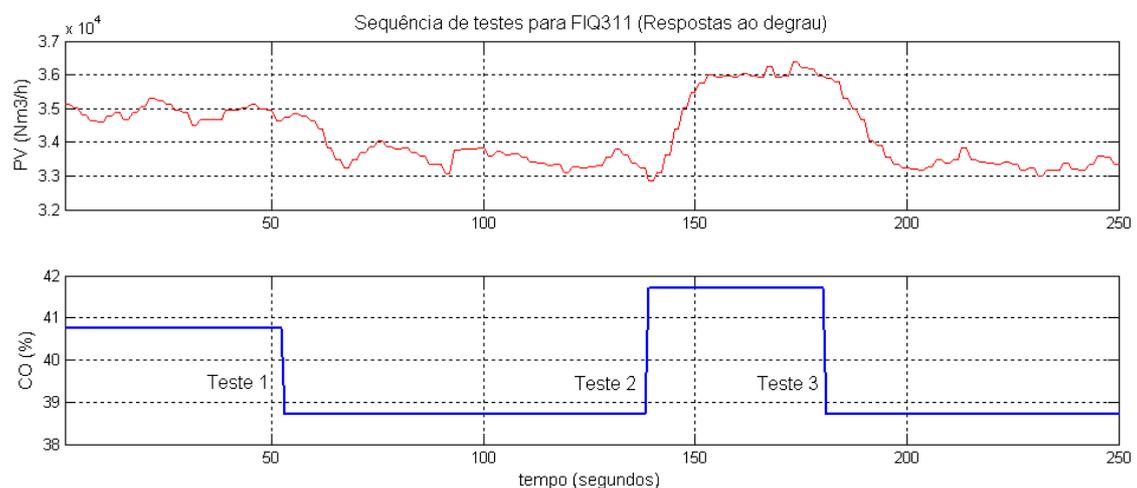


Figura 4.47 – FIQ311. Seqüência de teste em malha aberta

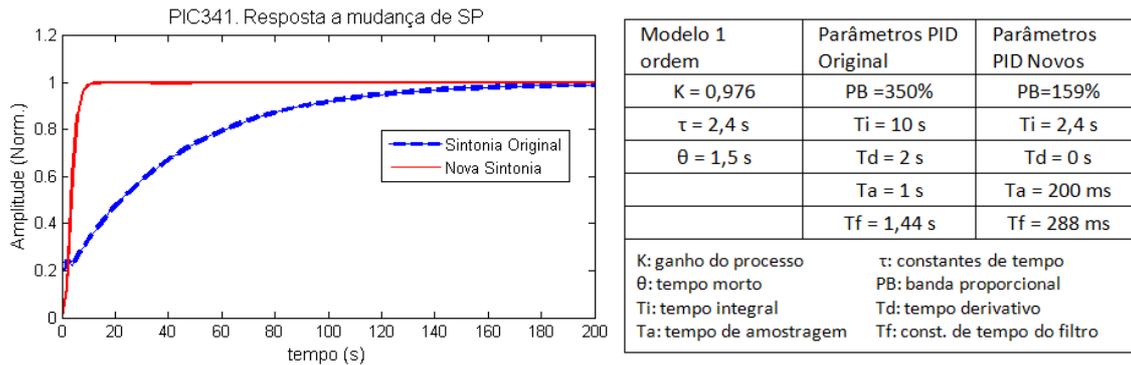


Figura 4.48 – PIC341. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 10 segundos.

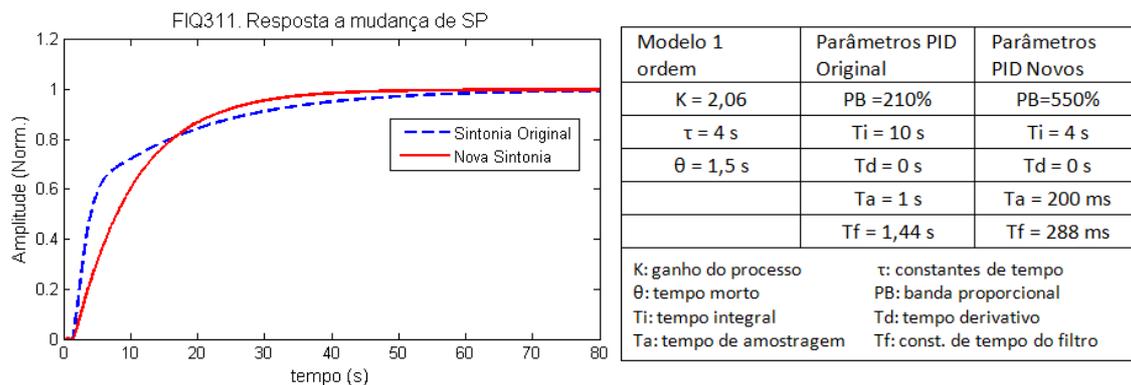


Figura 4.49 – FIQ311. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 40 segundos.

### Linha de gás de alto forno. (PIC342 e FIQ101)

As seqüências de testes para modelagem de PIC342 e FIQ101 são mostradas na Figura 4.50 e na Figura 4.51. A malha de pressão, PIC342, foi sintonizada para um tempo de acomodação de 300 segundos, enquanto que a malha de vazão FIQ101, foi sintonizada para um tempo de acomodação de 40 segundos, equivalente ao projetado para a vazão de ar, FIQ311. Simulações comparando as respostas à mudança de SP antes e após a mudança de sintonia são mostradas na Figura 4.52 e na Figura 4.53. Observa-se que os tempos de acomodação de FIQ101 e PIC342 foram reduzidos praticamente pela metade.

Finalmente, chama-se atenção, nesta malha, para um problema identificado na válvula FCV101. A Figura 4.54 mostra os gráficos de tendência da saída do controlador que é a referência de controle de posição para a válvula FCV101 e da posição real desta válvula. O sinal de posição sugere que a válvula fica abrindo e fechando com um ciclo de aproximadamente 358 segundos, mesmo quando a saída do controlador é constante. Este tipo de problema, que pode ser uma falha no posicionador da válvula, pode criar uma oscilação na vazão. A Figura 4.55, entretanto, mostra pelo espectro de potência do sinal de vazão, que não existem ciclos importantes com períodos próximos

ao da oscilação identificada. O ciclo mais próximo, com período de 370 segundos, corresponde a apenas 3,6% da potência do sinal.

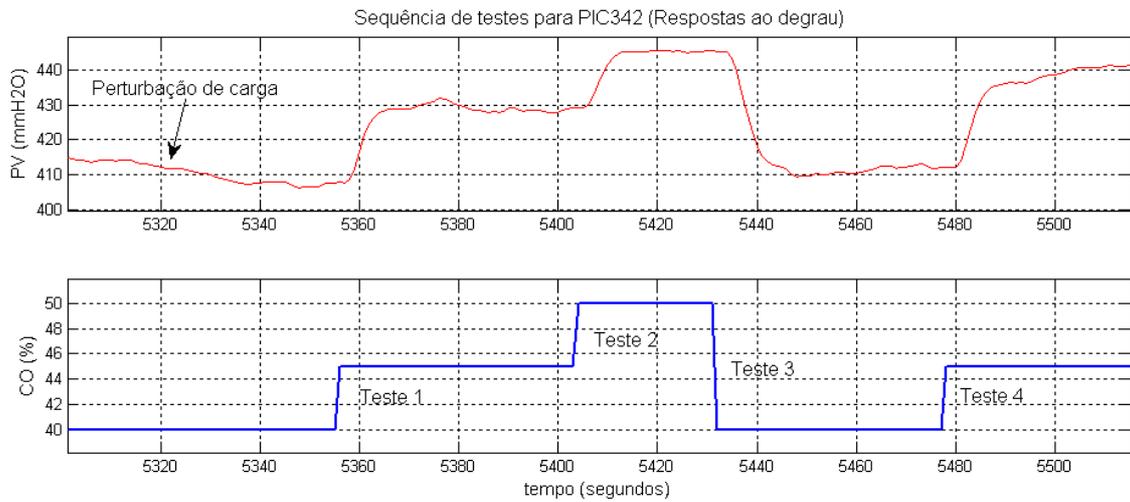


Figura 4.50 – PIC342. Seqüência de teste em malha aberta

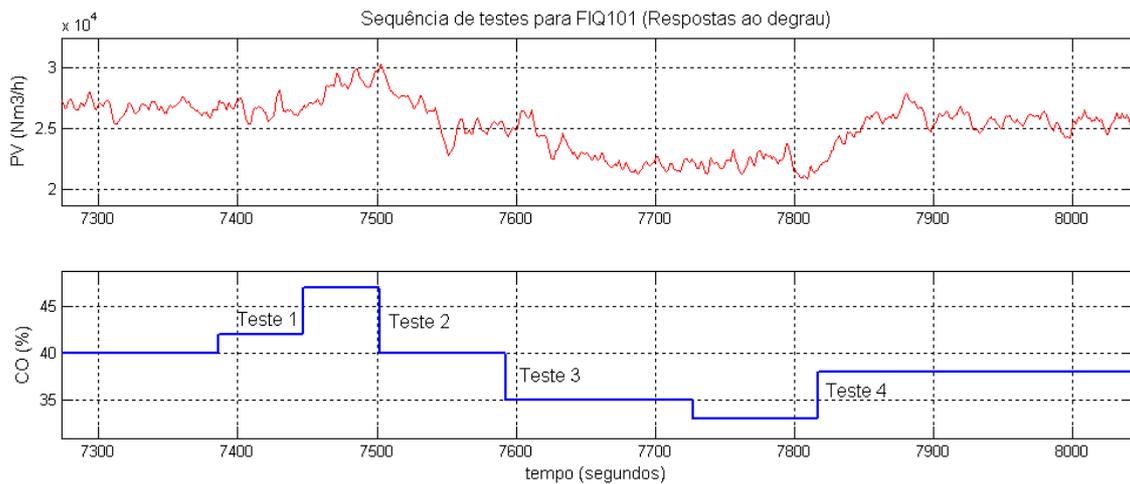
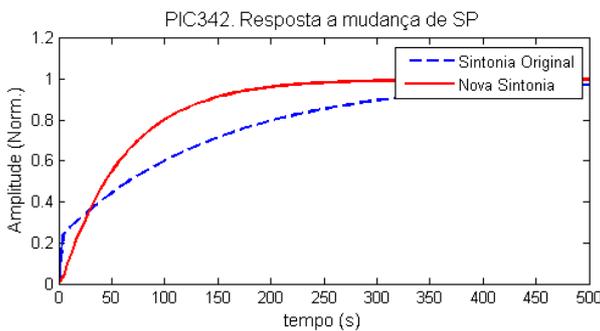


Figura 4.51 – FIQ101. Seqüência de teste em malha aberta



Modelo 1 ordem	Parâmetros PID Original	Parâmetros PID Novos
K = 0,36	PB = 120%	PB = 1500%
$\tau = 1,5$ s	Ti = 35 s	Ti = 1,5 s
$\theta = 2$ s	Td = 0 s	Td = 0 s
	Ta = 1 s	Ta = 200 ms
	Tf = 1,44 s	Tf = 288 ms

K: ganho do processo       $\tau$ : constantes de tempo  
 $\theta$ : tempo morto              PB: banda proporcional  
 Ti: tempo integral        Td: tempo derivativo  
 Ta: tempo de amostragem   Tf: const. de tempo do filtro

Figura 4.52 – PIC342. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 300 segundos.

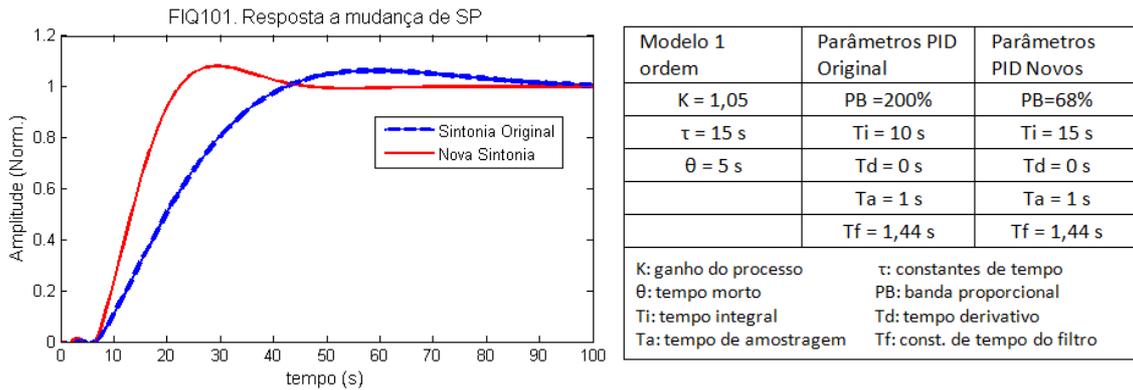


Figura 4.53 – FIQ101. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 40 segundos.

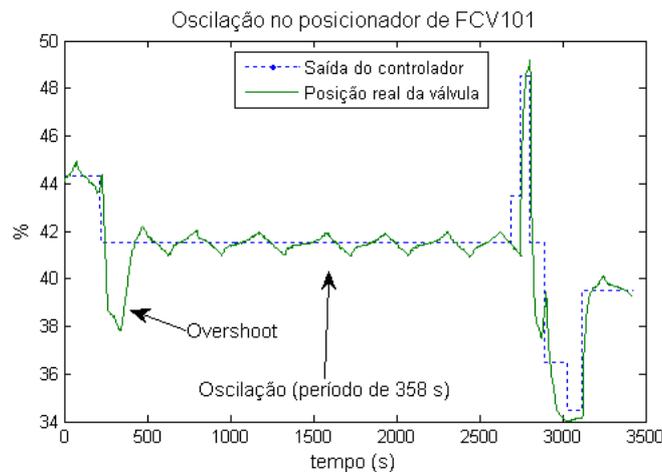


Figura 4.54 – FCV101. Presença de oscilação no posicionador.

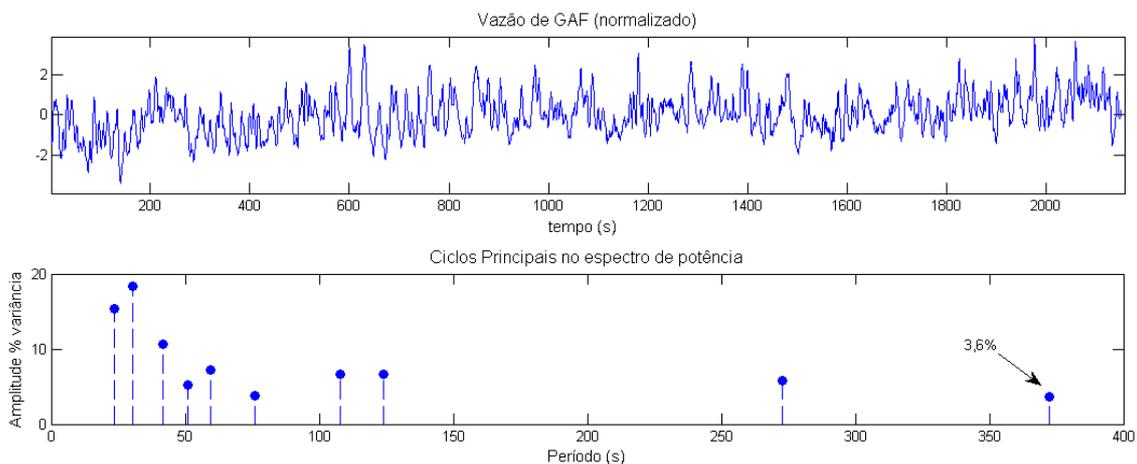


Figura 4.55 – Principais períodos de oscilação da vazão em operação em regime permanente. Oscilação em torno de 358 segundos é responsável por apenas 3,6% da variância.

**Linha de gás natural (FIQ102)**

Nesta linha, apenas a malha de vazão foi ajustada (o controle de pressão é realizado por uma válvula auto-pilotada). A Figura 4.56 mostra a seqüência de testes em malha aberta e a Figura 4.57 mostra a simulação da resposta à mudança de SP antes e após o ajuste de sintonia. Apesar desta malha ser mais rápida que a malha de

vazão de GAF (constante de tempo duas vezes menor), seu tempo de acomodação em malha fechada foi ajustado para ser o mesmo da malha de GAF (40 segundos).

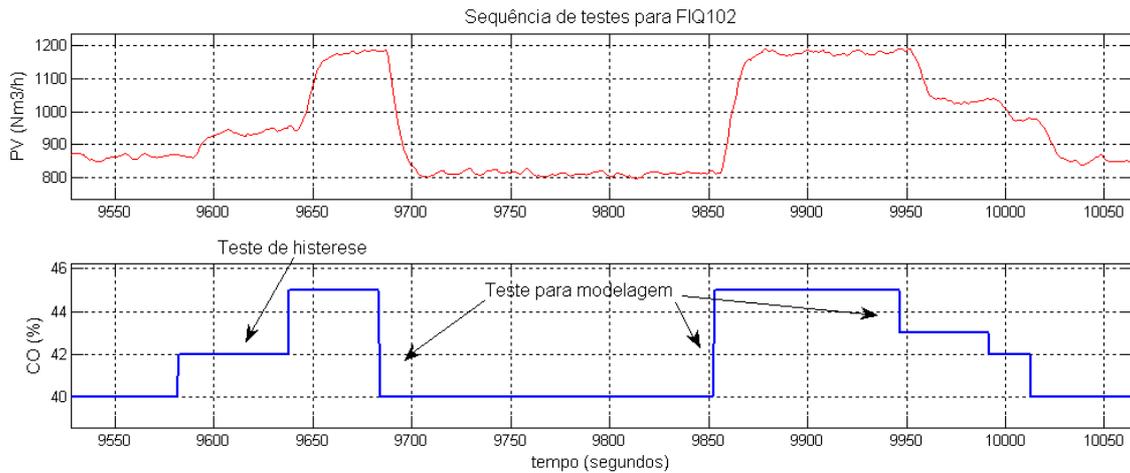


Figura 4.56 – FIQ102. Seqüência de teste em malha aberta

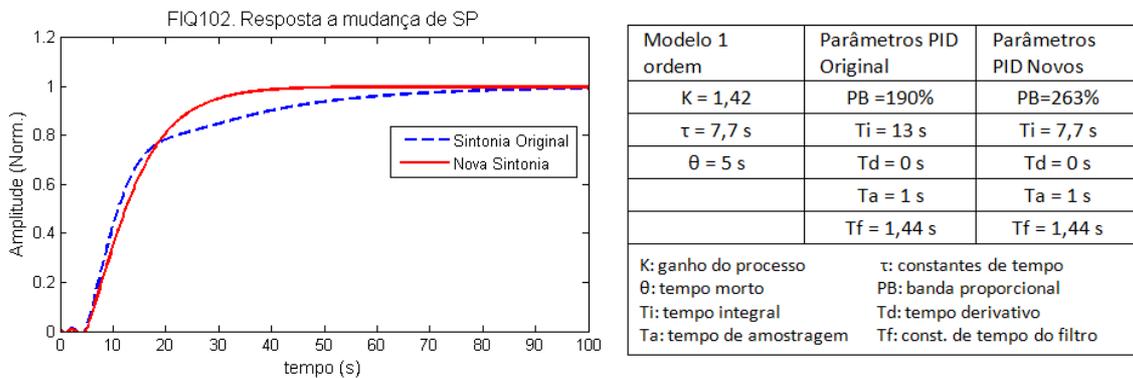


Figura 4.57 – FIQ102. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 40 segundos.

Linha de alcatrão (PIC137 e FIQ103)

A modelagem da linha de alcatrão exigiu considerações especiais. A linha possui um filtro para o alcatrão que provoca uma queda de pressão na linha que cresce a medida que o filtro vai sendo obstruído por detritos contidos no combustível. Quando esta queda de pressão atinge um grau que satura a velocidade da bomba, então o filtro é substituído. Isso ocorre periodicamente num período entre 5 e 10 dias.

Como conseqüência, a malha de pressão, PIC137, possui características bastante distintas dependendo da condição do filtro. Foram realizados testes para modelagem nas duas condições. Dois modelos matemáticos de primeira ordem foram obtidos para representar a resposta dinâmica da malha em cada condição (filtro limpo e filtro sujo). Os parâmetros do modelo são mostrados na tabela exibida na Figura 4.58. O controlador foi projetado baseando-se na condição de filtro limpo, que é a mais comum, porém a resposta em malha fechada também foi testada na condição de filtro sujo para assegurar estabilidade nas duas condições. A Figura 4.58 mostra

simulação da resposta à mudança de SP nas duas condições e com a sintonia original e a nova proposta. O tempo de acomodação com a nova sintonia é de 35 segundos, cerca de 3 vezes menor que o original. Com o filtro sujo, a resposta torna-se oscilatória e com tempo de acomodação maior (em torno de 200 segundos), porém ela ainda é considerada aceitável.

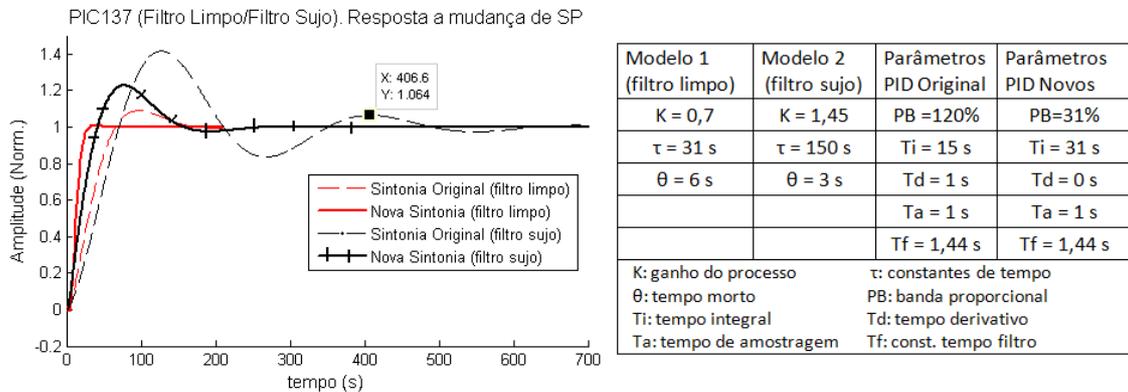


Figura 4.58 – PIC137. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 35 segundos.

A seqüência de testes realizados na malha de vazão, FIQ103, é mostrada na Figura 4.59 e a simulação da resposta em malha fechada na Figura 4.60. O controlador foi ajustado para um tempo de acomodação em torno de 100 segundos. Este é um valor intermediário, 3 vezes maior que o tempo de acomodação de PIC137 com o filtro limpo e duas vezes menor que o tempo de acomodação de PIC137 para filtro sujo.

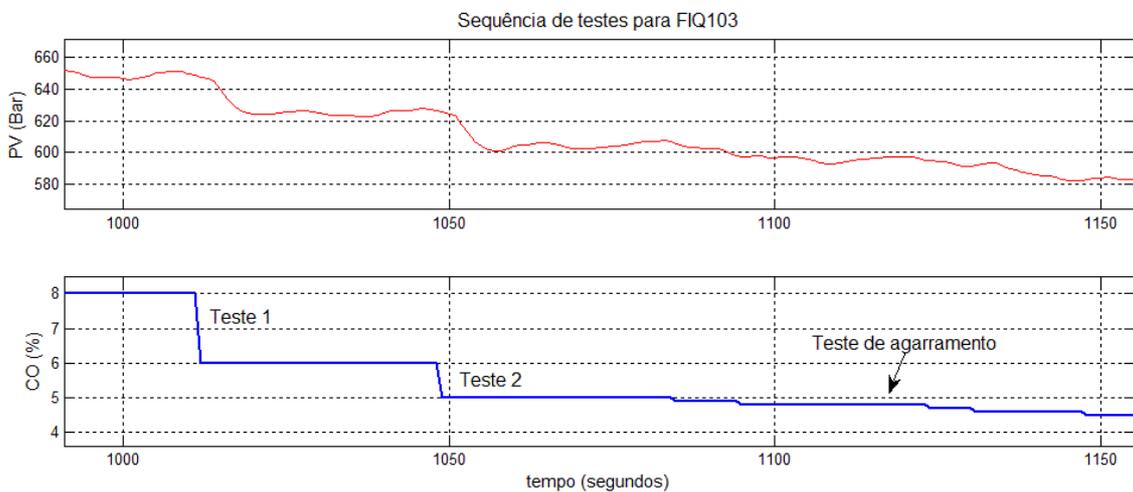


Figura 4.59 – FIQ103. Seqüência de teste em malha aberta

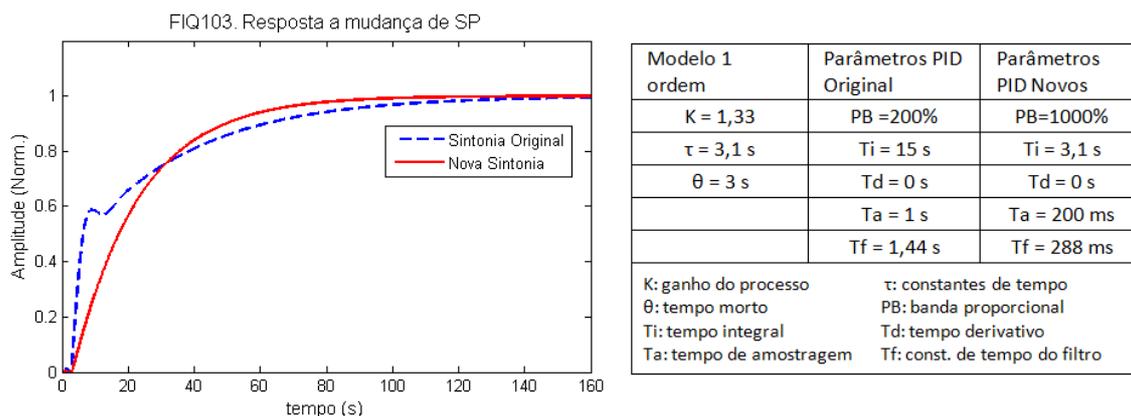


Figura 4.60 – FIQ103. Resposta ao degrau no SP e parâmetros de sintonia. Tempo de acomodação de 100 segundos.

#### 4.6. RESULTADOS

A Tabela 4.8 mostra os índices de desempenho das malhas de controle da caldeira ao final da auditoria das malhas. Para possibilitar a comparação com os índices calculados no início do trabalho (Tabela 4.4), utilizou-se uma base de dados com o mesmo tamanho (14 horas) e com a caldeira operando em condições semelhantes, ou seja, estável, com carga máxima e queimando GAF e Alcatrão. Para facilitar a comparação, em destaque na tabela estão os mesmo campos que foram destacados na Tabela 4.4.

Entre as três malhas mais importante da caldeira, foram obtidas importantes reduções na variabilidade relativa em LIC302 (de 53,6% para 10,7%) e em TIC327 (de 62,8% para 19,7%). A Figura 4.61 e Figura 4.62 mostram gráficos de tendência dessas duas malhas comparando-se a dispersão antes e depois das mudanças realizadas. Já em PIC322, a redução de variabilidade foi discreta (de 56% para 44%) e pode ter sido reflexo da redução de variabilidade em outras malhas. Apesar da redução nos tempo de resposta das malhas de vazão e, conseqüentemente, a possibilidade de melhoria no desempenho regulatório de PIC322, a sintonia do controlador de PIC322 não foi modificada devido a impossibilidade de se realizar testes para modelagem matemática.

Outros benefícios notáveis do trabalho foram nas malhas de vazão e pressão de água de alimentação (FIQ313 e PIC313). Em FIQ313, o novo ajuste do controlador reduziu o desvio padrão do erro de 0,82% para 0,18% e um ajuste na implementação do controlador eliminou o *offset* medido pelo índice (IAE não-absoluto). O principal ganho, porém, foi a redução no esforço de controle, medido pelo percentual diário de excursão de sua válvula, de 2263% para 397% (ou 22,63 aberturas/hora para 3,97 aberturas/hora). Os gráficos de tendência de antes e depois dos ajustes são mostrados na Figura 4.63. Já em PIC313, a melhoria no desempenho regulatório da malha fez reduzir o desvio padrão do erro de 0,14% para 0,02%. Os gráficos de tendência dessa malha são mostrados na Figura 4.64.

Tabela 4.8 – Índices de desempenho das malhas

	Descrição	Variabilidade relativa (%)	Desvio Padrão Erro (%)	Integral do Erro (%)	Excursão CO (%)	Desvio Padrão CO (%)	Saturação (% tempo)	Dimensionamento
FIQ101	Vazão GAF	5,66	1,09	0,16	1246,05	9,84	11,47	0,1
FIQ102	Vazão GN	6,38	1,03	0	584,46	0,7	0	1,51
FIQ103	Vazão Alcatrão	2,3	0,38	0,1	139,66	1,33	0	0,29
FIQ311	Vazão Ar Comb.	7,44	0,64	0	715,35	0,74	0	1,67
PIC341	Pressão Ar Comb.	0,65	07	0	533,06	0,41	0	0,18
FIQ313	Água Alimentação	2,58	<b>0,18</b>	<b>0</b>	<b>397,54</b>	0,32	0	1,35
PIC313	Pressão Água	3,58	<b>0,02</b>	0	323,68	0,28	0	2,07
PIC322	Pressão Tubulão	<b>43,83</b>	0,55	02	439,22	1,33	0	0,41
LIC302	Nível Tubulão	<b>10,74</b>	0,36	-01	483,4	0,42	0	0,85
PIC342	Pressão GAF	13,4	1,12	0	329,44	3,64	0	0,31
PIC323	Pressão Forno	1,77	0,27	-01	764,79	1,2	0	0,22
TIC327	Temp. Vapor	<b>19,74</b>	0,19	0	1054,73	3,15	0	06
PIC135	Pressão Ar Atom.	18,61	0,43	0	1362,55	0,43	0	1,02
PIC137	Pressão Alcatrão	1,04	06	0	533,34	0,45	0	0,13

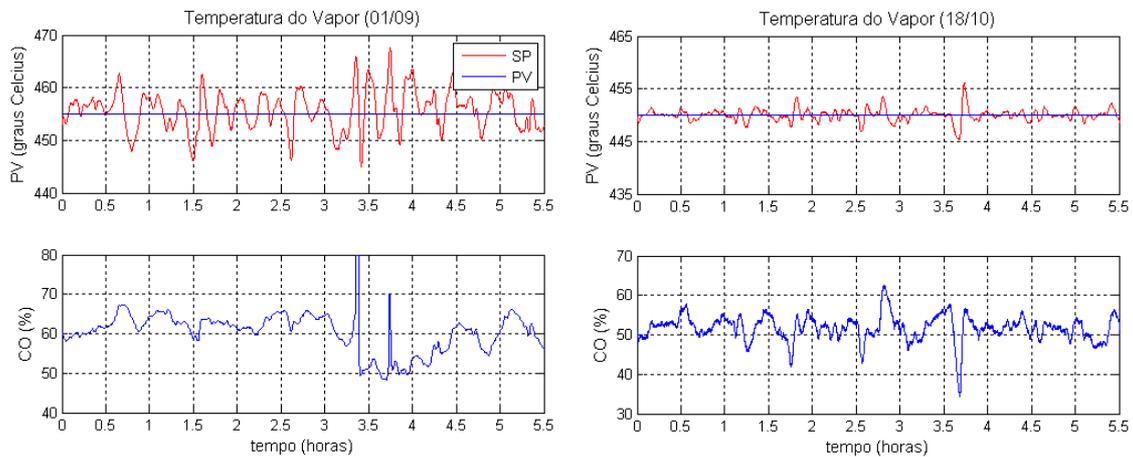


Figura 4.61 – TIC327. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria. Grande redução na variabilidade com uso de controle mais “agressivo”.

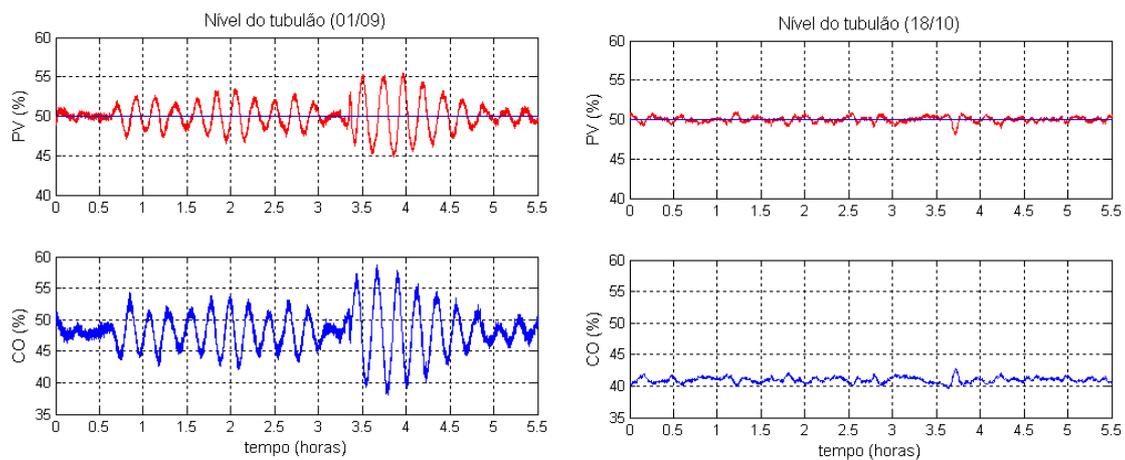


Figura 4.62 – LIC302. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria. Eliminação da oscilação e redução na variabilidade do nível.

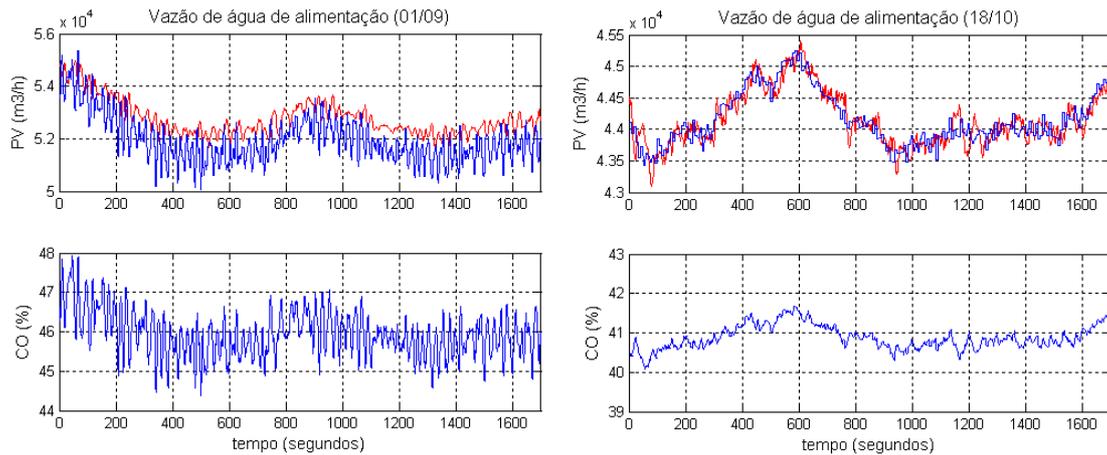


Figura 4.63 – FIQ313. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria. Redução drástica no grau de atividade na saída do controlador (CO) e eliminação do “offset” entre o SP e a vazão controlada.

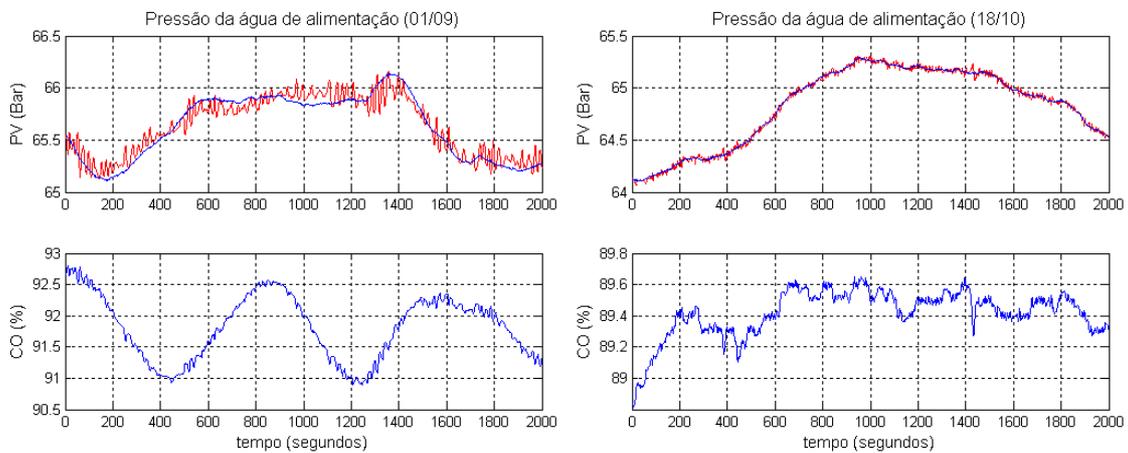
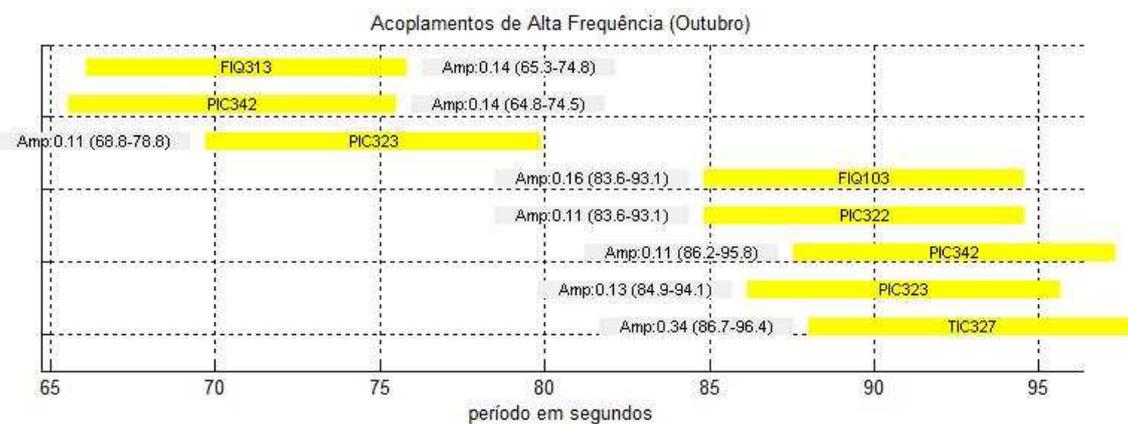


Figura 4.64 – PIC313. Comparação das tendências antes e após o trabalho de auditoria. Melhoria no desempenho servo-mecanismo com menores erros no rastreamento do SP.

Outro benefício do trabalho foi à remoção das causas das oscilações que foram identificadas da FASE IIB. A Figura 4.65 mostra os principais ciclos no espectro de potência do processo após o trabalho de auditoria. A oscilação com período em torno de 20 segundos não mais aparece em nenhuma variável e a oscilação em torno de 800 segundos aparece com amplitude bastante reduzida.



A

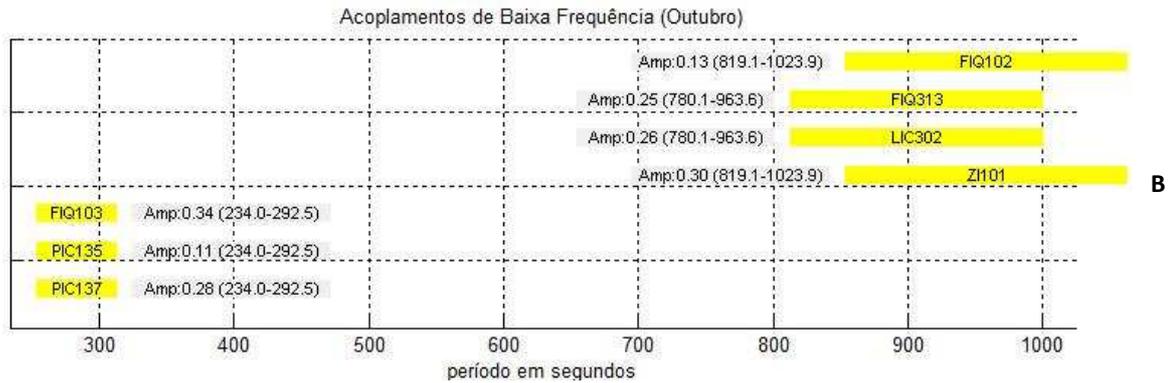


Figura 4.65 – Acoplamentos oscilatórios de alta frequência (A) e de baixa frequência (B)

A análise também mostra, no entanto, que o processo passou a apresentar um novo acoplamento, com período em torno de 300 segundos, nas malhas da linha de alcatrão (FIQ103, PIC137 e PIC135). Essa oscilação começou a existir devido a impurezas presentes no combustível e, apesar de o problema não ter sido solucionado, a análise de ciclos mostra que este ciclo de 300 segundos não se propaga para malhas importantes da caldeira. Outros ciclos em torno de 90 e 900 segundos mostrados na gravura aparecem com amplitudes pequenas (menores que 0.25), e são resultado de variações de carga naturais do processo.

Os métodos de detecção de oscilação também foram recalculados com dados após a auditoria e os resultados são mostrados na Tabela 4.9. A detecção de oscilação foi positiva exatamente para as malhas da linha de alcatrão.



#### 4.7. COMENTÁRIOS FINAIS

Realizada a auditoria, considera-se que o processo passa a operar em suas melhores condições, com exceção da linha de alcatrão que ainda opera sob influência de Causas Especiais (oscilação e variações causadas pelo filtro) e da relação estequiométrica que apresenta variações causadas por limitações na estratégia de controle de combustão.

Iniciam-se agora os esforços para que essas condições sejam mantidas. É a etapa de monitoramento contínuo do processo (in-process control), que será viabilizado neste trabalho por meio de um modelo de Validação Ampla, apresentado no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 5: PROJETO DE UM MODELO PARA VALIDAÇÃO AMPLA DA CALDEIRA

Baseado nas idéias discutidas no capítulo 2, um modelo de validação ampla é proposto para monitorar em tempo real o desempenho do sistema de controle da Caldeira e auxiliar na localização das falhas.

Primeiramente o mapeamento das Causas Especiais de variabilidade é mostrado na subseção 5.1. Estas informações em conjunto com outras obtidas durante a auditoria são utilizadas na subseção 5.2 para o projeto dos validadores. Na subseção 5.3 alguns exemplos demonstram o funcionamento do sistema de validação.

### 5.1. MAPEAMENTO DAS CAUSAS ESPECIAIS DE VARIABILIDADE

Durante o Levantamento de Campo, foram identificadas as condições operacionais que influenciam no comportamento das malhas de controle e variáveis de qualidade, resultando em Causas Especiais para a variabilidade. As mudanças no comportamento de algumas malhas também ocorrem em razão de desgaste ou funcionamento/parada de equipamentos do processo. As principais relações observadas foram:

- Controle da pressão de GAF (PIC342) e o nível de incrustação no trocador de calor de pré-aquecimento do GAF;
- Controle de pressão e vazão do alcatrão (PIC137 e FIQ103) e o grau de entupimento do filtro de alcatrão;
- Controle de nível do tubulão (LIC302) e o funcionamento do regenerador.

Essas relações, em conjunto com as identificadas no capítulo anterior, assim como critérios de como identificá-las em tempo real, estão sintetizadas na Tabela 5.1. Estes critérios foram obtidos por meio de conversas com operadores, em conjunto com um entendimento sobre o processo e conhecimento do *layout* da planta.

Algumas relações de causa e efeito, no entanto, não eram tão óbvias, principalmente devido à complexidade da planta, que possui recirculações de material (água e vapor) e diversos regeneradores energéticos para pré-aquecer os gases de combustão e água. Este mapeamento foi complementado pelo uso de uma análise em componentes principais (ACP), aplicado sobre uma base de dados de operação da planta.

Tabela 5.1 – Mapeamento das principais condições operacionais discretas

Condições	Malhas Impactadas	Modos	Identificação
Potência gerada	Vazão e pressão de combustíveis (FIQ101, FIQ102, PIC342). Vazão e pressão de ar (FIQ311, PIC341 e PIC323). Nível, vazão e pressão de água (LIC302, FIQ313 e PIC313).	Máxima	Acima de 9.5 MW/h
		Moderada	Abaixo de 9.5 MW/h
Mix de combustíveis	Vazão e pressão do ar de combustão. (FIQ311, PIC341). Pressão da fornalha (PIC323)	Somente GAF	FCV102 e 103 fechadas
		GAF + Alcatrão	FCV102 fechada
		GAF + Alcatrão + GN	Nenhuma válvula fechada
		GAF + GN	FCV103 fechada
		GN + Alcatrão	FCV101 fechada
Operação dos regeneradores	Nível, vazão e pressão de água (LIC302, FIQ313 e PIC313). Temperatura do vapor (TIC327)	Nenhum ligado	TI323 < 120
		Apenas um ligado	TI323 > 180
		Dois ligados	TI323 > 220
Nível de sujeira no filtro de alcatrão	Vazão e pressão do alcatrão (FIQ103 e PIC137). Pressão do ar de atomização (PIC135)	Normal	PIC137.CO < 60
		Alto	PIC137.CO > 60
Nível de incrustação no economizador do GAF	Vazão e pressão do GAF (FIQ101 e PIC342)	Normal	PCV342 variando
		Alto	PCV342 totalmente aberta

Inicialmente, para determinada janela de dados, calculou-se a variância do erro das malhas de controle e do resíduo de variáveis de qualidade em amostras tomadas periodicamente. A estes dados, associaram-se variáveis discretas criadas para representar cada modo das condições de operação do processo, relacionadas na Tabela 5.1. Em seguida, aplicou-se o ACP a estes dados, para identificar as correlações temporais existentes entre eles.

Um exemplo desta operação é mostrado na Figura 5.1. A tendência temporal da vazão de alcatrão é mostrada na figura superior, enquanto que a variância do erro de controle é mostrada na figura central. Observa-se que, a partir de determinado instante, a variabilidade da malha decai bruscamente. Observando-se, em seguida, o valor da variável discreta que representa o grau de sujeira do filtro de alcatrão, fica evidente a relação entre as variáveis. De fato, houve a troca do filtro, o que explica a queda na variabilidade.

A Figura 5.2 mostra o resultado da aplicação do ACP aplicado a amostras de variância de todas as malhas de controle nesta mesma janela de dados. Ele identificou que a troca do filtro também se refletiu na variância de outras duas malhas de controle (PIC135 e PIC137).

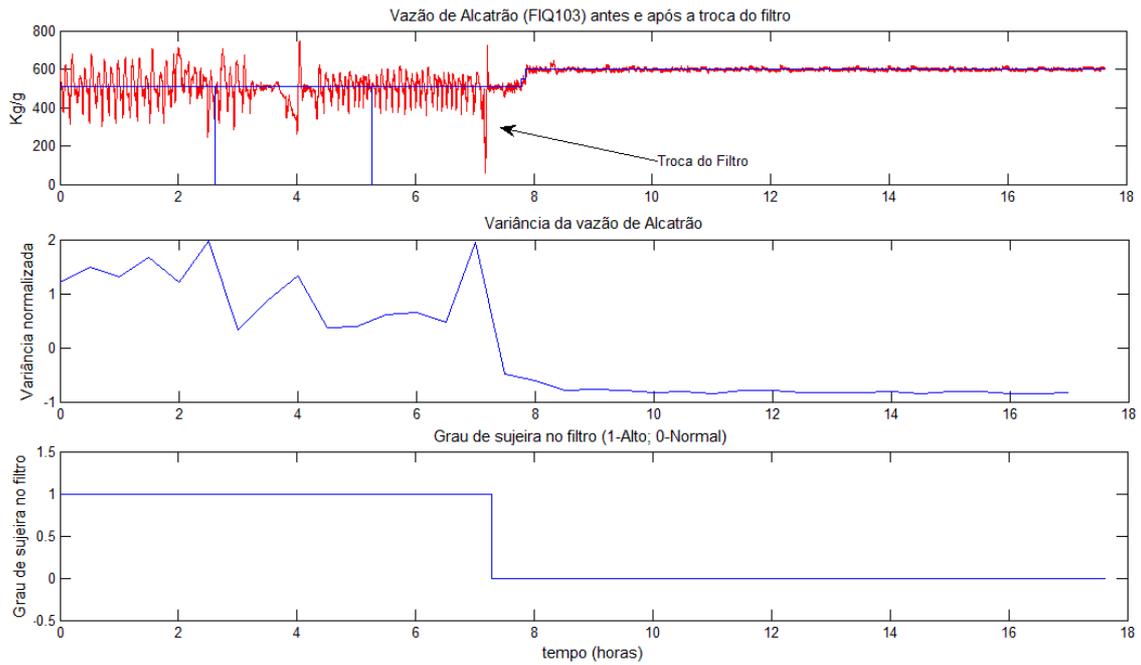


Figura 5.1 – Tendência temporal da vazão de alcatrão (figura superior) e a variância de amostras tomadas periodicamente (figura central). A figura inferior mostra variável discreta que representa o grau de sujeira do filtro.

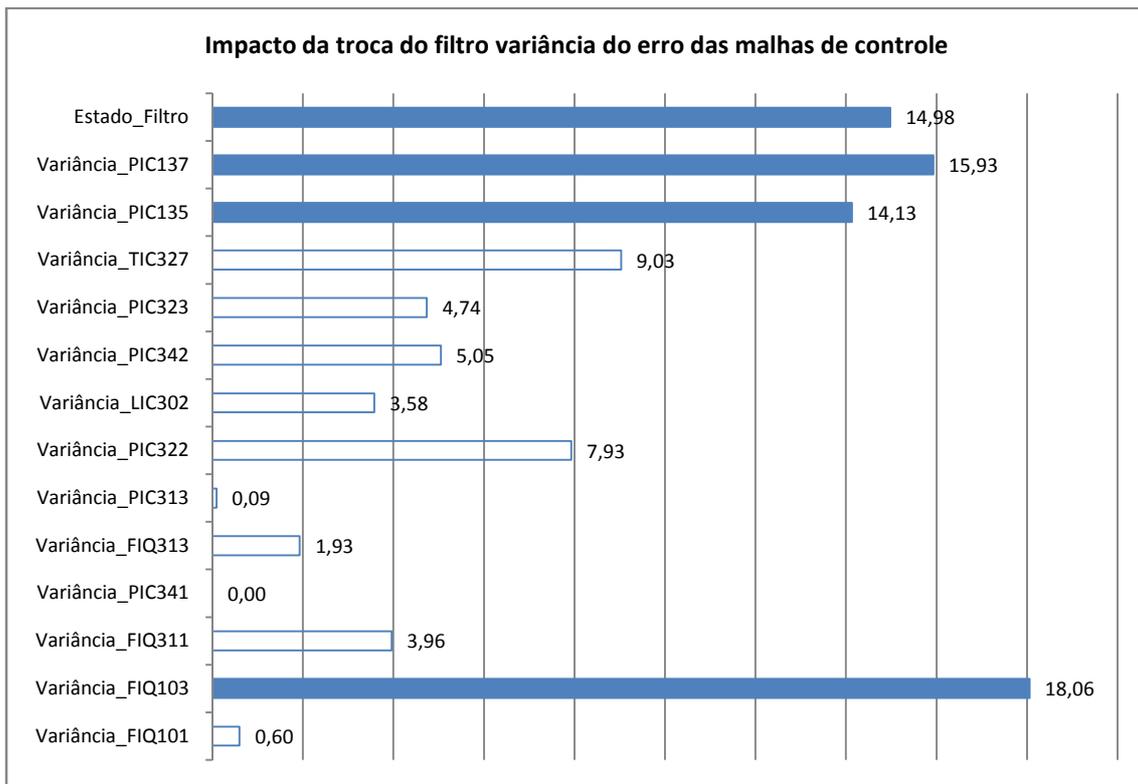


Figura 5.2 – Análise de Componentes Principais relacionando variância do erro das variáveis e grau de sujeira do filtro de alcatrão

## 5.2. PROJETO DOS VALIDADORES

Com os resultados do mapeamento realizado na seção anterior em conjunto com as informações obtidas durante a auditoria das malhas de controle, foi possível construir uma árvore de falha para a caldeira, conforme mostrado na Figura 5.3.

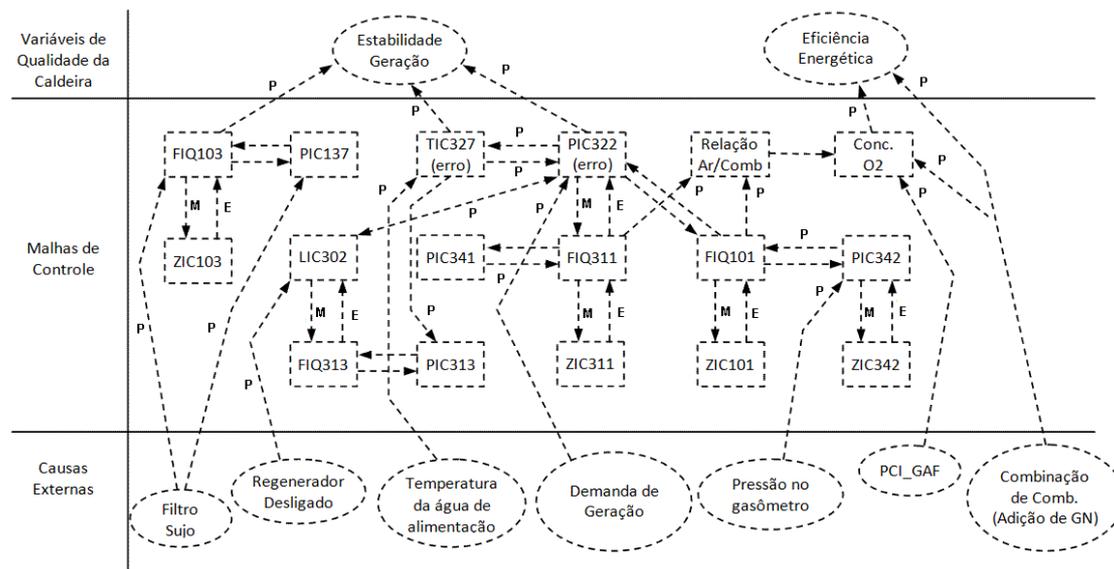


Figura 5.3 – Árvore de Falha para a Caldeira

A árvore é organizada conforme proposto no capítulo 2. Os validadores das duas variáveis de qualidade da caldeira são colocados na primeira linha. Estes validadores consistem em cartas de controle que monitoram a distribuição estatística de amostras do resíduo dessas variáveis. Dessa forma, variações anormais são detectadas.

Na base ficam as possíveis Causas Especiais para a variabilidade do processo. Neste grupo incluem-se os indicadores discretos relacionados na Tabela 5.1 e os validadores de variáveis que representam perturbações externas do processo, são elas: a temperatura da água de alimentação, a pressão no gasômetro e o PCI do gás de alto-forno. Estes três validadores também utilizam cartas de controle baseadas no resíduo das amostras da variável. Neste caso, a frequência de corte do filtro é igualada a frequência de corte das malhas TIC327, PIC342 e do sistema de combustão, respectivamente.

Na parte central estão posicionados os validadores das malhas de controle. Eles consistem em cartas de controle para monitorar a média e o desvio padrão do erro das malhas. Se uma Causa Especial é detectada, estes validadores devem notificar outras malhas que dependam de seu funcionamento. E, se for o caso de uma falha interna (originada no sensor, atuador ou controlador da malha), sua causa deve ser indicada.

### 5.3. EXEMPLOS

Três exemplos são extraídos da base de dados de operação da Caldeira para ilustrar o funcionamento do sistema de validação proposto.

#### 5.3.1. CONDIÇÃO ANORMAL NA PRESSÃO DE BOMBEAMENTO CAUSADA POR INTERVENÇÃO MANUAL

Neste primeiro exemplo, uma intervenção manual realizada na malha TIC327 (um degrau é realizado na saída de controle), é causa especial para variabilidade das malhas PIC313 e FIQ313. A Figura 5.4 mostra gráficos de tendência das malhas de controle do circuito de água durante esta intervenção. Nenhuma alteração importante é perceptível. As cartas de controle dos validadores de PIC313 e FIQ313, no entanto, detectam o evento, notificando a ocorrência de uma Causa Especial de variabilidade no instante próximo de 5 horas (ver Figura 5.5). De acordo com a árvore de falha, essas duas malhas podem ser afetadas pelas saídas de controle de LIC302 e TIC327. Acertadamente, o evento é atribuído a esta última, conforme indicado pelas cartas de controle das saídas destas variáveis.

A Figura 5.6 ilustra uma simulação de como seria a indicação do evento na árvore de falha. O símbolo com um “ponto de exclamação” em FIQ313 e PIC313 indica a detecção de uma Causa Especial para o erro de controle. Já em TIC327, o símbolo com uma mão indica que o controlador operou em modo manual.

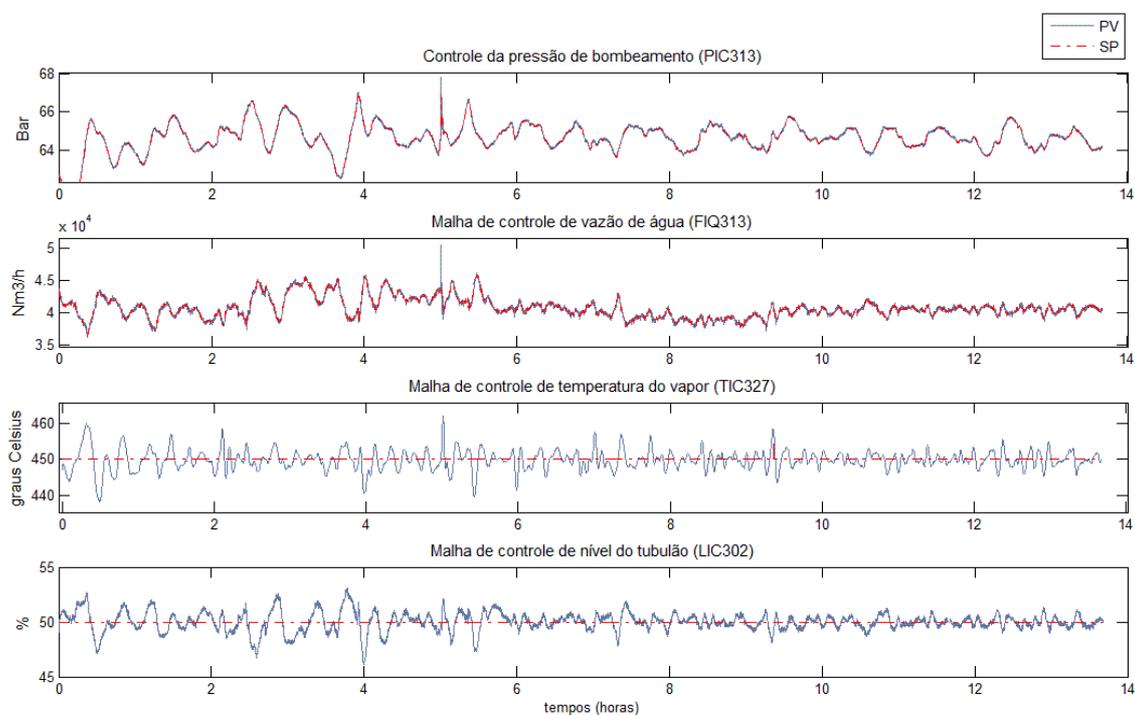


Figura 5.4 – Gráficos de tendência temporal de PIC313, FIQ313, TIC327 e LIC302.

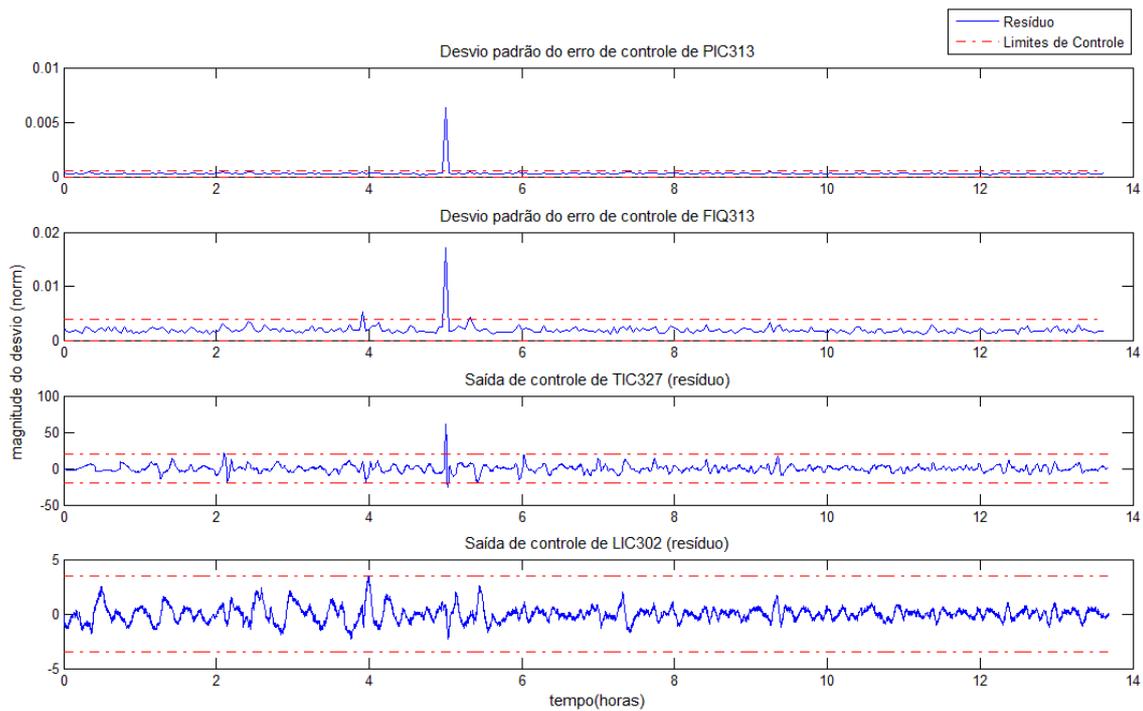


Figura 5.5 – Cartas de controle para o desvio padrão de amostras do erro de controle das malhas PIC313 e FIQ313 e do resíduo da saída de controle de TIC327 e LIC302.

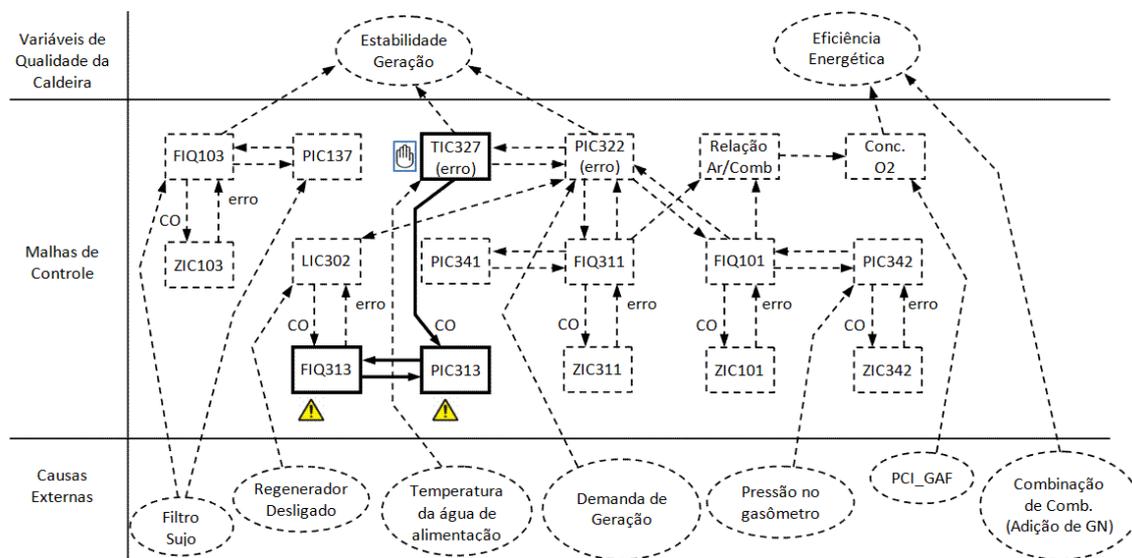


Figura 5.6 – Simulação da árvore de falha. Condição anormal detectada em FIQ313 e PIC313 é causada por intervenção manual na saída de TIC327.

### 5.3.2. CONDIÇÃO ANORMAL NA VAZÃO DE VAPOR CAUSADA POR DESLIGAMENTO DE EQUIPAMENTO

Neste exemplo, é mostrado como o impacto de uma intervenção externa (desligamento de um equipamento), propaga-se até afetar uma variável de qualidade. Os gráficos na Figura 5.7 mostram as tendências da vazão de vapor, diretamente relacionada com a qualidade de geração, e das malhas de controle LIC302 e PIC322 durante período em que o regenerador esteve desligado (primeiras 4 horas).

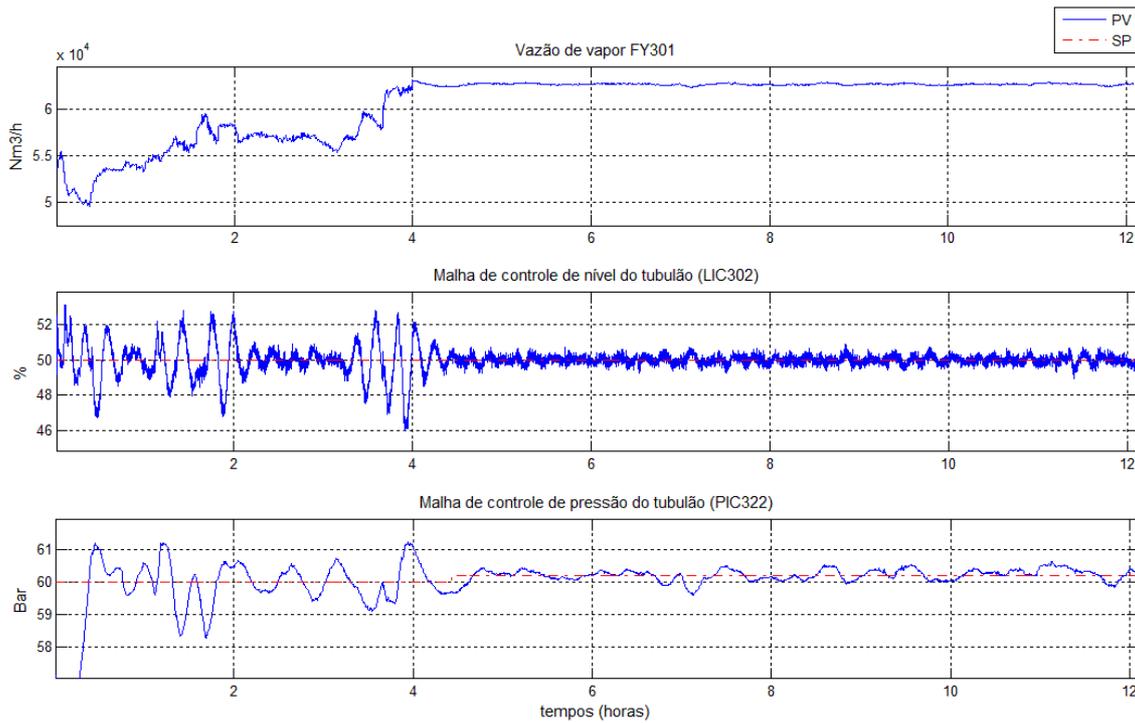


Figura 5.7 – Gráficos de tendência temporal da vazão de vapor (FY301) e das malhas LIC302 e PIC322.

As tendências revelam um comportamento notavelmente anormal, confirmado pelos validadores, cujas cartas são mostradas na Figura 5.8. A causa pode ser rastreada pela árvore de falha, simulada na Figura 5.9. No mesmo instante em que uma indicação de falha é exibida pelos validadores, também existe a indicação de regenerador desligado.

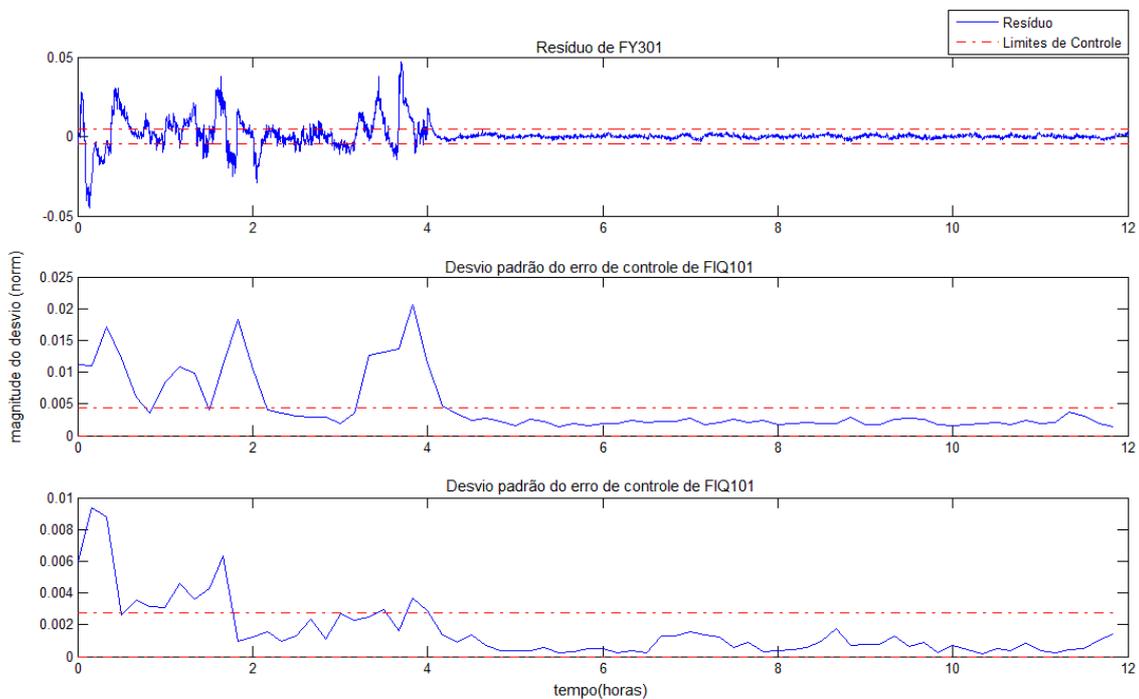


Figura 5.8 – Cartas de controle para amostras do resíduo da vazão de vapor (FY301) e do erro de controle das malhas LIC302 e PIC322.

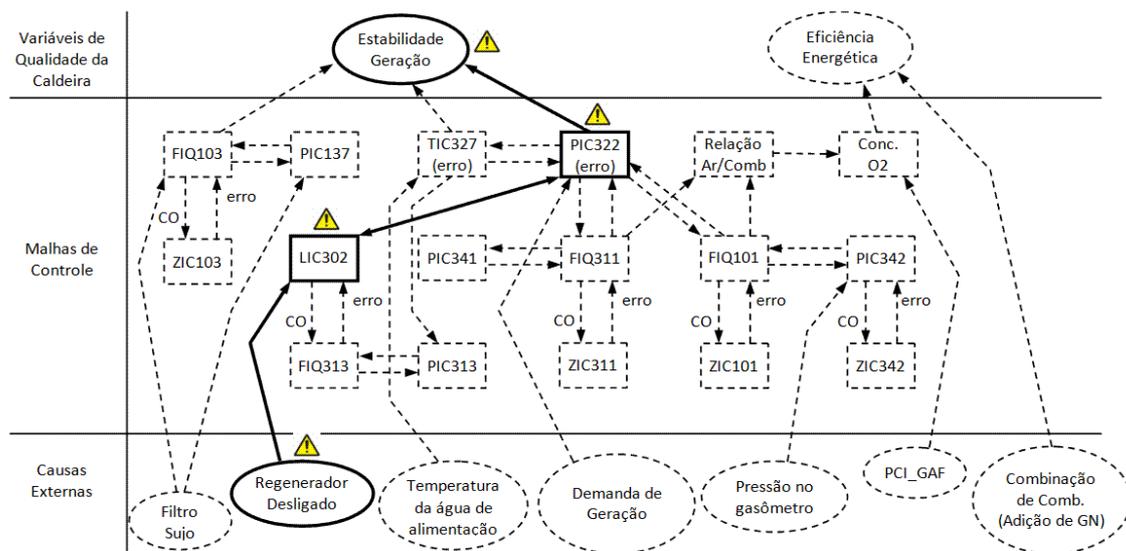


Figura 5.9 – Simulação da árvore de falha. Condição anormal na geração de energia é causada por variações nas malhas PIC322 e LIC302. A causa da anomalia nesta última é o desligamento do regenerador.

#### 5.4. COMENTÁRIOS FINAIS

Neste capítulo foi apresentado um esboço de um sistema para validação ampla do sistema de controle da caldeira. Os exemplos utilizaram dados *offline*, porém, uma ferramenta para monitoramento em tempo real poderia ser implementada a partir das mesmas idéias. E, para que os diagnósticos sejam mais precisos, é importante que sejam incorporados aos validadores das malhas de controle, validadores específicos para os sensores e atuadores.

Em relação à confiabilidade, é natural que, esporadicamente, um sistema validador gere um alarme falso ou detecte uma condição anormal, mas sem nenhuma causa aparente. Porém, se esta situação torna-se freqüente, é preciso realizar uma manutenção nos parâmetros do validador. Pode ocorrer também uma nova causa especial para a variabilidade que não foi mapeada durante o projeto e, então, ela deve ser incluída.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO E DIRECIONAMENTO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo mostra quais são as principais contribuições deste trabalho e, também, sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1. CONCLUSÃO

Apresentou-se uma metodologia para validação ampla do sistema de controle de unidades produtivas, incluindo uma metodologia para a auditoria das malhas de controle. O estudo de caso mostrou que ela é capaz de atingir um nível realmente efetivo de gestão. Isso significa que, além de monitorar o desempenho das malhas de controle, também é capaz de detectar a ocorrência de falhas e de localizar sua origem entre os elementos validados. Além disso, a extensão do uso de validadores a níveis mais elevados tais como variáveis de qualidade, possibilita verificar se determinada falha tinha impacto econômico ou operacional no processo.

Outra vantagem é a detecção de falhas iminentes que se caracterizam pela mudança de comportamento de determinado elemento, mas, a princípio, sem impacto em outros. Este tipo de detecção também é importante, já que o diagnóstico precoce permite que equipes de manutenção corrijam o problema antes que ele se agrave, resultando em falha em elementos num nível mais crítico para o processo.

É importante ressaltar, por outro lado, que este tipo de abordagem requer um rigoroso exame sobre o funcionamento do processo, de seus equipamentos e de suas condições operacionais. No projeto de validação ampla da caldeira, por exemplo, isso significou:

- Mapeamento das variáveis de qualidade e das possíveis causas de perturbação que fossem mensuráveis;
- Identificação das relações de causa e efeito entre malhas de controle, as variáveis de qualidade e as possíveis causas de perturbação;
- Caracterização das condições operacionais que influenciavam no comportamento do sistema de controle;
- Realização de testes para obtenção de modelos matemáticos para as malhas de controle.

Boa parte desses levantamentos foi obtida por meio da metodologia proposta para Auditoria de Malhas de Controle. Para identificação das Causas Especiais de variabilidade de cada elemento validado, tarefa mais dispendiosa do processo, o uso de ferramentas computacionais operando numa base histórica de operação se mostrou bastante eficaz.

Entre essas ferramentas, o uso de Análise de Componentes Principais a partir de uma base histórica contendo medidas da variabilidade do erro das malhas de controle e dos resíduos das variáveis de qualidade foi especialmente importante. Esta abordagem permitiu a inclusão de eventos discretos na análise, tais como acionamento de equipamentos, grau de obstrução de filtros, tipo de combustível, entre outros.

Também é importante ressaltar que um sistema validador, ao avaliar desempenho baseado num padrão estatístico de referência, não tem o propósito de verificar o grau de otimalidade do processo, mas sim de averiguar se ele opera em condições normais e sinalizar a origem do problema em caso de falta. Por isso, inicialmente o trabalho esteve voltado para a otimização do sistema, com foco em redução de variabilidade. E, neste contexto, um aspecto importante observado é que trabalhos de auditoria de malhas realizados numa base malha simples (SISO) podem ser incorretos ou mesmo contra produtivos. Se não for realizado um mapeamento prévio dos Acoplamentos Oscilatórios, há o risco de se desperdiçar recursos na análise e na modificação da operação das malhas que estão oscilando devido a causas externas.

Por último, é importante comentar sobre a viabilidade econômica de um projeto de Validação Ampla. Por ser uma abordagem que leva em conta a complexidade do processo, ela não pode ser implementada como um produto de prateleira, que após ser instalado e configurado, começa imediatamente a produzir os diagnósticos aos quais se propõem. A construção e manutenção dos validadores e da árvore de falha requerem a atuação constante de um profissional qualificado, o que agrega um custo permanente a solução.

O retorno econômico deste trabalho, porém, é observado ao longo do tempo. A incorporação gradual de validadores vai agregando inteligência ao sistema e seus diagnósticos promovem a otimização do processo, ao revelarem eventos que seriam desconhecidos numa inspeção visual de gráficos de tendência. Além disso, paradas de equipamentos passam a ser menos frequentes já que o sistema é capaz de gerar alertas sobre falhas incipientes. Outro aspecto desejável é a possibilidade de se incorporar o conhecimento de especialistas ao sistema auxiliando operadores inexperientes durante a tomada de uma decisão.

## 6.2. DIRECIONAMENTO PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar das simulações realizadas no capítulo 5, baseadas em dados históricos, terem sido suficientes para exemplificar a capacidade do sistema de validação em detectar e rastrear falhas, não foi possível observar a dinâmica de seu funcionamento. Para isso, é importante que uma versão seja implementada em tempo real. Com esta implementação, estudos podem ser realizados sobre as melhores formas de modelar

as classes validadoras e sobre como se estabelecer a comunicação entre elas. Além disso, formas automáticas de revalidação e gerenciamento de alarmes falsos poderiam ser exploradas.

Em relação ao validador de malhas de controle, este trabalho apresentou apenas técnicas para diagnósticos básicos de falhas internas, tais como: detecção de oscilação e diagnóstico de agarramento de válvulas. Existem, porém, muitos outros tipos de falhas. Um diagnóstico de robustez em tempo real, por exemplo, depende do desenvolvimento de algoritmos para estimação em tempo real de um modelo matemático para o processo. Além disso, técnicas de controle adaptativo também podem ser incorporadas ao validador. No controle de nível do tubulão (LIC302), por exemplo, a sintonia do controlador poderia ser automaticamente reajustada dependendo do funcionamento do regenerador.

E, por último, qualquer outro ativo industrial pode ser validado e incorporado ao sistema de validação ampla, desde que tenha associado a ele, direta ou indiretamente, algum tipo de medição e uma referência para seu desempenho. Dessa forma, validadores podem ser construídos para equipamentos, tais como: bombas, motores, trocadores de calor, regeneradores, filtros, etc. E, baseado no conhecimento de especialistas, algoritmos podem ser desenvolvidos para diagnósticos específicos para cada tipo de equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, L. A. (1999). *Introdução à Identificação de Sistemas*. 2ª Edição. Editora UFMG.
- American Society for Quality. *ASQ's Foundations in Quality*. Certified Quality Engineer.
- Araújo, M. L. (2004). *Desenvolvimento de um sistema de Monitoramento Contínuo e Cálculo de Eficiência da Caldeira e do Condensador da Usina Termoelétrica do Barreiro*. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Åström, K. J.; Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA-Instrumentation, Systems, and Automation Society
- Belli, P.; Bonavita, N.; Rea, R. (2006). *An Integrated Environment for Industrial Control Performance Assessment, Diagnosis and Improvement*. Proceedings of the 2006 ANIPLA. International Congress on Methodologies for Emerging Technologies in Automation
- Bialkowski, W. L. (1992). "Dream vs reality: A view from both sides of the gap." Proc. Contr. Syst. '92: Dream vs reality, Whistler, Canada, 283-298.
- Bjorklund, S.; Ljung, L. (2003). *A Review of Time-Delay Estimation Techniques*. Proceedings of the 42nd IEEE. Conference on Decision and Control. Mad, Hawaii USA, December 2003.
- Bonavita, N.; Bovero, J. C.; Martini, R. (2006). *Control Performance Monitoring: A data-driven approach*. Presented at: "Process and Control System Performance Monitoring" ANIPLA Workshop, Milan, 19 September 2006
- Braga, A R; Jota, F. G. (1994). *Multiple criteria for on-line performance assessment of industrial controllers*. 10º Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Rio de Janeiro, 1994.
- Braga, C. M. P.; Braga, A. R.; Fantini, M. & Jota, F. G. (2006). *Validação ampla de plantas industriais: Uma abordagem metodológica*, Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática, CBA'06, Salvador, Brasil, pp. 288-293.
- Braga, C. P.; Braga, A.; Caldas, M.; Fantini, M. (2006). *Memorial descritivo do Projeto de Cálculo de Eficiência da Usina Térmica do Barreiro*. GCPI-UFMG/CEMIG.
- Caldas, M. (2005). *Validação e Implementação de um Sistema Especializado para Cálculo de Eficiência - SECE para a Usina Termelétrica do Barreiro*. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte.
- Choudhury, M. A.; Kariwalw, V.; Shah, S. L.; Douke, H.; Takada, H.; Thornhill, N. (2005). *A Simple Test to Confirm Control Valve Stiction*. IFAC World Congress (2005), Julho 4-8, Praga.
- Choudhury, M. A.; Thornhill, N.; Shah, S. L. (2001). *A Data-Driven Model for Valve Stiction*.
- Choudhury, M. A.; Thornhill, N.; Shah, S. L. (2005). *Modelling valve stiction*. Control Engineering Practice 13 (2005) 641-658

- Choudhury, M. A.; Thornhill, N. F. (2004). *Diagnosis of poor control-loop performance using high order statistics*, Automatica 40 (2004) 1719-1728
- Clarke, D.W. (1999). *Sensor, Actuator and Loop Validation*, IEEE Control Systems Magazine, 15 (4): 39-45, 1995.
- Cobas, V. R. M. *Controle de Usinas Termelétricas*. Nest. (material de uso interno)
- Coelho, A. A. R.; Coelho, L. S. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*. Editora da UFSC, 2004.
- Dukelow, S.G. (1991). *The Control of Boilers*, 2nd ed. Instrument Society of America. USA. 1991.
- Embiruçu, M. (2004). *Avaliação Econômica de Projetos de Controle e Automação. Curso de Especialização em Instrumentação, Automação, Controle e Otimização de Processos Contínuos*. Escola Politécnica da UFBA.
- Equipacool Sistemas. Manual de Operação e Manutenção para a Caldeira a Gás de Alto-Forno da UTE-Barreiro.
- Fazenzena, M.; Trierweiler, J. O. (2006). *Variability Matrix: A New Tool to Improve the Plant Performance*. Adhem. Gramado, Brasil. Abril de 2006.
- Forsman, K.; Stattin A. *A new criterion for detecting oscillating in control loops*. European Control Conference ECC, Karlsruhe, Germany.
- Forsell U.; Ljung, L. (1999). *Closed-loop identification revisited*. Automatica 35 (1999) 1215-1241
- FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria. Instrumentação e Controle Aplicado a Caldeiras (material de uso interno)
- Gerry, J.; Ruel, M. (2000). *STICKTION: THE HIDDEN MENACE. How to Recognize This Most Difficult Cause of Loop Cycling*. Control Magazine, Novembro de 2000.
- Gerry, J.; Ruel, M. (2001). *How To Measure And Combat Valve Stiction On Line*. Apresentado na ISA2001, Houston, Texas, setembro de 2001.
- GHTF (2004). *Final Document: Quality Management Systems - Process Validation Guidance*. The Global Harmonization Task Force. GHTF/SG3/N99-10:2004 (Edition 2).
- Gomes, F. A. (2008). *Trabalho de graduação auditoria de malhas de controle de caldeira de uma usina termelétrica*. CEFET/MG. Belo Horizonte
- Gustafsson, F.(2000). *Adaptive Filtering and Change Detection*. John Wiley & Sons Ltd.
- Hägglund, T. (1995). *A control-loop performance monitor*. Control Engineering Practice. Vol 3 (11), pp. 1543-1551, 1995.
- Harris, T.J. (1989). *Assessments of control loop performance*. Canadian Journal of Chemistry Engineer, 67 (10), pp. 856-861.
- Harris, T.J., Seppala, C.T., (2001), *Recent Developments in Controller Performance Monitoring and Assessment Techniques*, CPC, 2001
- Ho, W.K.; Lim, K.W.; Xu, W. (1998). *Optimal Gain and Phase Margin Tuning for PID Controllers*. Automatica vol 34 (8), pp. 1009-1014, 1998

- Horch, A. (1999). *A simple method for detection of stiction in control valves*. Control Engineering Practice 7 (1999) 1221-1231
- Horch, A.; Cox, J. W.; Bonavita, N. (2007). *Peak Performance. Root Cause analysis of plant-wide disturbance*. ABB Review 1/2007.
- Horch, A.; Isaksson, A. J. (1999). *A modified index for control performance Assessment*. Journal of Process Control 9 (1999) 475-483.
- Horch, A. (2000). *Condition Monitoring of control loops*. Tese de Doutorado. Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia (2000).
- Ingimundarson, A.; Hägglund, T. *Closed Loop Identification of a First Order Plus Deadtime Model with Method of Moments*.
- Jatto, E.; Okhamafe, A.O. (2002). *An Overview of Pharmaceutical Validation and Process Controls in Drug Development*. Tropical Journal of Pharmaceutical Research, December 2002; 1 (2): 115-122.
- Ko, B-S.; Edgar, T. F. (1998). *Assessment of Achievable PI Control Performance for Linear Processes with Dead Time*. Proceedings of the American Control Conference. Philadelphia, June 1998.
- Kozub, D.; Garcia, C.E. (1993). *Monitoring and diagnosis of automated controllers in the chemical process industrie*. Em 'AIChE Meeting'. St. Louis, MO.
- Lipták, B.G. (1999). *Optimization of Industrial Unit Processes*. 2nd Edition. CRC Press LCC.
- Maciel, C. R. F. (2004). *Modelagem matemática para cálculo da eficiência de uma termelétrica pelo método da disponibilidade*. Dissertação de mestrado. Engenharia Mecânica. PUC Minas. Belo Horizonte.
- Mamzic, C. L. (1994). *Statistical Process Control – Practical Guides for Measurement and Control*. Instrument Society of America, 1995.
- Mejia, R.I.; Coelho A.A.R.; Farenzena M.; Trierweiler J. O.; Nunes G.C. (2008). *Auditoria de Malhas de Controle em Processos Industriais*. Tutoriais do XVII Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora 2008.
- Miao, T.; Seborg, D. (1998). *Automatic Detection of Excessively Oscillatory Feedback Control Loops*. Proceedings of the 1999 IEEE
- Michel, H. C. (2008). *Manual de utilização do IAMAuditoria v. 1.0*. Laboratório de Validação de Sistemas – UFMG. Uso interno.
- Mitchell, W.; Shook, D.; Shah, S.L. *A picture worth a thousand control loops: An innovative way of visualizing controller performance data*.
- Montgomery, D. C. (2001). *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley Sons Inc., Arizona University, USA.
- Niu, S. S. e Ljung, L. (1994). *Multiple Model Parameter Estimation*. Technical Report, Department of Electrical Engineering, Linkoping University, S-581 83 Linkping, Sweden.

- Olsen, T.; Bialkowski, B. (2002). *Lambda Tuning as a Promising Controller Tuning Method for the Refinery*. EnTech Control. Prepared for Presentation at 2002 AIChE Spring National Meeting in New Orleans. March 2002, Session No. 42 - Applications of Control to Refining. (Unpublished)
- Ordys, A. W.; Uduehi, D. & Johnson, M. A. (2007). *Process Control Performance Assessment: From Theory to Implementation*, Springer-Verlag.
- Pryor, C. (1982). *Autocovariance and power spectrum analysis*, Control Engineer (Oct) (1982) 103-106
- Ruel, M. (2000). *Stiction: The Hidden Menace*. Control Magazine, November 2000
- Ruel, M. (2003). Using filtering to improve performance. Presented at ISA EXPO 2003, 21-23 October 2003 in Houston, TX; <http://www.isa.org>
- S, Jamsa-Jounela, S.; Polkonen, R.; Georgiev, Z.; Zuehike, U.; Halmevaara, K. (2002). *Evaluation of Control Performance: Methods and Applications*. Proceedings of the 2002 IEEE International.
- Shinskey, F.G. (1998). *Process Control Systems. Application, Design, and Tuning*.
- Singhal A.; Salsbury T. I. (2005). *A simple method for detecting valve stiction in oscillating control loops*. Journal of Process Control 15 (2005) 371–382
- Swanda, A.P. e Seborg, D.E. (1999). Controller performance assessment based on setpoint response data. Proceedings of the American Control Conference, pp. 3863-3867.
- Thornhill, N.F.; Hägglund, T. (1997). *Detection and Diagnosis of Oscillation in Control Loops*. Control Engineering Practice, Vol. 5. (10), pp. 1343-1354, 1997
- Thornhill, N.F.; Huang, B.; Zhang. (2003). *Detection of multiple oscillations in control loops*. Journal of Process Control 13 (2003) 91-100
- Thornhill, N.F.; Shah, S. L.; Huang, B.; Vishnubhotla. A. (2002). *Spectral principal component analysis of dynamica process data*. Control Engineering Practice 10 (2002) 833-846.
- Torres, B.S., Fonseca, M.O., Passos, L.F., Faria, D.C. (2004). Avaliação de Desempenho, diagnóstico automático e sintonia de malhas de controle auxiliada por software dedicado, Revista Controle & Instrumentação, Ano 10, Número 98, Novembro, Págs. 69-75.
- Torres, B.S.; Carvalho, F.B.; Fonseca, M.O. & Seixas, C. (2006). *Performance Assessment of Control Loops – Case Studies*. IFAC 2006.
- Valle, R. M.; Pinheiro, P. C. (1995). *Controle de Combustão: Otimização do Excesso de Ar*. II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica. Agosto 1995. Rio de Janeiro.
- Willis, M.J. (1998). *Proportional-Integral-Derivative Control*, Lecture Notes, Dept. of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle.



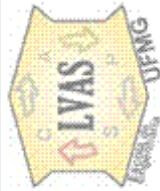
**ANEXO B – EXEMPLO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS PARA TESTES EM MALHA ABERTA**

	Universidade Federal de Minas Gerais <b>Escola de Engenharia – Grupo de Validação de Sistemas</b> <small>Av. Antônio Carlos, 6627 - Pólo Mineirão, VIC-Área III, 31.270-001                  Tel.: (51)3429.2442 www.gva.ufmg.br</small>		 A Melhor Energia do Brasil.		Data: 23/09/2008		
	Projeto de Validação Ampla da Usina Térmica do Barreiro Plano de Ação dos Testes para Auditoria das Malhas de Controle da Caldeira		Ação Contingência		Doc. Revisão: 1 Folha: 1/14		
Item	Dispositivos	Prior	Status	Procedimento	Local	Data	Responsável

1 - PIC313/FIQ313 – Pressão e vazão de Água de Alimentação							
Item	Dispositivos	Prior	Status	Procedimento	Local	Data	Responsável
0	Estação de trabalho	1		Instalação de software para monitoramento de tags OPC	UTBA	-	GVAS
1.1	Estação de trabalho	1		Iniciar monitoramento de todas as variáveis relacionadas com os testes ajustando suas escalas conforme limites toleráveis. (LIC302, FIQ313, PIC313, TIC327). A tendência dessas variáveis deverá ser acompanhada enquanto algum teste estiver sendo executado.	UTBA	Abortar teste.	GVAS
1.2	PIC313 – Testes MF	1		Realizar testes em MF e verificar pelas tendências se processo opera em condições normais.	UTBA	Adiar o teste.	GVAS/CEMIG
1.3	PIC313 - A->M	1		Chavear controlador PIC313 para manual. Remover filtro no transmissor ou SDCD.	UTBA	Voltar com o filtro da PV e retornar controlador PIC313 para automático	GVAS/CEMIG
1.4	Placa de Aquisição/Painel CS3000	1		Conectar cabos da placa de aquisição nas entradas relativas ao medidor PIT313 (e se possível também de FIT313). Verificar se não houve nenhuma interferência no sistema.	UTBA	Desconectar cabos.	GVAS/CEMIG
1.5	PIC313 - monitoramento	2		Manter controlador operando em malha aberta por um período de aproximadamente 500 constantes de tempo.	UTBA	Retornar controlador PIC313 para automático	GVAS
1.6	LIC302 – A->M	2		Chavear controlador LIC302 para manual	UTBA	Retornar controlador LIC302 para automático.	GVAS/CEMIG
1.7	FIQ313 – Testes MF	1		Realizar teste em MF	UTBA	Retornar controlador LIC302 para automático.	GVAS/CEMIG
1.7	FIQ313 – A->M	2		Chavear controlador FIQ313 para manual. Verificar se esta ação reduz variações na pressão medida em PIT313.	UTBA	Ajustar setpoint de FIQ313 para valor de segurança. Passar controlador de FIQ313 para automático. Retornar controlador LIC302 para automático.	GVAS/CEMIG

Legenda    Prioridade: 1 – Alta, 2 – Média, 3 – Baixa    Status: CO – Concluída, CA – Cancelada, PE - Pendente

ANEXO B – EXEMPLO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (CONTINUAÇÃO)

		Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia - Grupo de Validação de Sistemas Av. Antônio Carlos, 6627 - Belo Horizonte, MG-Brasil, 31.270-903 Tel.: (51) 4509 5488 www.gval.com.br		Projeto de Validação Ampla da Usina Térmica do Barreiro Plano de Ação dos Testes para Auditoria das Malhas de Controle da Caldeira		CEMIG A Melhor Energia do Brasil.		Data: 23/09/2008 Doc. Revisão: 1 Folha: 2/14	
						Local	Data	Ação Contingência	Responsável
Item	Dispositivos	Prior	Status	Procedimento	Local	Data	Ação Contingência	Responsável	
1.8	TIC327 – A->M	2		Chavear controlador TIC327 para manual.	UTBA		Retornar controlador TIC327 para automático	GVAS/CEMIG	
1.9	PIC313 - Testes modelagem	1		Realizar a seqüência de teste <u>simplificada</u> para identificação do processo. O teste deve abranger apenas a faixa de operação normal da malha, evitando desvios excessivos. Consultar descritivo da malha.	UTBA		Abortar o teste. Retornar MV para um valor de segurança. Retornar controladores para automático.	GVAS/CEMIG	
1.10	PIC313 – filtro PV	3		Ajustar filtro do transmissor ou no SDCD para remover ruídos de medição	UTBA		-	GVAS/CEMIG	
1.11	PIC313 - ajustes	1		Modificar sintonia de PIC313 para resposta rápida às mudanças de carga (evitar interação com FIQ313). Ajustar limites de saída do controlador para uma faixa de operação segura.	UTBA		-	GVAS/CEMIG	
1.12	PIC313 – M->A	1		Chavear controlador PIC313 para automático. Monitorar o funcionamento da malha e retornar os limites de saída para os valores originais.	UTBA		Chavear controlador para Manual. Ajustar MV para um valor de segurança. Retornar parâmetros originais. Chavear controlador para Auto	GVAS/CEMIG	
1.13	Teste em FIQ313???	1		Se processo continua controlável em modo manual, iniciar imediatamente testes em FIQ313 (item 1.14). Senão pular para item 1.18, aguardar estabilização e reiniciar testes em 1.6, 1.7 e 1.8, e depois continuar em 1.14.	UTBA		-	GVAS	
<b>FIQ313 – Vazão de Água de Alimentação</b>									
1.14	Placa de Aquisição/ Painel CS3000	1		Conectar cabos da placa de aquisição nas entradas relativas ao medidor FIT313. Verificar se não houve nenhuma interferência no sistema. Remover filtro.	UTBA		Desconectar cabos, retornar valor original do filtro.	GVAS/CEMIG	
1.15	FIQ313 - Testes	1		Realizar a seqüência de teste <b>completa</b> para identificação do processo e teste na válvula FCV313. O teste deve	UTBA		Abortar o teste. Retornar MV para um valor	GVAS/CEMIG	

Legenda | Prioridade: 1 – Alta, 2 – Média, 3 – Baixa | Status: CO – Concluída, CA – Cancelada, PE – Pendente

ANEXO B – EXEMPLO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (CONTINUAÇÃO)

		Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia - Grupo de Validação de Sistemas Av. Antônio Carlos, 6627 - São Xavier, 31270-901 Tel.: (51) 34109 2488 www.gem.ufmg.br				Data: 23/09/2008 Doc. Revisão: 1 Folha: 3/14		
Item	Dispositivos	Prior	Status	Procedimento	Local	Data	Ação Contingência	Responsável
1.16	FIQ313 – filtro PV	3		abrange apenas a faixa de operação normal da malha, evitando desvios excessivos. Consultar descritivo da malha.	UTBA		de segurança. Retornar controladores para automático.	GVAS/CEMIG
1.17	FIQ313 - ajustes	1		Modificar sintonia de FIQ313 para ótimo <u>rastreamento de setpoint, porém com frequência de corte 3-5 vezes maior que PIC313 para evitar interação</u> . Ajustar limites de saída do controlador para uma faixa de operação segura.	UTBA		-	GVAS/CEMIG
1.18	FIQ313 – M->A	1		Chavear controlador FIQ313 para automático. Monitorar o funcionamento da malha e retornar os limites de saída para os valores originais.	UTBA		Chavear controlador para Manual. Ajustar MV para um valor de segurança. Retornar parâmetros originais. Chavear controlador para Automático.	GVAS/CEMIG
1.19	TIC327 – M->A	2		Chavear controlador TIC327 para automático	UTBA			GVAS/CEMIG
1.20	LIC302 – M->A	2		Chavear controlador LIC302 para automático	UTBA		-	GVAS/CEMIG
1.21	Placa de Aquisição/ Painel CS3000	1		Desconectar cabos da placa de aquisição nas entradas relativas ao medidor PIT313 e FIT313.	UTBA		-	GVAS
1.22	Estação de trabalho	2		Iniciar operação assistida por pelo menos 1 hora.	UTBA		Retornar os parâmetros do controlador para seus valores originais.	GVAS

ANEXO B – EXEMPLO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (CONTINUAÇÃO)

	Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia – Grupo de Validação de Sistemas Av. Antônio Carlos, 6627 - São Xavier, 31270-901 Tel.: (51) 3409 2488 www.gva.ufmg.br			Data: 23/09/2008				
	Projeto de Validação Ampla da Usina Térmica do Barreiro Plano de Ação dos Testes para Auditoria das Malhas de Controle da Caldeira			Doc.	Revisão: 1	Folha: 4/14		
Item	Dispositivos	Prior	Status	Procedimento	Local	Data	Ação Contingência	Responsável

2 – LIC302 Nível do Tubulão Superior / TIC327 – Temperatura no Super Aquecedor								
2.1	LIC302 - monitoramento	1		Verificar pelas tendências se processo opera em condições normais.	UTBA		Adiar o teste.	GVAS/CEMIG
2.2	LIC302 - A->M	1		Chavear controlador LIC302 para manual. Remover filtro no transmissor ou SDCD.	UTBA		Voltar com o filtro de PV e retornar controlador LIC302 para automático	GVAS/CEMIG
2.3	Placa de Aquisição/ Painel CS3000	2		Conectar cabos da placa de aquisição nas entradas relativas ao medidor LIT302A e LIT302B. Verificar se não houve nenhuma interferência no sistema.	UTBA		Desconectar cabos.	GVAS/CEMIG
2.4	LIC302 - Testes modelagem	1		Realizar a sequência de teste <b>especial para processo integrador</b> . O teste deve abranger apenas a faixa de operação normal da malha, evitando desvios excessivos. Consultar descritivo da malha.	UTBA		Abortar o teste. Retornar MV para um valor de segurança. Retornar controladores para automático.	GVAS/CEMIG
2.5	LIC302 – filtro PV	3		Ajustar filtro do transmissor ou no SDCD para remover ruídos de medição	UTBA		-	GVAS/CEMIG
2.6	LIC302 - ajustes	1		Modificar sintonia de LIC302 para resposta rápida às mudanças de carga, mas com boa robustez. Ajustar limites de saída do controlador para uma faixa de operação segura.	UTBA		-	GVAS/CEMIG
2.7	LIC302 – M->A	1		Chavear controlador LIC302 para automático. Monitorar o funcionamento da malha e retornar os limites de saída para os valores originais.	UTBA		Chavear controlador para Manual. Ajustar MV para um valor de segurança. Retornar parâmetros originais. Chavear controlador para Automático.	GVAS/CEMIG
2.8	Estação de trabalho	1		Iniciar monitoramento de todas as variáveis relacionadas com os testes ajustando suas escalas conforme limites toleráveis. (TIC327 - etc). A tendência	UTBA		Abortar teste.	GVAS

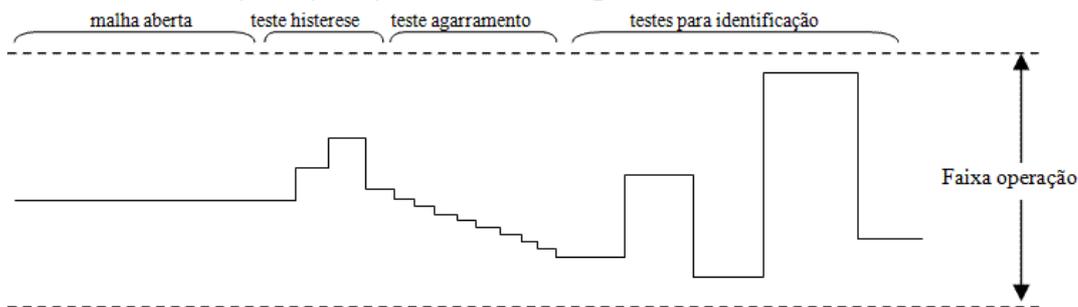
Legenda | Prioridade: 1 – Alta, 2 – Média, 3 – Baixa | Status: CO – Concluída, CA – Cancelada, PE - Pendente

**ANEXO B – EXEMPLO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (CONTINUAÇÃO)**

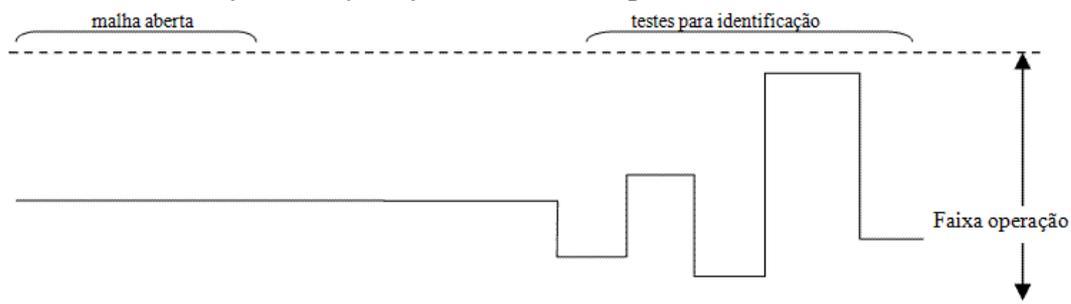
		Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia - Grupo de Validação de Sistemas <small>Av. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco, 31272-901 Tel.: (51) 3409 3468 www.gva.cedex.ufmg.br</small>				Data: 23/09/2008 Doc. Revisão: 1 Folha: 5/14		
Item	Dispositivos	Prior	Status	Procedimento	Local	Data	Ação Contingência	Responsável
2.9	TIC327 - monitoramento	1		dessas variáveis deverá ser acompanhada enquanto algum teste estiver sendo executado.	UTBA		Adiar o teste.	GVAS/CEMIG
2.10	TIC327 - A->M	1		Verificar pelas tendências se processo opera em condições normais. Chavear controlador TIC327 para manual.	UTBA		Retornar controlador TIC327 para automático	GVAS/CEMIG
2.11	TIC327 - Testes modelagem	1		Realizar a seqüência de teste completa para identificação do processo e teste do atuador. O teste deve abranger apenas a faixa de operação normal da malha, evitando desvios excessivos. Consultar descritivo da malha.	UTBA		Abortar o teste. Retornar MV para um valor de segurança. Retornar controladores para automático.	GVAS/CEMIG
2.12	TIC327 - filtro PV	3		Ajustar filtro do transmissor ou no SDCD para remover ruídos de medição	UTBA		-	GVAS/CEMIG
2.13	TIC327 - ajustes	1		Modificar sintonia de TIC327 para resposta rápida às mudanças de carga. Ajustar limites de saída do controlador para uma faixa de operação segura.	UTBA		-	GVAS/CEMIG
2.14	TIC327 - M->A	1		Chavear controlador TIC327 para automático. Monitorar o funcionamento da malha e retornar os limites de saída para os valores originais.	UTBA		Chavear controlador para Manual. Ajustar MV para um valor de segurança. Retornar parâmetros originais. Chavear controlador para Automático.	GVAS/CEMIG
2.15	Estação de trabalho	2		Iniciar operação assistida por pelo menos 2 horas.	UTBA		Retornar os parâmetros do controlador para seus valores originais.	GVAS/CEMIG

	Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Grupo de Validação de Sistemas Av. Antônio Carlos, 6627 - Belo Horizonte, MG-Brasil, 31.270-901 Tel.: (31)3409 3468 www.gvas.cpdee.ufmg.br		Data: 01/09/2008
			Revisão:
Projeto de Validação Ampla da Usina Térmica do Barreiro Sequência para sinal de teste em malha aberta		Área:	Tag:
		Descrição:	

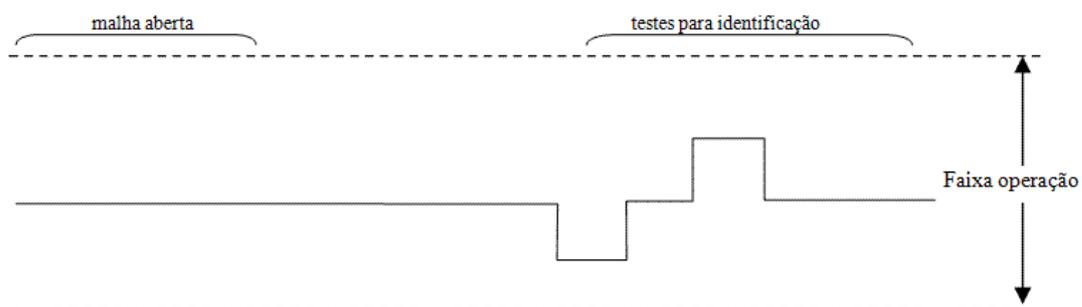
**A. Teste completo para processo auto-regulatório**



**B. Teste simplificado para processo auto-regulatório**



**C. Teste simplificado processo integrador**



**C.1. Definições Básicas**

1.1. Dado uma amostra de  $n$  variáveis aleatórias  $x$ , temos que a média  $\bar{x}$  da amostra é dada por:

$$\bar{x} = E[x] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Já o desvio padrão  $\sigma_x$  e a variância  $\sigma_x^2$  da amostra são definidos como:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\sigma_x^2 = E[(x - E[x])^2] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

1.2. A *covariância* de amostras de tamanho  $n$  de duas variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$  é a medida da dependência linear entre essas variáveis e é dada por:

$$cov(X, Y) = \sigma(X, Y) = E[(X - E[X])(Y - E[Y])] = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Já o *coeficiente de correlação* entre essas duas variáveis é semelhante ao cálculo da covariância, porém normalizado na faixa  $[-1,1]$  e é definido como:

$$\rho(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

1.3. Dado um vetor  $X \in \mathbb{R}^n$  de variáveis aleatórias, temos que a *matriz de covariância* tem dimensão  $n \times n$  e é definida como:

$$cov[X] = \sigma_x^2(n \times n) = \begin{bmatrix} \sigma^2(X_1) & \sigma(X_1, X_2) & \cdots & \sigma(X_1, X_n) \\ \sigma(X_2, X_1) & \sigma^2(X_2) & \cdots & \sigma(X_2, X_n) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \sigma(X_n, X_1) & \sigma(X_n, X_2) & \cdots & \sigma^2(X_n) \end{bmatrix}$$

E a *matriz de correlação*, ou *matriz de coeficientes de correlação*, é:

$$\rho[X] = \begin{bmatrix} 1 & \rho(X_1, X_2) & \cdots & \rho(X_1, X_n) \\ \rho(X_2, X_1) & 1 & \cdots & \rho(X_2, X_n) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \rho(X_n, X_1) & \rho(X_n, X_2) & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

1.4. A função de autocorrelação FAC de  $x(t)$  é:

$$r_{xx}(\tau, t) = E[x(t)x(t + \tau)]$$

Enquanto que a função de correlação cruzada FCC entre  $x(t)$  e  $y(t)$  é:

$$r_{xy}(\tau, t) = E[x(t)y(t + \tau)]$$

Tomada uma amostra de tamanho  $N$ , com intervalo de amostragem  $k$ , a FAC de  $x(t)$  e a FCC entre  $x(t)$  e  $y(t)$  podem ser estimadas por meio das relações:

$$r_{xx}(k) \approx \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^N x(i)x(i + k)$$

$$r_{xy}(k) \approx \frac{1}{2N + 1} \sum_{i=-N}^N x(i)y(i + k)$$

Obs.1: Se a média dos sinais for nula, então as funções de *autocorrelação* e *correlação cruzada* coincidem com as funções de *autocovariância* e *covariância cruzada*.

## C.2. Análise em Componentes Principais (ACP)

Dada uma matriz de dados  $D$ , que representa uma amostra de tamanho  $n$  de um conjunto de  $m$  séries temporais, e sua matriz de correlação  $S$ , de tamanho  $m \times m$ :

$$D_{n \times m} = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & \cdots & x_m(t_1) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ x_1(t_n) & \cdots & x_m(t_n) \end{bmatrix} \quad S_{m \times m} = \rho_D$$

Temos que os *autovetores*,  $V$ , da matriz  $S$ , fornecem as direções de um novo sistema coordenado ortogonal. Esses novos eixos representam as direções de variabilidade máxima e definem um novo espaço, no qual os dados podem ser projetados. A projeção é obtida por multiplicação escalar entre as colunas das matrizes e resulta em variáveis transformadas não-correlacionadas, chamadas componentes principais, CP:

$$CP_{n \times m} = D_{n \times m} \times V_{n \times m} = \begin{bmatrix} CP_1(t_1) & \cdots & CP_m(t_1) \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ CP_1(t_n) & \cdots & CP_m(t_n) \end{bmatrix}$$

Podemos dizer que as novas variáveis capturam os diferentes padrões de variação presentes no conjunto de dados. O percentual de informação, em termos da variação total dos dados, que foi capturada por cada componente é indicada pelas magnitudes dos *autovetores*, ou seja, pelos *autovalores*,  $\lambda$ , da matriz  $S$ .

A matriz de *autovetores*, também pode ser interpretada como uma matriz de pesos, onde cada um de seus elementos, elevados ao quadrado, representa o percentual de participação de cada variável da matriz  $D$  em cada componente CP.

É importante salientar que a ACP depende de um prévio escalonamento das variáveis da matriz de dados  $D$ . Um escalonamento típico é tornar a média dos dados nula (subtraindo-se o valor médio) e dividir o resultado pelo desvio padrão, conforme mostrado na expressão abaixo:

$$\hat{X} = \frac{x - \bar{x}}{\sigma(x)}$$

### D.1 - Método da síntese direta

Neste método, a função de transferência do controlador,  $G_c(s)$ , é sintetizada a partir de um modelo matemático do processo,  $G_p(s)$  de forma que a função de transferência da malha fechada seja equivalente a uma determinada função de transferência desejada  $(C/R)_d$ . Essa função de transferência pode ser de primeira ordem com tempo morto onde  $\tau_c$  é a constante de tempo desejada para a malha fechada (parâmetro de projeto) e o tempo morto,  $\theta$ , é igual ou maior ao tempo morto do processo, ou seja:

$$\left(\frac{C}{R}\right)_d = \frac{e^{-\theta s}}{\tau_c s + 1} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \quad (1)$$

Colocando-se  $G_c$  em evidência, temos:

$$G_c(s) = \frac{1}{G_p(s)} \frac{e^{-\theta s}}{(\tau_c + \theta)s} \quad (2)$$

#### 1.1. Modelos de primeira ordem com tempo morto

Quando o modelo matemático do processo,  $G_p(s)$ , é do tipo Primeira Ordem com Tempo Morto, onde  $K$  é o ganho do processo,  $\tau_p$  é a constante de tempo e  $\theta$  é o tempo morto. Substituindo-se a função de transferência de  $G_p(s)$  na equação 2, temos:

$$G_c(s) = \frac{\tau_p s + 1}{K(\tau_c + \theta)s} = \frac{\tau_p}{K(\tau_c + \theta)} \left(1 + \frac{1}{\tau_p s}\right) \quad (3)$$

Obtém-se, portanto um controlador com a estrutura de um PI com  $K_c = \tau_p / K(\tau_c + \theta)$  e  $T_i = \tau_p$ .

#### 1.2. Modelos de segunda ordem com tempo morto

Quando o modelo matemático do processo é de segunda ordem com tempo morto, onde  $K$  é o ganho do processo,  $\tau_{p1}$  e  $\tau_{p2}$  são as constantes de tempo e  $\theta$  é o tempo morto, a equação 2 torna-se:

$$G_c(s) = \frac{(\tau_{p1}s + 1)(\tau_{p2}s + 1)}{K(\tau_c + \theta)s} = \frac{\tau_{p1} + \tau_{p2}}{K(\tau_c + \theta)} \left[1 + \frac{1}{(\tau_{p1} + \tau_{p2})s} + \left(\frac{\tau_{p1}\tau_{p2}}{\tau_{p1} + \tau_{p2}}\right)s\right] \quad (4)$$

Obtém-se, portanto um controlador com a estrutura de um PID com  $K_c = (\tau_{p1} + \tau_{p2}) / K(\tau_c + \theta)$ ,  $T_i = (\tau_{p1} + \tau_{p2})$  e  $T_d = \left(\frac{\tau_{p1}\tau_{p2}}{\tau_{p1} + \tau_{p2}}\right)$ .

## D.2 - Método lambda para processos integradores

O método lambda tem esse nome, pois utiliza um parâmetro de projeto,  $\lambda$ , para sintetizar um controlador PI que resulta em certas características na resposta do processo em malha fechada. Ele requer um modelo integrador para o processo, com função de transferência mostrada na equação 5.

$$G_p(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{s} \quad (5)$$

O valor de lambda é definido de acordo com um dos seguintes critérios de desempenho:

- $T_{r1}$  (tempo de reação): Tempo requerido, após uma perturbação em degrau na variável controlada, para que o controlador a contenha de se afastar do setpoint e inicie o retorno.  $T_{r1} = \lambda$ . Em mudanças de setpoint, podemos interpretar  $T_{r1}$ , ou lambda, como sendo equivalente ao tempo de subida.
- $T_{r2}$  (tempo de restabelecimento): Tempo requerido, após uma perturbação em degrau, para que o controlador atenuie totalmente a perturbação, trazendo a variável controlada de volta ao setpoint.  $T_{r2} = 6*\lambda$ . Em mudanças de setpoint, podemos interpretar  $T_{r2}$ , ou 6\*lambda, como sendo o tempo de acomodação.

Semelhante ao método da síntese direta, o controlador é obtido após igualar a função de transferência em malha fechada desejada,  $(C/R)_d$ , com a função de transferência em malha fechada do processo. Porém, neste caso, os dois pólos de malha fechada (pólo do processo e pólo do controlador) são posicionados num mesmo ponto  $(-1/\lambda)$ , sobre o eixo real, o que resulta no menor tempo de acomodação para uma resposta sobreamortecida num processo tipo integrador. A função de transferência do controlador é obtida isolando-se  $G_c(s)$  na seguinte expressão:

$$\left(\frac{C}{R}\right)_d = \frac{1}{(\lambda s + 1)^2} = \frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} = \frac{(T_i s + 1) e^{-\theta s}}{\left(\frac{T_i}{K_c K_p} - T_i \theta\right) s^2 + (T_i - \theta) s + 1} \quad (6)$$

Colocando-se  $G_c$  em evidência, temos um controlador com a estrutura de um PI, onde:

$$T_i = 2\lambda + \theta \text{ e } K_c = \frac{2\lambda + \theta}{K_p(\lambda + \theta)^2} \quad (7)$$