



Simulação e Análise de Correlação em Gerenciamento de Alarmes: Aplicação em Caldeiras Semi-Industriais

Isadora de Carvalho Marino

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

Andréa Pereira Parente, M.Sc.

Dezembro de 2017

Simulação e Análise de Correlação em Gerenciamento de Alarmes: Aplicação em Caldeiras Semi-Industriais

Isadora de Carvalho Marino

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharêu em Engenharia Química.

Aprovado por:

Ana Mehl, D.Sc.

Ingrid Oliveira Passos, Engenheira Química

Elene de Souza Freitas, M.Sc.

Orientado por:

Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

Andréa Pereira Parente, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2017

Isadora de Carvalho Marino.

Simulação e Análise de Correlação em Gerenciamento de Alarmes: Aplicação em Caldeiras Semi-Industriais/ Isadora de Carvalho Marino.

xiv, 90 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2017.

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Jr. e Andréa Pereira Parente

1. Simulação de Alarmes. 2. Análise de Correlação de Alarmes. 3. Controle Supervisório. 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Maurício Bezerra de Souza Jr. e Andréa Pereira Parente. I. Simulação e Análise de Correlação em Gerenciamento de Alarmes: Aplicação em Caldeiras Semi-Industriais

Dedico este trabalho à minha família.

No fim tudo dá certo, se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.

Fernando Sabino

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Donato, minha mãe Fátima e minha avó Maria Beatriz, pelas palavras de conforto em momentos de ansiedade, por acreditarem em mim e me apoiarem do início ao fim deste período intenso e estressante de faculdade.

Ao meu namorado Thor, pelo carinho, confiança, e por me fazer acreditar sempre que “tudo vai dar certo”.

A todos os meus amigos, especialmente àqueles que me acompanham nesta trajetória desde 2011.1.

Aos meus orientadores Maurício Bezerra e Andréa Parente, pelo suporte, por todos os conhecimentos compartilhados e, acima de tudo, por terem tornado possível a confecção deste trabalho.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharêu em Engenharia Química.

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CORRELAÇÃO EM GERENCIAMENTO DE ALARMES: APLICAÇÃO EM CALDEIRAS SEMI-INDUSTRIAIS

Isadora de Carvalho Marino

Dezembro, 2017

Orientadores: Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

Prof. Andréa Pereira Parente, M.Sc.

O presente trabalho promove uma avaliação da aplicação de técnicas de gerenciamento de alarmes na indústria. Um dos principais objetivos destas técnicas é garantir que o número de alarmes acionados não ultrapasse o número máximo gerenciável pelo operador. Buscando tornar esta avaliação prática em sistemas de alarmes industriais, foi desenvolvido um método de simulação que reproduz o comportamento dos alarmes. Um estudo de caso foi realizado para os alarmes absolutos e alarmes de diagnóstico de variáveis analógicas configurados na planta da caldeira do Laboratório de Engenharia Química, EQ/UFRJ. A análise dos históricos de alarmes da caldeira evidencia algumas deficiências, como a ocorrência de alarmes ruidosos e eventos de avalanche de alarmes, justificando a necessidade de alterações na configuração do sistema. A aplicação do método de simulação de alarmes aos históricos de dados coletados permitiu a análise dos resultados das mudanças propostas. Adicionalmente, foi realizada uma análise de correlação das variáveis de processo da caldeira visando reduzir o número de alarmes monitorados isoladamente. Por fim, diversas propostas foram feitas buscando-se aprimorar a eficiência do sistema. Estas propostas incluem a supressão de alguns alarmes considerados desnecessários para a operação normal da caldeira, a alteração dos valores de banda morta assim como a adição de *delay* na ativação e/ou desativação de alguns alarmes e, por fim, o monitoramento conjunto de alarmes correlacionados.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	1
I.1 MOTIVAÇÃO	1
I.2 OBJETIVO.....	1
I.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
II.1 CALDEIRAS.....	3
II.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES.....	4
II.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES.....	6
II.1.3 A CALDEIRA NO CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO.....	7
II.2 CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE PROCESSOS.....	9
II.2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS	9
II.2.2 CONTROLE APLICADO A CALDEIRAS	12
II.3 CAMADAS DE PROTEÇÃO EM CALDEIRAS.....	13
II.3.1 ALARMES	14
II.4 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	16
II.5 GERENCIAMENTO DE ALARMES.....	18
II.5.1 O PROBLEMA DOS ALARMES: ADVENTO DE SISTEMAS DCS	20
II.5.2 CICLO DE VIDA DOS ALARMES.....	22
II.5.3 TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO DE ALARMES.....	25
II.5.3.1 <i>DEADBAND</i>	27
II.5.3.2 <i>ON-DELAYE OFF-DELAY</i>	28
II.5.3.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO.....	29
II.5.4 DESEMPENHO DO SISTEMA DE ALARMES	30
II.5.4.1 INUNDAÇÃO DE ALARMES.....	31
II.5.4.2 ALARMES RUIDOSOS.....	32
CAPÍTULO III – ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA	34
III.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA	34
III.2 FUNCIONAMENTO DA CALDEIRA.....	35
III.3 MONITORAMENTO E CONTROLE DA CALDEIRA	37
III.4 LISTA DE ALARMES CONFIGURADOS.....	39
III.5 ANÁLISE DE HISTÓRICOS DE ALARMES.....	42

III.6	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE ALARMES	49
CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES		52
IV.1	SIMULAÇÃO DOS ALARMES DA CALDEIRA DO LADEQ	52
IV.1.1	TESTE DAS CONFIGURAÇÕES DOS ALARMES	53
IV.2	ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ALARMES.....	64
IV.2.1	COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	65
IV.2.2	ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS.....	71
IV.2.3	ANÁLISE DE <i>CLUSTERS</i>	74
CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....		77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		79
APÊNDICE A – DIAGRAMA P&ID DA PLANTA		84
APÊNDICE B – FÓRMULAS DA SIMULAÇÃO DE ALARMES.....		85
APÊNDICE C – MAPAS DE CORES DOS DADOS INDIVIDUAIS		88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Máquina de Heron.....	3
Figura 2: Caldeira flamotubular horizontal.....	5
Figura 3: Caldeira flamotubular vertical.....	5
Figura 4: Esquema simplificado de uma caldeira aquatubular.....	6
Figura 5: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.....	7
Figura 6: Exemplo de processo em controle manual.....	10
Figura 7: Exemplo de processo em controle automático.....	11
Figura 8: Diagrama de blocos para estratégia de controle feedback.....	12
Figura 9: O conceito de camadas de proteção.....	14
Figura 10: Esquema representativo das indicações de estado e prioridade dos alarmes.....	18
Figura 11: Parede de controle.....	20
Figura 12: Crescimento exponencial do número de alarmes configurados por operador.....	21
Figura 13: O ciclo de vida dos alarmes.....	23
Figura 14: Comportamento das principais variáveis contínuas em um dia de operação da caldeira do LADEQ.....	36
Figura 15: Tela do sistema supervisório da planta da caldeira do LADEQ.....	38
Figura 16: Arquivo em Excel utilizado para simulação dos alarmes.....	53
Figura 17: Resultado da simulação após adição de <i>on-delay</i> aos alarmes FIT1031 e PIT1032.....	53
Figura 18: Perfil de variação dos rótulos TIT1042 e LIT1013 nos dados compilados.....	68
Figura 19: Perfil de variação de todas as variáveis de processo nos dados compilados.....	69
Figura 20: Mapa de cores da correlação entre as variáveis de processo a partir dos dados individuais.....	70
Figura 21: Diagrama de pareto da porcentagem de variância explicada por cada componente principal na caldeira do LADEQ.....	73

Figura 22: Dendrograma dos principais grupos de variáveis na caldeira do LADEQ.	75
Figura 23: Mapa de cores dos coeficientes de correlação do primeiro dia de operação.	88
Figura 24: Mapa de cores dos coeficientes de correlação do segundo dia de operação.	88
Figura 25: Mapa de cores dos coeficientes de correlação do terceiro dia de operação.	89
Figura 26: Mapa de cores dos coeficientes de correlação da primeira aula prática no quarto dia de operação.	89
Figura 27: Mapa de cores dos coeficientes de correlação da segunda aula prática no quarto dia de operação.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Recomendações para indicações dos alarmes de acordo com seus estados.....	17
Tabela 2: Valores padrão de banda morta para diferentes tipos de sinal	28
Tabela 3: Valores padrão de tempo de atraso para diferentes tipos de sinal.....	28
Tabela 4: Resumo de KPI's de sistemas de alarmes.	30
Tabela 5: Lista de alarmes absolutos de variáveis contínuas configurados na planta da caldeira do LADEQ.....	39
Tabela 6: Lista de alarmes de diagnóstico configurados na planta da caldeira do LADEQ.	41
Tabela 7: Lista de alarmes de variáveis discretas configurados na planta da caldeira do LADEQ.	42
Tabela 8: Histórico de alarmes acionados em um dia de operação da caldeira do LADEQ.	43
Tabela 9: Alarmes de falha de comunicação do sistema SCADA em um dia de operação da caldeira do LADEQ.....	44
Tabela 10: Quantidade total de disparos dos alarmes absolutos e de diagnóstico da caldeira do LADEQ nos quatro dias de estudo.....	46
Tabela 11: Métricas calculadas para o sistema de alarmes da caldeira do LADEQ.	47
Tabela 12: Número de disparos dos alarmes FIT1031 variando-se a banda morta..	55
Tabela 13: Número de disparos dos alarmes FIT1031 variando-se os tempos de atraso.	55
Tabela 14: Número de disparos dos alarmes FIT1031 com novo valor de banda morta variando-se os tempos de atraso.	56
Tabela 15: Número de disparos do alarme RATE por taxa de variação definida.....	56
Tabela 16: Número de disparos dos alarmes PIT1032 variando-se a banda morta..	57
Tabela 17: Número de disparos dos alarmes PIT1032 variando-se os tempos de atraso.	58
Tabela 18: Número de disparos dos alarmes PIT1032 com novo valor de banda morta variando-se os tempos de atraso.	58
Tabela 19: Número de disparos dos alarmes LIT1026 variando-se a banda morta..	59

Tabela 20: Número de disparos dos alarmes LIT1026 variando-se os tempos de atraso.	60
Tabela 21: Número de disparos dos alarmes LIT1026 com novo valor de banda morta variando-se os tempos de atraso.	60
Tabela 22: Levantamento de dados para escolha de <i>on-delay</i> dos alarmes de falha de comunicação.	61
Tabela 23: Configurações propostas para os alarmes da caldeira do LADEQ	62
Tabela 24: Quantidade total de disparos dos alarmes absolutos nos quatro dias de estudo após alterações.	63
Tabela 25: Métricas calculadas para o sistema de alarmes da caldeira do LADEQ após a implementação das recomendações finais.	63
Tabela 26: Parâmetros da distribuição de probabilidades das variáveis de processo.	66
Tabela 27: Coeficientes de correlação das variáveis de processo a partir dos dados compilados.	67
Tabela 28: Coeficientes de correlação das variáveis de processo a partir dos dados individuais.	69
Tabela 29: Componentes principais e coeficientes das variáveis de processo.	73

LISTA DE ABREVIATURAS

BP	Empresa de nome British Petroleum
DCS	Distributed Control System
EEMUA	Engineering Equipment and Materials Users Association
EQ	Escola de Química
HAZOP	Hazard and Operability Study
HI	Limite alto de uma variável de processo que ativa seu alarme
HIHI	Limite muito alto de uma variável de processo que ativa seu alarme
IHM	Interface Homem-Máquina
ISA	International Society of Automation
KPI	Key Performance Indicator
LADEQ	Laboratório de Engenharia Química
LOLO	Limite muito baixo de uma variável de processo que ativa seu alarme
LO	Limite baixo de uma variável de processo que ativa seu alarme
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PCA	Principal Component Analysis
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

I.1 MOTIVAÇÃO

Ao longo do tempo, os sistemas de controle industriais se tornaram cada vez mais robustos e automatizados. A maioria das plantas modernas conta com sistemas computadorizados avançados capazes de atuar em processos com elevado nível de complexidade (Venkatasubramanian *et al.*, 2003).

No entanto, ainda que os sistemas de controle automático tenham como objetivo a manutenção das variáveis de processo em seus valores ideais, o controlador pode não apresentar desempenho satisfatório na presença de condições anormais (perturbações maiores que as esperadas na condição de projeto e/ou falhas). As atividades de detecção e diagnóstico de falhas e posterior intervenção ainda são em grande parte dependentes de ação do operador (Venkatasubramanian *et al.*, 2003).

A presença do fator humano nesta área do controle pode ser um problema em muitos casos. De fato, as estatísticas mostram que cerca de 70% dos acidentes na indústria são causados por erro humano (Venkatasubramanian *et al.*, 2003). Este número, no entanto, envolve uma série de outros fatores que contribuem para a incapacidade dos operadores em lidar com algumas situações de risco, como é o caso das falhas no gerenciamento do sistema de alarmes.

A ausência de um sistema de alarmes eficiente impede que os operadores tenham todas as informações necessárias de forma clara no momento de tomar uma decisão. A estimativa de que as indústrias químicas e de petróleo nos Estados Unidos perdem aproximadamente 20 bilhões de dólares anualmente por conta de condições anormais de processo (Vásquez *et al.*, 2016) demonstra a dimensão econômica deste problema.

I.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é utilizar os principais conceitos, normas e métricas do gerenciamento de alarmes para identificar oportunidades de melhoria do sistema

de alarmes da caldeira semi-industrial localizada no Laboratório de Engenharia Química na Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LADEQ/EQ/UFRJ). O presente estudo é focado nas configurações dos alarmes, de tal modo que as recomendações resultantes possam ser facilmente implementadas em curto prazo. Para prever o comportamento do sistema de alarmes após a implementação das alterações propostas, é desenvolvido neste trabalho um sistema simulador de alarmes. É realizado, ainda, um estudo da correlação entre os alarmes.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo descreve a motivação do presente estudo, que consiste na importância e destaque do gerenciamento de alarmes no contexto do controle e segurança de processos em diversos ramos da indústria atualmente.

No segundo capítulo são apresentados todos os conceitos relevantes ao tema abordado. Abrange algumas definições relacionadas a caldeiras e onde elas estão inseridas no contexto da indústria brasileira, noções de controle de processos e as principais ideias do gerenciamento de alarmes.

O terceiro capítulo apresenta um estudo de caso da caldeira do Laboratório de Engenharia Química na Universidade Federal do Rio de Janeiro e a metodologia de simulação de alarmes desenvolvida. No estudo de caso são descritos os principais instrumentos e malhas de controle presentes na planta, o funcionamento da caldeira, e o sistema de alarmes configurado. Uma avaliação aprofundada dos históricos de alarmes extraídos é realizada. A metodologia de simulação de alarmes é descrita detalhadamente ao final do capítulo.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões do trabalho desenvolvido, sendo composto de duas partes: Primeiramente, são apresentados os resultados das alterações nas configurações (básica e avançada) dos alarmes por meio da aplicação da metodologia de simulação de alarmes. Nesta etapa, é avaliado como estas mudanças podem influenciar no desempenho do sistema. Posteriormente, os resultados da análise de correlação dos alarmes configurados são descritos e discutidos.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 CALDEIRAS

O conhecimento da força expansiva do vapor de água já existia desde 200 a.C., como mostram alguns registros históricos. Naquela época, Hero, de Alexandria, criou uma forma primitiva de turbina a vapor composta por uma caldeira que servia como suporte a uma esfera oca. A esfera contava também com dois pequenos tubos inclinados em ângulo reto, abertos nas pontas em contato com a atmosfera e dispostos perpendicularmente às conexões entre a caldeira e a esfera. O calor recebido pela caldeira promovia a vaporização da água, e o vapor gerado saía através dos tubos para a atmosfera, fazendo a esfera girar. Sua invenção é conhecida como “máquina de Heron” (Figura 1), também denominada Eolípila (Babcock e Wilcox, 1978).

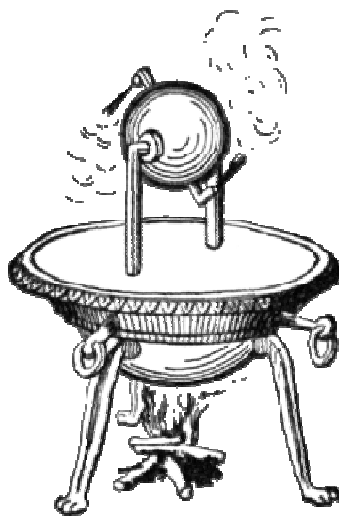


Figura 1: Máquina de Heron.
Fonte: Babcock e Wilcox, 1978

Desde a criação de Hero até o final do século XVI e início do século XVII, não há registros de progresso. A primeira máquina a vapor com aplicação prática foi introduzida apenas em 1699 por Thomas Savery, utilizada para bombear água das minas de carvão (Babcock e Wilcox, 1978).

A utilização do vapor para geração de energia ganhou importância significativa na revolução industrial. Durante este período, a máquina a vapor, que

possuía o mesmo princípio de funcionamento de uma caldeira, transformava a energia proveniente da queima de madeira ou carvão em energia mecânica, necessária em grande parte das atividades industriais realizadas na época (Wrigley, 2013).

No século XVIII, surgiram as primeiras caldeiras compostas por tubos de água, precursoras dos modelos multitubulares atuais (Babcock e Wilcox, 1978).

Segundo a definição de Pera (1990), um gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica (combustível), ar e fluido vaporizante, constituído por diversos equipamentos associados, perfeitamente integrados, para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. As caldeiras, ou caldeiras de vapor, são as mais simples unidades geradoras de vapor de água.

Uma caldeira de vapor é constituída essencialmente por um recipiente fechado, pressurizado, contendo tubos nos quais se introduz água, que é transformada em vapor pela aplicação externa de calor (Pera, 1990).

O funcionamento das caldeiras de um modo geral é descrito por Bega (2003). Segundo ele, estes equipamentos são compostos basicamente por dois sistemas: o sistema vapor-água e o sistema combustível-ar-gás da combustão. No segundo sistema, a queima do combustível na câmara de combustão converte a energia química do combustível em calor. Esta queima é obtida com a mistura completa e cuidadosa do combustível com o ar de combustão, e o calor gerado é transferido para o primeiro sistema (vapor-água) para promover a vaporização da água.

II.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

Nas caldeiras flamotubulares, também conhecidas como fogotubulares, os gases provenientes da combustão são gerados na fornalha e passam por dentro de múltiplos tubos circundados por água no interior do tubulão. A transferência de calor entre os gases e a água promove a geração de vapor na caldeira.

Dependendo da disposição dos tubos, as caldeiras podem ser flamotubulares horizontais ou flamotubulares verticais (Martinelli, 2003). Na Figura 2 e na Figura 3 estão representados esquemas destes dois tipos.

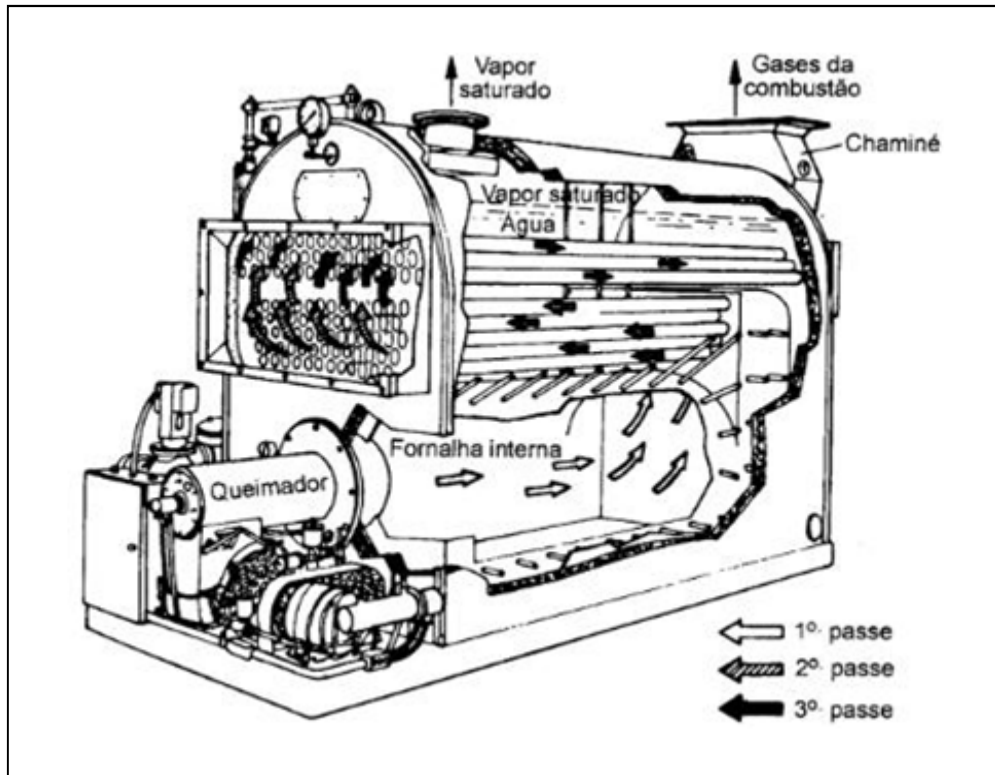


Figura 2: Caldeira flamotubular horizontal.
 Fonte: Bega (2003)

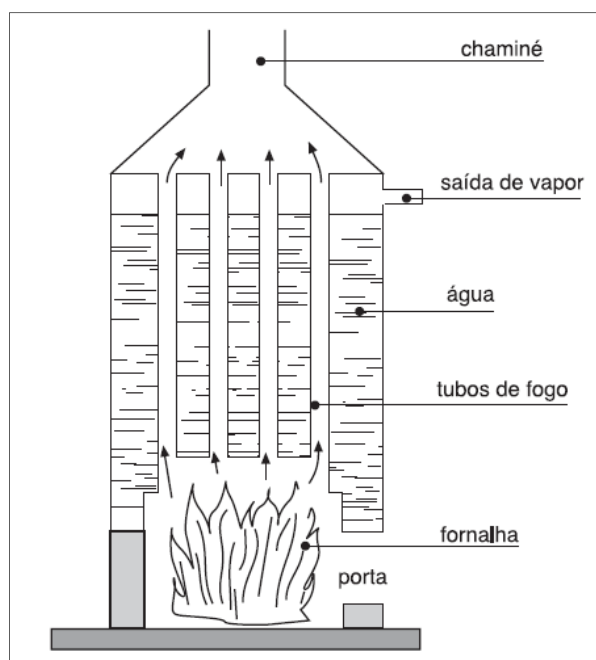


Figura 3: Caldeira flamotubular vertical.
 Fonte: Eficiência Energética no Uso de Vapor (Eletrobrás, 2005)

As caldeiras flamotubulares têm uso limitado às instalações de pequeno porte, com pressões inferiores a 15 bar (1500 kPa) ou capacidades inferiores a 15 t/h de vapor saturado. Sua aplicação é restrita às operações que admitem o uso de vapor saturado (Bazzo, 1995).

II.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES

Neste tipo de caldeira a estrutura consiste em múltiplos tubos conectados nas extremidades a dois tubulões: um tubulão inferior totalmente ocupado por água e um tubulão superior contendo uma mistura de vapor saturado e água.

A água fria é alimentada no tubulão superior e segue fluxo descendente no interior dos tubos denominados *downcomers*, até atingir o tubulão inferior. Com o calor recebido dos gases de combustão gerados na fornalha, a água é vaporizada e o vapor resultante segue o fluxo oposto ao da água, atingindo o tubulão superior através dos tubos denominados *risers*. A Figura 4 apresenta um esquema simplificado deste tipo de caldeira.

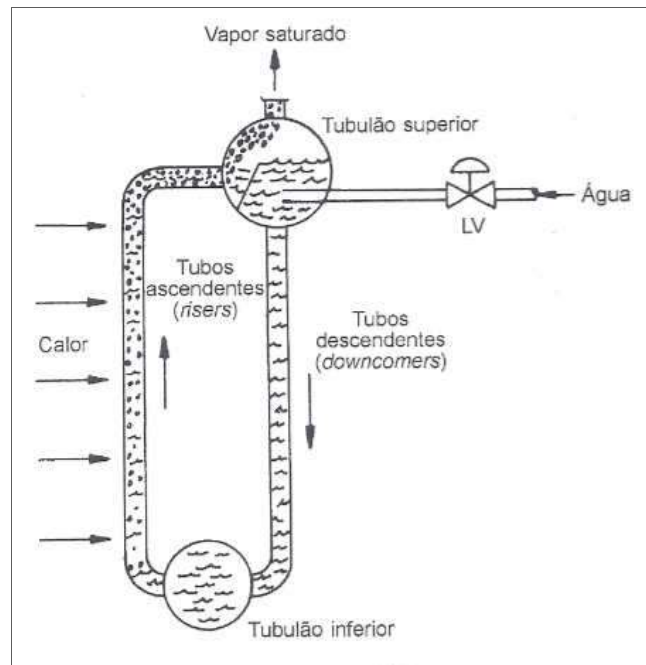


Figura 4: Esquema simplificado de uma caldeira aquatubular.
Fonte: Bega (2003)

As caldeiras aquatubulares podem atender fábricas de pequeno a grande porte e são frequentemente adaptadas com a instalação de economizador e

superaquecedores (Bazzo, 1995). Os superaquecedores são utilizados para produção de vapor superaquecido, que além de fornecer maior quantidade de energia, aumenta o rendimento das turbinas a vapor. Os economizadores, por sua vez, são unidades utilizadas para o melhor aproveitamento do calor dos gases de combustão (Bega, 2003).

II.1.3 A CALDEIRA NO CENÁRIO ENERGÉTICO BRASILEIRO

No sentido de explorar a capacidade energética de fontes renováveis, o Brasil apresenta-se à frente dos demais países no cenário mundial. De acordo com os dados do Ministério de Minas e Energia (2016), a participação de fontes renováveis configurou 41,2% da oferta interna de energia, já tendo atingido o patamar de 46,8% em 2009.

A matriz elétrica brasileira conta com uma participação ainda mais expressiva de fontes renováveis, conforme demonstrado pelo gráfico na Figura 5. Em 2015, 75,5% da oferta interna de eletricidade era oriunda destas fontes, observando-se a predominância da geração hidráulica, que representou um total de 64% da matriz elétrica (Ministério de Minas e Energia, 2016).

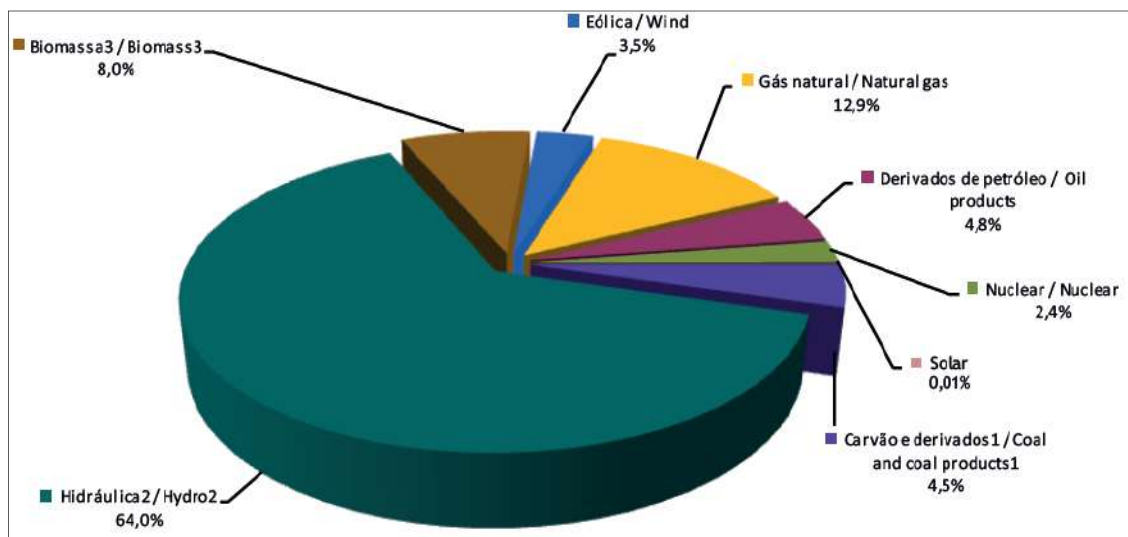


Figura 5: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.
Fonte: Ministério de Minas e Energia (2016)

Apesar de estes números colocarem o Brasil em uma posição invejável frente aos esforços internacionais na busca por fontes renováveis de energia, a

dependência do setor elétrico à disponibilidade de recursos hídricos demonstra uma fragilidade preocupante. Como ressalta Velázquez (2006), esta fragilidade ficou evidente após a crise de 2001, quando foi anunciado o plano de racionamento de energia elétrica em um momento que o país passava por um período de estiagem. A vulnerabilidade da geração de energia às condições climáticas locais, somada ao impacto socioambiental causado pela inundação de grandes áreas ao redor das usinas hidrelétricas (Vichi e Mansor, 2009), demonstra a necessidade da diversificação da matriz elétrica brasileira.

A geração de vapor nas caldeiras vem ajudando a contribuir com a redução desta dependência na oferta de eletricidade, principalmente através da queima de biomassa, recurso de grande abundância no Brasil (Coelho, 1999). O vapor produzido pela queima é alimentado a uma turbina que movimenta o eixo de um gerador, obtendo-se assim a energia elétrica.

Em 2015, as centrais térmicas responderam por 25% na expansão da capacidade instalada de geração de energia elétrica. Destes 25%, 13,2% estão relacionadas à queima de biomassa, enquanto 11,8% estão representadas pela queima de fontes não renováveis, dentre elas carvão mineral, diesel e óleo combustível (Ministério de Minas e Energia, 2016).

Na operação de caldeiras, combustíveis gasosos de bom poder calorífico são preferíveis aos combustíveis líquidos por apresentarem queima mais eficiente. Caso sejam utilizados combustíveis líquidos, o óleo diesel é uma melhor opção se comparado ao óleo combustível por garantir maior estabilidade da chama da fornalha (Eletrobrás, 2005). Dentre os combustíveis de origem fóssil, o gás natural teve maior destaque na capacidade instalada de geração elétrica das centrais térmicas em 2015, seguido do óleo diesel, que apresentou um crescimento de 23,4% de representatividade desde 2014 (Ministério de Minas e Energia, 2016).

Um assunto que vem ganhando destaque no contexto energético nacional é a cogeração de eletricidade nos setores sucroalcooleiros e em indústrias de papel e celulose. Na cogeração aplicada ao setor de papel e celulose, parte do vapor gerado na caldeira é destinada ao processo, enquanto a outra parte é alimentada a uma turbina e é utilizada para gerar energia elétrica com auxílio de um gerador. No setor sucroalcooleiro, por sua vez, a parte do vapor destinada ao processo é transformada em energia mecânica na turbina.

Nas indústrias de papel e celulose, são utilizadas como combustível nas caldeiras a lenha, óleo combustível, lixívia e resíduos de madeira (Velázquez, 2006). No segmento de álcool e açúcar, a grande disponibilidade de bagaço de cana como resíduo de processo permite alcançar resultados mais expressivos na geração de energia elétrica excedente. Segundo Coelho, em 1999, o setor já era praticamente auto-suficiente em termos energéticos. A forte presença do bagaço de cana no cenário energético é confirmada na geração elétrica em autoprodutoras, com a produção total de 34,16 TWh em 2015. Desta produção total, 13,73 TWh são geradas e consumidas *in loco* (Ministério de Minas e Energia, 2016).

A maior flexibilidade das caldeiras no que diz respeito ao tipo de combustível utilizado representa uma vantagem da utilização deste equipamento nas unidades geradoras de eletricidade.

II.2 CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DE PROCESSOS

II.2.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS

O controle de processos químicos em geral tem por objetivos a operação segura das unidades produtivas, a preservação das taxas de produção definidas de acordo com o mercado e a manutenção de parâmetros de qualidade do produto final. Para atingi-los, o sistema de controle monitora as principais variáveis de processo e provoca a alteração dessas variáveis para manter as condições de processo desejadas (Ogunnaike e Ray, 1994).

Em um sistema típico, o controle das variáveis de interesse é obtido por alterações em outras variáveis, conhecidas como variáveis manipuladas, usualmente vazões do processo que podem ser reguladas pela abertura de válvulas. O desempenho de qualquer sistema de controle, portanto, depende do estudo aprofundado e observação das relações entre todas as variáveis presentes.

O controle de uma planta pode ser realizado manual ou automaticamente. No controle manual, o próprio operador realiza a função de medidor, controlador e atuador, medindo a variável de interesse, comparando-a com o valor desejado (*setpoint*) e atuando na válvula para corrigir a variável manipulada com base na diferença entre o valor medido e o desejado (erro). No controle automático, a

variável de interesse é medida por um transmissor, que emite um sinal – referente à medição realizada – para o controlador. O controlador realiza a comparação entre o valor medido e o *setpoint* para obter o valor do erro e envia um sinal para a válvula de controle, que induz a alteração na variável manipulada (Bega, 2003). Abaixo se encontra um processo de aquecimento de um fluido sob controle manual (Figura 6) e sob controle automático (Figura 7). Nota-se na Figura 7 que o sinal analógico enviado pelo controlador passa por um conversor I/P, que o transforma em variação de pressão. Estes conversores são necessários uma vez que as válvulas disponíveis na indústria respondem a variações de pressão, e não a sinais analógicos.

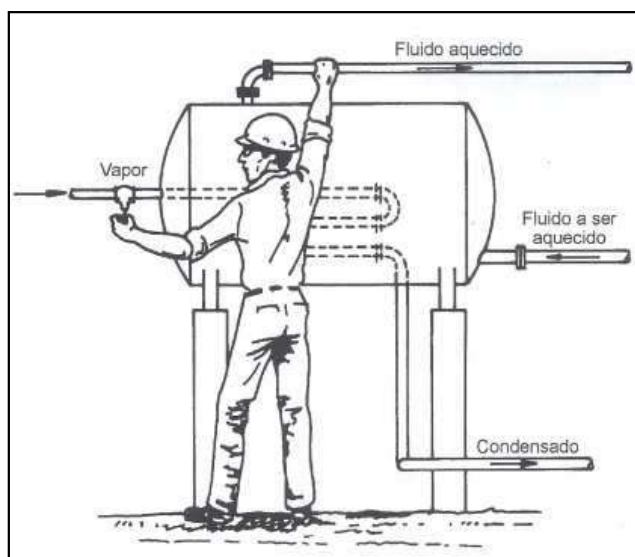


Figura 6: Exemplo de processo em controle manual.
Fonte: Bega (2003)

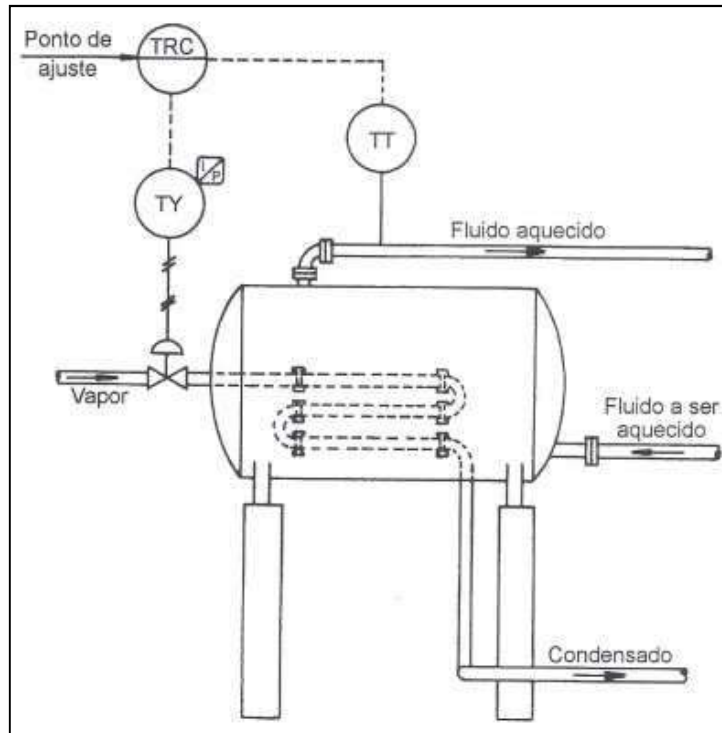


Figura 7: Exemplo de processo em controle automático.
Fonte: Bega (2003)

A Figura 7 retrata a simplificação de um diagrama P&ID. Este diagrama apresenta a descrição detalhada dos equipamentos e instrumentos utilizados em uma planta, e pode ser extremamente complexo quando se trata de produção em escala industrial. Em posse deste documento, a visualização do processo se torna muito mais viável, sendo possível avaliar possíveis riscos de segurança assim como suas causas e efeitos, ou até mesmo a consequência de uma alteração na configuração do sistema.

Uma malha de controle pode também ser representada por um diagrama de blocos, no qual estão descritos seus principais elementos e variáveis de processo. Ao contrário do diagrama P&ID, no diagrama de blocos o processo químico não é detalhado, e sim reduzido a apenas um bloco que promove a transformação das variáveis de entrada e perturbações (também denominadas “carga” do processo) em variáveis de saída. O diagrama de blocos de um processo qualquer com estratégia de controle de retroalimentação é apresentado a seguir.

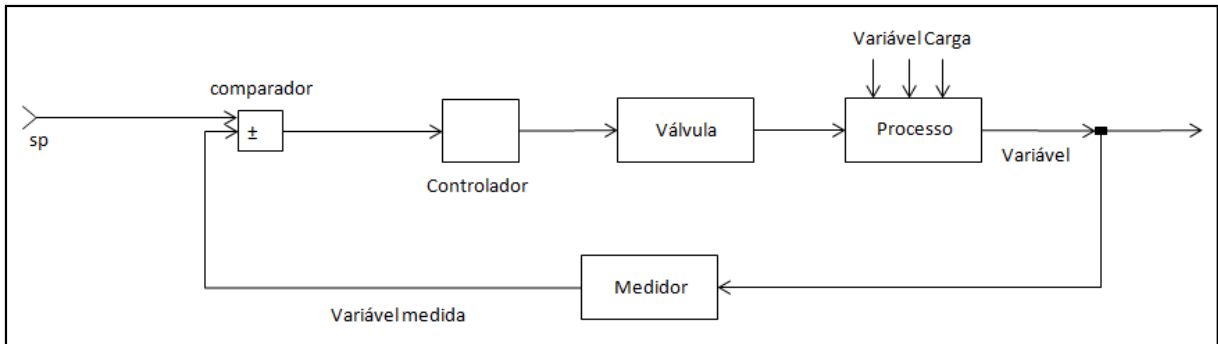


Figura 8: Diagrama de blocos para estratégia de controle feedback.
Adaptado de Valdman *et al.* (2008)

II.2.2 CONTROLE APLICADO A CALDEIRAS

As principais variáveis a serem controladas para garantir a operação adequada e segura das caldeiras (Pellegrinetti e Bentsman, 1996), assim como os motivos para tal, estão descritos a seguir.

- **Pressão de vapor na linha de saída**

O desempenho de equipamentos a vapor posteriores à caldeira no fluxograma de processos industriais (exemplo: turbinas a vapor) está diretamente relacionado ao controle eficaz da pressão de vapor na linha de saída.

- **Nível de água no tubulão**

O nível de água no tubulão não deve ser baixo a ponto de causar o superaquecimento do equipamento ou alto a ponto de levar ao transbordamento de água.

- **Mistura ar-combustível na câmara de combustão**

O ajuste incorreto da relação ar-combustível configura condição insegura da operação, uma vez que a combustão incompleta do combustível pode ocasionar explosões. Para garantir a segurança da planta, deve ser mantido o excesso de ar na câmara de combustão.

No Brasil, a instrumentação a ser utilizada e os requisitos mínimos a serem seguidos por todas as empresas privadas e públicas que possuem caldeiras em suas acomodações, a fim de garantir a segurança dos trabalhadores e integridade física do equipamento durante sua operação, instalação, inspeção e manutenção, são apresentados detalhadamente na Norma Regulamentadora – NR 13, emitida

pelo Ministério do Trabalho. De acordo com a norma as caldeiras devem apresentar, no mínimo:

- Válvula de segurança com ajuste de pressão menor ou igual à pressão máxima de trabalho admissível (PMTA);
- Instrumento que indique a pressão do vapor acumulado;
- Controle automático de nível de água com intertravamento no caso de nível reduzido, para evitar superaquecimento;
- Sistema secundário de alimentação de água independente do principal, para evitar superaquecimento decorrente de alimentação insuficiente de água, em caldeiras de combustível sólido não atomizado ou com queima em suspensão;
- Para caldeiras de recuperação de álcalis, sistema dedicado de drenagem rápida de água, com ação automática após acionamento pelo operador.

II.3 CAMADAS DE PROTEÇÃO EM CALDEIRAS

Todos os processos químicos envolvem riscos à saúde dos operadores e à integridade de seus equipamentos. Durante a operação de caldeiras, os principais cenários de risco são a perda de ar para combustão, a redução da quantidade de água no tubulão e a falta de controle de combustível alimentado à caldeira. Em alguns casos mais graves, se estas condições não forem controladas apropriadamente, elas podem acarretar na sua explosão (Morrison *et al.*, 2012).

Devido aos perigos associados aos sistemas industriais, a segurança dos operadores deve ser garantida por meio de diversos recursos – o que inclui tanto o projeto adequado da planta quanto a instalação de dispositivos específicos, como alarmes e sistemas de alívio. Estudos periódicos também devem ser realizados com o objetivo de avaliar todos os riscos relacionados à operação e reduzir suas probabilidades de ocorrência. Um exemplo bastante difundido deste tipo de estudo é o HAZOP.

Os diferentes recursos de segurança relacionados a um processo podem ser visualizados como camadas de proteção, conforme apresentado na Figura 9. Neste conceito, é essencial que todas as camadas sejam independentes entre si e garantam por si só a mitigação dos riscos associados à operação. Quando há a

ocorrência de um evento adverso, caso a primeira camada de proteção não seja suficiente para prevenir consequências indesejáveis e retornar o processo à sua normalidade, a segunda camada deverá fazê-lo, e assim sucessivamente (Summers, 2003). Morrison *et al.* (2012) aplicam este conceito à operação de caldeiras. Os alarmes e a consequente resposta do operador são definidos como terceira camada de proteção na visão dos autores, antecedida do controle de combustão e projeto do queimador. O acionamento dos sistemas de intertravamento de segurança, que promovem a interrupção imediata da operação através da parada dos equipamentos associados, está incluído na camada de proteção subsequente aos alarmes. Todas as caldeiras devem contar com sistemas de intertravamento de segurança, devido ao risco de explosão.

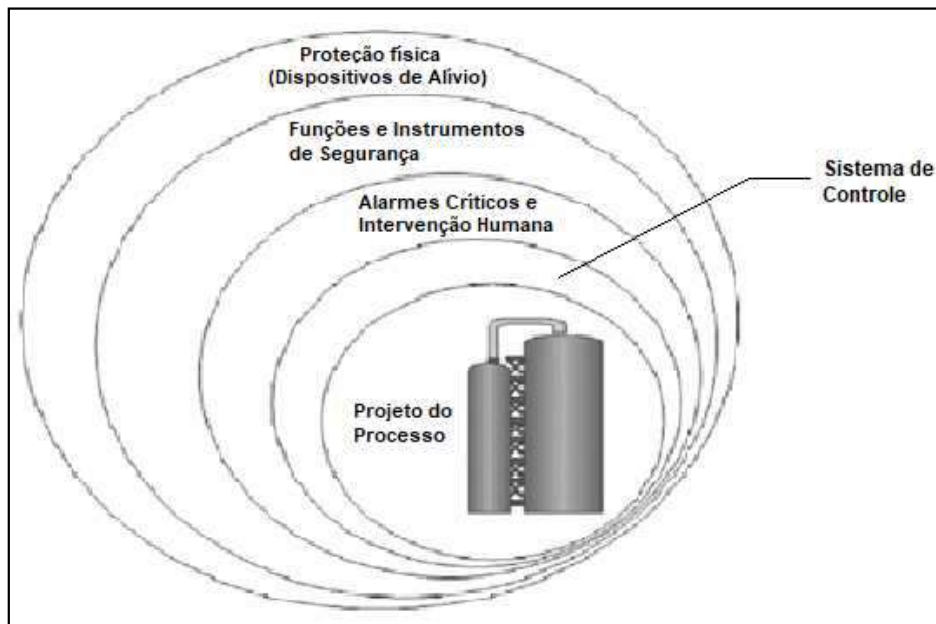


Figura 9: O conceito de camadas de proteção.
Adaptado de Morrison *et al.* (2012)

II.3.1 ALARMES

Segundo definição da norma ISA 18.2 (2016), um alarme é uma “forma audível e/ou visível de indicar ao operador um defeito em um equipamento, um desvio no processo ou uma condição anormal que requer pronta resposta”.

É importante que a diferença entre alarmes e eventos esteja bem clara no momento da criação de novos alarmes ou durante a avaliação periódica do sistema. A configuração de alarmes desnecessários que podem distrair o operador e dificultar

a identificação da causa raiz de um distúrbio do processo é uma das principais causas de sistemas de alarmes falhos. Hollifield e Habibi (2007) definem três princípios básicos que devem ser seguidos à risca para a decisão do que é ou não é um alarme: alarmes devem demandar ação do operador, ser ativados apenas em condições anormais de operação e um sistema não deve conter vários alarmes redundantes. Caso um desses três parâmetros não seja seguido, o alarme em questão não deve ser configurado, ou deve ser excluído do sistema.

A seguir encontram-se alguns dos principais tipos de alarmes definidos pela norma EEMUA 191 (1999):

- **Alarmes absolutos**

Os alarmes absolutos seguem uma lógica que compara o valor atual da variável de processo com limites pré-determinados, denominados *setpoints*. Os *setpoints* delimitam a faixa de valores aceitáveis para aquela variável durante a operação. Caso esses limites sejam ultrapassados, o alarme é acionado.

O acionamento desses alarmes pode ser do tipo LOLO, LO, HI e HHHI, dependendo do tipo de variação observada. Os acionamentos LOLO e LO indicam valores abaixo dos limites inferiores estabelecidos, enquanto os acionamentos HI e HHHI indicam valores acima dos limites superiores.

- **Alarmes de taxa de variação**

Seguem a mesma lógica dos alarmes absolutos, porém o que está sendo comparado a um valor pré-determinado não é a variável em si, mas sim a sua taxa de variação no tempo.

- **Alarmes de desvio**

Para este tipo de alarme, é estabelecido um limite máximo para o valor da diferença entre dois sinais analógicos distintos, e ele é acionado caso esta variação ultrapasse o limite.

- **Alarmes de discrepância**

Comparam o estado atual da planta com seu estado esperado.

- **Alarmes calculados**

Alarmes gerados pela combinação lógica de vários sinais.

- **Alarmes do sistema de controle e instrumentação**

Este tipo de alarme é acionado na ocorrência de falha nos *hardwares* ou *softwares* do sistema de controle.

II.4 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

Interface homem-máquina (IHM) é o espaço – normalmente a tela de um computador – onde todas as informações relevantes da planta são apresentadas visualmente ao operador, incluindo os alarmes. A IHM deve garantir que todas essas informações sejam disponibilizadas de forma clara, concisa e completa, de forma a facilitar o reconhecimento da ação corretiva pertinente a cada condição anormal. Seu conceito está inserido no escopo dos sistemas de alarmes segundo a ISA 18.2 (2016).

O projeto da IHM é uma das etapas mais importantes do processo de gerenciamento de alarmes, contribuindo diretamente para a interação adequada entre o operador e o sistema de alarmes. Neste projeto são definidos o método de apresentação dos alarmes, o mecanismo utilizado para apresentar os alarmes ao operador, as indicações dos estados dos alarmes, os diferentes formatos de exibição dos alarmes e as funções que estarão disponíveis ao operador (ISA 18.2, 2016).

Um alarme deve ter formas distintas de indicação que variam de acordo com seu estado e sua prioridade. As diferentes combinações de recursos visuais e auditivos na apresentação do alarme permitem a identificação destas características pelo operador.

Os estados que um alarme pode assumir são:

- Normal: indica que nenhuma condição anormal foi detectada para a variável monitorada;
- Não reconhecido: indica que o alarme não foi reconhecido pelo operador através da função de reconhecimento *acknowledge*;
- Reconhecido: indica que o alarme foi reconhecido pelo operador através da função de reconhecimento *acknowledge*;
- Retorno-ao-normal: indica que a variável monitorada retornou à sua condição normal de processo;

- Arquivado: indica que a função de arquivamento da IHM foi utilizada para o alarme;
- Suprimido: indica que a função de supressão da IHM foi utilizada para o alarme;
- Fora de serviço: indica que o instrumento relacionado ao alarme está fora de serviço.

A Tabela 1 contém um resumo das formas de indicação recomendadas pela ISA 18.2 (2016) para cada estado:

Tabela 1: Recomendações para indicações dos alarmes de acordo com seus estados

Estado do Alarme	Indicação audível	Indicações visuais		
		Cor	Símbolo	Piscar
Normal	Não	Não	Não	Não
Não reconhecido	Sim	Sim	Sim	Sim
Reconhecido	Não	Sim	Sim	Não
Retorno-ao-normal não reconhecido	Não	Combinação		Opcional
Arquivado	Não	Opcional		N/A
Suprimido	Não	Opcional		N/A
Fora de serviço	Não	Opcional		N/A

Fonte: Adaptado de ISA 18.2 (2016)

A indicação visual do alarme em seu estado “retorno-ao-normal não reconhecido” pode ser a mesma do alarme em seu estado normal ou pode utilizar um elemento piscante para indicar uma condição não reconhecida (ISA 18.2, 2016).

Para garantir a facilidade de distinção das prioridades dos alarmes pelo operador, cada prioridade deve ser indicada de forma única por meio da combinação de indicações visuais e auditivas. Recomenda-se a definição de cores e sons diferentes para cada prioridade. Tanto as cores quanto os sons designados devem ser utilizados única e exclusivamente para indicação das prioridades, ou seja, nenhum outro elemento gráfico ou indicação do sistema de controle deve possuir qualquer uma das cores ou sons definidos (ISA 18.2, 2016; Hollifield e Habibi, 2007).

A Figura 10 contém um exemplo de diferentes formas de indicar os alarmes de acordo com seu estado e prioridade, utilizando cores e símbolos. Neste

esquema, o triângulo azul claro é utilizado para indicar alarmes de prioridade baixa, o círculo alaranjado indica alarmes de prioridade alta e o quadrado vermelho indica alarmes de prioridade emergência. O quadrado de cor vermelho fraco indica que o alarme de prioridade emergência foi reconhecido através da função *acknowledge*.

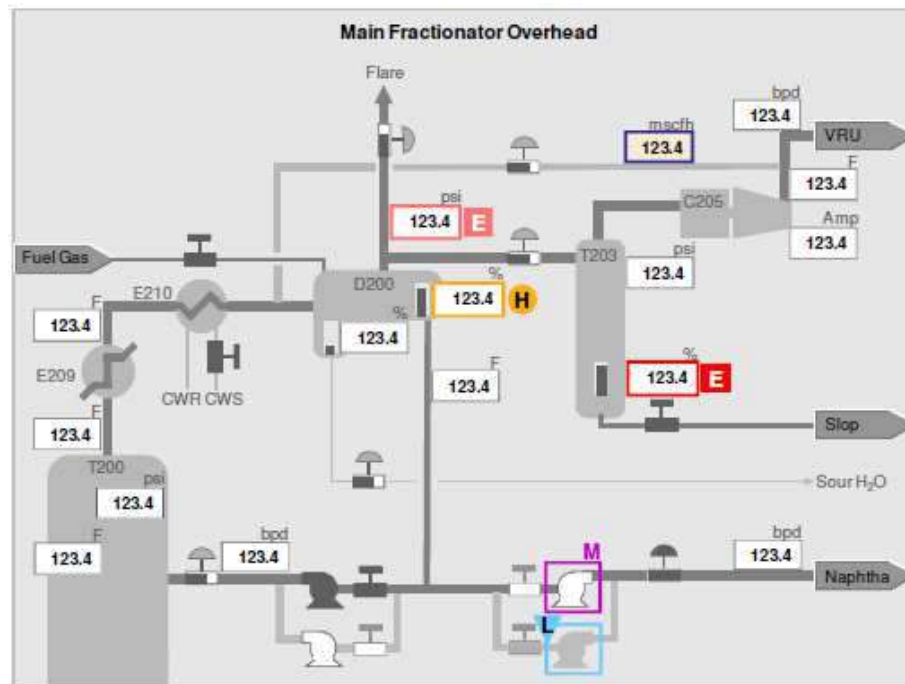


Figura 10: Esquema representativo das indicações de estado e prioridade dos alarmes.
Fonte: ASM Webinar Communications Program, 2009.

II.5 GERENCIAMENTO DE ALARMES

A preocupação com o gerenciamento de alarmes em indústrias é relativamente recente. Rothenberg (2009) cita o ano de 1988 como data do primeiro reconhecimento da existência de problemas nos sistemas de alarmes, quando algumas – ou a maioria – das dificuldades operacionais foram atribuídas a deficiências nestes sistemas.

Alguns incidentes de grandes proporções causados (dentre outros aspectos) pela gestão inadequada de alarmes tiveram repercussão mundial e chamaram a atenção para a importância deste assunto. Dentre eles, a explosão ocorrida na refinaria de Milford Haven da Texaco causou a perda de dois meses de produção da fábrica e um custo de 48 milhões de libras pelo reparo dos danos, além de mais de 200 mil libras em multas aos donos. A causa principal da explosão foi o aumento

significativo do nível de hidrocarboneto líquido inflamável em um tanque de processo, configurando uma situação de alto risco que não foi detectada a tempo pelos operadores. A falha na identificação do problema ocorreu devido à quantidade excessiva de alarmes gerada após um raio atingir a refinaria, cinco horas antes da explosão. Foi estimado que um novo alarme era acionado a cada 2 ou 3 segundos. Falhas no sistema de controle também contribuíram para a ocorrência do incidente (Bransby e Jenkinson, 1998; Health & Safety Executive, 1997). Outros incidentes que foram atribuídos pelo menos em parte a falhas no gerenciamento de alarmes também foram reportados, como é o caso do acidente na usina nuclear de Three Mile Island, nos Estados Unidos, em 1978 (Bransby e Jenkinson, 1998).

Rothenberg (2009) descreve, de forma objetiva, a definição de gerenciamento de alarmes como a determinação de:

- Todas as condições operacionais da planta que devem ser alarmadas
- A configuração paramétrica para ativação de cada alarme
- A classificação de cada situação alarmada considerando sua importância
- A compilação das informações e como apresentá-las de forma a garantir que haja o melhor entendimento de como gerir as situações de risco com êxito.

Basicamente, o gerenciamento de alarmes tem como objetivo garantir que o sistema cumpra suas funções principais, detectando e alertando ao operador sobre condições anormais que exigem sua ação, sem induzi-lo ao erro ou sobrecarregá-lo (Rothenberg, 2009).

Conforme ressalta Rothenberg (2009):

Aperfeiçoar o sistema de alarmes em plantas industriais é uma tarefa que requer planejamento cuidadoso, comprometimento, recursos suficientes, total cooperação do pessoal envolvido, habilidade de modificar componentes de uma infraestrutura fraca e o entendimento de que as mudanças propostas levarão a um novo “estilo de vida”.

Apesar dos esforços necessários, na prática, benefícios relevantes foram observados após a implementação dessas melhorias. No que diz respeito à redução de despesas, os resultados gerais demonstram uma redução de 5% a 15% de custos não planejados com manutenção após 6 meses de operação estável com as

mudanças estabelecidas, além de uma redução de 20% a 30% em despesas com seguro (Rothenberg, 2009).

II.5.1 O PROBLEMA DOS ALARMES: ADVENTO DE SISTEMAS DCS

Segundo Hollifield e Habibi (2007), o advento de sistemas computadorizados nas salas de controle contribuiu significativamente para o surgimento das deficiências observadas atualmente nos sistemas de alarmes industriais.

Anteriormente, as salas de controle contavam com painéis contendo indicadores individuais relacionados a cada processo. O sistema de alarmes era representado por pequenas janelas retangulares atribuídas a diferentes variáveis do processo. O acionamento de um alarme era observado pelo acender e apagar repetitivo de luzes nestas janelas, além de um sinal sonoro emitido por uma buzina. Este painel também contava com um botão de reconhecimento, ou *acknowledge*, que permitia ao operador retornar o alarme a seu estado normal (Hollifield e Habibi, 2007). Um painel de controle típico está representado na Figura 11.



Figura 11: Parede de controle.
Fonte: Hollifield e Habibi (2007)

A introdução de sistemas DCS (*distributed control system*), o que inclui sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), facilitou tarefas que antes exigiam avaliações prévias mais aprofundadas, como era o caso da inclusão

de um novo alarme: nos painéis de controle, esta inclusão era dificultada tanto pelo custo quanto pela disponibilidade de espaço, devendo ser, portanto, justificada apropriadamente. Atualmente, novos alarmes podem ser criados com apenas alguns cliques (Hollifield e Habibi, 2007).

A praticidade alcançada com o avanço da tecnologia nas salas de controle teve como consequência o aumento exacerbado da quantidade de alarmes configurados por operador ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 12. A ausência de normas consistentes para a criação e configuração de alarmes também contribuiu para este cenário (Hollifield e Habibi, 2007).

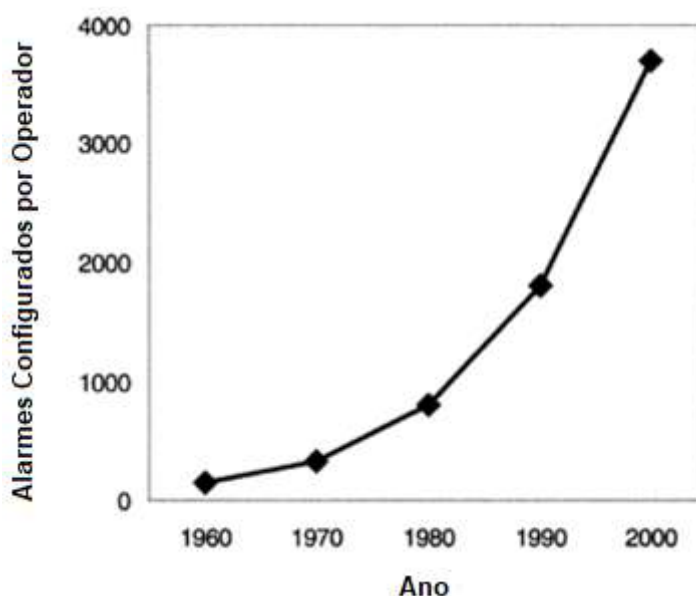


Figura 12: Crescimento exponencial do número de alarmes configurados por operador.
Fonte: Hollifield e Habibi (2007)

Como consequência, a habilidade dos operadores em lidar com situações de risco foi prejudicada, uma vez que eles são sobrecarregados com alarmes quando um problema acontece na planta, inutilizando o propósito de todo o sistema (Hollifield e Habibi, 2007). Esta situação foi potencializada com a complexidade crescente de processos industriais e de seus controles, o que contribuiu também para a redução do número de operadores.

Atualmente, estes sistemas computadorizados são largamente utilizados por diversos ramos da indústria, como as refinarias, indústrias químicas, petroquímicas e de geração de energia (Hollifield e Habibi, 2007). Devido a sua ampla aplicação,

alguns estudos voltados para a resolução das limitações destes sistemas no que diz respeito ao gerenciamento de alarmes foram desenvolvidos.

Brown e O'Donnell tratam, em seu trabalho, dos principais aspectos que dificultam a implementação de um sistema de alarmes eficiente nestes sistemas. Alguns destes aspectos inerentes a sistemas DCS se encontram listados abaixo:

- A estrutura do sistema de alarmes é estática;
- Priorização discreta de alarmes, contando com poucas opções de prioridades;
- A função “*acknowledge*”, que trata do reconhecimento manual dos novos alarmes pelo operador, não apresenta utilidade durante inundações de alarmes;
- Redundância de alarmes no processo;
- Falhas de manutenção causam o acionamento de múltiplos alarmes;
- Alarmes configurados para indicar problemas nos sinais dos sensores são acionados frequentemente.

II.5.2 CICLO DE VIDA DOS ALARMES

O ciclo de vida dos alarmes é um guia detalhado que compreende todas as etapas a serem seguidas para garantir o desempenho eficiente do sistema de alarmes, abrangendo desde a concepção inicial até a manutenção do sistema já em operação. Este modelo é aplicável tanto ao gerenciamento de sistemas de alarmes já existentes quanto à implementação de sistemas totalmente novos (ISA 18.2, 2016).

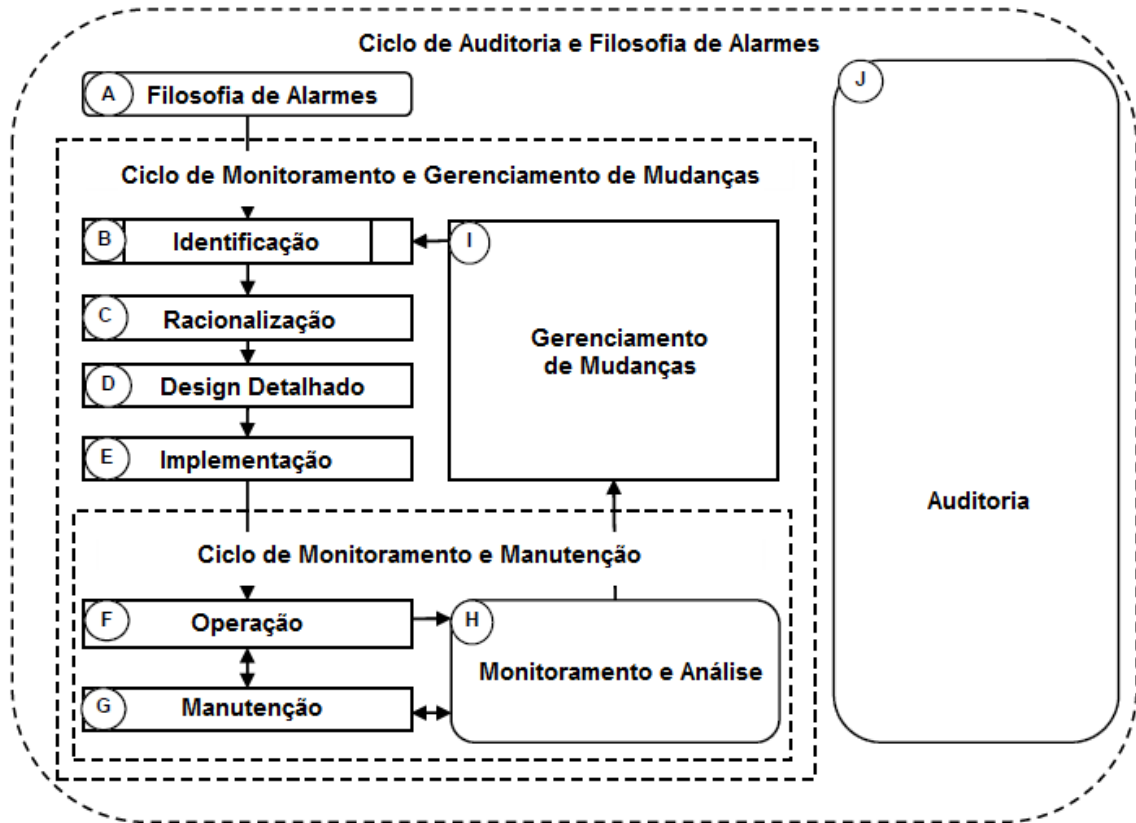


Figura 13: O ciclo de vida dos alarmes.
 Fonte: ANSI/ISA 18.2 (2016)

As etapas do modelo, assim como sua descrição, estão descritas a seguir.

- **Filosofia de Alarmes**

O desenvolvimento de uma filosofia de alarmes é o primeiro passo para garantir que o sistema de alarmes opere e seja gerenciado de forma eficiente. Neste documento devem ser definidas todas as formas utilizadas pela empresa de garantir que os objetivos do sistema de alarmes, que também são definidos no mesmo documento, estejam sendo cumpridos adequadamente. A partir deste documento espera-se que haja informação suficiente que permita manter o desempenho do sistema e deve estar claro quais processos são utilizados em cada passo do ciclo de vida dos alarmes. A classificação dos alarmes, os métodos de priorização utilizados, a forma como os alarmes são apresentados ao operador na interface homem-máquina considerando suas prioridades e as métricas utilizadas para avaliação de performance do sistema de alarmes são exemplos de definições que devem ser cobertas pelo documento.

- **Identificação**

A identificação de alarmes compreende a fase de avaliação, decisão e compilação da lista dos alarmes potenciais a serem incluídos ou modificados no processo. O reconhecimento da necessidade de inclusão ou modificação de um alarme pode ser consequência de métodos formais, como estudos HAZOP, ou de processos rotineiros, como testes operacionais e modificações no processo.

- **Racionalização**

Os potenciais alarmes oriundos da fase de identificação devem passar pela racionalização para que seja avaliada sua real necessidade de acordo com o que é ditado pela filosofia de alarmes. Depois de confirmada sua utilidade baseando-se nos objetivos propostos para o sistema, o alarme é documentado. Este é o momento de definir a prioridade do alarme levando em conta suas consequências e tempo disponível de resposta para o operador, assim como sua classificação, conforme descrito na filosofia. Também são definidos seu *setpoint* e ações que devem ser tomadas pelo operador caso o alarme seja acionado.

- **Design Detalhado**

Nesta etapa são determinados todos os parâmetros da configuração do alarme, o que inclui seu projeto básico, que vai depender do tipo do alarme e o sistema de controle no qual ele está inserido, a apresentação do alarme na IHM e recursos avançados como *deadband*, *on-delay* e *off-delay*.

- **Implementação**

Após concluídas todas as etapas anteriores, os novos alarmes ou sistemas de alarmes podem ser implementados e testados. Durante esta fase é importante que os operadores sejam treinados.

- **Operação**

Nesta fase o sistema de alarmes está em uso, cumprindo sua função.

- **Manutenção**

O sistema de alarme já em funcionamento deve passar por manutenções periódicas a fim de garantir sua efetividade.

- **Monitoramento e Análise**

A avaliação do desempenho do sistema de alarmes através das métricas (descritas na seção II.5.4) indicadas na filosofia de alarmes deve ser feita constantemente para que possíveis falhas sejam identificadas e mudanças necessárias sejam realizadas.

- **Gerenciamento de Mudanças**

A realização de qualquer alteração no sistema de alarmes deve ser formalizada e documentada adequadamente, e as mudanças devem ser aprovadas antes da implementação.

- **Auditoria**

O estágio de auditoria consiste na revisão periódica do desempenho do gerenciamento de alarmes. As auditorias permitem que a integridade do sistema de alarmes seja mantida e pode resultar na identificação de falhas que por algum motivo não tenham sido detectadas na fase de monitoramento, além de auxiliar também na verificação de oportunidades de melhoria.

II.5.3 TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO DE ALARMES

Para que se cumpram os objetivos principais dos sistemas de alarmes, os limites estabelecidos na sua configuração devem estar alinhados com variações previstas durante a operação normal da planta. O simples ajuste destes limites em sistemas de alarmes existentes levando em conta estas variações demonstrou-se uma prática extremamente benéfica em muitas plantas. Outra prática interessante inclui a configuração de limites ajustáveis de acordo com condições operacionais (Bransby e Jenkinson, 1998).

Bransby e Jenkinson (1998) realizaram uma pesquisa financiada pelo *Health and Safety Executive* para reunir e apresentar boas práticas no gerenciamento de alarmes em indústrias químicas e indústrias de geração de energia. Algumas técnicas mencionadas em seu trabalho, utilizadas para lidar com alarmes repetitivos e transitórios, estão descritas a seguir:

- Utilização de filtros passa-baixa para reduzir ruídos no sinal do processo;
- Supressão de alarmes durante transições entre estados estacionários;
- Definição de banda morta, ou *deadband*;
- Aplicação de tempo de atraso para eliminar pares ativo/inativo de alarmes ruidosos;
- Utilização de um contador para detectar alarmes repetitivos;
- Arquivamento (também conhecido como inibição ou desativação) de alarmes que estejam causando perturbações ao operador. O arquivamento automático de alarmes repetitivos é conhecido como auto-arquivamento;
- Anúnciação de linha única, utilizada para evitar o aparecimento constante de alarmes repetitivos em uma mesma página da lista de alarmes exposta ao operador.

A redefinição de alarmes pode ser utilizada para eliminar alarmes desnecessários gerados equivocadamente durante a configuração inicial do sistema. A distinção entre eventos e alarmes verdadeiros seguida da posterior eliminação de eventos do display é descrita como uma boa prática por Bransby e Jenkinson (1998).

Apresentar os alarmes da melhor forma para o operador também é extremamente importante. A priorização é o método mais utilizado e também o mais recomendado para garantir que os alarmes mais relevantes sejam evidenciados (por exemplo, por cores diferentes). A classificação de alarmes por área ou sistema é um método de organização que pode auxiliar o operador a identificar as áreas que se encontram em situação de risco em uma planta. O agrupamento de alarmes, por sua vez, pode ser útil em casos onde diversos alarmes são acionados por um motivo comum, ou quando determinado grupo exige a mesma resposta do operador. As mensagens exibidas aos operadores quando um alarme é acionado devem ser as mais claras possíveis para garantir seu entendimento.

A fim de facilitar a detecção e diagnóstico automáticos de falhas em um sistema de tratamento de água oleosa em plataforma *offshore*, Figueredo *et al.* (2016) utilizam a simulação de alarmes em MATLAB®/SIMULINK® para obter a relação entre os disparos dos alarmes e as falhas e/ou perturbações às quais o processo foi submetido. Cada cenário de risco simulado resultou no disparo de combinações específicas de alarmes. A partir destas combinações, foram desenvolvidas redes neurais artificiais que permitem o diagnóstico do cenário de risco baseando-se nas ativações dos alarmes.

II.5.3.1 DEADBAND

Um dos principais recursos disponíveis nos sistemas de alarmes atuais no que diz respeito a técnicas de gerenciamento de alarmes é a banda morta (*deadband*). A definição correta deste atributo contribui fortemente para o bom funcionamento do sistema e reduz a incidência de alarmes ruidosos.

A banda morta é, em sua definição, um intervalo entre o *setpoint* e o valor que retorna o alarme a seu estado inativo. Desta forma, o acionamento de um alarme do tipo HI ocorrerá caso a variável monitorada ultrapasse o valor do seu *setpoint*, porém ele apenas será desativado quando sua medição for inferior ao valor correspondente à diferença entre o *setpoint* e a banda morta.

Este recurso é extremamente útil em casos onde a variável flutua próxima ao valor do *setpoint*, pois ele funciona como um filtro para estas variações. É importante ressaltar que, para que este resultado seja alcançado, o valor definido para a banda morta deve ser maior do que as flutuações esperadas para o processo (Bransby e Jenkinson, 1998).

Na Tabela 2 estão apresentados alguns valores de banda morta recomendados pela EEMUA 191 (1999). Estes valores estão definidos como porcentagens do *setpoint* do alarme.

Tabela 2: Valores padrão de banda morta para diferentes tipos de sinal

Tipo de Sinal	Banda Morta
Vazão	5%
Nível	5%
Pressão	2%
Temperatura	1%

Fonte: EEMUA 191 (1999)

II.5.3.2 *ON-DELAY E OFF-DELAY*

Os recursos de *on-delay* e *off-delay* são largamente utilizados para eliminar alarmes ruidosos. O *on-delay* garante que apenas condições anormais que permaneçam por um período de tempo determinado sejam alertadas ao operador. Neste caso, o alarme não é acionado imediatamente. O *off-delay*, por sua vez, consiste no período de tempo durante o qual o estado ativo do alarme deve ser mantido após o retorno da condição de processo à normalidade. Este recurso é eficaz para reduzir a geração de alarmes ruidosos repetitivos e transitórios.

A EEMUA 191 (1999) propõe diferentes tempos de atraso para os alarmes dependendo da variável monitorada, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3: Valores padrão de tempo de atraso para diferentes tipos de sinal.

Tipo de Sinal	<i>Delay</i>
Vazão	15 segundos
Nível	60 segundos
Pressão	15 segundos
Temperatura	60 segundos
Outros	5 segundos

Fonte: EEMUA 191 (1999)

A utilização de *on-delay* pode ser uma boa estratégia para evitar o acionamento de alarmes desnecessários durante o início e o encerramento da atividade de um equipamento.

Um estudo de caso realizado por Wang e Chen (2014) em um aquecedor de baixa pressão demonstraram os benefícios da configuração de *on-delay*. Neste

estudo, as oscilações do nível de água do aquecedor geravam uma elevada quantidade de alarmes ruidosos. A adição de tempos de atraso baseados nos intervalos entre os disparos reduziria de 244 para 28 a quantidade de alarmes gerados em um período de 24 horas.

II.5.3.3 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO

A supervisão de um processo químico envolve o monitoramento de uma gama extensa de variáveis de processo. Devido às interações do próprio sistema, é comum observar relações diretas entre as variáveis, ou seja, um mesmo evento pode causar efeitos similares em determinado grupo de variáveis, formando um padrão de comportamento. Tomando um reator como exemplo, uma mudança na composição da vazão alimentada ao reator influencia na conversão da reação, que por sua vez provoca a alteração na composição do produto, na vazão do produto e/ou na temperatura do reator (Dalapatu *et al.*, 2013).

Conseqüentemente, os alarmes configurados para variáveis altamente correlacionadas também apresentarão alto grau de correlação, o que implicaria no disparo de múltiplos alarmes na ocorrência de uma falha de processo (Dalapatu *et al.*, 2013).

A finalidade principal dos diferentes métodos de análise de correlação das variáveis de processo é reduzir a dimensão do banco de dados monitorado. A partir da identificação de grupos de variáveis correlacionadas, o monitoramento destes grupos se torna muito mais prático do que o monitoramento individual dos dados (Ge *et al.*, 2013).

Por este motivo, a análise da correlação entre as variáveis de um processo é muito utilizada como ferramenta de gerenciamento de alarmes. Na literatura, Dalapatu *et al.* (2013) utilizam a análise de correlação para descartar variáveis redundantes em uma técnica de agrupamento de variáveis baseada em eventos anormais em um reator de agitação contínua. Eles mencionam ainda demais técnicas de agrupamento, dentre elas o agrupamento de variáveis baseado exclusivamente na sua correlação. Higuchi *et al.* (2009) aplicam um método de prospecção de dados para identificar a correlação entre os alarmes e dividir ocorrências individuais em grupos, reduzindo a quantidade total de alarmes em uma

planta de produção de etileno. Soares *et al.* (2016) investigam a aplicação de três técnicas distintas de análise de correlação como mecanismo de redução da quantidade de alarmes configurados em diferentes sistemas presentes em plantas de processamento de gás natural.

II.5.4 DESEMPENHO DO SISTEMA DE ALARMES

A avaliação periódica do desempenho do sistema de alarmes já em funcionamento é uma parte essencial do seu ciclo de vida. Esta avaliação usualmente é feita a partir do cálculo de alguns indicadores que devem estar alinhados com a filosofia dos alarmes. Estes indicadores são calculados a partir dos históricos de alarmes e comparados com valores ideais de desempenho determinados pela planta.

Um resumo dos KPIs (*Key Performance Indicators*) recomendados pela norma ISA 18.2 (2016) para traduzir o desempenho do sistema de alarmes em números estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resumo de KPI's de sistemas de alarmes.

(continua)

Métricas de performance de alarmes baseadas em 30 dias de dados		
Métrica	Valor meta	
Alarmes anunciados por período de tempo	Valor meta: muito provável de ser aceitável	Valor meta: máximo possível de ser gerenciado
Alarmes anunciados por hora por operador	~6 (média)	~12 (média)
Alarmes anunciados a cada 10 minutos por operador	~1 (média)	~2 (média)
Métrica	Valor meta	
Porcentagem de períodos de 10 minutos contendo mais de 10 alarmes	~<1%	
Número máximo de alarmes em um período de 10 minutos	≤10	
Porcentagem de tempo ocupada por inundações de alarme	~<1%	

Tabela 4: Resumo de KPI's de sistemas de alarmes.

(continuação)

Métricas de performance de alarmes baseadas em 30 dias de dados	
Métrica	Valor meta
Porcentagem de contribuição dos 10 alarmes mais frequentes na carga total de alarmes	~<1% a 5% no máximo, com planos de ação para endereçar deficiências
Quantidade de alarmes ruidosos <i>chattering</i> e <i>fleeting</i>	Zero, planos de ação para corrigir qualquer ocorrência
Quantidade de alarmes ruidosos <i>stale</i>	Menos de 5 presentes em qualquer dia, com planos de ação para endereçá-los
Distribuição de prioridades anunciadas	3 prioridades: ~80% baixa, ~15% média, ~5% alta ou 4 prioridades: ~80% baixa, ~15% média, ~5% alta, ~<1% mais alta Outras prioridades com propósitos especiais são excluídas do cálculo

Fonte: ISA 18.2 (2016)

Como indicado na norma, estas métricas apenas se mostram significativas se calculadas a partir de, no mínimo, 30 dias de histórico de alarmes. A quantidade de alarmes ruidosos, porém, pode ser avaliada tomando-se um espaço amostral reduzido.

Alguns fatores comuns a sistemas de alarmes mal implementados devem ser o ponto focal do trabalho de gerenciamento de alarmes. A observação desses fatores indica a deficiência do sistema e a necessidade de uma avaliação minuciosa dos alarmes configurados, seguida da sua redefinição. Esta avaliação pode até mesmo ter como resultado a exclusão de alguns alarmes do sistema, caso chegue-se à conclusão de que os mesmos seriam, na verdade, eventos, e não alarmes. Esta diferenciação é mencionada como boa prática por Bransby e Jenkinson (1998).

II.5.4.1 INUNDAÇÃO DE ALARMES

A inundação de alarmes, ou avalanche de alarmes, é o fenômeno de acionamento de múltiplos alarmes ultrapassando o limite máximo por operador que permite seu diagnóstico e ação em tempo hábil. A norma ISA 18.2 (2016) define que um operador consegue gerenciar, no máximo, dez alarmes gerados em dez minutos,

e taxas de acionamento superiores a essa são configuradas como inundação de alarmes.

Quando um sistema de alarmes é mal configurado, até mesmo desvios esperados nas variáveis do processo podem ocasionar a sobrecarga do operador. A escolha do *setpoint*, assim como a utilização de recursos como *delay* e *deadband*, devem refletir essas variações.

Uma das principais causas da inundação de alarmes em indústrias químicas está relacionada às diferentes transições entre estados estacionários característicos do próprio processo. Estas transições englobam também os diferentes modos operacionais da planta, como o início e o encerramento das atividades de um equipamento.

Transições em processos também podem ocorrer por conta de alterações na matéria-prima ou em taxas de produção/processamento, além de operações de manutenção, como a regeneração de absorvedores (Viswanathan e Srinivasan, 2000).

Brown e O'Donnell (1997) propuseram uma lógica de supressão de alarmes na refinaria Grangemouth, da BP, visando reduzir a quantidade dos alarmes irrelevantes acionados durante o encerramento da operação no reator de reforma catalítica. Neste trabalho, a lógica de supressão foi baseada nos diferentes modos operacionais do reator, representados por “casos”. Deste modo, os alarmes desnecessários para cada modo operacional eram desativados automaticamente.

Srinivasan *et al.* (2005) também buscaram uma solução para este problema, criando um framework utilizando uma abordagem baseada em análise de tendência para localizar diferentes modos operacionais e transições entre estados em dados históricos e caracterizá-los.

II.5.4.2 ALARMES RUIDOSOS

Os alarmes ruidosos são os principais “maus atores” em sistemas de alarmes, e sua presença contribui significativamente para a ocorrência de inundações de alarmes.

Os *chattering alarms*, denominação dada a alarmes que são acionados e desativados repetidamente em curtos intervalos de tempo, são exemplos clássicos

de alarmes ruidosos na indústria. Em sistemas computadorizados, este tipo de ruído implica no risco de mensagens importantes não aparecerem no *display* para o operador, uma vez que a lista de alarmes estará ocupada com os alarmes ruidosos (Bransby e Jenkinson, 1998). Além disso, o acionamento repetitivo destes alarmes muitas vezes faz com que os operadores passem a ignorar suas ocorrências, o que pode configurar uma situação de risco caso alguma falha de processo ocorra e seja alertada pelo alarme ruidoso. Nesse contexto parte do tempo dos operadores acaba por ser destinada a avaliar se determinados alarmes exigem sua ação corretiva ou não.

Alguns recursos comuns presentes na maioria dos sistemas de controle, como *on-delay*, *off-delay* e banda morta, são mitigadores eficientes de alarmes ruidosos repetitivos e transitórios (VanCamp, 2016).

Outros tipos de alarmes ruidosos encontrados na indústria são os *fleeting alarms*, ou alarmes transitórios, que transitam rapidamente entre os estados de ativo e inativo de forma menos constante, e os *stale alarms*, ou alarmes viciados, que permanecem em seu estado ativo por longos períodos de tempo (por exemplo 24 horas). Alarmes ruidosos do tipo *stale* devem passar por uma etapa de racionalização para que sua necessidade seja avaliada (ISA 18.2, 2016).

CAPÍTULO III – ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA

III.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA

A caldeira semi-industrial alvo do estudo de caso realizado neste trabalho encontra-se localizada no Laboratório de Engenharia Química da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LADEQ/EQ/UFRJ). Trata-se de uma caldeira flamotubular vertical, que pode fornecer vapor saturado a uma central de operações que contém uma coluna de destilação e um sistema de trocadores de calor subsequentes. A maior parte do seu tempo de operação ocorre durante as aulas práticas da disciplina Laboratório de Engenharia Química (LADEQ).

A planta conta com um tanque de alimentação de água e um tanque de alimentação de óleo diesel à caldeira, além de três tanques contendo óleo diesel estocado. A vazão de vapor destinada à central de operações é regulada por uma válvula manual, enquanto a linha de vapor para descarte conta com uma válvula de controle digital cerceada de válvulas manuais à montante e à jusante além de uma linha de *bypass*. Duas bombas garantem o abastecimento de água e de óleo à caldeira, e um soprador de ar permite a entrada de ar para combustão no seu queimador.

A instrumentação da planta inclui medidores de nível e de temperatura dos tanques de armazenamento de água e de óleo, um medidor de nível da caldeira, um medidor da vazão de água de alimentação à caldeira, medidores de pressão e de vazão do vapor na linha de saída e um medidor de temperatura dos gases de combustão. A tecnologia de transmissão destes sinais é digital e se dá via protocolo de comunicação *fieldbus*.

Dentre as malhas de controle presentes, destaca-se neste trabalho o monitoramento e controle da vazão e pressão do vapor na linha de saída, o controle da razão ar-combustível dentro do queimador e o controle do nível de água na caldeira. A malha de controle que garante a manutenção da razão ar-combustível utiliza um analisador de composição de gases posicionado na chaminé da caldeira para monitorar a concentração de oxigênio não reagido. Este equipamento é de tecnologia analógica e também pode monitorar a concentração de outros gases

exaustos da combustão como dióxido e monóxido de carbono. O resultado desta análise leva à alteração da velocidade de rotação do motor de um ventilador que ajusta a entrada de ar no queimador.

O controle do nível de água na caldeira é do tipo lógico e se dá pelo acionamento ou desligamento da bomba de alimentação de água. O status ligado/desligado da bomba é alterado de acordo com a medição do nível de água na caldeira: seu acionamento ocorre quando o nível está abaixo do limite estabelecido e a bomba desliga quando o estado do nível da caldeira atinge um patamar alto previamente setado.

O controle de pressão ou vazão de vapor da caldeira é realizado da seguinte forma: a medição da pressão na linha de saída de vapor é transmitida a um controlador de pressão, e a medição da vazão na linha de saída de vapor, de forma análoga, é transmitida a um controlador de vazão. Uma seleção feita pelo usuário dos sinais enviados por ambos os controladores permite a transmissão do comando final (abre/fecha) à válvula de controle para ajuste da vazão de vapor. Durante as aulas práticas, o controle de vazão é realizado manualmente pelos alunos, ou seja, a válvula de controle não é acionada.

Todos os equipamentos e instrumentação da planta estão representados em detalhe no diagrama P&ID da caldeira do LADEQ, Apêndice A deste trabalho.

III.2 FUNCIONAMENTO DA CALDEIRA

Como a operação da caldeira é conduzida conforme o procedimento experimental das aulas práticas de LADEQ, seu funcionamento ocorre de forma relativamente regular se comparados históricos das principais variáveis de processo coletados em dias distintos, salvas algumas variações esperadas devido à manipulação de válvulas manuais por alunos durante as práticas.

Anteriormente ao horário das aulas, a caldeira passa por um processo de pré-aquecimento. A operação é iniciada com o acendimento da caldeira por meio do acionamento do botão “QUEIMADOR” no painel de comando após a conclusão de uma etapa de verificação inicial, na qual diversos itens são checados pelos alunos de forma a garantir a segurança e o funcionamento adequado da caldeira. Os procedimentos desta etapa inicial incluem: certificar-se que a quantidade de óleo

diesel no tanque de alimentação é suficiente para o tempo de operação e verificar se o controle de água da caldeira se encontra em modo automático.

Após o acendimento da caldeira, observa-se o comportamento da pressão de vapor na linha de saída. Quando esta pressão atinge 65 psi, a válvula manual de vapor para descarte é manipulada de forma a estabilizar a vazão de vapor em aproximadamente 230 Kg/h. Esta vazão se mantém constante durante o tempo remanescente da prática. Enquanto dados relevantes ao procedimento são coletados pelos alunos manualmente a cada ciclo de água iniciado com o acionamento da bomba de alimentação de água à caldeira, o sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) aquisita e armazena todas as variáveis de processo que são transmitidas para a sala de controle em intervalos de 1 segundo.

Na Figura 14 é demonstrado um exemplo de gráfico obtido após um dia de operação normal da caldeira. Nele são observadas as variações das principais variáveis de processo com o decorrer do tempo. O eixo secundário do gráfico se refere aos valores de vazão na linha de saída de vapor.

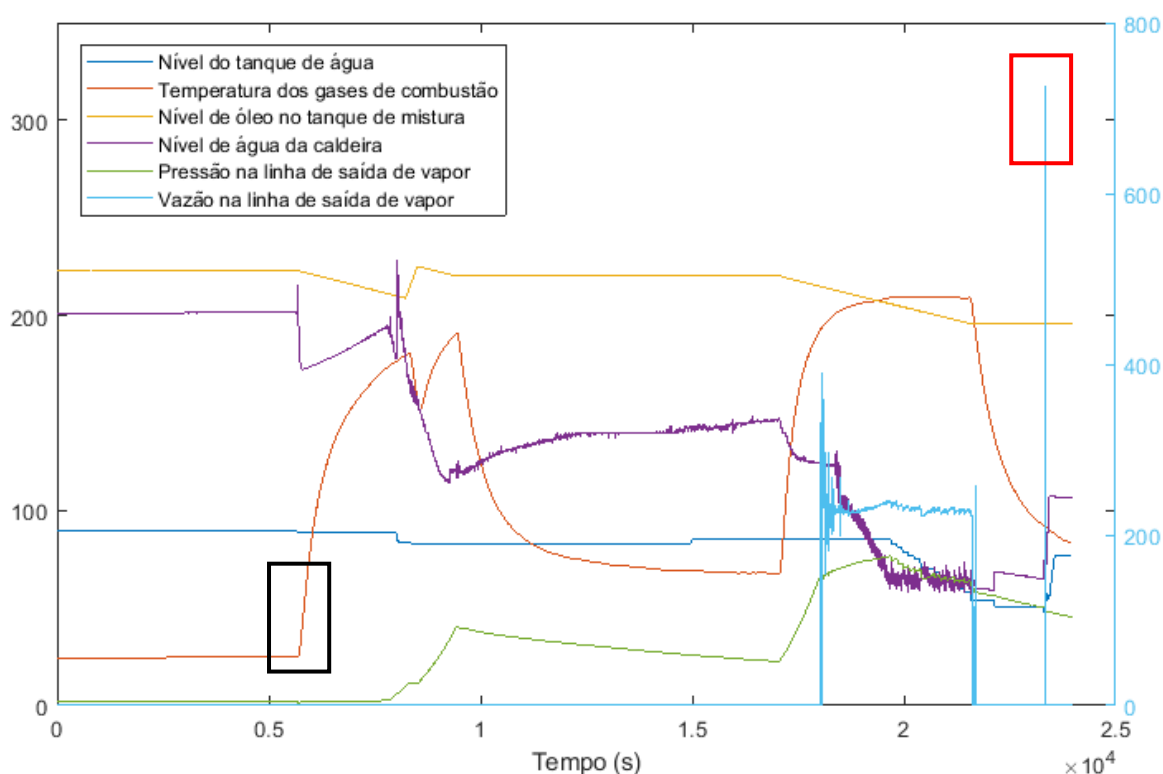


Figura 14: Comportamento das principais variáveis contínuas em um dia de operação da caldeira do LADEQ.

No gráfico, o processo de pré-aquecimento é evidenciado pelo aumento da temperatura dos gases de combustão antes do início da operação (destacado pelo retângulo preto na Figura 14). Após a partida da caldeira (cerca de 17.000 segundos decorridos do início da coleta de dados), a pressão de vapor aumenta continuamente até atingir o valor de operação definido (65 psi) e decresce com a abertura da válvula de vapor. Observa-se, no entanto, que a queda de pressão não ocorre imediatamente após a abertura da válvula, o que pode ser explicado pela própria dinâmica do processo. Conforme demonstrado por Parente (2014), o tempo de resposta da pressão à abertura da válvula é um pouco maior do que o tempo de resposta da vazão de vapor na caldeira.

O nível de água da caldeira diminui na partida da caldeira, possivelmente devido ao fenômeno de contração ocasionado pelas variações de temperatura e pressão. Este fenômeno se baseia na redução do volume de água da caldeira provocado pela redução da concentração de bolhas abaixo do nível de água (Nikiel, 2009). O aumento da pressão provoca a diminuição das bolhas contribuindo para o fenômeno de contração do nível da caldeira.

Após a abertura da válvula de vapor, o nível atinge valores mais baixos, dando início ao processo de abastecimento de água à caldeira (evidenciado pela queda do nível do tanque de água). Nota-se que, ao final do procedimento, a vazão de vapor atinge valores altíssimos devido à necessidade de reduzir drasticamente a pressão de vapor antes do desligamento da caldeira (destacado pelo retângulo vermelho na Figura 14).

III.3 MONITORAMENTO E CONTROLE DA CALDEIRA

Todas as variáveis de processo relevantes à operação da caldeira são medidas e transmitidas para o sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) iFix®, da GE. Este *software* permite ao usuário o monitoramento e interferência no processo em tempo real através da tela de um computador, onde é apresentado um sinótico representativo dos equipamentos e instrumentação da planta, como bombas, válvulas e transmissores. Cada instrumento é nomeado por um rótulo ou *tag* (de acordo com a norma ISA 5.1 (2009) para identificação e simbologia de instrumentos) e as medições relacionadas a cada *tag* são apresentadas ao usuário.

Neste sistema, são configurados os alarmes utilizados para garantir a segurança da operação. Os alarmes mais recentes acionados são listados na parte inferior da tela juntamente a informações detalhadas do tipo do alarme, *tag* relacionada ao instrumento que gerou o alarme, a descrição da variável monitorada pelo instrumento, o valor desta variável que causou o acionamento do alarme, o horário de disparo do alarme e o reconhecimento do alarme, representado pela função *acknowledge*.

Outros recursos disponíveis relacionados ao sistema de alarmes são representados por botões no menu principal do sistema supervisório. Ao clicar nestes botões o usuário tem acesso a uma lista de alarmes ativos e a dados históricos de alarmes acionados. A Figura 15 apresenta a tela principal do sistema, na qual os recursos mencionados se encontram à esquerda do sinótico da planta da caldeira.

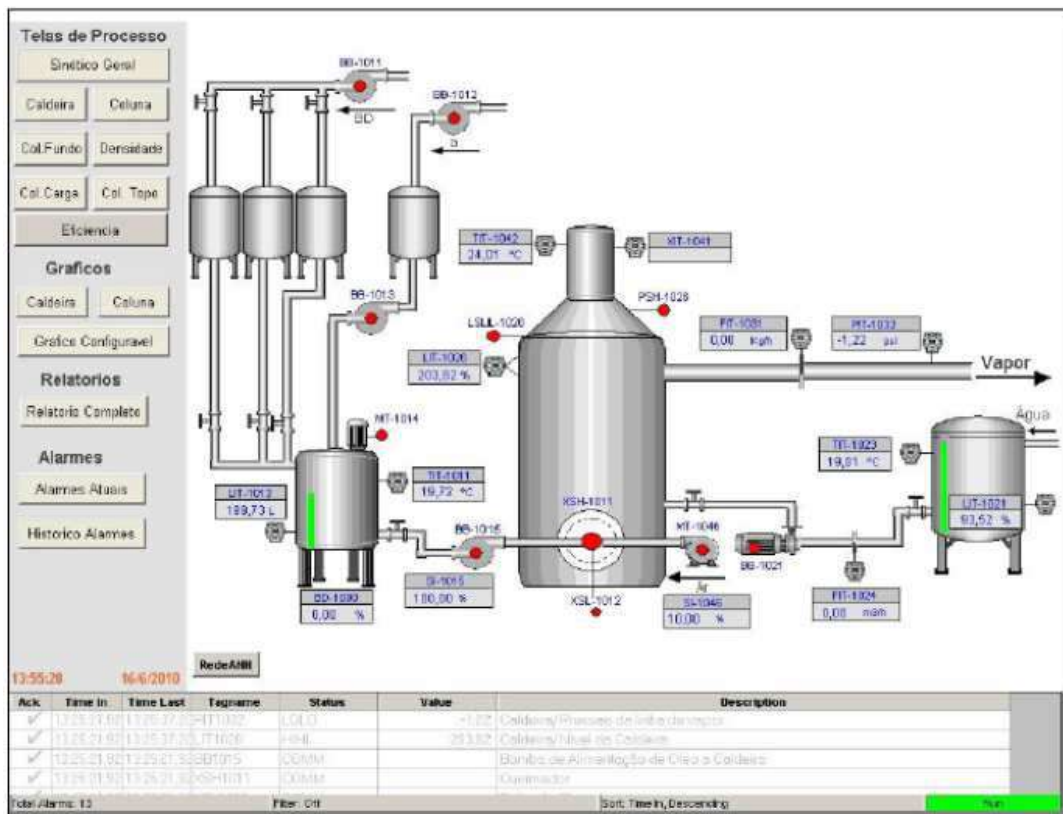


Figura 15: Tela do sistema supervisório da planta da caldeira do LADEQ.

III.4 LISTA DE ALARMES CONFIGURADOS

O sistema supervisório permite a criação de diversos tipos de alarmes. No sistema de alarmes da planta da caldeira do LADEQ, foram configurados 27 alarmes absolutos de variáveis contínuas, 16 alarmes de diagnóstico de instrumentos e 9 alarmes de variáveis discretas, totalizando 52 alarmes. Estes alarmes estão relacionados aos *tags* dos instrumentos instalados na planta.

A listagem de todos os alarmes disponíveis na planta será apresentada a seguir. Para os alarmes absolutos e de diagnóstico, descritos na Tabela 5 e Tabela 6, serão mencionados a descrição das variáveis relacionadas a cada *tag*, os tipos de acionamento que podem ser gerados para cada alarme assim como os *setpoints* estabelecidos para os mesmos e recursos avançados de configuração. Para os alarmes de variáveis discretas, descritos na Tabela 7, serão apresentadas as descrições de cada *tag* e os estados discretos que levam ao disparo dos alarmes. Para todos os alarmes configurados, não foi desenvolvido o recurso de atraso, ou *delay*.

Os alarmes de variáveis discretas não serão foco deste estudo devido a uma falha ocorrida no Controlador Lógico-Programável (CLP) que, dentre outras funções, é responsável pela conversão das variáveis de natureza discreta para o protocolo digital *fieldbus*. Não obstante, os alarmes discretos serão listados apenas para conhecimento, por estarem presentes em alguns históricos de alarmes analisados no decorrer do trabalho.

Tabela 5: Lista de alarmes absolutos de variáveis contínuas configurados na planta da caldeira do LADEQ.

(continua)

Tag	Descrição	LOLO	LO	HI	HIHI	Deadband
FIC1031_MV	Saída para Válvula de Vapor	0	0	100	100	5
FIT1031	Caldeira/ Vazão de vapor	0	100	500	500	25
LIT1013	Caldeira/ Nível Tanque de Mistura	0	50	353	353	18
LIT1021	Caldeira/ Nível do tanque de água	0	50	100	100	5
LIT1026	Caldeira/ Nível da Caldeira	0	0	100	100	5

Tabela 5: Lista de alarmes absolutos de variáveis contínuas configurados na planta da caldeira do LADEQ.

(continuação)

Tag	Descrição	LOLO	LO	HI	HIHI	Deadband
PIT1032	Caldeira/ Pressao da linha de vapor	20	38	70	70	2,38
TIT1042	Caldeira/ Temperatura dos gases de saida	0	110	228	850	42,9
XIC1031_TR	Tempo Integral da Malha de Vapor	0	0	10.000	10.000	500
XIC1046	Malha de Controle de Combustão	0	0	100	100	5
XIC1046_AM_ESCRITA	Escreve o modo alvo do bloco	0	0	100	100	5
XIC1046_AM_LEITURA	Lê o Modo Atual do Bloco	0	0	100	100	5
XIC1046_MV	Saída para o Inversor de Frequência	0	0	100	100	5
XIC1046_PV	Variável controlada da Malha de Ar	0	0	100	100	5
XIC1046_SEL_PN	Seleciona O2V (1)/O2C(2)/CO2V(3)/CO2R (4)	3	3	3	4	0
XIC1046_SP	Referencia do soprador	0	0	10.000	10.000	500
XIT1041C1	Crédito Calor Sensível Ar de Combustão	-100	-100	100	100	10
XIT1041C3	Crédito Calor Sensível do Combustível	-10	-10	50	50	3
XIT1041C4	Crédito Calor Sensível Umidade Ar Comb.	-5	-5	5	5	1
XIT1041EPCI	Eficiência com base no PCI	0	0	110	110	6
XIT1041P1	Eficiência com base no PCI	0	0	5.000	5.000	250
XIT1041P2	Perda de Calor Sensível pelos Gases /H2O	0	0	500	500	25
XRN1041CO2_E	Concentração de CO2 predita	0	10,28	13,48	100	5
XRN1041CO_E	Concentração de CO predita	0	0	423	500	25
XRN1041NO2_E	Concentração de NO2 predita	0	0	10	10	1
XRN1041NO_E	Concentração de NO predita	0	54	75	100	5
XRN1041O2_E	Concentração de O2 predita	0	2	5,35	15	0,75
XRN1041SO2_E	Concentração de SO2 predita	0	0	33	50	3

Tabela 6: Lista de alarmes de diagnóstico configurados na planta da caldeira do LADEQ.

Tag	Descrição	LOLO	LO	HI	HIHI	Deadband
FST1024	Diagnóstico do FIT1024	0	0	228	228	11
FST1031	Diagnóstico do FIT1031	0	0	228	228	11
LST1013	Diagnóstico do LIT1013	0	0	228	228	11
LST1021	Diagnóstico do LIT1021	0	0	228	228	11
LST1026	Diagnóstico do LIT1026	0	0	228	228	11
PST1032	Diagnóstico do PIT1032	0	0	228	228	11
SSV1046	Diagnóstico Soprador SI1046(IF-Inv.Freq)	0	0	64.000	64.000	3.200
TST1011	Diagnóstico do TIT1011	0	0	228	228	11
TST1023	Diagnóstico do TIT1023	0	0	228	228	11
TST1042	Diagnóstico do TIT1042	0	0	228	228	11
XSRN1041CO	Diagnostico do XRN1041CO	64	128	228	228	11
XSRN1041CO2	Diagnostico do XRN1041CO2	64	128	228	228	11
XSRN1041NO	Diagnostico do XRN1041NO	64	128	228	228	11
XSRN1041NO2	Diagnóstico do XRN1041NO2	64	128	228	228	11
XSRN1041O2	Diagnostico do XRN1041O2	64	128	228	228	11
XSRN1041SO2	Diagnostico do XRN1041SO2	64	128	228	228	11

Tabela 7: Lista de alarmes de variáveis discretas configurados na planta da caldeira do LADEQ.

Tag	Descrição	Estado de disparo do alarme
XST1041O2	Estado do sinal de O2	Erro
XSL1012	Falha de Chama	Falha
XSH1011	Queimador	Desligado
BB1015	Bomba de Alimentação de Óleo à Caldeira	Desligada
BB1021	Bomba de Água	Ligada
LSLL1026	Nível Crítico de Água	Abaixo do Limite
MT1046	Soprador	Desligado
PSH1026	Pressostato	Acima do Limite
XAT1041	Erro físico do analisador de gases	Erro

É essencial mencionar outros dois tipos de alarmes que não estão descritos acima: O alarme do tipo “RATE” relacionado à tag FIT1031, que é gerado quando a taxa de variação da vazão de vapor ultrapassa o limite de 100 Kg/h/s, e os alarmes do tipo “COMM”, que indicam falha na comunicação entre os instrumentos e o sistema supervisor.

III.5 ANÁLISE DE HISTÓRICOS DE ALARMES

Para que sejam propostas alterações na configuração básica e avançada dos alarmes de forma a melhorar o desempenho do sistema, foram avaliados históricos de alarmes de quatro dias de operação.

A Tabela 8 apresenta um exemplo de histórico referente a um dos dias estudados. Estes dados foram exportados diretamente do sistema supervisor a arquivos do Microsoft Office Excel® com o objetivo de facilitar sua avaliação. Nota-se que este recurso permite ao usuário consultar o valor da variável que levou ao disparo do alarme, o tipo de alarme acionado e o horário do disparo. Examinando-se o histórico, também é possível verificar o horário e valor da variável que levou o

mesmo alarme a retornar ao estado inativo, observando-se o *status* “OK” apresentado pela mesma *tag* depois de decorrido certo tempo do acionamento. Os alarmes de variáveis discretas podem apresentar também o valor CFN, sigla de *Change From Normal*, indicando a mudança do estado daquela variável.

Tabela 8: Histórico de alarmes acionados em um dia de operação da caldeira do LADEQ.

(continua)

Dia	Hora	Tag	Status	Valor
12/05/2017	08:18:44	FIT1031	LO	0,00
12/05/2017	08:18:44	LIT1026	HIHI	148
12/05/2017	08:18:45	PIT1032	LOLO	2,84
12/05/2017	08:18:45	TIT1042	LO	95,84
12/05/2017	08:18:46	XSRN1041O2	LOLO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XSRN1041CO2	LOLO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XSRN1041NO2	LOLO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XSRN1041SO2	LOLO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XSRN1041CO	LOLO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XSRN1041NO	LOLO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XRN1041O2_E	LO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XRN1041NO_E	LO	0,00
12/05/2017	08:18:46	XRN1041CO2_E	LO	0,00
12/05/2017	08:18:44	MT1046	CFN	Desligado
12/05/2017	08:18:44	XSH1011	CFN	Desligado
12/05/2017	08:18:44	BB1015	CFN	Desligado
12/05/2017	08:18:45	XST1041O2	CFN	Erro
12/05/2017	08:18:47	XIC1046_SEL_PN	HI	4
12/05/2017	08:25:22	TIT1042	OK	152,99
12/05/2017	08:33:37	PIT1032	LO	22,46
12/05/2017	08:47:42	TIT1042	LO	109,92
12/05/2017	09:22:50	LIT1026	OK	95
12/05/2017	09:27:48	TIT1042	OK	153,01
12/05/2017	09:29:13	LIT1026	HIHI	100
12/05/2017	09:29:30	PIT1032	OK	40,53
12/05/2017	09:35:58	FIT1031	RATE	352,01
12/05/2017	09:36:00	FIT1031	HIHI	500,33
12/05/2017	09:36:20	FIT1031	OK	407,44
12/05/2017	09:36:23	FIT1031	RATE	202,94
12/05/2017	09:36:24	FIT1031	OK	128,04
12/05/2017	09:36:27	FIT1031	LO	0,00
12/05/2017	09:36:43	FIT1031	OK	157,59
12/05/2017	09:41:02	LIT1026	OK	95
12/05/2017	09:41:13	LIT1026	HIHI	100

Tabela 8: Histórico de alarmes acionados em um dia de operação da caldeira do LADEQ.

(continuação)

Dia	Hora	Tag	Status	Valor
12/05/2017	09:41:17	LIT1026	OK	95
12/05/2017	09:54:05	PIT1032	HIHI	70,02
12/05/2017	09:59:11	PIT1032	OK	67,29
12/05/2017	10:25:51	FIT1031	RATE	118,87
12/05/2017	10:25:52	FIT1031	LO	0,00
12/05/2017	10:43:05	TIT1042	LO	109,98
12/05/2017	11:34:19	FIT1031	OK	188,79
12/05/2017	11:34:24	TIT1042	OK	152,95
12/05/2017	11:34:29	FIT1031	LO	98,43
12/05/2017	11:34:32	FIT1031	OK	125,99
12/05/2017	12:16:11	FIT1031	LO	98,73
12/05/2017	12:16:18	LIT1021	LO	50
12/05/2017	12:33:01	TIT1042	LO	109,98
12/05/2017	13:53:29	PIT1032	LO	37,98
12/05/2017	14:21:08	LIT1026	HIHI	101
12/05/2017	14:21:56	LIT1021	OK	55
12/05/2017	15:49:04	PIT1032	LOLO	20,00

Os alarmes de falha de comunicação acionados neste mesmo dia estão apresentados na Tabela 9. A coluna de valores será omitida neste caso, uma vez que a ocorrência de falha de comunicação indica que os valores transmitidos pela instrumentação da planta não foram capturados pelo sistema SCADA.

Tabela 9: Alarmes de falha de comunicação do sistema SCADA em um dia de operação da caldeira do LADEQ.

(continua)

Dia	Hora	Tag	Status
12/05/2017	08:18:38	XIC1046_SEL_PN	COMM
12/05/2017	17:07:38	FIT1031	COMM
12/05/2017	17:07:39	FST1024	COMM
12/05/2017	17:07:39	FST1031	COMM
12/05/2017	17:07:38	LIT1013	COMM
12/05/2017	17:07:39	LIT1021	COMM
12/05/2017	17:07:39	LIT1026	COMM
12/05/2017	17:07:38	LST1013	COMM
12/05/2017	17:07:39	LST1021	COMM
12/05/2017	17:07:39	LST1026	COMM
12/05/2017	17:07:39	PIT1032	COMM
12/05/2017	17:07:39	PST1032	COMM

Tabela 9: Alarmes de falha de comunicação do sistema SCADA em um dia de operação da caldeira do LADEQ.

(continuação)

Dia	Hora	Tag	Status
12/05/2017	17:07:38	XIC1046_SP	COMM
12/05/2017	17:07:38	SSV1046	COMM
12/05/2017	17:07:39	TIT1042	COMM
12/05/2017	17:07:38	XIC1046_MV	COMM
12/05/2017	17:07:39	TST1011	COMM
12/05/2017	17:07:39	TST1023	COMM
12/05/2017	17:07:39	TST1042	COMM
12/05/2017	17:07:38	XIC1046_AM_ESC	COMM
12/05/2017	17:07:38	XIC1046_AM_LEI	COMM
12/05/2017	17:07:38	XIC1046_PV	COMM
12/05/2017	17:07:38	XIC1046_SEL_PN	COMM
12/05/2017	17:07:38	FIC1031_MV	COMM
12/05/2017	17:07:38	PSH1026	COMM
12/05/2017	17:07:38	MT1046	COMM
12/05/2017	17:07:38	LSLL1026	COMM
12/05/2017	17:07:38	XSH1011	COMM
12/05/2017	17:07:38	XAT1041	COMM
12/05/2017	17:07:38	XSL1012	COMM
12/05/2017	17:07:38	BB1015	COMM
12/05/2017	17:07:38	BB1021	COMM
12/05/2017	17:07:38	XST1041O2	COMM

A partir da análise dos dados, fica claro que estes alarmes contribuem significativamente para a quantidade total de acionamentos em um dia de operação. Por este motivo, sua configuração também será avaliada.

O levantamento da quantidade total de disparos é uma boa prática para direcionar o foco do estudo, uma vez que os alarmes acionados com mais frequência têm maior potencial de sobrecarregar o operador. Além disso, a maior representatividade de um pequeno grupo de alarmes na quantidade total de acionamentos por si só gera uma desconfiança em relação ao desempenho do sistema. Considerando as questões mencionadas, foi feita uma contagem da quantidade total de vezes em que os alarmes absolutos e de diagnóstico foram acionados durante a operação normal da caldeira, excluindo-se os disparos de falha de comunicação. Os resultados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Quantidade total de disparos dos alarmes absolutos e de diagnóstico da caldeira do LADEQ nos quatro dias de estudo.

Alarme	Status	Quantidade de disparos
FIT1031	LO	23
FIT1031	RATE	21
LIT1026	HIHI	14
TIT1042	LO	13
PIT1032	LO	10
FIT1031	HIHI	7
PIT1032	LOLO	6
XSRN1041O2	LOLO	5
XSRN1041CO2	LOLO	5
XSRN1041NO2	LOLO	5
XSRN1041SO2	LOLO	5
XSRN1041CO	LOLO	5
XSRN1041NO	LOLO	5
XRN1041O2_E	LO	5
XRN1041NO_E	LO	5
XRN1041CO2_E	LO	5
XIC1046_SEL_PN	HI	5
LIT1021	LO	3
PIT1032	HIHI	2
Total geral		149

Somando-se a quantidade de 149 alarmes ao número de disparos de alarmes de falha de comunicação nos quatro dias estudados, a quantidade de alarmes acionados chega a 352.

O cálculo de algumas métricas propostas pela ISA 18.2 (2016) e a comparação dos resultados obtidos com seus valores ideais permite a identificação de possíveis problemas de desempenho apresentados pelo sistema de alarmes da planta e o estabelecimento de metas claras e definidas que virão a auxiliar na avaliação das melhorias obtidas após a implementação das mudanças propostas.

Para o cálculo destas métricas, foram considerados todos os alarmes absolutos, de diagnóstico e de falha de comunicação acionados nos dias estudados.

Tabela 11: Métricas calculadas para o sistema de alarmes da caldeira do LADEQ.

Métrica	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	Meta
Alarmes anunciados a cada 10 minutos por operador	2,98	1,97	3,56	1,25	1 (média)
Porcentagem de períodos de 10 minutos contendo mais de 10 alarmes	6,82%	4,88%	13,64%	3,77%	~<1%
Número máximo de alarmes em um período de 10 minutos	42	32	31	32	≤10
Quantidade de alarmes ruidosos <i>chattering</i> e <i>fleeting</i>	0	2	3	2	0

Os indicadores apresentados na Tabela 11 evidenciam a existência de deficiências no sistema de alarmes. Nota-se que os períodos de 10 minutos contendo mais de 10 alarmes chegaram a representar 13,64% do tempo total de operação em um dos dias avaliados. Os alarmes de vazão de vapor na linha de saída contribuíram significativamente para este resultado, juntamente aos alarmes de falha de comunicação. Observa-se também que, nos quatro dias de operação, o usuário foi submetido a eventos de inundação de alarmes significativos com o disparo de mais de 30 alarmes distintos em apenas 10 minutos. O risco frequente de ocorrência destes eventos justifica a necessidade de alterações na configuração dos alarmes.

Em posse dos históricos extraídos e da lista de alarmes existentes, seus *setpoints* e valores de banda morta, foi realizada uma análise aprofundada a partir dos conhecimentos adquiridos sobre os conceitos de gerenciamento de alarmes. As observações feitas nesta etapa e as melhorias propostas para reduzir as falhas estão descritas a seguir.

Primeiramente, foi verificado o disparo de alguns alarmes em comum durante a partida da caldeira nos quatro dias estudados. No exemplo de histórico de alarmes apresentado na Tabela 8, nota-se que os primeiros acionamentos indicam baixa vazão na saída de vapor, baixa pressão na saída de vapor, alto nível de água na caldeira e baixa temperatura dos gases de combustão. Estes alarmes falham em alertar condições que, considerando o modo operacional em que a caldeira se encontra, não representam anormalidades do processo ou riscos iminentes, tampouco exigem alguma ação corretiva por parte do operador. Para evitar a

sobrecarga diária do usuário, foi avaliada a proposta inicial de configurar o recurso de *delay* para estes alarmes. No entanto, como as variáveis em questão levam, em média, mais de uma hora para atingirem seus valores ideais de operação e a adição de um *delay* elevado aos alarmes pode acarretar em riscos ao processo, o tempo de *delay* que será utilizado terá como resultado apenas a redução do tempo de permanência destes alarmes, ao invés da eliminação completa dos disparos no início da operação.

Os alarmes de falha de comunicação, por sua vez, foram acionados em maior parte durante o desligamento da caldeira, e em alguns casos durante o *start up*. A Tabela 9 demonstra um exemplo em que o status COMM foi alertado para 32 variáveis distintas ao final da operação. Para este tipo de alarme, a configuração de um tempo reduzido de *delay* seria satisfatória, uma vez que os disparos ocorrem durante curtos intervalos de tempo. Deste modo não será imposto nenhum tipo de perigo à operação caso alarmes COMM sejam acionados com atraso durante o tempo de operação normal da caldeira.

Além dos maus atores identificados ao início e ao final da operação da planta, é notória a frequência de disparo de alguns alarmes em sobreposição aos demais, conforme demonstrado na Tabela 10. O alarme RATE da *tag* FIT1031 foi responsável pela segunda maior quantidade de disparos, sendo ultrapassado apenas pelo alarme LO da mesma variável. Examinando-se os históricos mais a fundo, verifica-se que o alarme RATE teve permanência máxima de dois segundos nos dias amostrados, ou seja, não houve tempo suficiente para o operador tomar uma ação corretiva após o acionamento do alarme em nenhum dos casos. Devido à sua repetição e rápida transição entre os estados ativo e inativo, ele configura um bom exemplo de alarme ruidoso repetitivo e transitório (*chattering*). Para reduzir esta frequência, propõe-se alterar a taxa de variação que gera seu disparo.

Para os alarmes LOLO, LO, HI e HIHI dos rótulos FIT1031, LIT1026, TIT1042, PIT1032 e LIT1021, são propostas alterações de *setpoint*, banda morta e/ou adição de tempos de atraso de forma que disparos considerados desnecessários sejam reduzidos ou até mesmo eliminados. Estas alterações serão avaliadas detalhadamente na etapa de teste das configurações dos alarmes.

Os alarmes absolutos XRN1041CO2_E, XRN1041CO_E, XRN1041NO2_E, XRN1041NO_E, XRN1041O2_E, XRN1041SO2_E e os alarmes de diagnóstico

XSRN1041CO2_E, XSRN1041CO_E, XSRN1041NO2_E, XSRN1041NO_E, XSRN1041O2_E, XSRN1041SO2_E foram configurados para alertar condições anormais das variáveis e sinais correspondentes ao sensor virtual de gases da caldeira. A partir dos históricos de alarmes analisados foi verificado, no entanto, que alguns destes alarmes estão sendo disparados mesmo que, atualmente, o sensor não se encontre em funcionamento. Este é o caso dos alarmes XRN1041O2_E, XRN1041NO_E, XRN1041CO2_E, XSRN1041CO2_E, XSRN1041CO_E, XSRN1041NO2_E, XSRN1041NO_E, XSRN1041O2_E, XSRN1041SO2_E, que foram acionados durante o *start up* da caldeira e permaneceram ativos até o desligamento da mesma em todos os dias estudados, podendo ser tomados como exemplos de alarmes ruidosos do tipo *stale*, ou alarmes viciados. Considerando o exposto, propõe-se desativar estes alarmes enquanto o sensor virtual de gases não estiver funcionando.

Além disso, alguns alarmes que foram configurados para a realização de testes na caldeira continuaram ativos mesmo após a conclusão dos testes, como por exemplo os alarmes XIC1046_PV (variável controlada da malha de ar), XIC1046_SEL_PN (Seleciona O2V (1)/O2C(2)/CO2V(3)/CO2R(4)), XIC1046_SP (referência do soprador), XIC1046_AM_ESCRITA (escreve o modo alvo do bloco) e XIC1046_AM_LEITURA (lê o modo atual do bloco). O alarme XIC1046_SEL_PN, assim como os alarmes relacionados ao sensor virtual de gases mencionados anteriormente, permaneceu acionado durante todo o tempo de operação nos dias estudados.

III.6 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO DE ALARMES

O funcionamento de alarmes absolutos e alarmes de diagnóstico de variáveis analógicas segue uma lógica relativamente simples. Tanto o acionamento quanto a desativação de um alarme é resultado da comparação entre o valor da variável correspondente ao seu *tag* e o valor do seu *setpoint*. O recurso de banda morta é incorporado a esta lógica de forma que a desativação do alarme não resulte da comparação do valor da variável ao *setpoint* em si, mas sim ao valor obtido pela subtração ou adição da banda morta ao *setpoint*, dependendo se o alarme é do tipo HI ou LO, respectivamente. Da mesma forma, o recurso de *delay* afeta o

funcionamento do alarme ao impor um atraso para a transição entre seus status ativo e inativo.

Levando em consideração as questões expostas acima, foi desenvolvida uma metodologia de simulação de alarmes em Microsoft Excel capaz de reproduzir o funcionamento de um sistema de alarmes qualquer desde que sejam conhecidos os valores de *setpoint*, tempo de atraso e banda morta definidos para cada alarme e que seja possível exportar os dados das variáveis de processo medidas em intervalos de tempo definidos pelo sistema de controle da planta.

De modo a facilitar seu entendimento, a metodologia de simulação de alarmes desenvolvida neste trabalho encontra-se dividida por etapas, a seguir:

- Dispondo-se dos dados das variáveis de processo em uma planilha de forma que as colunas representem os rótulos de cada instrumento e as linhas representem o horário de cada medição, foram inseridas, para cada rótulo, uma coluna auxiliar representando o funcionamento dos alarmes sem o recurso de atraso e uma coluna principal contendo a simulação final. Estas colunas podem ser nomeadas de acordo com a preferência de cada usuário, porém recomenda-se a utilização do rótulo do instrumento correspondente aos alarmes.
- Alarmes de taxa de variação e alarmes de falha de comunicação devem ser simulados separadamente, ou seja, devem contar com suas próprias colunas auxiliar e final, uma vez que eles seguem uma lógica de acionamento diferente daquela aplicável aos alarmes LOLO, LO, HI e HIHI.
- Os valores de *setpoint* LOLO, LO, HI e HIHI, o valor da taxa de variação definida para cada alarme deste tipo e os valores de banda morta, *on-delay* e *off-delay* dos alarmes são inseridos em uma tabela.
- A linha imediatamente acima dos primeiros resultados da simulação deve ser deixada em branco para garantir o funcionamento da lógica de acionamento desenvolvida neste trabalho.
- Com o auxílio de fórmulas disponíveis no Microsoft Office Excel®, representa-se os status ativo e inativo dos alarmes de cada variável pelos dígitos 1 e 0 respectivamente, em todas as linhas subsequentes até o último horário disponível na planilha. Cada dia de operação conta com uma planilha de

simulação. As fórmulas utilizadas nas colunas auxiliares e principais estão detalhadas no Apêndice B.

A simulação retorna ao usuário sequências de dígitos 1 e 0 para todas as *tags* consideradas. O disparo de qualquer alarme é representado pelo valor 1 independentemente do seu tipo, ou seja, não há distinção entre os alarmes LOLO, LO, HI e HIHI na simulação. A identificação do alarme acionado pode ser feita pela observação dos valores das variáveis monitoradas e os *setpoints* definidos para cada um.

A utilização desta metodologia permite ao usuário avaliar como alterações na configuração dos alarmes afetam o funcionamento e a eficiência do sistema como um todo.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV.1 SIMULAÇÃO DOS ALARMES DA CALDEIRA DO LADEQ

Dando continuidade ao estudo de caso realizado na caldeira do LADEQ, foi aplicada a metodologia de simulação de alarmes aos dados de variáveis contínuas coletados nos quatro dias de operação correspondentes aos históricos de alarmes analisados anteriormente, sendo possível, portanto, a comparação entre os resultados da simulação e os históricos reais obtidos. As medições das variáveis contínuas foram transmitidas a cada segundo para o sistema SCADA e os dados de interesse foram exportados para uma planilha de dados por meio de um recurso do sistema supervisório utilizado.

Primeiramente, avaliou-se a capacidade da metodologia desenvolvida de representar o funcionamento do sistema de alarmes da caldeira. A simulação foi realizada para todos os alarmes absolutos e alarmes de diagnóstico acionados nos históricos extraídos, seguindo as etapas descritas na seção III.6. Após comparação dos dados simulados com os dados históricos, foram evidenciadas pequenas discrepâncias de um a dois segundos entre os horários de disparo ou desativação dos alarmes em alguns casos. Esta incompatibilidade pode ser explicada por atrasos na transmissão das medições realizadas pela instrumentação da caldeira ao computador, considerando que a instrumentação e o computador ficam localizados em áreas distintas do laboratório. Apesar da divergência, os resultados obtidos foram considerados satisfatórios para o objetivo deste trabalho.

Uma vez validada a metodologia de simulação, foi possível prever o comportamento do sistema de alarmes da caldeira após a implementação das mudanças nas suas configurações básicas e avançadas. As alterações propostas e descritas no item III.5 incluem mudança dos valores de *setpoint*, banda morta e tempo de atraso dos alarmes pelo usuário.

A Figura 16 e a Figura 17 demonstram um exemplo de simulação feita para um dos dias de operação. Na Figura 16, tem-se o comportamento real do sistema de alarmes conforme descrito no histórico extraído pelo sistema supervisório, enquanto na Figura 17 observa-se, pelo resultado da simulação, uma previsão do

funcionamento do sistema caso fosse imposto um período de 5 segundos de *on-delay* para os alarmes do rótulo FIT1031 e 3 segundos de *on-delay* para os alarmes do rótulo PIT1032.

Dados						SIMULAÇÃO						
Hora	LIT1021	TIT1042	LIT1026	FIT1031	PIT1032	LIT1021	TIT1042	LIT1026	FIT1031	PIT1032	RATE	COMM
15:51:43	56,4994	86,5462	75,44	487,751	39,695	0	1	0	0	0	0	0
15:51:44	56,6297	86,5405	74,8966	542,494	37,7991	0	1	0	1	1	0	0
15:51:45	56,8388	86,5305	73,4148	542,628	37,7991	0	1	0	1	1	0	0
15:51:46	56,9967	86,5236	72,3682	514,364	40,0367	0	1	0	1	1	0	0
15:51:47	57,1606	86,5201	68,7903	221,961	42,1684	0	1	0	0	0	1	0
15:51:48	57,3268	86,5105	67,0124	230,589	41,9964	0	1	0	0	0	0	0
15:51:49	57,5041	86,4974	66,8429	237,749	41,9415	0	1	0	0	0	0	0
15:51:50	57,6608	86,4896	67,3595	67,2146	41,7156	0	1	0	1	0	0	0
15:51:51	57,934	86,4805	67,2806	67,8658	41,7074	0	1	0	1	0	0	0
15:51:52	58,0353	86,4673	67,0333	109,94	41,5162	0	1	0	1	0	0	0
15:51:53	58,1838	86,4606	67,5142	150	41,3361	0	1	0	0	0	0	0
15:51:54	58,3351	86,4496	67,495	136,623	41,4183	0	1	0	0	0	0	0
15:51:55	58,5121	86,4353	67,1907	83,0471	41,6102	0	1	0	1	0	0	0
15:51:56	58,7626	86,43	66,6025	0	41,5827	0	1	0	1	0	0	0
15:51:57	58,9285	86,4221	66,5599	0	41,8176	0	1	0	1	0	0	0

Figura 16: Arquivo em Excel utilizado para simulação dos alarmes.

Dados						SIMULAÇÃO						
Hora	LIT1021	TIT1042	LIT1026	FIT1031	PIT1032	LIT1021	TIT1042	LIT1026	FIT1031	PIT1032	RATE	COMM
15:51:43	56,4994	86,5462	75,44	487,751	39,695	0	1	0	0	0	0	0
15:51:44	56,6297	86,5405	74,8966	542,494	37,7991	0	1	0	0	0	0	0
15:51:45	56,8388	86,5305	73,4148	542,628	37,7991	0	1	0	0	0	0	0
15:51:46	56,9967	86,5236	72,3682	514,364	40,0367	0	1	0	0	0	0	0
15:51:47	57,1606	86,5201	68,7903	221,961	42,1684	0	1	0	0	0	1	0
15:51:48	57,3268	86,5105	67,0124	230,589	41,9964	0	1	0	0	0	0	0
15:51:49	57,5041	86,4974	66,8429	237,749	41,9415	0	1	0	0	0	0	0
15:51:50	57,6608	86,4896	67,3595	67,2146	41,7156	0	1	0	0	0	0	0
15:51:51	57,934	86,4805	67,2806	67,8658	41,7074	0	1	0	0	0	0	0
15:51:52	58,0353	86,4673	67,0333	109,94	41,5162	0	1	0	0	0	0	0
15:51:53	58,1838	86,4606	67,5142	150	41,3361	0	1	0	0	0	0	0
15:51:54	58,3351	86,4496	67,495	136,623	41,4183	0	1	0	0	0	0	0
15:51:55	58,5121	86,4353	67,1907	83,0471	41,6102	0	1	0	0	0	0	0
15:51:56	58,7626	86,43	66,6025	0	41,5827	0	1	0	0	0	0	0
15:51:57	58,9285	86,4221	66,5599	0	41,8176	0	1	0	0	0	0	0

Figura 17: Resultado da simulação após adição de *on-delay* aos alarmes FIT1031 e PIT1032.

Nota-se, pela Figura 17, que a configuração dos tempos de atraso mencionados para ambos os alarmes eliminaria por completo seus disparos no período de tempo avaliado.

IV.1.1 TESTE DAS CONFIGURAÇÕES DOS ALARMES

A avaliação preliminar dos históricos de alarmes permitiu a elaboração de sugestões de alteração de configuração que serão consideradas nesta etapa.

A etapa de teste das novas configurações dos alarmes foi conduzida por meio da alteração manual dos valores de *setpoint*, banda morta e tempo de atraso dos alarmes na planilha de simulação. Após cada alteração, foram analisados o número total de disparos do alarme em questão e o comportamento do sistema.

Os índices de performance, ou KPIs, indicados pela ISA 18.2 (2016) para avaliação do desempenho global do sistema de alarmes foram recalculados para as novas configurações e estão apresentados no final desta seção.

- **Alarmes de vazão de vapor da caldeira**

Como o ajuste da vazão de vapor é feito através do manuseio da válvula de vapor para descarte durante as aulas práticas da disciplina de Laboratório de Engenharia Química, esta variável se comporta de forma extremamente instável, passando por oscilações constantes e significativas, o que causa disparos frequentes dos alarmes. Dentre os alarmes configurados na planta da caldeira do LADEQ, os alarmes de vazão são os mais ruidosos. O alarme de vazão baixa, por exemplo, respondeu pelo maior número de disparos nos históricos extraídos, seguido do alarme de taxa de variação.

Sobre o alarme de taxa de variação ou *rate*, a variação atualmente configurada no sistema supervisor da caldeira que define o seu disparo é de 100 kg/h/s. É importante ressaltar, porém, que este tipo de alarme é suprimido pelos outros alarmes configurados para a mesma variável por que estes apresentam maior grau de prioridade. Ou seja, o alarme de taxa de variação não é disparado caso o alarme de vazão muito baixa, baixa, alta ou muito alta esteja ativo.

Devido a esta supressão, o comportamento do alarme *rate* não é afetado apenas pela taxa de variação definida, mas também pelas configurações dos demais alarmes de vazão. Por este motivo os resultados das mudanças propostas para os alarmes de vazão muito baixa, baixa, alta e muito alta se refletem também nos alarmes de taxa de variação de vazão de vapor.

Um valor de banda morta igual a 25 kg/h foi configurado para os alarmes de vazão muito baixa, baixa, alta e muito alta. Este valor corresponde a 5% do valor de *setpoint* do alarme de vazão muito alta (HIHI), de acordo com sugestão da norma EEMUA 191 (1999). Por meio da simulação de alarmes, foram testados incrementos

percentuais de 1% nos valores do parâmetro banda morta até que não se observasse redução significativa no número de disparos. O resultado destas alterações na quantidade de disparos dos alarmes está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Número de disparos dos alarmes FIT1031 variando-se a banda morta.

Porcentagem do setpoint HHH	5%	6%	7%	8%	9%	10%
Banda morta (kg/h)	25	30	35	40	45	50
Disparos	51	51	49	49	49	49

Os resultados obtidos demonstram que a alteração da banda morta do alarme levaria a uma redução do número de disparos. No entanto, em um dos dias de operação avaliados, os alarmes de vazão muito alta e de vazão baixa foram acionados em um intervalo de apenas 8 segundos, ambos os disparos apresentando permanência de 3 segundos. Este tipo de problema seria eliminado com a adição de tempo de atraso no disparo e/ou desativação dos alarmes de vazão.

Seguindo a recomendação da norma EEMUA 191 (1999) para alarmes de vazão, o tempo de atraso de 15 segundos foi testado. Os resultados das alterações no número de disparos dos alarmes de vazão muito baixa, baixa, alta e muito alta estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Número de disparos dos alarmes FIT1031 variando-se os tempos de atraso.

On-delay	0	15	0	15
Off-delay	0	0	15	15
Disparos	51	40	18	19

Por meio da simulação foi possível observar que o desempenho dos alarmes de vazão seria significativamente aprimorado pela adição de tempo de atraso na desativação. Este resultado pode ser ainda mais expressivo se alterados ambos os parâmetros, conforme demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14: Número de disparos dos alarmes FIT1031 com novo valor de banda morta variando-se os tempos de atraso.

On-delay	0	15	0	15
Off-delay	0	0	15	15
Disparos	49	39	17	18

Ajustando-se a banda morta para 35 kg/h e adicionando-se 15 segundos de tempo de atraso na desativação (*off-delay*) dos alarmes de vazão muito baixa, baixa, alta e muito alta, o número de disparos dos alarmes de vazão nos quatro dias estudados seria reduzido a 17.

Após o teste das configurações dos alarmes de vazão muito baixa, baixa, alta e muito alta, foi possível avaliar o ajuste da taxa de variação definida para o acionamento do alarme "RATE". Esta análise foi realizada mantendo-se os valores de banda morta e de tempo de atraso mencionados anteriormente para os demais alarmes de vazão. A Tabela 15 mostra os resultados do número de disparos do alarme de taxa de variação e de todos os alarmes de vazão nos quatro dias de operação, depois de testadas as taxas de variação de 100 a 175 kg/h/s com incrementos de 25 kg/h/s.

Tabela 15: Número de disparos do alarme RATE por taxa de variação definida.

Taxa de variação (kg/h/s)	100	125	150	175
Disparos "RATE"	4	2	2	2
Total de Disparos	17	15	15	15

De acordo com os dados da simulação demonstrados acima, a alteração da taxa de variação de 100 kg/h/s para 125 kg/h/s, juntamente aos ajustes de banda morta e tempo de atraso dos demais alarmes de vazão, reduziria significativamente o número total de disparos dos alarmes configurados para esta variável.

- **Alarmes de pressão na linha de saída de vapor da caldeira**

Nos históricos extraídos, os alarmes referentes à pressão do vapor produzido pela caldeira não apresentaram sinais significativos de ruído.

Como esperado, o alarme de pressão muito baixa foi ativado predominantemente durante transições operacionais de partidas e paradas, ou seja, quando não havia produção de vapor. O alarme de pressão baixa, por sua vez, foi anunciado também durante as aulas práticas devido a perturbações do processo causadas pelo ajuste manual da válvula de vazão de vapor.

Um único caso de transitoriedade foi observado nos quatro dias avaliados, no qual o tempo de permanência do alarme de pressão baixa foi extremamente baixo, indicando uma oportunidade de melhoria na configuração dos alarmes. Por este motivo, a alteração do valor de banda morta e a adição de tempo de atraso foram estudadas e os resultados da simulação estão apresentados nas Tabela 16, Tabela 17 e Tabela 18.

A banda morta configurada originalmente para os alarmes de pressão corresponde a 3,4% do valor do *setpoint* HHI. Na simulação, foram testados valores de 5% a 10% deste *setpoint*.

Tabela 16: Número de disparos dos alarmes PIT1032 variando-se a banda morta.

Porcentagem do setpoint HHI	3,4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
Banda morta (psi)	2,38	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7
Disparos	13	11	10	10	10	10	10

Pelos resultados apresentados acima, observou-se que o ajuste da banda morta para 6% do *setpoint* HHI permitiu a maior redução no número de disparos, eliminando o ruído do alarme. Esta redução é proveniente do incremento do tempo de permanência de dois disparos ocorridos em um dos dias de operação e a consequente eliminação de dois pares ativo/inativo.

Para a simulação dos alarmes com adição de tempo de atraso o valor testado foi de 3 segundos, que corresponde ao tempo de permanência do acionamento transitório observado nos históricos.

Tabela 17: Número de disparos dos alarmes PIT1032 variando-se os tempos de atraso.

On-delay	0	3	0	3
Off-delay	0	0	3	3
Disparos	13	12	13	12

Os resultados da Tabela 17 comprovam que, conforme esperado, apenas um disparo seria eliminado com a definição de 3 segundos de *on-delay*. Adicionalmente, pelos dados apresentados na Tabela 18, observa-se que a alteração simultânea de ambos os parâmetros (banda morta e tempo de atraso) não resultaria em um número de disparos menor que 10, uma vez que o único acionamento eliminado pelo *on-delay* não ocorreria caso a banda morta fosse definida em 4,2 psi. Por este motivo, para os alarmes de pressão, recomenda-se apenas o ajuste da banda morta.

Tabela 18: Número de disparos dos alarmes PIT1032 com novo valor de banda morta variando-se os tempos de atraso.

On-delay	0	3	0	3
Off-delay	0	0	3	3
Disparos	10	10	10	10

- **Alarmes de temperatura dos gases de combustão da caldeira**

O alarme de temperatura baixa (LO) dos gases de combustão foi o único alarme de temperatura acionado nos quatro dias de operação avaliados. Todos os seus disparos ocorreram durante transições de estado, quando não havia nenhum tipo de risco imposto à operação. Estas transições incluem a partida ou *start up* da caldeira, a conclusão do processo de pré-aquecimento e o encerramento ou *shut down* da atividade da caldeira. Assim como o alarme de pressão muito baixa, o alarme de temperatura baixa foi anunciado apenas quando não havia produção de vapor.

Considerando que os dados de temperatura não apresentaram flutuação nos históricos extraídos e que os *setpoints* configurados atendem às variações esperadas na operação, a alteração da configuração destes alarmes não é justificável.

- **Alarmes de nível da caldeira**

Na operação de caldeiras, algumas oscilações do nível de água podem ocorrer devido à intensa interação entre o sistema de água e o sistema de combustão, afetando o controle de nível. Bega (2003) atribui as dificuldades do controle de nível da caldeira a fenômenos de expansão (*swell*) e contração (*shrink*), este último mencionado no item III.2. Ambos são causados por variações na taxa de aquecimento que podem ser provocadas por perturbações na pressão de vapor.

Por conta desta interação, os alarmes de nível podem ser disparados por variações inerentes à natureza do processo, sem a necessidade de intervenção da operação. A configuração destes alarmes deve, portanto, filtrar ao máximo essas oscilações, evitando a geração de falsos alarmes.

Na caldeira do LADEQ, foram observados alguns casos de rápida transição (menos de 10 segundos) entre o estado ativo e inativo do alarme de nível muito alto (HIHI).

A banda morta configurada atualmente para os alarmes de nível é de 5% do valor de *setpoint* do alarme de nível muito alto (HIHI). Os valores de 6%, 7%, 8%, 9% e 10% deste *setpoint* foram testados como possíveis valores de banda morta. Os resultados destas alterações estão apresentados na Tabela 19.

Tabela 19: Número de disparos dos alarmes LIT1026 variando-se a banda morta.

Porcentagem do setpoint HIHI	5%	6%	7%	8%	9%	10%
Banda morta (L)	5	6	7	8	9	10
Disparos	14	10	9	9	9	9

O único alarme associado ao nível da caldeira acionado nos quatro dias foi o alarme de nível muito alto. Esta constatação em associação aos dados da Tabela 19 sugere que a variável monitorada flutua em torno de 95 L. O incremento da banda morta resultou na eliminação de cinco disparos. Isto indica que a configuração atual não é suficiente para filtrar as variações transitórias de nível da caldeira.

Adicionalmente, foi testada a adição de tempo de atraso aos alarmes mantendo-se o valor de banda morta configurado atualmente. Apesar da recomendação da EEMUA 191 (1999) de 60 segundos de atraso para alarmes de nível, os históricos extraídos evidenciam que a definição de um tempo menor é suficiente para filtrar as flutuações da variável. A escolha do tempo de atraso de 45 segundos foi baseada no maior intervalo entre os pares ativo/inativo e inativo/ativo de alarmes transitórios observados nos quatro dias. O número total de disparos dos alarmes após as adições de tempo de atraso está apresentado na Tabela 20.

Tabela 20: Número de disparos dos alarmes LIT1026 variando-se os tempos de atraso.

On-delay	0	45	0	45
Off-delay	0	0	45	45
Disparos	14	10	11	10

Buscando-se obter melhores resultados, propôs-se a alteração conjunta dos valores de banda morta e tempos de atraso fixando-se a banda morta em 7% do *setpoint* HHH, valor que trouxe maior redução no número de disparos. No entanto, conforme observado na Tabela 21, a adição de tempo de atraso não afetaria o desempenho do alarme após o ajuste da banda morta, tornando-se desnecessária a sua utilização.

Tabela 21: Número de disparos dos alarmes LIT1026 com novo valor de banda morta variando-se os tempos de atraso.

On-delay	0	45	0	45
Off-delay	0	0	45	45
Disparos	9	9	9	9

- **Alarmes de nível do tanque de água alimentada à caldeira**

Os alarmes de nível do tanque de água alimentada à caldeira foram acionados, no máximo, uma vez em cada dia de operação estudado. Para os acionamentos analisados, não foram verificadas oportunidades de aperfeiçoamento. Devido à escassez de histórico de dados, não serão propostas alterações na configuração destes alarmes.

- **Alarmes de falha de comunicação**

Na etapa de análise dos históricos de alarmes, concluiu-se que a adição de tempo de atraso no disparo dos alarmes de falha de comunicação reduziria drasticamente a quantidade total de acionamentos, principalmente durante o período de desligamento da caldeira. A proposta do tempo de atraso do tipo *on-delay* será baseada na observação dos históricos.

Na Tabela 22 são apresentados os intervalos considerados para a escolha do tempo ideal de *on-delay*. Para o *start up*, os horários identificados na tabela delimitam o intervalo entre o disparo do alarme e o início da transmissão dos dados de variáveis contínuas para o sistema supervisor. Nos históricos extraídos, no máximo um alarme de falha de comunicação por dia foi acionado durante o *start up* da caldeira. Para o desligamento (*shut down*), está indicado o tempo decorrido entre o horário de transmissão dos últimos dados de variáveis contínuas e o último disparo deste tipo de alarme em cada dia de operação.

Tabela 22: Levantamento de dados para escolha de *on-delay* dos alarmes de falha de comunicação.

Dia	Start up	Shut down
1º	08:10:40 – 08:11:10	15:27:06 – 15:27:09
2º	–	16:04:56 – 16:04:59
3º	12:29:57 – 12:30:27	16:06:30 – 16:06:31
4º	08:18:38 – 08:19:08	17:07:38 – 17:07:39

O período de *on-delay* definido para os alarmes de falha de comunicação foi baseado no maior intervalo de tempo apresentado na Tabela 22. A escolha do intervalo máximo garante que o recurso será eficaz tanto no início quanto no final da operação da planta. De fato, a adição de 30 segundos de atraso eliminaria completamente o disparo destes alarmes nos quatro dias de operação avaliados, conforme observado na simulação.

Após a conclusão da etapa de testes, obteve-se o conjunto de configurações apresentado na Tabela 23. Nota-se que as novas configurações envolvem exclusivamente os alarmes acionados nos históricos extraídos, uma vez que a comparação dos dados simulados com os dados reais é essencial para garantir que

o sistema terá um melhor desempenho. É importante ressaltar, no entanto, que a lógica de simulação é genérica e pode ser utilizada para qualquer alarme.

Tabela 23: Configurações propostas para os alarmes da caldeira do LADEQ

Tag	LOLO	LO	HI	HIHI	Deadband	On-delay	Off-delay	Taxa de Variação
FIT1031	0	100	500	500	35	0	15	125
PIT1032	20	20	70	70	4,2	–	–	–
TIT1042	0	110	228	850	42,9	–	–	–
LIT1026	0	0	100	100	7	–	–	–
LIT1021	0	50	100	100	5	–	–	–
Todas (alarmes de falha de comunicação)	–	–	–	–	–	30	–	–

Além das configurações indicadas na Tabela 23, algumas recomendações adicionais ao sistema de alarmes incluem a desativação dos alarmes de testes e dos alarmes do sensor virtual de gases, conforme descrito na etapa de análise dos históricos de alarmes.

O número total de disparos dos alarmes com as novas configurações e demais recomendações nos quatro dias de operação avaliados estão apresentados na Tabela 24. Os novos indicadores de desempenho do sistema de alarmes podem ser observados na Tabela 25.

Tabela 24: Quantidade total de disparos dos alarmes absolutos nos quatro dias de estudo após alterações.

Alarme	Quantidade de disparos
FIT1031	15
LIT1026	9
TIT1042	15
PIT1032	10
LIT1021	3
XSRN1041O2	0
XSRN1041CO2	0
XSRN1041NO2	0
XSRN1041SO2	0
XSRN1041CO	0
XSRN1041NO	0
XRN1041O2_E	0
XRN1041NO_E	0
XRN1041CO2_E	0
XIC1046_SEL_PN	0
Falha de comunicação	0
Total geral	52

Tabela 25: Métricas calculadas para o sistema de alarmes da caldeira do LADEQ após a implementação das recomendações finais.

Métrica	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	Meta
Alarmes anunciados a cada 10 minutos por operador	0,30	0,47	0,60	0,25	1 (média)
Porcentagem de períodos de 10 minutos contendo mais de 10 alarmes	0%	0%	0%	0%	~<1%
Número máximo de alarmes em um período de 10 minutos	4	4	5	4	≤10
Quantidade de alarmes ruidosos <i>chattering e fleeting</i>	0	0	1	0	0

Comparando a quantidade total de disparos na Tabela 24 com o levantamento da Tabela 10 somado aos disparos de falha de comunicação, observa-se que as alterações propostas garantiriam uma redução de 85% da quantidade total de disparos.

Complementando este resultado, os indicadores de performance do sistema de alarmes apresentaram uma melhoria considerável. As métricas utilizadas para ilustrar o desempenho do sistema evidenciam a eliminação dos eventos de inundação de alarmes. A quantidade de disparos em períodos de 10 minutos não ultrapassou o valor meta (10 disparos) em nenhum dos dias estudados. De fato, este número permaneceu confortavelmente abaixo da meta, uma vez que o operador seria submetido, no máximo, a 4 ou 5 alarmes em um período de 10 minutos. Além disso, nenhum caso de repetição constante de alarmes foi observado com as novas configurações. Um único evento de transitoriedade foi identificado para o alarme de baixa vazão de vapor.

A partir dos dados de número de disparos e das novas métricas do sistema de alarmes, é possível concluir que o operador teria maior facilidade em gerenciar condições anormais de processo após a implementação das configurações apresentadas na Tabela 23. Além disso, por conta da redução da quantidade de alarmes ruidosos, haveria uma maior confiança por parte do operador nos eventos alertados pelo sistema de alarmes.

Os resultados obtidos demonstram que a utilização adequada de recursos disponíveis nos sistemas supervisórios pode aprimorar drasticamente a eficiência do sistema de alarmes. A metodologia desenvolvida neste trabalho permite concluir que as alterações propostas trarão benefícios consideráveis ao sistema de alarmes da planta da caldeira do LADEQ/EQ/UFRJ. Estes benefícios incluem a redução da quantidade de alarmes ruidosos e do risco de eventos de inundação de alarmes. Por fim, seria possível obter um sistema de alarmes robusto que garantiria o suporte necessário à operação.

IV.2 ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE OS ALARMES

Conforme demonstrado anteriormente, cada variável de processo da caldeira do LADEQ está relacionada a um rótulo da instrumentação da planta, e os dados das variáveis contínuas ao longo do tempo podem ser tratados como distribuições de probabilidades. No presente estudo de caso, três abordagens foram utilizadas para reconhecer os alarmes correlacionados: o cálculo dos coeficientes de correlação entre as variáveis, uma ferramenta estatística denominada PCA (*Principal Component Analysis*), ou análise dos componentes principais, e a análise de

clusters, ou análise de agrupamentos. Todas as avaliações foram conduzidas em Matlab®, utilizando os dados históricos extraídos pelo sistema supervisor da planta. É importante ressaltar que os dados históricos utilizados nesta etapa englobam apenas o processo de geração de vapor propriamente dito, ou seja, não estão sendo considerados os dados coletados durante os transientes de operação (*start up* e *shut down*) e o pré-aquecimento da caldeira.

Tendo em vista que o objetivo principal do estudo de caso é identificar oportunidades de melhoria no monitoramento dos alarmes configurados na caldeira, apenas as variáveis de processo cujos alarmes foram acionados em pelo menos um dos quatro dias estudados foram submetidas às análises de correlação. As variáveis analógicas de diagnóstico não estão incluídas nesta seleção uma vez que se propôs a desativação dos alarmes de diagnóstico acionados nestes dias.

IV.2.1 COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO

Avaliando-se dados sequenciais de uma única variável, é possível determinar alguns parâmetros principais que caracterizam a distribuição de probabilidades desta variável. Estes parâmetros são a média aritmética (μ_X), que pode ser definida como a medida do valor central da sequência, e a variância (σ_{XX}^2), que é uma medida da dispersão dos dados em relação ao valor central. Usualmente, utiliza-se o desvio padrão (σ_X) como medida de dispersão, que nada mais é do que a raiz quadrada da variância. Os cálculos da média aritmética, variância e desvio padrão de uma distribuição qualquer estão detalhados a seguir (Soares *et al.*, 2016).

$$\mu_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$$

$$\sigma_{XX}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_X)^2$$

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_X)^2}$$

A partir dos parâmetros mencionados é possível avaliar a relação entre duas sequências de variáveis distintas. A covariância é comumente utilizada para medir esta relação. Considerando duas variáveis X e Y distintas, a covariância é dada por:

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y)$$

O coeficiente de correlação de Pearson (ρ_{XY}), parâmetro utilizado para medir a similaridade entre dois conjuntos distintos de dados, pode ser obtido pela seguinte equação:

$$\rho_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu_X)(Y_i - \mu_Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu_X)^2 (Y_i - \mu_Y)^2}}$$

Tanto a covariância quanto o coeficiente de correlação são parâmetros que medem a associação entre duas variáveis. Para tratar conjuntos de dados que contêm três ou mais variáveis, é recomendável que os coeficientes de correlação calculados para cada par de variáveis sejam apresentados em uma matriz.

Na Tabela 26 e na Tabela 27 estão apresentados, respectivamente, os parâmetros estatísticos das sequências de variáveis e os coeficientes de correlação resultantes para todos os pares de variáveis. Estes coeficientes foram calculados, inicialmente, a partir da compilação dos dados coletados nos quatro dias estudados.

Tabela 26: Parâmetros da distribuição de probabilidades das variáveis de processo.

Rótulo	Média	Desvio Padrão
LIT1021	76,02	10,44
TIT1042	203,30	7,27
LIT1013	198,78	18,35
LIT1026	74,21	18,26
FIT1031	241,52	34,56
PIT1032	65,18	4,60

Como esperado, a vazão na linha de saída de vapor apresentou a maior variância dentre as *tags* avaliadas. Este resultado condiz com os dados do número total de disparos dos alarmes apresentados na Tabela 10, uma vez que esta variável gerou o maior número de acionamentos nos dias estudados.

Tabela 27: Coeficientes de correlação das variáveis de processo a partir dos dados compilados.

	LIT1021	TIT1042	LIT1013	LIT1026	FIT1031	PIT1032
LIT1021	1					
TIT1042	-0,35	1				
LIT1013	0,57	-0,09	1			
LIT1026	0,59	-0,51	0,41	1		
FIT1031	0,16	-0,08	0,09	0,06	1	
PIT1032	0,39	0,22	0,28	0,09	-0,07	1

Os coeficientes de correlação calculados a partir dos dados compilados apresentaram algumas discrepâncias em relação aos dados individuais, destacando-se a redução do nível de correlação entre os rótulos LIT1013 e TIT1042. Isto pode ser explicado pela diferença considerável entre os valores de ambas as variáveis no final de uma operação e no início da operação subsequente. Neste caso, flutuações irreais da temperatura dos gases de combustão e do nível de óleo no tanque de mistura são geradas pela compilação dos dados, afetando o coeficiente de correlação entre as variáveis. É possível observar estas variações expressivas de uma operação a outra na Figura 18.

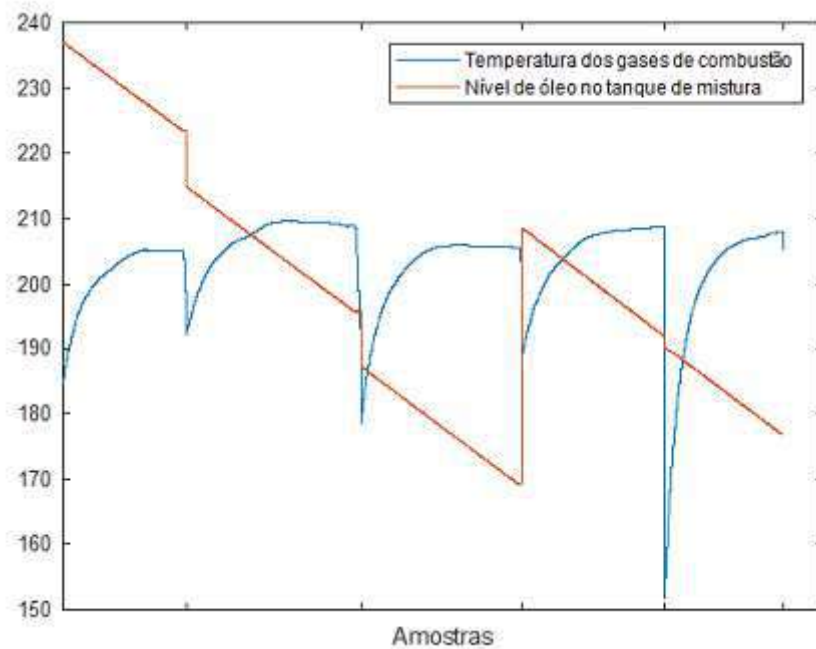


Figura 18: Perfil de variação dos rótulos TIT1042 e LIT1013 nos dados compilados.

O caráter não contínuo da operação e dos dados analisados também pode influenciar o nível de correlação apontado para outros pares de variáveis, apesar desta diferença ser menos expressiva do que no caso do par TIT1042/LIT1013. A correlação entre a temperatura dos gases de combustão e o nível do tanque de água, por exemplo, também é reduzida com a análise do conjunto total de dados. Por fim, a correlação entre alguns pares de variáveis é condicionada à escolha dos históricos de dados que compõem o conjunto avaliado. Na Figura 19 é possível observar o perfil de comportamento de todas as variáveis de processo consideradas nesta análise. O eixo secundário do gráfico se refere aos valores de vazão na linha de saída de vapor.

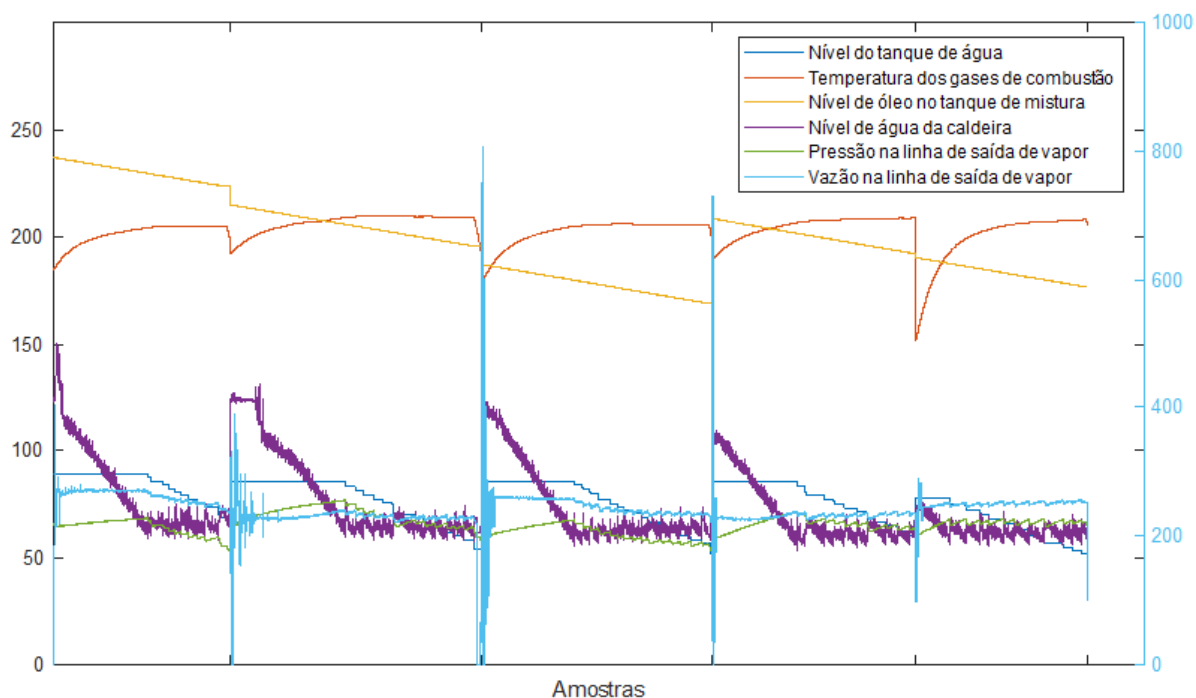


Figura 19: Perfil de variação de todas as variáveis de processo nos dados compilados.

Para eliminar as influências da compilação dos dados nos resultados da análise, os coeficientes de correlação devem ser avaliados individualmente para cada dia de operação da caldeira. Tomando-se um dos dias de operação para ilustrar o perfil das relações observadas nos dados gerais, obtiveram-se os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Coeficientes de correlação das variáveis de processo a partir dos dados individuais.

	LIT1021	TIT1042	LIT1013	LIT1026	FIT1031	PIT1032
LIT1021	1					
TIT1042	-0,66	1				
LIT1013	0,95	-0,86	1			
LIT1026	0,59	-0,97	0,82	1		
FIT1031	-0,01	-0,08	0,01	0,07	1	
PIT1032	0,22	0,55	-0,10	-0,61	-0,21	1

O mapa de cores apresentado na Figura 20, gerado a partir dos coeficientes de correlação calculados acima, permite uma melhor visualização das correlações

identificadas. Na estrutura do mapa de cores, os eixos são formados pelas variáveis dos dados analisados, as cores mais intensas indicam alta correlação e as cores mais claras indicam baixa correlação. Os diagramas individuais gerados a partir dos dados coletados em cada operação estão incluídos no apêndice C.

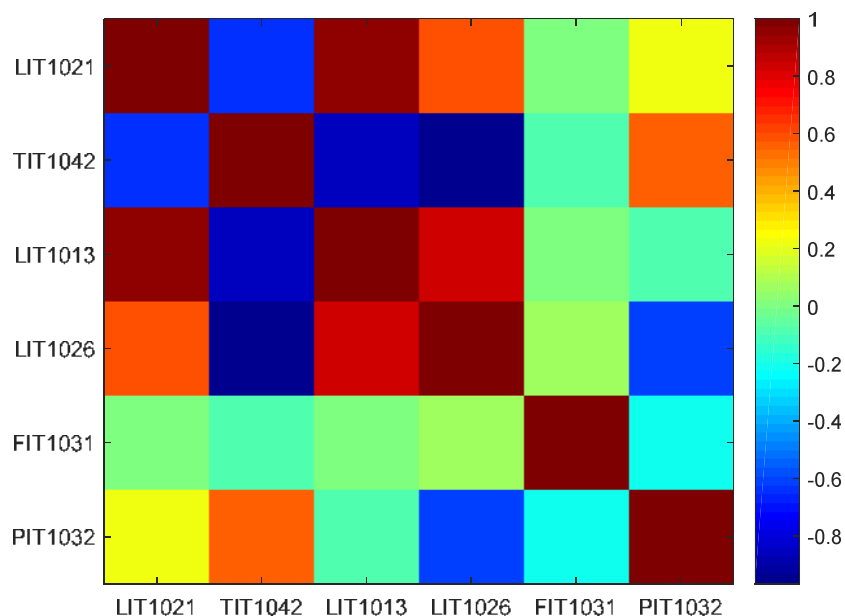


Figura 20: Mapa de cores da correlação entre as variáveis de processo a partir dos dados individuais.

Os resultados da análise demonstram fortes níveis de correlação entre as variáveis dos rótulos LIT1021, TIT1042, LIT1013 e LIT1026, entre os pares TIT1042/PIT1032 e LIT1026/PIT1032, e correlações mais brandas entre o rótulo FIT1031 e as demais variáveis de processo. O sinal negativo dos coeficientes de correlação calculados para os pares LIT1026/TIT1042, LIT1013/TIT1042, LIT1021/TIT1042 e LIT1026/PIT1032 indica relação inversa entre as variáveis.

É importante ressaltar que as correlações identificadas não apontam para a existência de alarmes redundantes. Cada alarme avaliado contém informações relevantes à manutenção da segurança da operação e da qualidade do vapor produzido, não havendo justificativa para o descarte de qualquer um dos alarmes. As correlações são decorrentes do efeito do comportamento de uma variável em outra, o que, neste caso, pode ser explicado pelas interações envolvidas no processo químico.

A relação direta entre as variáveis LIT1026 e LIT1021 está associada ao próprio sistema de controle do processo, uma vez que a água é bombeada do

tanque de armazenamento à caldeira sempre que o nível da caldeira está abaixo de um valor pré-definido. Já a relação entre as variáveis LIT1013 e LIT1021 pode ser explicada pelo processo de geração de vapor na caldeira: como a queima do combustível disponível no queimador é acompanhada pelo decréscimo do nível de água na caldeira, a transferência de diesel do tanque de mistura ao queimador coincide com a transferência de água do tanque de armazenamento à caldeira. O perfil de comportamento semelhante das variáveis pode ser observado na Figura 14. A relação entre as variáveis TIT1042 e PIT1032 também é explicada pelo processo de produção de vapor na caldeira, que provoca o aumento da temperatura dos gases de combustão e da pressão na linha de saída de vapor. As *tags* LIT1026 e LIT1013, por sua vez, são correlacionadas pelos processos de geração de vapor e de bombeamento de água descritos anteriormente.

As relações inversas entre os pares LIT1026/TIT1042, LIT1013/TIT1042 e LIT1021/TIT1042 também estão vinculadas ao processo de geração de vapor, já que o decréscimo dos níveis da caldeira, de óleo no tanque de mistura e de água no tanque de armazenamento, assim como o incremento da temperatura dos gases de combustão, são consequências diretas deste processo. A relação inversa entre os rótulos LIT1026 e PIT1032 pode ser explicada pelo maior tempo de resposta da pressão à abertura da válvula de vapor durante a operação, conforme explicado na seção III.2. Enquanto o nível de água da caldeira decresce com a abertura da válvula, a pressão de vapor permanece em perfil ascendente por determinado período de tempo.

IV.2.2 ANÁLISE DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

O princípio do PCA baseia-se em identificar novas variáveis a partir de grupos das variáveis originais que capturem o máximo da variabilidade do conjunto de dados. Estas novas variáveis, denominadas componentes principais, são nada mais do que combinações lineares das variáveis originais. O número de componentes principais gerados a partir de determinado conjunto de dados é semelhante ao número de variáveis presentes nos dados originais, no entanto é comum que a variância acumulada de alguns dos primeiros componentes ultrapasse 80% da variância total. (Mathworks, 2003).

O PCA envolve alguns conceitos estatísticos básicos como média aritmética, desvio padrão, autovalores e autovetores. O conjunto de dados originais passa por um pré-processamento no qual todos os valores são subtraídos da média aritmética e divididos pelo desvio padrão da distribuição. Esta etapa inicial é importante para eliminar as diferenças de escala e de unidade de medida entre as variáveis originais. Os componentes principais, por sua vez, são os autovetores da matriz de covariância do conjunto de dados pré-processado, e o autovalor relacionado a cada autovetor corresponde à variância do componente (Soares *et al.*, 2016; Bro e Smilde, 2014).

Para uma avaliação completa dos resultados deste tipo de análise estatística, é necessário obter a matriz de coeficientes do PCA, na qual cada linha corresponde a uma variável do conjunto de dados originais e cada coluna corresponde a um componente principal (Mathworks, 2003). Conforme mencionado anteriormente, cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais. Deste modo, os coeficientes atribuídos a cada variável em um mesmo componente principal indicam o seu nível de contribuição para a variância deste componente. Conseqüentemente, entende-se que as variáveis com coeficientes maiores carregam a informação mais relevante e apresentam maior grau de correlação entre si.

Em oposição ao que foi observado anteriormente no método dos coeficientes de correlação, a análise de componentes principais conduzida a partir da compilação dos dados dos quatro dias estudados gerou resultados consistentes. A análise do conjunto total de dados representou de forma satisfatória os resultados obtidos a partir dos dados de cada operação. Esta diferença pode estar associada ao fato do método de PCA se tratar de uma análise estatística multivariada: todas as variáveis são analisadas de forma integrada no conjunto de dados e examinadas perante o comportamento deste conjunto. O método dos coeficientes de correlação, por outro lado, se trata de uma análise estatística biparamétrica na qual cada par de variáveis é avaliado independentemente.

A matriz de coeficientes resultante do PCA aplicado ao conjunto total dos dados está apresentada na Tabela 29. Os componentes principais são apresentados em ordem decrescente de variância, ou seja, o primeiro componente principal

captura a maior variabilidade do conjunto de dados. O Diagrama de Pareto com a variância explicada por cada componente pode ser observado na Figura 21.

Tabela 29: Componentes principais e coeficientes das variáveis de processo.

Rótulo	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
LIT1021	0,0666	0,3391	-0,0027	0,8868	0,0587	-0,3011
TIT1042	-0,0245	-0,1230	0,2352	-0,1259	0,8919	-0,343
LIT1013	0,0808	0,6424	0,7144	-0,2344	-0,1226	0,0210
LIT1026	0,0664	0,6629	-0,6548	-0,2750	0,2277	0,0016
FIT1031	0,9920	-0,1222	-0,0079	-0,0235	0,0152	0,0154
PIT1032	-0,0062	0,0531	0,0743	0,2581	0,3660	0,8894

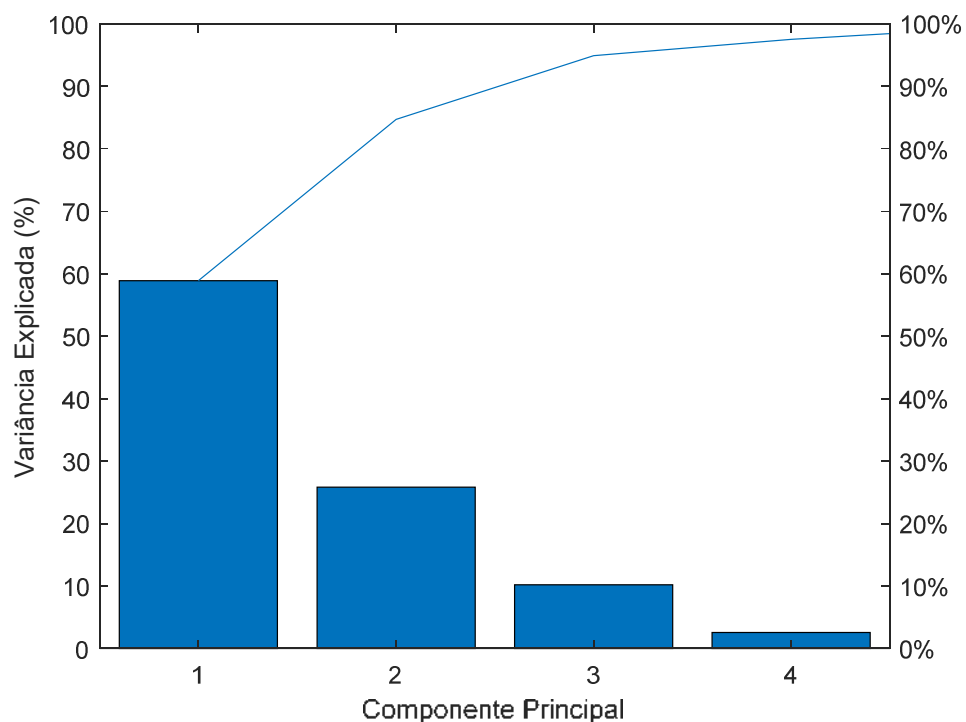


Figura 21: Diagrama de Pareto da porcentagem de variância explicada por cada componente principal na caldeira do LADEQ.

A análise realizada demonstra que 97,5% da variância total do conjunto de dados poderia ser atribuída a quatro componentes principais. A partir da matriz de coeficientes da Tabela 29, é evidente que quatro variáveis contribuem de forma mais significativa para a variância do conjunto de dados: a vazão na linha de saída de vapor, o nível de água da caldeira, o nível de óleo no tanque de mistura e o nível do tanque de água. A correlação entre os rótulos LIT1021, LIT1013 e LIT1026 e os

rótulos TIT1042, LIT1013 e LIT1026 pode ser observada pelos coeficientes do segundo e terceiro componentes principais, respectivamente. As relações entre as variáveis estão alinhadas com o processo de geração de vapor e consequente alimentação de água à caldeira, conforme descrito no item IV.2.1. Neste caso, os rótulos LIT1013 e LIT1026 possuem coeficientes similares em ambos os componentes, portanto são mais fortemente correlacionadas de acordo com o PCA.

Além das correlações identificadas, o resultado do PCA indica que, no que diz respeito ao monitoramento e supervisão da operação da caldeira, a informação mais relevante para o usuário encontra-se concentrada em quatro das seis variáveis de processo. Seria possível, portanto, simplificar o controle supervisão da caldeira mantendo-se o foco do operador no monitoramento de apenas quatro variáveis.

IV.2.3 ANÁLISE DE CLUSTERS

Como resultado da análise de *clusters* (ou análise de agrupamentos) obtém-se o agrupamento das variáveis do conjunto de dados de forma que as variáveis em um mesmo grupo possuem perfis de variação semelhantes, enquanto variáveis de grupos distintos possuem comportamentos divergentes (Mathworks, 2003).

A primeira etapa necessária para a condução deste tipo de análise é o cálculo das distâncias entre todos os pares de objetos do conjunto de dados. Esta distância representa o nível de similaridade ou dissimilaridade entre os pares, e pode ser calculada de diversas formas. No presente trabalho, será utilizada a distância Euclidiana entre os pontos (Mathworks, 2003).

Em uma próxima etapa, os objetos que apresentam maior proximidade de acordo com as distâncias calculadas anteriormente são agrupados em *clusters* binários. Um *cluster* binário formado pelo agrupamento de objetos similares é então identificado como um novo objeto que pode ser vinculado a outro *cluster* ou a um dos objetos originais, formando *clusters* maiores. Este agrupamento é feito iterativamente até que todos os *clusters* binários formem uma árvore hierárquica, que pode ser visualmente representada por um dendrograma (Mathworks, 2003; Soares *et al.*, 2016).

O dendrograma é um diagrama composto por linhas em formato de “U” que conectam os pares de objetos com menor distância entre si, sejam eles objetos

originais ou *clusters* binários. A altura de cada linha determina a distância (nesse caso, Euclidiana) entre os objetos conectados por ela. O dendrograma gerado a partir dos dados compilados dos quatro dias de operação está apresentado na Figura 22.

Prosseguindo-se com a investigação de possíveis discrepâncias e perdas de informação com a análise do conjunto total de dados, observou-se que a compilação dos dados dos quatro dias de operação não afetou os resultados obtidos pela análise de *clusters*. De fato, a análise realizada a partir dos dados de cada operação resultou em dendrogramas similares ao da Figura 22, diferindo apenas nas distâncias Euclidianas calculadas. Vale ressaltar que este método estatístico é multivariado e independente do comportamento linear das variáveis no conjunto de dados.

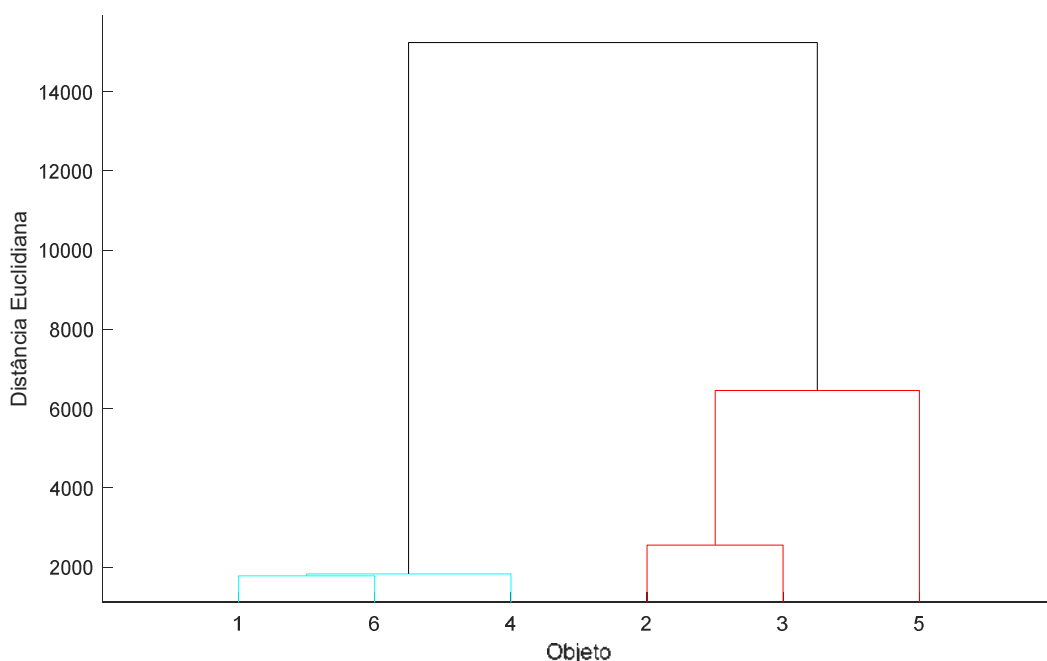


Figura 22: Dendrograma dos principais grupos de variáveis na caldeira do LADEQ.

Os objetos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 demonstrados no dendrograma acima se referem respectivamente aos rótulos LIT1021, TIT1042, LIT1013, LIT1026, FIT1031 e PIT1032. A partir da análise de *clusters* é evidente a formação de dois grupos: o primeiro composto pelo nível de água no tanque de armazenamento, nível de água na caldeira e pressão na linha de saída de vapor; e o segundo composto pela temperatura dos gases de combustão, nível de óleo no tanque de mistura e vazão

na linha de saída de vapor. É possível observar também que o grupo formado pelos objetos 1, 4 e 6 possui um nível de similaridade maior do que o grupo formado pelos objetos 2, 3 e 5. Dentre as variáveis do segundo grupo, a vazão na linha de saída de vapor é a que menos se assemelha às demais, possivelmente devido às perturbações relacionadas ao ajuste manual da vazão. É comum que as flutuações da vazão sejam transitórias a ponto de não gerar efeito no comportamento das outras variáveis no conjunto de dados.

A formação destes dois grupos se torna clara quando são examinados os comportamentos das variáveis de processo na Figura 14. Considerando que a distância Euclidiana entre os dados foi utilizada como medida de similaridade, cada grupo foi formado pelas variáveis cujos valores se mantiveram mais próximos uns aos outros durante a operação.

A partir dos resultados dos três métodos estatísticos, propõe-se o monitoramento conjunto dos alarmes configurados para os rótulos LIT1021 e LIT1026, e dos alarmes configurados para os rótulos LIT1013 e TIT1042. A inter-relação entre as variáveis em cada um dos grupos está intimamente relacionada a processos envolvidos na operação da caldeira. As variáveis de nível da caldeira e nível do tanque de água carregam grande parte da informação do controle de nível da caldeira e indicariam possíveis falhas precedentes ao transbordamento ou superaquecimento da caldeira. As variáveis de nível de óleo no tanque de mistura e temperatura dos gases de combustão, por sua vez, representam o monitoramento do processo de combustão que ocorre no queimador e indicariam a queima ineficiente de combustível. Pelos resultados das análises, os alarmes dos rótulos FIT1031 e PIT1032 devem continuar a ser monitorados isoladamente.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho propôs-se a avaliar de forma prática a aplicação de técnicas de gerenciamento de alarmes em processos industriais, tema que tem adquirido grande visibilidade de pesquisadores e indústrias de diversos ramos nos últimos anos. Dada a sua importância na manutenção da segurança da operação e da qualidade de seus produtos, diversos mecanismos de aprimoramento do desempenho de sistemas de alarmes estão disponíveis na literatura, variando de recursos simples do controle supervisão a algoritmos complexos desenvolvidos por pesquisadores da área.

A fim de facilitar o trabalho de gerenciamento de alarmes, que muitas vezes pode gerar resistência dentro da indústria, foi desenvolvido um método de simulação de alarmes que reproduz sua lógica de funcionamento baseada na sua configuração básica, o que inclui os limites definidos para gerar seu disparo, e em recursos avançados de *deadband* e *delay*, que estão disponíveis na maioria dos sistemas de controle supervisão encontrados na indústria atualmente.

Para demonstrar as vantagens e aplicabilidade do método de simulação de alarmes desenvolvido, um estudo de caso foi realizado no sistema de alarmes de uma caldeira de pequeno porte localizada no Laboratório de Engenharia Química (LADEQ), EQ/UFRJ. Os históricos de alarmes extraídos pelo sistema supervisão da caldeira indicam a presença de alarmes ruidosos e risco constante de avalanches de alarmes. Diversas oportunidades de melhoria foram identificadas, o que inclui a supressão de alarmes desenvolvidos especificamente para testes e alarmes do analisador virtual de gases, que atualmente não é utilizado no monitoramento do processo. Além disso, ficou evidente que os recursos de configuração disponíveis no sistema supervisão não estão sendo utilizados para evitar o acionamento de alarmes desnecessários.

Em decorrência do estudo de caso realizado na caldeira do LADEQ, obteve-se um conjunto de configurações que reduziria 85% do número de disparos e resultaria em indicadores de desempenho característicos de um sistema de alarmes robusto, de acordo com as metas definidas pela ISA 18.2. A utilização do método de simulação de alarmes desenvolvido neste trabalho se mostrou extremamente

conveniente para o usuário do sistema supervisor, na medida em que possibilita a previsão do comportamento do sistema de alarmes sem que alterações sejam feitas na planta.

Por fim, buscando-se aprimorar a forma de apresentação dos alarmes e simplificar o monitoramento do sistema, foi realizada uma análise de correlação das variáveis de processo da caldeira através de três métodos estatísticos distintos: o cálculo dos coeficientes de correlação, a análise dos componentes principais e a análise de *clusters*. Os resultados obtidos por cada análise foram relativamente distintos, possivelmente devido ao comportamento não-linear do sistema. No entanto, algumas correlações se mantiveram consistentes, indicando que o monitoramento dos alarmes configurados para o nível do tanque de água e o nível da caldeira, assim como o monitoramento dos alarmes de nível de óleo no tanque de mistura e temperatura dos gases de combustão, poderia ser feito de forma integrada, reduzindo o número de alarmes monitorados isoladamente sem que haja perda da informação fornecida ao usuário. Além disso, foram identificadas as variáveis mais relevantes à supervisão do processo, sendo possível direcionar o foco do operador para um número limitado de alarmes durante a operação da caldeira.

Para trabalhos futuros, sugere-se avaliar a aplicação de outras técnicas de gerenciamento de alarmes (não abordadas neste trabalho) no sistema de alarmes da caldeira do LADEQ, como a priorização dos alarmes. Esta avaliação pode ser incorporada ao método de simulação de alarmes desenvolvido. Além disso, propõe-se a simplificação da lógica utilizada na simulação e a utilização de outro programa ou software que possa gerar resultados de forma mais ágil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ISA-5.1. Instrumentation Symbols Identification. American National Standard, 2009.

ANSI/ISA-18.2. Management of Alarm Systems for the Process Industries. American National Standard, 2016.

ASM WEBINAR COMMUNICATIONS PROGRAM, 2009. An Introduction to the ASM Guidelines: Effective Operator Display Design. Webinar: Abnormal Situation Management Consortium e Human Centered Solutions. Disponível em <<https://www.asmconsortium.net>>. Acesso em 19 Setembro 2017.

BABCOCK, WILCOX, Steam - its generation and use. Nova Iorque: The Babcock & Wilcox Co., 1978.

BAZZO, E. Geração de Vapor. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BEGA, E. A. Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

BRANSBY, M., L., JENKINSON, J. The management of alarm systems. Health and Safety Executive, 1998.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Portaria MTE nº 594, de 28 de Abril de 2014 altera Norma Regulamentadora NR-13 – Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações. Disponível em <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras>>. Acesso em 02 Julho 2017.

BRO, R., SMILDE, A. K. Principal Component Analysis, *Analytical Methods*, v. 6, p. 2812-2831, 2014.

BROWN, D., C., O'DONNELL, M. Too Much of a Good thing? – Alarm Management Experience in BP Oil: Part 1: Generic Problems with DCS Alarm Systems, 1997.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. Eficiência Energética no Uso de Vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

COELHO, S. T. Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a Partir de Biomassa. Um Modelo para o Estado de São Paulo. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. São Paulo. 1999.

DALAPATU, P., AHMED, S., KHAN, F. Alarm allocation for event-based process alarm systems, In: 10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, Mumbai, India, p. 815-820, 2013.

EEMUA 191. Alarm systems: a guide to design, management and procurement. The Engineering Equipment and Materials Users Association, 1999.

FIGUEREDO, A. K. M., DE SOUZA JUNIOR, M. B., MELO, P. F. F. F. E., LIMA, K. M. SISTEMA INTELIGENTE DE ANÁLISE DE DADOS DISCRETOS DE ALARMES PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS NO TRATAMENTO DA ÁGUA OLEOSA EM PLATAFORMA OFFSHORE. In: XXI Congresso Brasileiro de Automática 2016, 2016, Vitória, ES. Congresso Brasileiro de Automática Conference Proceedings, 2016.

GE, Z., SONG, Z., GAO, F. Review of Recent Research on Data-Based Process Monitoring, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 52, p. 3543-3562, 2013.

HEALTH & SAFETY EXECUTIVE. The explosion and fires at the Texaco Refinery, Milford Haven, 24 July 1994. 1997.

HIGUCHI, F., YAMAMOTO, I., TAKAI, T., NODA, M., NISHITANI, H., Use of Event Correlation Analysis to Reduce Number of Alarms, *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 27, p. 1521-1526, 2009.

HOLLIFIELD, B. R., HABIBI, E. Alarm Management: Seven Effective Methods for Optimum Performance. ISA – Instrumentation, Systems and Automation, 2007.

MARTINELLI L. C. J. Geradores de Vapor. Universidade do Rio Grande do Sul – UERGS – UNIJUÍ – Campus Panambi, 2003. Disponível em <<http://saudeetrabalho.com.br/download/gera-vapor.pdf>>. Acesso em 20 Fevereiro 2017.

Mathworks (2003). Statistics toolbox for use with MATLAB. Natick, MA: The Math-Works, Inc.

MORRISON, D. T., FECKE, M., RAMIREZ, J. Using Layer of Protection Analysis to Understand Necessary Safeguards for Steam Boiler Operation, *Process Safety Progress*, v. 31, n. 3, p. 248-254, 2012.

NIKIEL, J. M. Sistema de instrumentação e automação de caldeira com combustíveis alternativos (Estudo da influência do uso da mistura diesel-biodiesel no comportamento de uma caldeira). EQ/UFRJ. 2009.

OGUNNAIKE, B. A., RAY, W. H. Process Dynamics, Modeling, And Control. [S.l.]: Ie-oxford, 1994.

PARENTE, A. P. Estratégias de Controle Ecoeficientes Aplicadas a Caldeiras Semi-Industriais. EQ/UFRJ. Rio de Janeiro. 2014.

PELLEGRINETTI, J., BENTSMAN, J. Nonlinear Control Oriented Boiler Modeling – A Benchmark Problem for Controller Design, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 4, n. 1, 1996.

PERA, H., Geradores de Vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. 2. ed. São Paulo: Fama, 1990.

ROTHENBERG, D. H. Alarm management for process control: a best-practice guide for design, implementation, and use of industrial alarm systems, 1. ed., Nova Iorque: Momentum Press, 2009.

SOARES, V. B., PINTO, J. C., DE SOUZA JR., M. B. Alarm management practices in natural gas processing plants, *Control Engineering Practice*, v. 55, p. 185-196, 2016.

SRINIVASAN, R., VISWANATHAN, P., VEDAM, H., NOCHUR, A. A framework for managing transitions in chemical plants, *Computers and Chemical Engineering*, v. 29, p. 305-322, 2005.

SUMMERS, A. E. Introduction to layers of protection analysis, *Journal of Hazardous Materials*, v. 104, p. 163-168, 2003.

VALDMAN, B., FOLLY, R., SALGADO, A. Dinâmica, Controle e Instrumentação de Processos. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2008.

VANCAMP, K., Alarm Management by the Numbers: Deeper understanding of common alarm-system metrics can improve remedial actions and result in a safer plant, *Chemical Engineering Essentials for the CPI Professional*, 2016.

VÁSQUEZ, J. W. et al. Alarm management based on diagnosis. IFAC-Papers online, p. 126-131, 2016.

VELÁZQUEZ S. M. S. G. Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. São Paulo. 2006.

VENKATASUBRAMANIAN, V., RENGASWAMY R., YIN K., KAVURI S. N. A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods, *Computer and Chemical Engineering*, v. 27, p. 293-311, 2003.

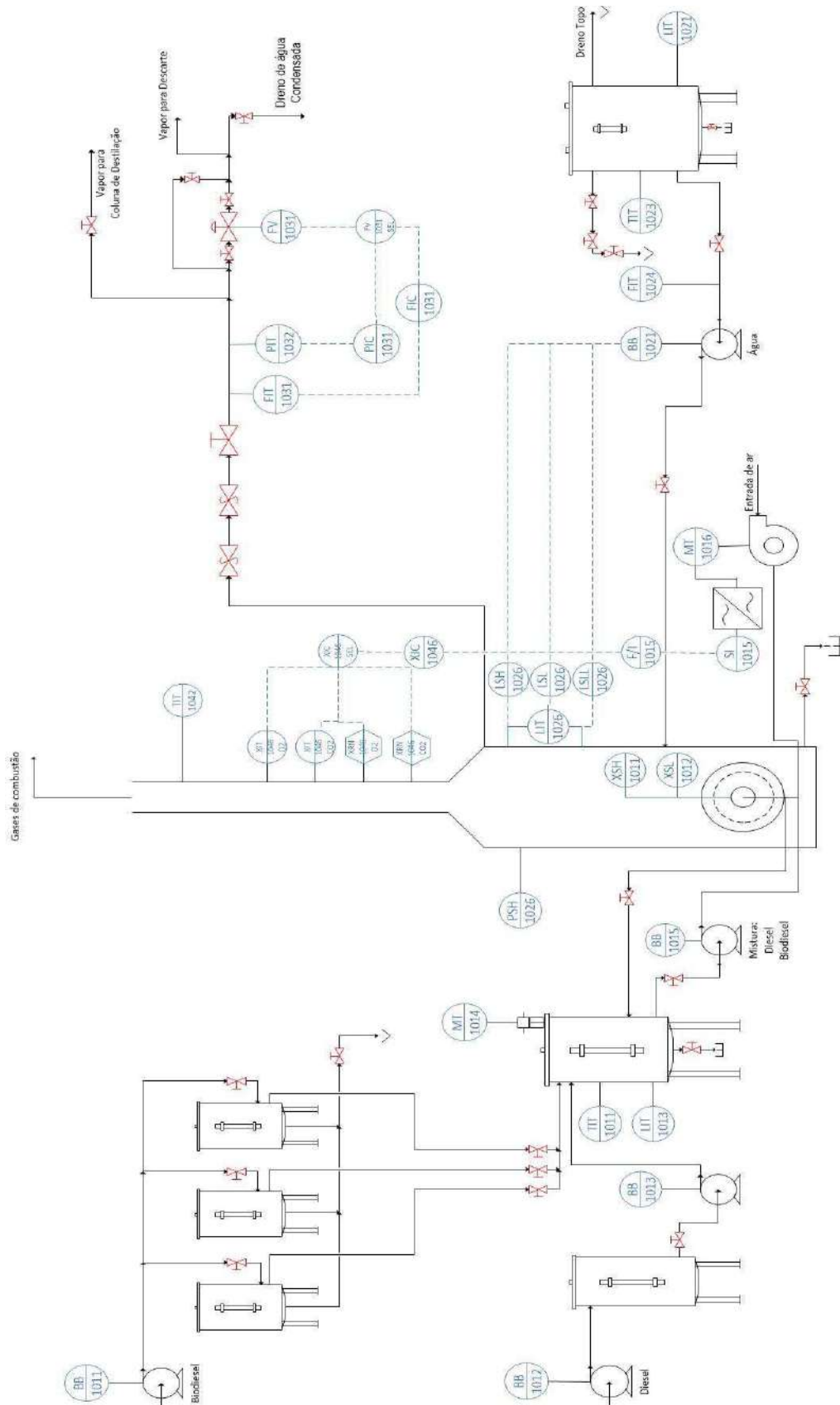
VICHI, F. M., MANSOR, M. T. C. Energia, Meio Ambiente e Economia: O Brasil no Contexto Mundial, *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009.

VISWANATHAN, P. K., SRINIVASAN, R. (2000). A Supervisory Algorithm for Online Identification of Operating Modes and Transitions in Process Plants, Presented at the AIChE Annual Meeting, Los Angeles, USA, November 2000.

WANG, J., CHEN, T. An online method to remove chattering and repeating alarms based on alarm durations and intervals, *Computers and Chemical Engineering*, v. 67, p. 43-52, 2014

WRIGLEY, E. A. Energy and the English Industrial Revolution, Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

APÊNDICE A – DIAGRAMA P&ID DA PLANTA



APÊNDICE B – FÓRMULAS DA SIMULAÇÃO DE ALARMES

Para facilitar o entendimento das fórmulas utilizadas na planilha de simulação de alarmes em Microsoft Office Excel®, as células foram nomeadas da seguinte forma:

LL – *Setpoint* LOLO

L – *Setpoint* LO

H – *Setpoint* HI

HH – *Setpoint* HIHI

DD – Banda morta (*deadband*)

OND – *On-delay*

OFD – *Off-delay*

V – Valor da variável monitorada no segundo *i*

V:V – Intervalo contendo todas as variáveis monitoradas no segundo *i*

V' – Valor da variável monitorada no segundo *i-1*

T – Taxa de variação definida para o alarme RATE

A – Valor da simulação na coluna auxiliar no segundo *i* (1 ou 0)

A' – Valor da simulação na coluna auxiliar no segundo *i-1* (1 ou 0)

A* – Valor da simulação na coluna auxiliar dos demais alarmes configurados para o mesmo rótulo (utilizada para a simulação do alarme RATE)

P – Valor da simulação na coluna principal no segundo *i* (1 ou 0)

P' – Valor da simulação na coluna principal no segundo *i-1* (1 ou 0)

P* – Valor da simulação na coluna principal dos demais alarmes configurados para o mesmo rótulo (utilizada para a simulação do alarme RATE)

Simulação de alarmes com banda morta, sem *delay* (colunas auxiliares):

- Alarmes de muito baixo, baixo, alto e muito alto (LOLO, LO, HI e HIHI)

=SE(V="";0;SE(E(OU(A'="";A'=0);V>L;V<H);0;SE(E(A'=1;V>(L+DD);V<(H-DD));0;1)))

- Alarme de taxa de variação (RATE)

=SE(OU(V="";A*=1);0;SE(E(OU(A'="";A'=0);OU(E((V-V')>0;(V-V')<T);E((V-V')<0;(V-V')>-T);(V-V')=0));0;SE(E(A'=1;OU(E((V-V')>0;(V-V')<(T-DD));E((V-V')<0;(V-V')>(-T+DD));(V-V')=0));0;1)))

- Alarme de falha de comunicação (COMM)

=SE(CONT.VALORES(V:V)=0;1;0)

Simulação de alarmes com banda morta e *delay* (colunas principais):

- Alarmes de muito baixo, baixo, alto e muito alto (LOLO, LO, HI e HIHI)

=SEERRO(SE(V="";0;SE(E(OND<>0;OFD<>0);SE(E(A=1;P'=0);SE(SOMA(DESLOC(A;-OND;0;OND;1))=OND;1;0);SE(E(A=1;P'=1);1;SE(E(A=0;P'=1);SE(SOMA(DESLOC(A;-OFD;0;OFD;1))=0;0;1);0)));SE(E(OND<>0;OFD=0);SE(E(A=1;SOMA(DESLOC(A;-OND;0;OND;1))=OND);1;0);SE(E(OND=0;OFD<>0);SE(E(A=0;SOMA(DESLOC(A;-OFD;0;OFD;1))=0);0;1);A)))));SE(OND=0;A;0))

- Alarme de taxa de variação (RATE)

=SEERRO(SE(OU(V="";P*=1);0;SE(E(OND<>0;OFD<>0);SE(E(A=1;P'=0);SE(SOMA(DESLOC(A;-OND;0;OND;1))=OND;1;0);SE(E(A=1;P'=1);1;SE(E(A=0;P'=1);SE(SOMA(DESLOC(A;-

A;-

OFD;0;OFD;1))=0;0;1);0))) ;SE(E(OND<>0;OFD=0);SE(E(A=1;SOMA(DESLOC(A;-
OND;0;OND;1))=OND);1;0);SE(E(OND=0;OFD<>0);SE(E(A=0;SOMA(DESLOC(A;-
OFD;0;OFD;1))=0);0;1);A)))) ;SE(OND=0;A;0))

- Alarme de falha de comunicação (COMM)

=SEERRO(SE(E(OND<>0;OFD<>0);SE(E(A=1;P'=0);SE(SOMA(DESLOC(A;-
OND;0;OND;1))=OND;1;0);SE(E(A=1;P'=1);1;SE(E(A=0;P'=1);SE(SOMA(DESLOC(
A;-
OFD;0;OFD;1))=0;0;1);0))) ;SE(E(OND<>0;OFD=0);SE(E(A=1;SOMA(DESLOC(A;-
OND;0;OND;1))=OND);1;0);SE(E(OND=0;OFD<>0);SE(E(A=0;SOMA(DESLOC(A;-
OFD;0;OFD;1))=0);0;1);A)))) ;SE(OND=0;A;0))

APÊNDICE C – MAPAS DE CORES DOS DADOS INDIVIDUAIS

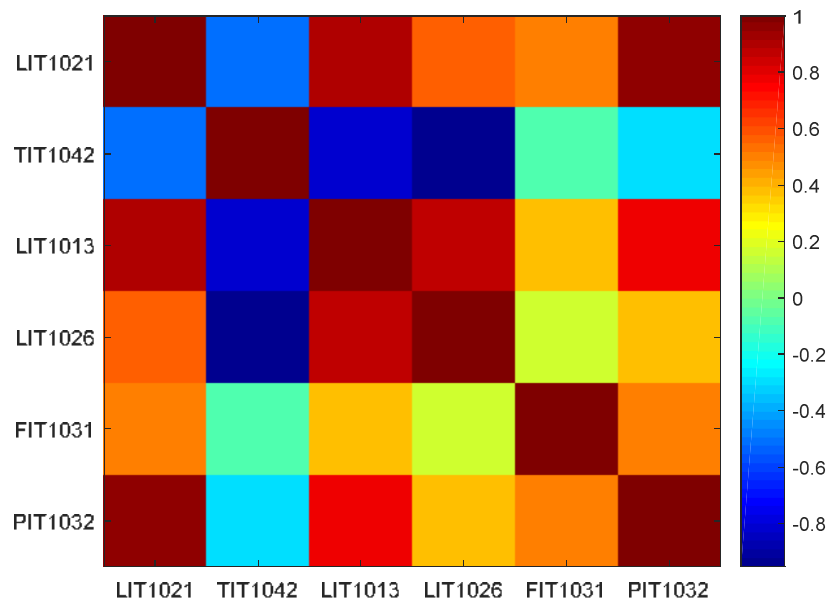


Figura 23: Mapa de cores dos coeficientes de correlação do primeiro dia de operação.

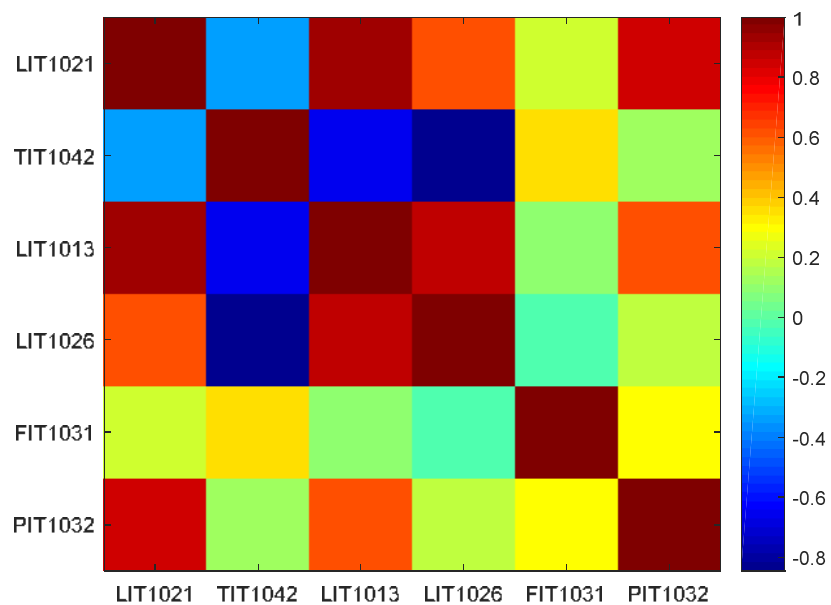


Figura 24: Mapa de cores dos coeficientes de correlação do segundo dia de operação.

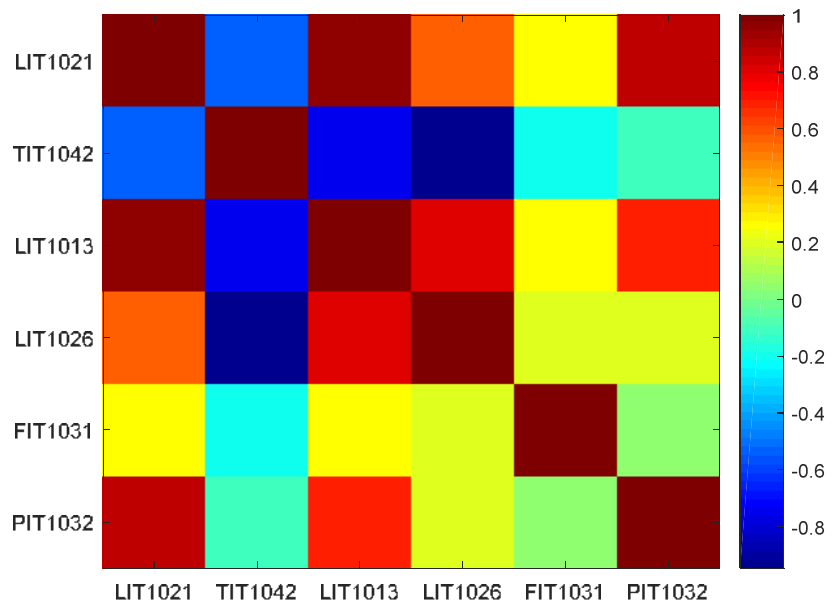


Figura 25: Mapa de cores dos coeficientes de correlação do terceiro dia de operação.

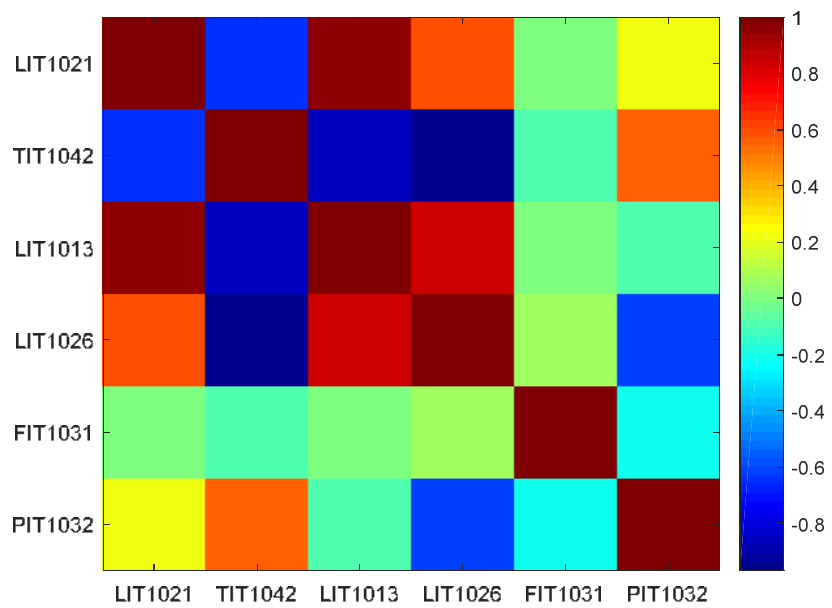


Figura 26: Mapa de cores dos coeficientes de correlação da primeira aula prática no quarto dia de operação.

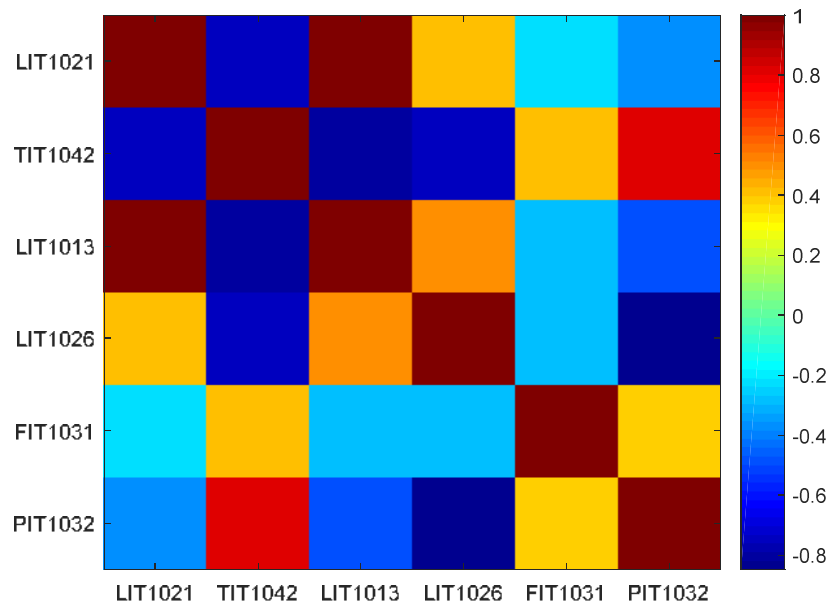


Figura 27: Mapa de cores dos coeficientes de correlação da segunda aula prática no quarto dia de operação.