



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ANÁLISE DE PROCESSO EM CALDEIRAS DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA**

AUTOR: HENRIQUE CARLOS OYAMA

Uberlândia – MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ANÁLISE DE PROCESSO EM CALDEIRAS DA INDÚSTRIA
SUCROENERGÉTICA**

Henrique Carlos Oyama

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do
curso de Engenharia Química

Uberlândia – MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE HENRIQUE CARLOS OYAMA
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 15 DE
DEZEMBRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof.

Orientador (FEQ/UFU)

Prof.

FEQ/UFU

Prof.

FEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Ana, ao meu irmão, Augusto, e aos membros da família pelo amor, carinho e apoio incondicional.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Química da UFU, em especial, ao professor Luís Cláudio, Valéria, Humberto, Mezenga, Erika, Márcia, Ubirajara, Marquinho e Rubens pela minha formação como cidadão e profissional na condição de aprendiz. Como jovem pesquisador na IC, ao orientador Luís Cláudio pelos valiosos ensinamentos, pelo incentivo ao gosto pela pesquisa e discussão que o desenvolvimento dela suscita, pela paciência, dedicação e inspiração.

Aos meus amigos que pude compartilhar de felicidades e inmensuráveis experiências.

Ao grupo PET-EQ que possibilitou meu amadurecimento e oportunidade de desenvolver atividades relacionadas ao ensino, pesquisa e extensão.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram nos meandros deste trabalho.

[...] diante de um tratado cada estudante [...] devia estar consciente de que numa daquelas páginas, talvez numa só linha, fórmula ou palavra, está inscrito seu futuro em caracteres indecifráveis, mas que se tornarão claros "depois": depois do sucesso, do erro ou da culpa, da vitória ou da derrota.

Primo Levi¹

1. LEVI, P. A tabela periódica. Trad. Luiz Sérgio Henriques. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2005, p. 225.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas.....	iii
Resumo	iv
Abstract.....	v
 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	 1
1.1 - PANORAMA BRASILEIRO NO SETOR SUCROENERGÉTICO.....	1
1.2 - OBJETIVO.....	4
1.2.1 - Objetivo Geral	4
1.2.2 - Objetivo Específico	4
 CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA / ESTADO DA ARTE.....	 4
2.1 - SISTEMAS DE COGERAÇÃO	4
2.2 - COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO	5
2.3 - SISTEMAS DE CICLO A VAPOR.....	6
2.4 - PRINCIPAIS ASPECTOS AMBIENTAIS NAS CALDEIRAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO.....	8
2.5 - DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DAS CALDEIRAS A COMBUSTÍVEIS.....	11
2.5.1 - Recuperação de calor dos gases de combustão	15
2.5.2 - Caldeiras flamotubulares.....	16
2.5.3 - Caldeiras aquatubulares.....	18
2.5.4 - Combustão do bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras	21
2.6 - SISTEMA DE CONTROLE DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR.....	24
2.6.1 - Controle de combustão de combustível sólido.....	26
2.6.2 - Controle de nível	32
2.6.3 - Direções e estratégias futuras para o controle de caldeiras	35
2.7 - NORMAS DE SEGURANÇA ADOTADAS EM SISTEMAS DE COMBUSTÃO ..	38
2.8 - ANÁLISE DE SEGURANÇA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	39
2.8.1 - Estudo HAZOP	40
2.8.2 - Características essenciais do estudo HAZOP.....	40
2.8.3 - Procedimento do estudo HAZOP.....	42
2.8.4 - Relação entre HAZOP e LOPA	46
2.8.5 - Uma breve visão do estudo CHAZOP	47
2.8.6 - Método SHARD.....	48

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE CASO: CALDEIRA AQUATUBULAR.....	49
3.1 - METODOLOGIA	49
3.2 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
 CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	 68
4.1 - CONCLUSÕES.....	68
4.2 - SUGESTÕES	69
 ANEXO 1.....	 70
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 73

Lista de Figuras

Figura 1 - Participação da biomassa da cana-de-açúcar na geração elétrica total	2
Figura 2 - Autoconsumo e energia exportada pelas usinas de biomassa de cana-de-açúcar	3
Figura 3 – Histórico de energia exportada para o SIN e cana-de-açúcar processada	6
Figura 4 - Cogeração do tipo <i>topping</i>	7
Figura 5 - Cogeração do tipo <i>bottoming</i>	7
Figura 6 - Faixas de temperatura indicativas para os sistemas de cogeração em <i>topping</i> e <i>bottoming</i>	8
Figura 7 - Cadeia produtiva da cana-de-açúcar	9
Figura 8 - Diagrama básico de uma caldeira	11
Figura 9 - Identificação dos componentes clássicos de uma caldeira	14
Figura 10 - Caldeira com pré-aquecedor de ar de combustão.	15
Figura 11 - Caldeira com economizador	16
Figura 12 - Esquema de uma caldeira flamotubular com três passes e fornalha interna	17
Figura 13 - Caldeira flamotubular típica com três passes e fornalha interna	17
Figura 14 - Esquema básico de uma caldeira aquatubular	19
Figura 15 - Circulação na caldeira aquatubular	20
Figura 16 - Diagrama esquemático de uma caldeira com tiragem balanceada, utilizando economizador e preaquecedor de ar	21
Figura 17 - Caldeira com queima de combustível sólido por deposição	22
Figura 18 - Caldeira com queima de combustível sólido em suspensão	22
Figura 19 - Caldeira tipo AT da fabricante Dedini S. A.	23
Figura 20 - O efeito do <i>Swell</i>	25
Figura 21 - O efeito do <i>Shrink</i>	26
Figura 22 - Controle de combustão simplificado com acionamento independente e aplicado a combustível sólido	28
Figura 23 - Controle de combustão simplificado com correção vazão de vapor/vazão de ar ..	29
Figura 24 - Controle de combustão série – combustível seguindo ar, aplicado a combustível sólido	30
Figura 25 - Controle de combustão paralelo com correção de poder calorífico	31
Figura 26 - Controle de nível a um elemento	33
Figura 27 - Controle de nível a dois elementos	34
Figura 28 - Concepção moderna do controle de nível a três elementos	35

Figura 29 - Sistema de controle moderno com estimador de estados	37
Figura 30 - Diagrama de blocos da análise HAZOP de uma seção/nó de um processo.....	44
Figura 31 - Camadas de proteção para redução de riscos em plantas industriais.....	48
Figura 32 - Diagrama de blocos da caldeira	51
Figura 33 – Pentagrama de pó combustível.....	54
Figura 34 - Fluxograma de processo de uma usina sucroenergética.	70
Figura 35 - Recorte do setor das caldeiras do fluxograma de processo de uma usina sucroenergética	71
Figura 36 - Informações de correntes de uma usina sucroenergética.....	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Impactos ambientais do processamento da cana-de-açúcar sobre os diferentes meios físicos	10
Tabela 2 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor.....	11
Tabela 3 - Descrição dos componentes clássicos de uma caldeira.....	12
Tabela 4 - Características gerais das caldeiras AT da fabricante Dedini S. A.	23
Tabela 5 - Classificação dos métodos de segurança.....	39
Tabela 6 - Principais vantagens do método HAZOP	41
Tabela 7 - Principais limitações do método HAZOP.	41
Tabela 8 - Palavras-guia padrões e seus significados genéricos no método HAZOP	45
Tabela 9 - Palavras-guia válidas e combinação de parâmetros de projeto para linhas de processo - “x” representa as combinações válidas	45
Tabela 10 - Planilha HAZOP para registro de dados	46
Tabela 11 - Formulário HAZOP.....	50
Tabela 12 - Características da caldeira aquatubular para o estudo de caso.	50
Tabela 13 - Identificação das seções de estudo.	51
Tabela 14 – Características recomendadas para água de caldeiras aquatubulares	53
Tabela 15 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 1 (Água de alimentação).	57
Tabela 16 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 2 (Caldeira aquatubular).....	60
Tabela 17 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 3 (Ar de combustão).....	63
Tabela 18 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 4 (Combustível sólido).....	65

Resumo

Este trabalho contemplou o estudo das características técnicas de caldeiras e dos sistemas de cogeração de energia à luz dos aspectos ambientais, sistemas de controle e análise de segurança aplicados na indústria sucroenergética. Tal recorte temático mostrou o panorama energético e ambiental brasileiro com o adensamento do bagaço de cana-de-açúcar como resíduo industrial de rico potencial para cogeração e produção de bioetanol de segunda geração. Foi examinado o processo de comercialização de energia elétrica no setor pela venda de sua produção excedente nos Ambientes de Contratação Regulada e Livre. Em sintonia com o critério de segurança, investigou-se o controle da pressão de vapor e nível do tubulão superior, consideradas as variáveis controladas mais importantes da caldeira. Na sequência, foram apresentadas normas de segurança em sistemas de combustão e diretrizes para análise de prevenção de perdas com destaque para o método HAZOP. Por fim, para consolidar o estudo proposto, definiu-se um cenário genérico de cogeração em uma usina sucroenergética para realizar um estudo de caso, implementando a metodologia HAZOP, porém inspirada na abordagem SHARD como análise individual prévia a ser dirigida aos revisores. Pela avaliação das seções/nós de estudo 1 (Água de alimentação), 2 (Caldeira aquatubular), 3 (Ar de combustão) e 4 (Combustível sólido) do processo selecionado, constatou-se que para dirimir as falhas por corrosão, suprimir ou restringir falhas dos sistemas de controle e eliminar fontes potenciais de poluição atmosférica, entre outros eventos de perigo, a prevenção deve ser o baluarte confluyente das ações e salvaguardas exigidas em concordância com os procedimentos da NR-13.

Palavras-chave: Caldeira, Sucroenergética, Cogeração, Controle, Segurança, HAZOP

Abstract

This work has studied the technical characteristics of boilers and energy cogeneration systems in light of the environmental aspects, control systems and safety analysis applied in the sugar-energy industry. This thematic clipping has showed the Brazilian energy and environmental panorama with the setting of sugarcane bagasse as an industrial residue with a high potential for cogeneration and the production of second generation bioethanol. The process of commercialization of electric energy in the sector was examined by the sale of its surplus production in the Regulated Contracting Environment and Free Contracting Environment. In accordance with the safety criterion, the control of the vapor pressure and upper steam drum level, both considered the most important controlled variables of the boiler, were investigated. Following, safety standards in combustion systems and guidelines for loss prevention analysis were presented, highlighting the HAZOP method. Finally, to consolidate the proposed study, a generic scenario of cogeneration was defined in a sugar-energy industry to carry out a case study, implementing the HAZOP methodology, but inspired by the SHARD approach as a previous individual analysis to be sent to the reviewers. By the evaluation of study nodes 1 (Feed water), 2 (Water tube boiler), 3 (Combustion air) and 4 (Solid fuel) of the selected process, it was verified that, in order to settle failure by corrosion, suppress or restrict failures of control systems and eliminate potential sources of air pollution, among other hazard events, prevention must be the confluent bulwark of the actions and safeguards required in agreement with the procedures of NR-13.

Keywords: Boiler, Sugar-energy, Cogeneration, Control, Safety, HAZOP

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - PANORAMA BRASILEIRO NO SETOR SUCROENERGÉTICO

A história da cana-de-açúcar no Brasil se confunde com a própria memória nacional, uma vez que o advento das plantações da cultura no país data do século XVI (Dean, 1997). Atualmente, o Brasil se consagra, e se perpetuará nas próximas décadas, como o maior produtor e exportador mundial de açúcar, e o segundo maior produtor mundial de etanol, ficando atrás somente da produção estadunidense de etanol de milho. Ao mesmo tempo, o país é o segundo maior partícipe exportador agrícola mundial, desempenhando papel decisivo nos mercados internacionais (OECD/FAO, 2016).

Em linhas regionais, o Brasil contempla dois períodos distintos de safra da cana-de-açúcar: de setembro a março no Norte-Nordeste; e de abril a novembro no Centro-Sul. Desta forma, o país produz etanol durante quase o ano inteiro, sendo também o único grande *player* em dimensão mundial com safra no primeiro semestre do ano. As melhores usinas nacionais produzem em torno de 71 kg de açúcar e 42 litros de etanol para cada tonelada de cana-de-açúcar processada. (NOVACANA, 2017). Conforme a UNICA (2017) - União da Indústria de Cana-de-Açúcar -, na safra de 2016/2017, foram processados 651,841 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produzindo 38,734 milhões de toneladas de açúcar e 27,254 milhões de m³ de etanol.

Em face do panorama brasileiro de premência para auferir um modelo de mundo mais ecoeficiente - confluência de gestão ambiental aos objetivos econômicos, pautada no consumo racional da energia e minimização do uso de recursos naturais -, as usinas do setor sucroenergético empregam sistemas de cogeração com a produção simultânea de calor e trabalho para o processo de produção de açúcar e etanol, sendo utilizado o bagaço de cana-de-açúcar como combustível das caldeiras. O vapor gerado destes equipamentos do sistema de utilidades pode ser aplicado para acionamento de sopradores, moendas, bombas, limpeza, esterilização, aquecimento e conversão em energia elétrica (ENSINAS et al., 2014).

Como base de comparação para esse último uso, em 2015, a participação da bioeletricidade na geração nacional de energia foi de 4,1%, mantendo o mesmo patamar obtido em 2014 com 3,9%. As usinas sucroenergéticas injetaram no Sistema Interligado Nacional (SIN), em média, 2,5 GW, valor 18,5% superior ao total verificado em 2014. A Figura 1 apresenta a participação sazonal da biomassa de cana-de-açúcar na geração de energia elétrica em 2014/2015. Nota-se a complementariedade com a fonte hídrica, uma vez

que o aumento da geração da bioeletricidade ocorre durante a safra, período concomitante ao de estiagem (EPE, 2016).

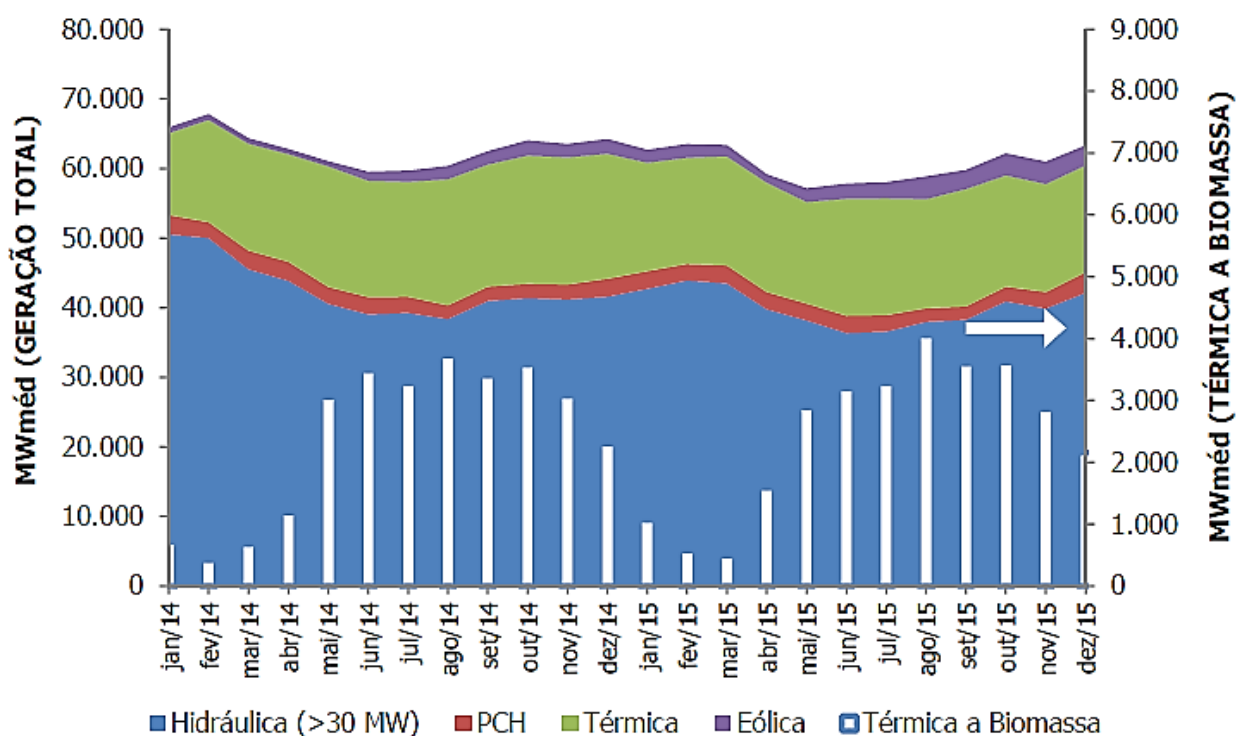
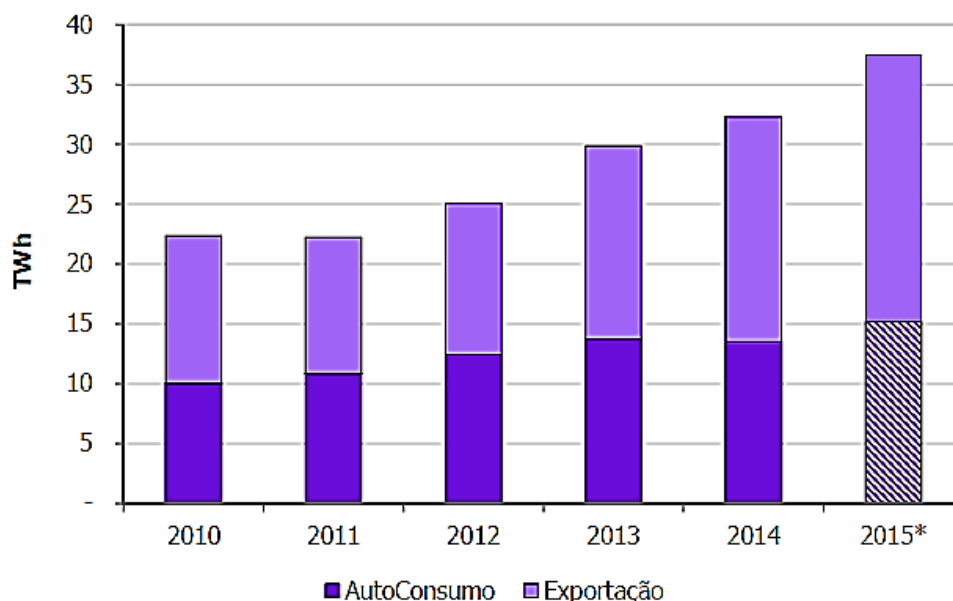


Figura 1 - Participação da biomassa da cana-de-açúcar na geração elétrica total.
Fonte: CCEE, 2015a.

Além de possibilitar às unidades sucroenergéticas a autossuficiência de energia mecânica, térmica e elétrica, o sistema de cogeração permite a produção de excedente de energia elétrica comercializáveis no sistema elétrico nacional (NETO; RAMON, 2002). Conforme observado nos anos anteriores, as unidades continuaram seu movimento de crescente eficiência, com a troca de caldeiras antigas por outras de maior pressão de operação. Esta evolução se deve, em especial, aos incentivos federais, a exemplo de linhas de financiamento do BNDES para fomento do parque gerador, e dos movimentos de fusão ocorridos no setor. De acordo com a Figura 2, nos últimos anos foi também observado um crescimento na geração de energia elétrica com esta fonte residual, seja para o autoconsumo, em virtude do aumento da produção de etanol e açúcar, seja para a exportação de energia ao SIN (EPE, 2016).



Nota: * Dados de Autoconsumo para 2015 preliminares da EPE (2015).

Figura 2 - Autoconsumo e energia exportada pelas usinas de biomassa de cana-de-açúcar. Fonte: EPE, 2015; CCEE, 2015b.

Ademais, o aproveitamento dos componentes lignocelulósicos do bagaço e resíduos agrícolas da cana-de-açúcar (RAC) para a produção de açúcar e bioetanol de segunda geração (E2G) adensam os meandros de pesquisa e evolução tecnológica sob a égide da sustentabilidade do desenvolvimento. Apesar dos desafios de incentivos governamentais neste avanço, ao longo dos últimos anos, foram construídas unidades pioneiras produtoras de bioetanol lignocelulósico em três cidades brasileiras: Piracicaba (SP), São Manoel (SP) e São Miguel dos Campos (AL), sendo de responsabilidade das empresas Raízen, Usina São Manoel em parceria com o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e GranBio, respectivamente.

Em uma de suas reflexões, que caracterizam uma política energética vindoura, SACHS (2000) sugere uma (re)invenção da sociedade moderna: uma “civilização de biomassa” que deverá conseguir mitigar a enorme dívida social acumulada ao longo dos anos, ao mesmo tempo em que reduzirá a dívida ecológica. Neste sentido, o sistema de cogeração da indústria sucroenergética transpõe não como uma panaceia energética nacional, mas como complemento e guarida para a oferta interna de energia elétrica sustentável ao país.

1.2 - OBJETIVO

1.2.1 - Objetivo Geral

Realizar a revisão de sistemas nas áreas de automação de processos químicos e segurança industrial; estudar processos para uma caldeira com alimentação de bagaço de cana-de-açúcar; avaliar o cenário nacional e regional, bem como investigar tecnologias para a cogeração de energia; e avaliar segurança de caldeiras da indústria sucroenergética;

1.2.2 - Objetivo Específico

Estudar as características de caldeiras e de cogeração de energia; investigar aspectos técnicos das caldeiras utilizadas na indústria sucroenergética; selecionar tecnologia de interesse para um estudo de caso e avaliar a segurança e controle em sua operação.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA / ESTADO DA ARTE

2.1 - SISTEMAS DE COGERAÇÃO

A cogeração pode ser definida como a “produção conjunta, em processo sequencial, de eletricidade (ou energia mecânica) e energia térmica útil” (LIZZARAGA, 1994). Em termos normativos, de acordo com a Resolução ANEEL 235/2006, Art.3, cogeração é estabelecido como um processo operado para fins da produção combinada das utilidades, calor e energia mecânica (geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica), a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária de combustível para qualquer que seja o ciclo termodinâmico. A opção pela cogeração se desvela como possibilidade de obter uma conversão e aproveitamento mais eficientes de energia quando comparada à geração independente de somente uma forma de energia - caso das centrais termelétricas, por exemplo (ENSINAS et al., 2014). Assim, a cogeração galga como meandro alternativo para minorar, sobretudo, problemas ambientais e energéticos no mundo.

2.2 - COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO

A partir da “crise do apagão” que instigou o racionamento de energia em 2001, o governo brasileiro introduziu novas regras no mercado de energia elétrica. O Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004 regulamentou a “comercialização de energia elétrica entre concessionários, permissionários e autorizados de serviços e instalações de energia elétrica, bem como destes com seus consumidores no Sistema Interligado Nacional – SIN” (Brasil, 2004). Nesta concepção, foram estabelecidos dois ambientes para o processo de venda de energia elétrica: Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL).

Sob o ponto de vista da cogeração nas usinas do setor sucroenergético, existem essas duas alternativas para a venda da produção elétrica excedente. A primeira opção reúne os leilões de compra de energia elétrica realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), por delegação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), no âmbito do ACR, em que são concentradas as operações de compra e venda de energia por meio de licitações onde ocorrem os leilões de energia nova (A-3 e A-5), de reserva (LER) e de fontes alternativas (LFA), e correspondem à ampla fonte de compra das concessionárias de distribuição que integram o SIN (BARJA, 2006; EPE, 2016). Vale destacar que o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado por decreto em 2004, se enquadra no ACR, pois sua contratação é regulada através de condições específicas definidas pela Aneel (CCEE, 2017).

A segunda alternativa de venda dos excedentes das centrais de cogeração se encontra no âmbito da geração distribuída no ACL. Neste ambiente, atuam os agentes de geração, de comercialização, de importação, de exportação e os consumidores livres, em contratos bilaterais de compra e venda de energia livremente negociados, não sendo permitida às distribuidoras a aquisição de energia neste mercado (EPE, 2016; ABRADÉE, 2017).

Dentre as 376 usinas a biomassa de cana-de-açúcar em operação em 2015, 40% exportaram energia para o SIN. Apesar de crescente, desse montante somente 16% comercializaram energia em leilões no Ambiente de Contratação Regulada (EPE, 2016). A Figura 3 destaca o aumento do montante exportado para o SIN (ACR e ACL), o total contratado por modalidade via leilões de energia, e a quantidade de cana-de-açúcar processada ao longo do tempo.

Observa-se também que por ser uma tecnologia consagrada pelo setor, as usinas sucroenergéticas utilizam sistemas a vapor com equipamentos, amiúde, de fabricação nacional. Uma gama de fabricantes de caldeiras, turbinas a vapor e geradores elétricos são encontrados (por exemplo, as fabricantes de caldeiras industriais Dedini S.A. e Caldema) que atendem, inclusive, ao mercado externo (ENSINAS et al., 2014).

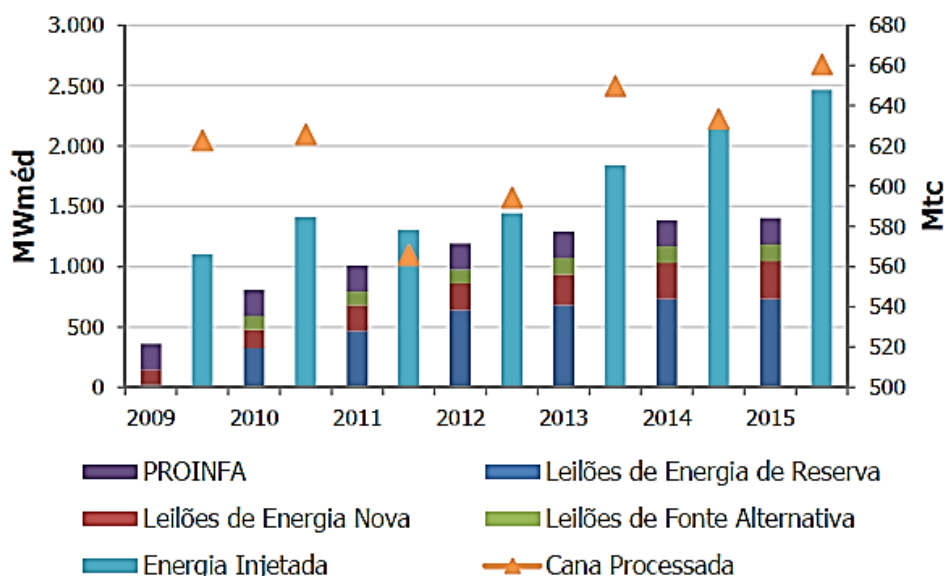


Figura 3 – Histórico de energia exportada para o SIN e cana-de-açúcar processada.
Fonte: EPE, 2016

Na Figura 3, confere-se que na safra de 2015/2016, a produção nacional de cana-de-açúcar foi de 666,824 milhões de toneladas, sendo que no estado de Minas Gerais se processaram 64,853 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (cerca de 10% do total estimado); ao passo que em São Paulo, como referência do maior estado produtor da matéria-prima, etanol e açúcar brasileiro, foram processados 368,323 milhões de toneladas de cana-de-açúcar ou aproximadamente 55% da produção nacional (UNICA, 2017).

2.3 - SISTEMAS DE CICLO A VAPOR

Os sistemas de cogeração são classificados em dois grupos de acordo com a sequência relativa em que a energia é utilizada no processo produtivo: geração anterior (a montante) de energia eletromecânica (*topping cycle*) e geração posterior (a jusante) de energia eletromecânica (*bottoming cycle*). As Figuras 4 e 5 representam os fluxogramas básicos da tecnologia de cogeração do tipo *topping* e *bottoming*, respectivamente, e a Figura 6 indica a distribuição racional da cogeração em se aproveitar toda a faixa da temperatura

disponibilizada pelo combustível para a produção sequencial de eletricidade e calor útil. De acordo com CARVALHO et al. (2004), é usual a utilização de calor nas indústrias na faixa entre 120°C e 200°C, tipicamente para os processos de secagem, cozimento, evaporação, etc.; por outro lado, a geração de energia elétrica trabalha em níveis mais elevados de temperatura, na faixa entre 400°C e 950°C.

Em outras palavras, no ciclo de vapor do tipo *topping*, o primeiro aproveitamento da energia disponibilizada pelo combustível é aplicado para geração de energia eletromecânica (altas temperaturas) e, em seguida, para o aproveitamento de calor útil. Por esta razão, tradicionalmente, estes sistemas de ciclo a vapor são adotados pelas usinas sucroenergéticas, nas quais o bagaço é utilizado para geração de vapor vivo nas caldeiras que aciona turbinas de contrapressão acopladas a um gerador elétrico; o vapor de alta pressão é extraído para acionamento de picadores, desfibradores e moendas, enquanto o vapor de escape da turbina à baixa pressão é empregado como fonte térmica em diversos equipamentos da usina (ENSINAS et al., 2014).



Figura 4 - Cogeração do tipo *topping*. Fonte: BARJA, 2006.

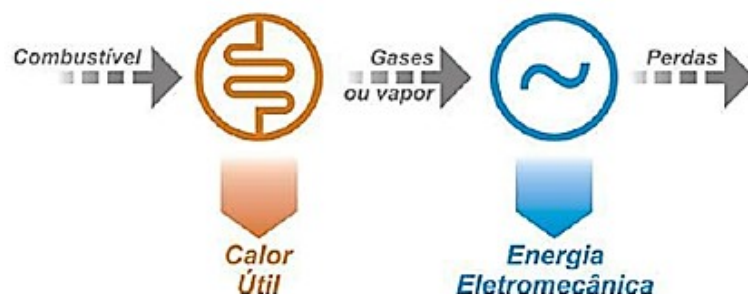


Figura 5 - Cogeração do tipo *bottoming*. Fonte: BARJA, 2006.

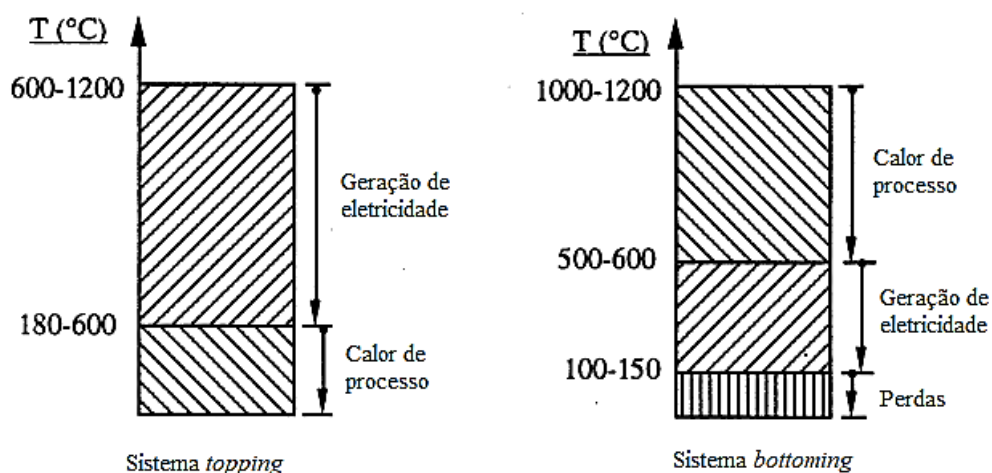


Figura 6 - Faixas de temperatura indicativas para os sistemas de cogeração em *topping* e *bottoming*. Fonte: adaptado de COGEN EUROPE, 2001.

Segundo ENSINAS et al. (2014), o aumento considerável dos níveis de temperatura e pressão do vapor produzido pelas caldeiras dos sistemas de cogeração possibilitou o aumento de eletricidade excedente gerada que pode ser vendida às concessionárias. Em adição à maior eficiência das caldeiras, o uso de turbinas de extração-condensação tornou possível a geração de energia elétrica e sua comercialização, inclusive, no período de entressafra.

2.4 - PRINCIPAIS ASPECTOS AMBIENTAIS NAS CALDEIRAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Conforme CAMARGO (1990), as antigas caldeiras utilizadas no setor sucroenergético até a década de 1980 admitiam uma concepção que se fundamentava na eliminação do bagaço, considerado como rejeito indesejável do processo. Porém, em razão da necessidade atual e vindoura de geração de energia a partir de fontes renováveis e da busca incessante por um modelo de indústria mais ecoeficiente, o bagaço da cana-de-açúcar passou a ser visto como subproduto ou resíduo industrial de rico potencial para cogeração (ou geração de calor e eletricidade para o próprio processo) e produção de bioetanol (E2G). A Figura 7 mostra a cadeia produtiva da cana-de-açúcar com relevo para as etapas que matizam essas aplicações.

Os danos ambientais (compreendidos como lesões ao meio ambiente com alteração adversa do equilíbrio ecológico e da qualidade de vida) ou impactos ambientais mais acentuados oriundos da queima do bagaço nas caldeiras agroindustriais estão relacionados à poluição do ar, conforme mostra a Tabela 1. Neste sistema de geração de energia, ocorrem

emissões de gases, monóxido e dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, os quais intensificam o efeito estufa. Soma-se a isto, o efeito nocivo à saúde humana dependendo, em geral, da concentração do poluente no ambiente e seu tempo de exposição.

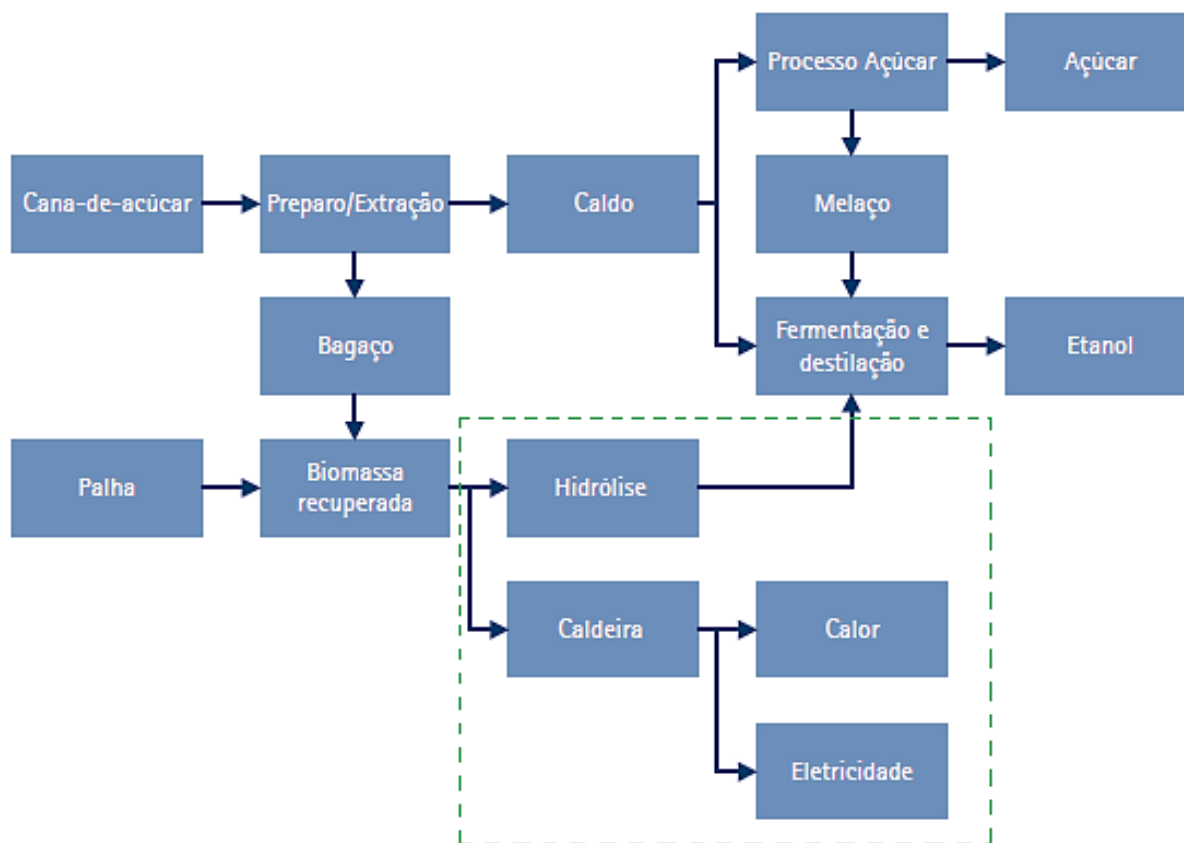


Figura 7 - Cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Fonte: adaptado de EPE, 2007.

De acordo com LORA (2000), para altas concentrações desses poluentes gerados das caldeiras, são agravados não apenas o estado de saúde de pacientes com doenças respiratórias, mas também constituem risco iminente à população local (o gás CO, como poluente altamente tóxico, afeta a capacidade do sangue de transportar oxigênio e o NO₂, como exemplo do grupo dos óxidos de nitrogênio, atua sobre os alvéolos pulmonares, podendo provocar enfisema, inibir as defesas pulmonares e resultar em efeito fitotóxico). Além desses poluentes, o sistema das caldeiras, na combustão de compostos contendo carbono e traços de cloro, compõe uma fonte antropogênica de formação de dioxinas, um poluente orgânico persistente (POP) de grande espectro de consequências à saúde humana (disrupção endócrina, deficiências imunológicas, cânceres, danos neurológicos) e ainda com poucos trabalhos realizados no âmbito nacional (PERLATTI, 2012). O efeito bioacumulativo de alguns POPs,

sobretudo do DDT, foi notoriamente documentado na obra “Primavera Silenciosa” de CARSON (2010).

Tabela 1 - Impactos ambientais do processamento da cana-de-açúcar sobre os diferentes meios físicos.

Meio físico	Recebimento e lavagem	Moenda / Geração de vapor	Destilação	Tratamento do caldo	Evaporação e cozimento em tachos	Centrifugação e secagem
Ar		-Emissão de particulados; -Emissão de NO _x ; -Bagacinho no ar.				
Água	-Águas de lavagem.		-Vinhaça		-Condensados.	
Solo		-Cinzas.		-Torta de filtro.		

Fonte: adaptado de LORA, 2000.

Os materiais particulados, em termos de impactos ambientais, também imprimem efeitos estéticos indesejáveis pela cor escura que apresentam, com alteração da paisagem local e deposição das partículas em suspensão no ar sobre as residências. As cinzas da caldeira, por outro lado, quando reutilizados nas lavouras de cana-de-açúcar da própria indústria, tornam-se ecologicamente viáveis, pois, uma vez incorporado ao solo, suscita um melhoramento na capacidade de retenção de umidade, corrige parcialmente a acidez e proporciona um melhor crescimento das culturas (BRUNELLI; PISANI JÚNIOR, 2006).

Diante dos subprodutos da colheita e processamento industrial da cana-de-açúcar, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na resolução nº 436, de 22 de dezembro de 2011, estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 2 de janeiro de 2017. Assim, a Tabela 2 apresenta os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor, a partir da combustão externa de biomassa de cana-de-açúcar. Ressalta-se também que a Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002, definiu que sistemas de tratamento térmicos de resíduos não podem ultrapassar o limite de 0,50 ng/Nm³ de dioxina (BRASIL, 2002).

Tabela 2 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor.

Potência Térmica Nominal (MW)	Material Particulado ⁽¹⁾	NOx ⁽¹⁾ (como NO ₂)
MW < 50	520	NA ⁽²⁾
50 ≤ MW ≤ 100	450	350
MW > 100	390	350

⁽¹⁾ os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca a 8% de oxigênio.

⁽²⁾ NA – Não Aplicável.

Fonte: BRASIL, 2011.

2.5 - DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DAS CALDEIRAS A COMBUSTÍVEIS

Uma caldeira a vapor - também chamada de gerador de vapor pela importância no setor industrial (TEIR, 2003)- é engendrada pelo sistema vapor-água (lado de água da caldeira) e pelo sistema combustível-ar-gás da combustão (lado de fogo da caldeira), conforme mostra a Figura 8. Neste último sistema, a combustão, promovida na fornalha, converte a energia química do combustível em energia térmica, a qual é transferida para o lado de água da caldeira para geração de vapor. As entradas deste sistema são o combustível e o ar necessário para sua combustão (BEGA, 1989).

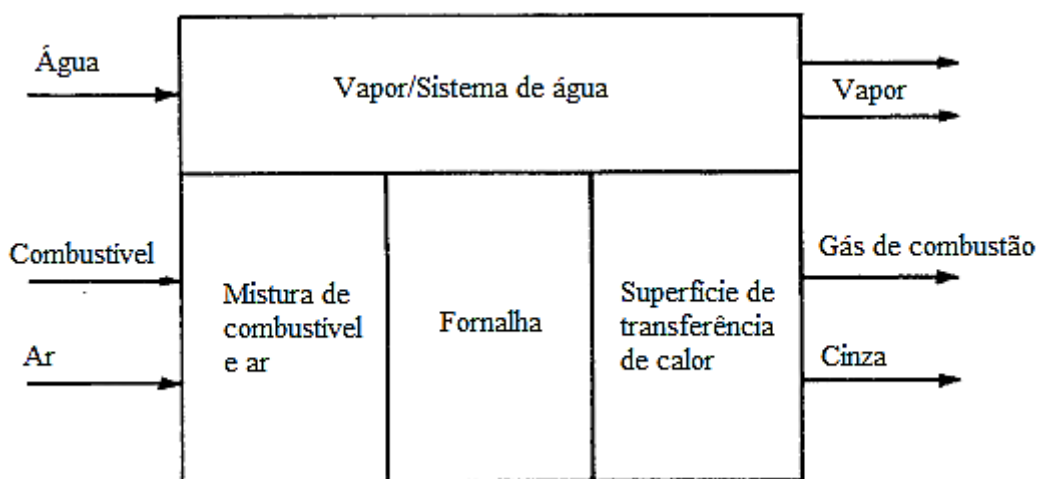


Figura 8 - Diagrama básico de uma caldeira. Fonte: adaptado de DUKELOW, 1991.

O processo de adicionar calor para converter água em vapor tem uma constante de tempo que depende das características específicas da instalação. Os fatores que afetam esta

constante de tempo incluem o armazenamento de calor do sistema, os coeficientes de transferência de calor em diferentes partes do sistema, as massas de metal e dos materiais refratários, suas configurações e várias outras particularidades. Em relação ao controle do processo, amiúde, considera-se aceitável que a constante de tempo total se apresenta na aproximação de minutos. Para a maioria dos procedimentos de análises de um controle de caldeira, o sistema pode ser concebido como alcançando 63,21% da resposta final em um intervalo de tempo igual a uma constante de tempo, ou seja, um sistema de primeira ordem é suficiente neste estudo (DUKELOW, 1991).

As caldeiras a combustíveis modernas são classificadas em dois tipos representativos, conforme a forma de transferência de calor para vaporizar a água: flamotubulares (também conhecidas como caldeiras fumotubulares, pirotubulares ou fogotubulares) e aquatubulares (ou aguatubulares). Ressalta-se que neste trabalho serão abordadas de uma maneira genérica as diferenças inerentes dessas categorias de caldeiras. Além desta classificação, as caldeiras que empregam bagaço como combustível podem queimar o sólido por deposição ou em suspensão.

Os componentes clássicos dos geradores de vapor mais completos, sobretudo quando destinados à queima de combustíveis sólidos, são o cinzeiro, a fornalha, câmara de combustão, tubos evaporadores, superaquecedor, economizador, pré-aquecedor de ar, canais de gases e chaminé (os acessórios de aproveitamento de calor serão mais bem descritos no detalhamento das caldeiras investigadas), conforme definidos na Tabela 3 e identificados no esquema da Figura 9 (NOGUEIRA et al., 2005).

Tabela 3 - Descrição dos componentes clássicos de uma caldeira.

(A) Cinzeiro	Local onde se depositam cinzas e ou, eventualmente, restos de combustíveis que atravessam o suporte de queima sem completarem sua combustão.
--------------	--

Continua

Continuação da Tabela 3

(B) Fornalha	Ela é constituída pelos queimadores (no caso de combustíveis líquidos e gasosos) ou grelhas (para combustíveis sólidos) e/ou câmaras de combustão; ocorre, em seu interior, o advento do processo de queima dos combustíveis e de onde são gerados os produtos da combustão. Esta parte do equipamento trabalha de maneira a evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar a temperatura do combustível até a combustão, propiciar condições ideais para a combustão completa, promover turbulência na mistura ar-combustível, e impedir a troca de calor entre os gases quentes oriundos da combustão e o ambiente.
(C) Câmara de combustão	Em consonância para proporcionar proteção e suporte aos queimadores e grelhas, a câmara de combustão é o volume no qual se desenvolve a chama e se completa a combustão, uma vez que o combustível deve ser consumido antes dos produtos dessa combustão serem conduzidos no feixe de tubos. Por vezes, confunde-se com a própria fornalha, dela fazendo parte; outras vezes, separa-se completamente.
(D) Tubos Evaporadores	Correspondem ao vaso fechado e pressurizado com tubos contendo água no seu interior, a qual, ao receber calor, transforma-se em vapor.
(E) Superaquecedor	Responsável pela elevação da temperatura do vapor saturado gerado na caldeira.

Continua

Continuação da Tabela 3

(F) Economizador	Componente onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão direcionados à chaminé.
(G) Pré-aquecedor de ar ou pré-ar	Componente cuja função é aquecer o ar de combustão para introduzi-lo na fornalha, aproveitando o calor sensível dos gases da combustão.
(H) Canais de gases	São trechos intermediários ou finais de circulação dos gases de combustão até a chaminé. Podem ser de alvenaria ou de chapas de aço, conforme a temperatura dos gases que neles circulam.
(I) Chaminé	É a parte que garante a expulsão dos gases de combustão com velocidade e altura determinadas para o ambiente e, indiretamente, promove a boa circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema pelo efeito de tiragem.

Fonte: NOGUEIRA et al., 2005.

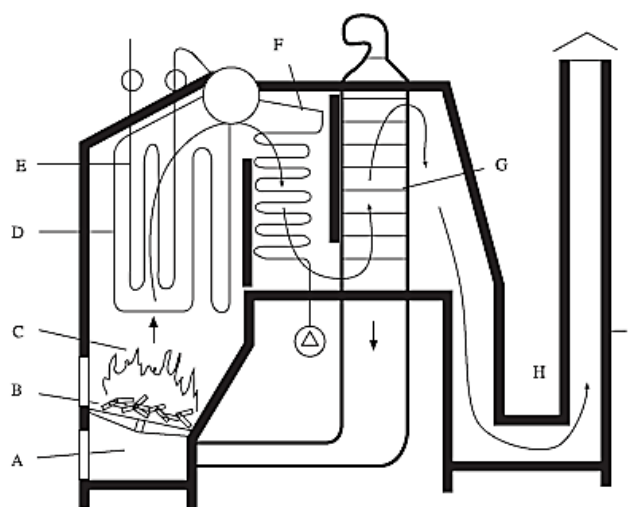


Figura 9 - Identificação dos componentes clássicos de uma caldeira. Fonte: PERA, 1990.

2.5.1 - Recuperação de calor dos gases de combustão

Para que as perdas de calor dos gases de combustão sejam reduzidas, trocadores de calor separados devem ser adicionados à caldeira para recuperar mais calor e esfriar com maior eficiência os gases de combustão. O pré-aquecedor de ar de combustão, mostrado na Figura 10, é uma das maneiras de recuperação de calor.

De acordo com a Figura 10, o gás de combustão de saída da caldeira passa através do pré-aquecedor de ar de combustão. Da mesma forma, o ar de entrada do sistema também passa pelo pré-aquecedor de ar antes de ser misturado com o combustível. Uma vez que a temperatura dos gases de combustão é superior à temperatura do ar, o calor é transferido do gás de combustão para o ar de combustão através da superfície de transferência de calor de convecção do pré-aquecedor de ar de combustão. Assim, o calor adicionado ao ar de combustão que entra na sequência na fornalha, aumenta o processo de combustão e reduz o requisito de combustível. Segundo DUKELOW (1991), com esta configuração, aproximadamente 1% do combustível é salvo para cada aumento de 40°F (ou 22,22°C) na temperatura do ar de combustão.

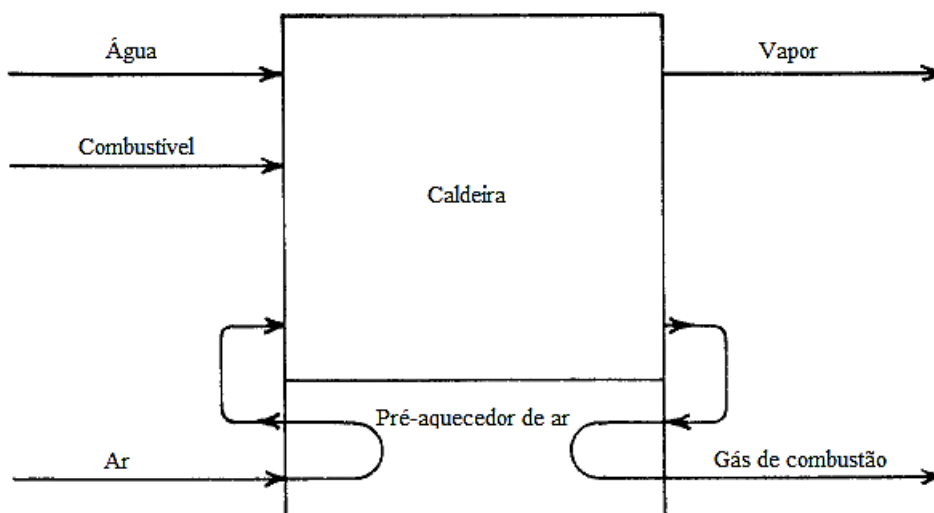


Figura 10 - Caldeira com pré-aquecedor de ar de combustão. Fonte: adaptado de DUKELOW, 1991.

O emprego de um economizador constitui outro método importante de recuperação de calor. O arranjo deste tipo de trocador de calor é mostrado na Figura 11, em que o gás de combustão de saída da caldeira entra no economizador, onde está em contato com a superfície de transferência de calor, na forma de tubos de água, através dos quais flui a água de alimentação da caldeira. Uma vez que o gás de combustão está a uma temperatura mais

elevada do que a água, o gás de combustão é resfriado e a temperatura da água aumenta. De maneira análoga ao pré-aquecedor de ar, o aumento do calor na água de alimentação reduz o requisito de combustível para caldeira e ar de combustão, sendo que aproximadamente 1% do combustível de entrada é salvo para cada aumento de 10°F (ou 5,56°C) na água de alimentação à medida que passa pelo economizador (DUKELOW, 1991).

Ambos os tipos de trocadores de calor definidos são comumente utilizados em caldeiras de dimensões elevadas. Quando tanto um pré-aquecedor de ar como um economizador são usados, como ocorre em caldeiras completas com todos os componentes clássicos, a prática industrial consiste em passar os gases de combustão primeiro através do economizador e depois pelo pré-aquecedor de ar de combustão (DUKELOW, 1991).

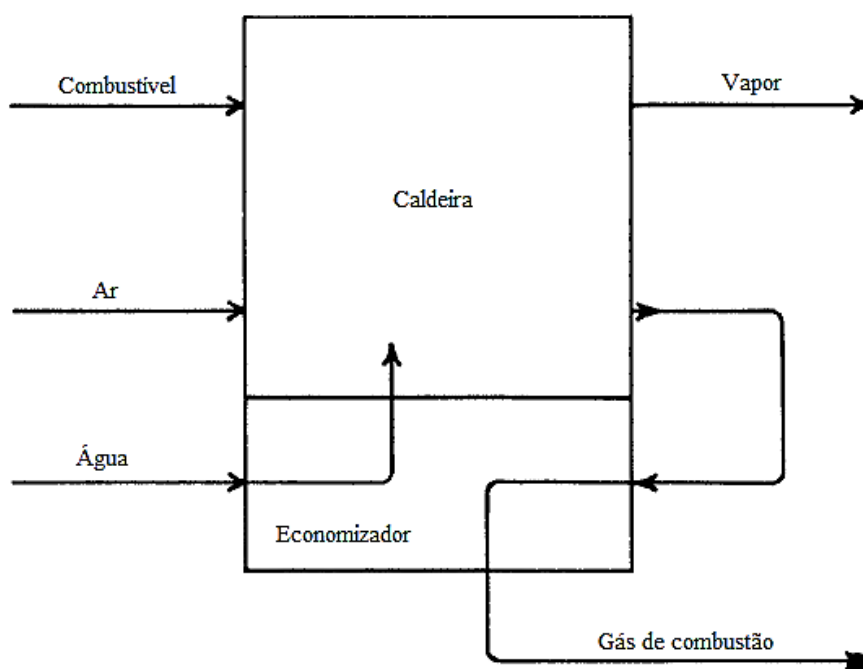


Figura 11 - Caldeira com economizador. Fonte: adaptado de DUKELOW, 1991

2.5.2 - Caldeiras flamotubulares

As caldeiras flamotubulares são utilizadas na maior parte das unidades industriais de pequeno e médio porte (DUKELOW, 1991). O baluarte das caldeiras flamotubulares, historicamente consagrada como o primeiro tipo de caldeira construída, é a circulação da água ao redor de diversos tubos, montados entre espelhos na forma de um único feixe tubular e dentro dos quais passam os gases de combustão, em dois ou mais passes (o maior número de passagens pelos tubos permite um melhor aproveitamento da energia disponível nesses gases),

em direção à chaminé (BAZZO,1992), conforme apresentado pelo esquema da Figura 12 e seu retrato típico na Figura 13. Em outras palavras, o lado de fogo é impelido por dentro dos tubos e o lado de água, por fora dos tubos da caldeira.

Assim, o vapor é gerado pelo calor transferido dos gases quentes da combustão para a água que os circunda, através das paredes de material metálico dos tubos. O resfriamento desses gases de combustão é função, sobretudo, da condutividade e área dos tubos, e da diferença de temperatura entre os gases e água da caldeira (BEGA, 2003).

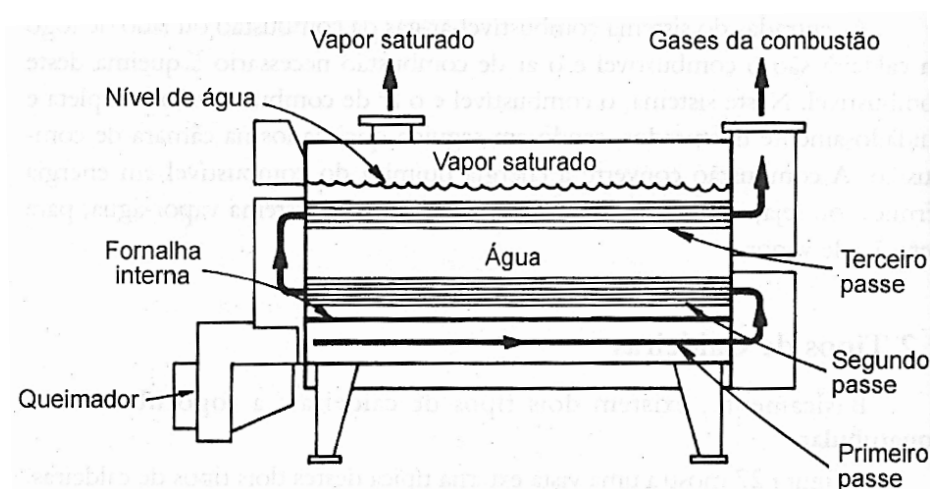


Figura 12 - Esquema de uma caldeira flamotubular com três passes e fornalha interna.
Fonte: BEGA, 2003.

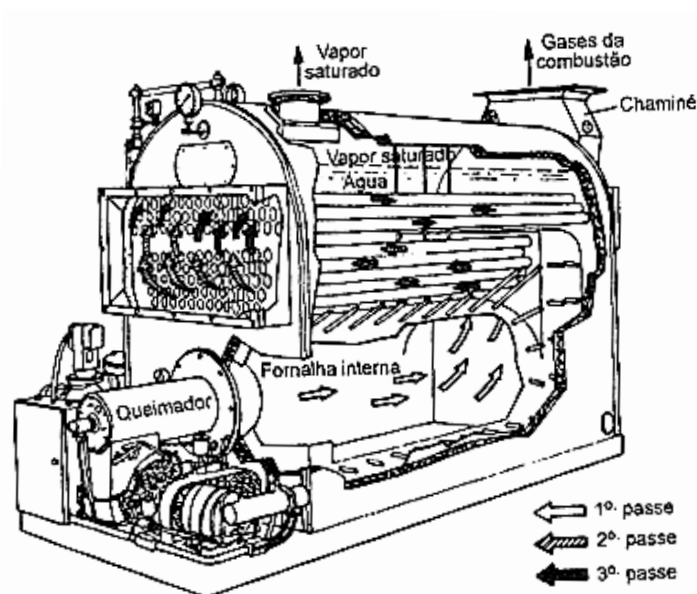


Figura 13 - Caldeira flamotubular típica com três passes e fornalha interna.
Fonte: BEGA, 2003

As caldeiras flamotubulares podem ser construídas com fornalhas internas ou externas. Também conhecidas como caldeiras escocesas, as caldeiras flamotubulares de fornalhas internas são projetadas para queimarem óleo ou gás natural. Apesar de apresentarem um bom rendimento térmico, em torno de 84%, elas são limitadas a pressões inferiores a 15 bar e produção de 15 t/h de vapor (somente saturado), por razões de construção (dimensões exageradas são obtidas para valores superiores), tornando-as menos competitivas quando comparadas às caldeiras aquatubulares. Além disso, de acordo com BAZZO (1992), sua forma construtiva, muito vulnerável aos perigos de explosão, prodigaliza o ambiente de operação – a pressão de vapor atua diretamente sobre as paredes da fornalha, tubos, carcaça externa e espelhos.

Por outro lado, a opção por fornalhas externas admite a utilização de combustíveis sólidos, como lenha ou carvão fóssil. A fornalha, neste caso, é envolvida por paredes d'água, ensejando maior eficiência de queima dos sólidos, uma das características também das caldeiras aquatubulares. Segundo PERES (1982), no caso específico das usinas sucroenergéticas brasileiras, ao longo das décadas de 30 e 40, essas caldeiras flamotubulares foram substituídas, peremptoriamente, por caldeiras aquatubulares.

2.5.3 - Caldeiras aquatubulares

Em oposição às caldeiras flamotubulares, nas caldeiras aquatubulares a água circula por dentro dos tubos e os gases quentes da combustão passam por fora dos tubos, sendo normalmente conectados entre dois ou mais tubulões/tambores cilíndricos, conforme mostra a Figura 14. Desta forma, o processo de aquecimento dos tubos em que circula água é realizado com o calor transferido pelos gases de combustão obtidos pela queima do combustível com o ar de combustão no sistema de queimador.

O tubulão inferior trabalha incessantemente cheio de água e compõe o ponto baixo da caldeira. A lama que pode se desenvolver na caldeira se sedimenta e pode ser extraída do fundo deste tambor inferior, sendo por isto também chamado de tambor de lama. Vale ressaltar, porém, que uma caldeira moderna que tenha a finalidade de cogeração de energia elétrica pode apresentar somente o tambor de vapor em razão da água utilizada ser muito pura, o que impede a formação de lodo químico e, portanto, elimina-se a necessidade do tubulão inferior (DUKELOW, 1991).

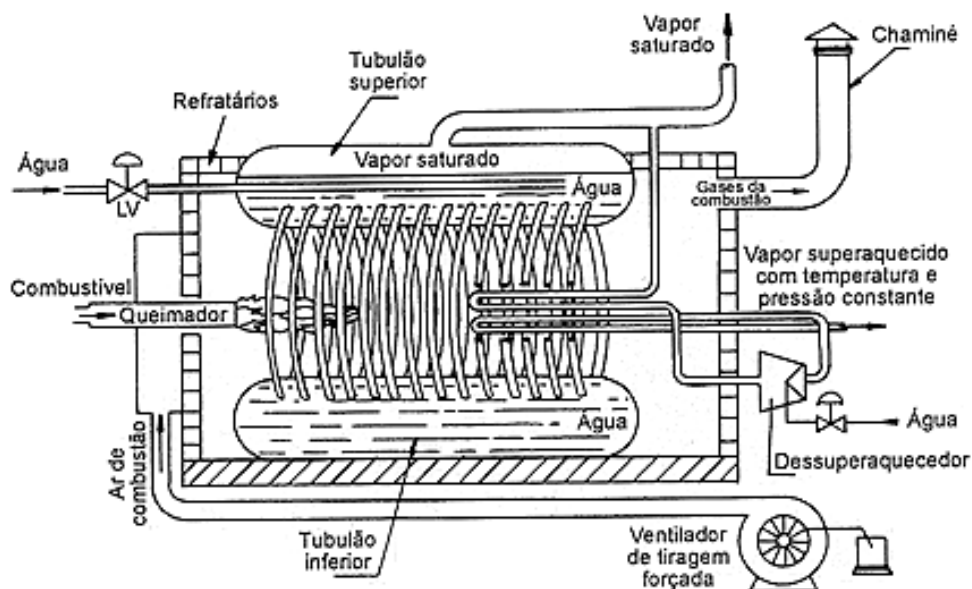


Figura 14 - Esquema básico de uma caldeira aquatubular. Fonte: BEGA, 2003.

Por outro lado, o tubulão superior (ou tambor de vapor) contempla um sistema de controle para manter seu nível de líquido em cerca de 50%. Tanto o lado de fogo quanto o lado de água da caldeira são isolados por uma parede de refratários (câmara de combustão) para evitar perdas de calor ao ambiente (BEGA, 2003). A circulação da água é resultado do aquecimento dos tubos de subida ("*riser*") com gás de combustão quente, sendo que o vapor é liberado no tambor de vapor, princípio mostrado na Figura 15. Desta maneira, quando o circuito está cheio de água, um diferencial de peso específico se estabelece entre a água dentro dos tubos ascendentes (zona radiante) e a água encontrada nos tubos descendentes ("*downcomer*" – zona de convecção). A água com maior peso específico dos tubos descendentes "empurra" a água com menor peso específico para o tubulão superior, iniciando o processo de circulação (DANTAS, 1988).

O vapor gerado no tubulão superior é saturado ou superaquecido. Caso seja desejado vapor superaquecido deve-se empregar os superaquecedores, destinados a aumentar a temperatura do vapor para um valor acima de sua temperatura de saturação, e instalado um sistema de dessuperaquecimento para resfriamento controlado. Esses superaquecedores são constituídos por um ou mais feixes tubulares em forma de serpentina, sendo classificados como de radiação ou de convecção. Como apanágio, o uso de vapor superaquecido aumenta a disponibilidade de energia, além de conferir um maior rendimento das turbinas em função do maior salto entálpico disponível (BEGA, 2003).

Para reduzir as perdas de calor nos gases de combustão, são adicionados o economizador e o pré-aquecedor de ar como acessórios de aproveitamento de calor. Conforme

já descrito, o primeiro aproveita o calor residual dos gases de combustão para aquecer a água de alimentação. Além de ensejar um aumento no rendimento da unidade, sua instalação minimiza o choque térmico entre a água de alimentação e a existente no tubulão superior. Seguindo esse caminho, os gases de combustão, após passarem pelo economizador, são levados ao pré-aquecedor de ar com o objetivo de preaquecer o ar de combustão utilizado na queima de combustível, de acordo com o diagrama da Figura 16 (BEGA, 2003).

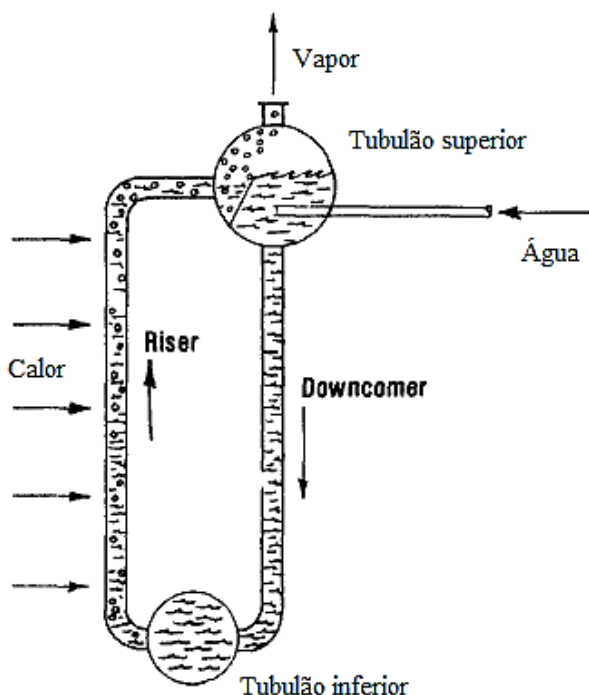


Figura 15 - Circulação na caldeira aquatubular. Fonte: adaptado de DUKELOW, 1991.

Como as caldeiras aquatubulares podem ser facilmente projetadas para maior ou menor volume de fornalha usando a mesma superfície de aquecimento de convecção, tais caldeiras são particularmente aplicáveis à queima de combustível sólido. Uma característica, porém, de acordo com DUKELOW (1991), é o fato das caldeiras a combustível sólido geralmente exigirem maior espaçamento entre os tubos e maior o volume da fornalha quando comparado ao uso dos demais tipos de combustíveis (líquido ou gasoso).

De acordo com PEREA (2005), as antigas caldeiras aquatubulares utilizadas no setor sucroenergético do país, em sua grande maioria, operavam com vapor à pressão de 20 bar e 300°C de temperatura e rendimento que poderiam variar de 80% a 85%. Em razão da possibilidade da comercialização de energia elétrica, as usinas de açúcar estão substituindo suas anódinas caldeiras por sistemas de cogeração de tecnologia nacional de maior eficiência

e capacidade de produção. Atualmente são fabricadas caldeiras com rendimentos em torno de 87% e capacidade de produção entre 150 t/h e 250 t/h, pressão acima de 60 bar e temperatura variando entre 480°C e 520°C (ENSINAS et al., 2014; PEREA, 2005).

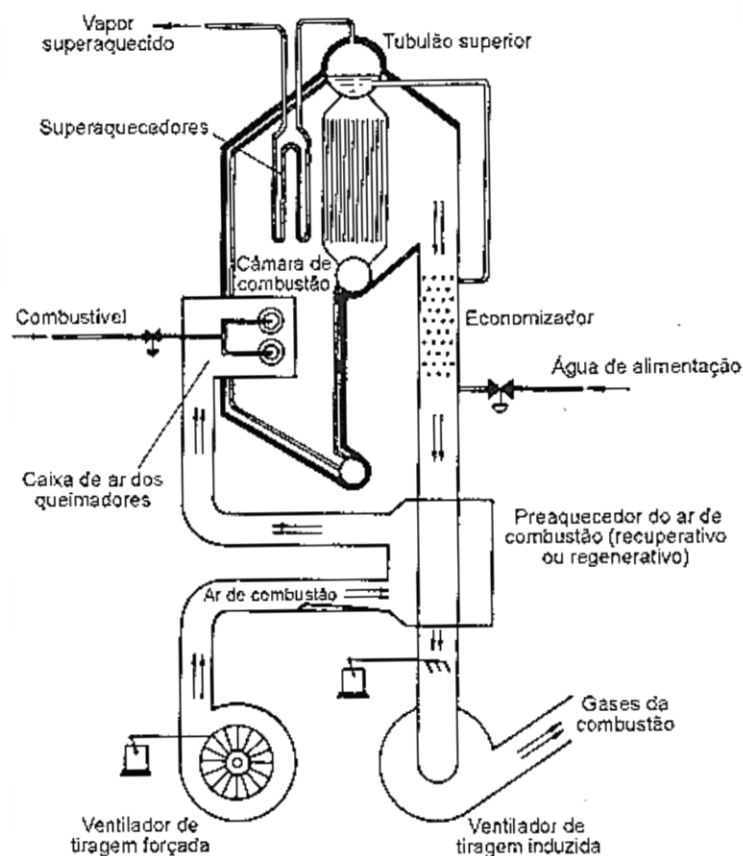


Figura 16 - Diagrama esquemático de uma caldeira com tiragem balanceada, utilizando economizador e preaquecedor de ar. Fonte: BEGA, 2003.

2.5.4 - Combustão do bagaço de cana-de-açúcar em caldeiras

Conforme já indicado neste trabalho, a combustão do bagaço de cana-de-açúcar nas caldeiras pode ser realizada essencialmente de dois modos: por deposição ou em suspensão.

Na queima por deposição, o bagaço é depositado na fornalha e amoldado em formato cônico ou em camada regular, segundo mostra a Figura 17, sobre um grelhado tipo basculante ou rotativo, por onde se recebe ar injetado e ocorre o processo da queima. Esta estratégia de queima apresenta baixo rendimento e, de acordo com CAMPANARI (2002, *apud* PAZIAN, 2004), vem se mingando das usinas de açúcar e etanol.

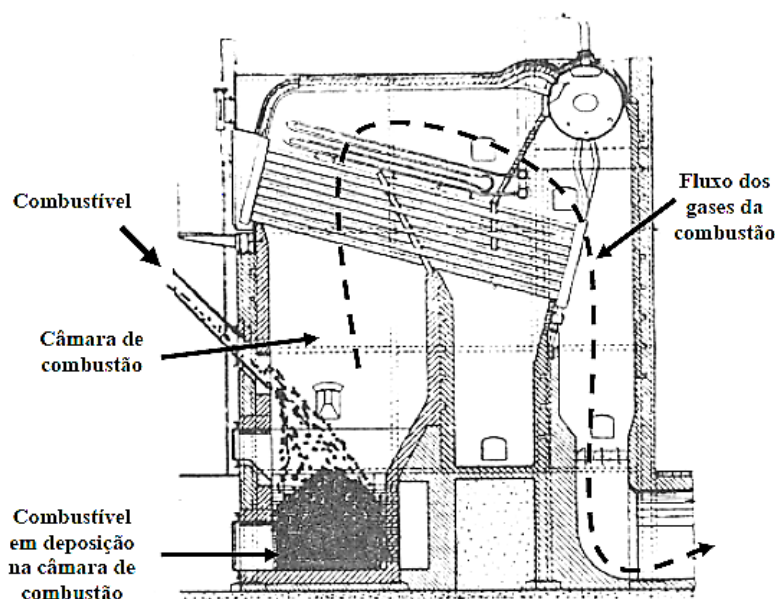


Figura 17 - Caldeira com queima de combustível sólido por deposição. Fonte: PAZIAN, 2004.

Por outro lado, na queima em suspensão, o bagaço é finamente pulverizado ou atomizado e infundido na fornalha por meio de injetores pneumáticos, sendo geralmente instalados nos cantos da fornalha, o que possibilita a formação de um vórtice do combustível durante o processo da queima, proporcionando alto rendimento térmico (85% a 87%). A queima do bagaço em suspensão é aplicada, mormente, em caldeiras de grande porte (vazões de vapor acima de 100 t/h), conforme mostrada esquematicamente na Figura 18 abaixo.

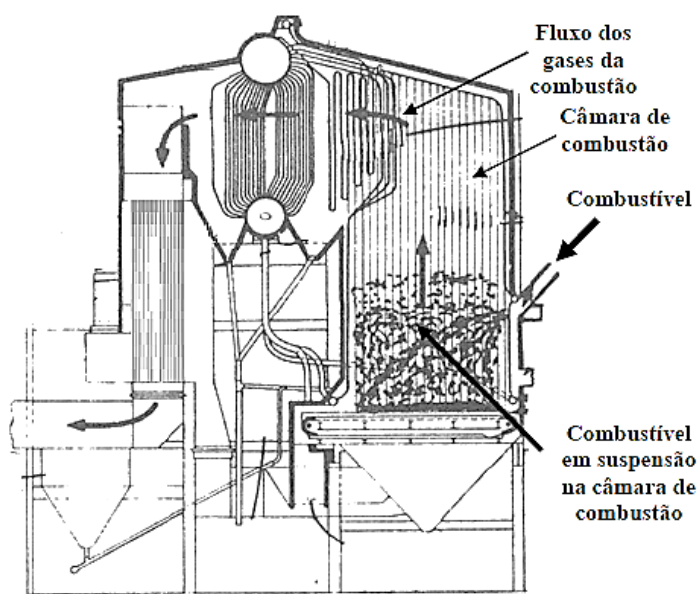


Figura 18 - Caldeira com queima de combustível sólido em suspensão. Fonte: PAZIAN, 2004.

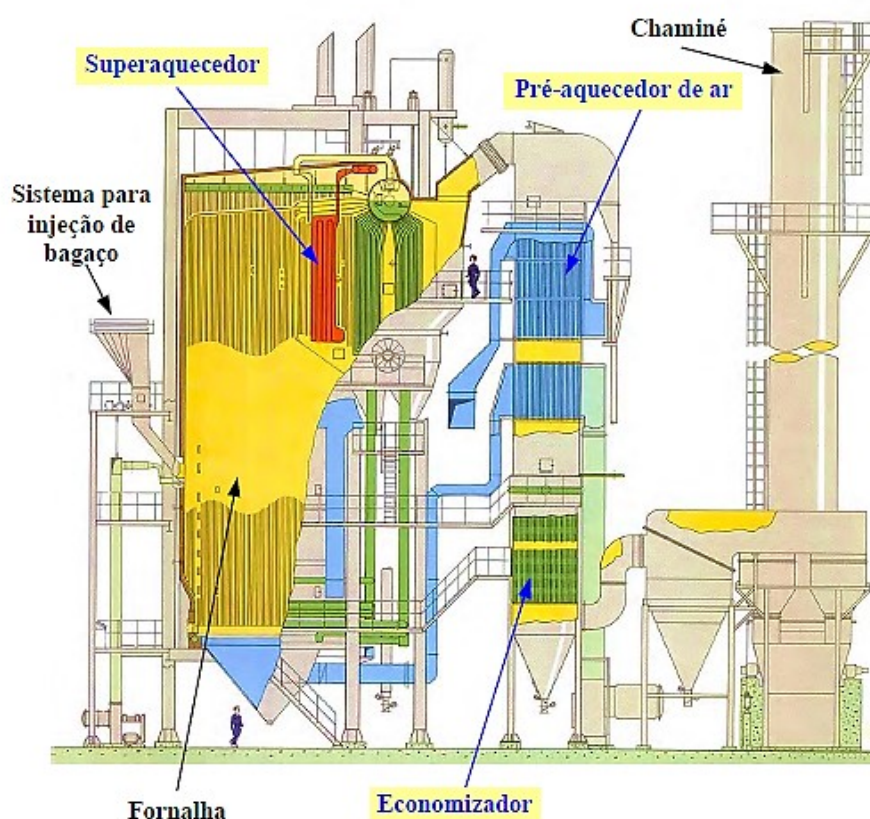


Figura 19 - Caldeira tipo AT da fabricante Dedini S. A.

A Figura 19 apresenta uma caldeira AT fabricada pela Dedini S. A. que ilustra a instalação de superaquecedores, economizadores, aquecedores de ar e o sistema de injeção de bagaço no processo de queima por suspensão. As características gerais das caldeiras AT são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características gerais das caldeiras AT da fabricante Dedini S. A.

Tipo	Aquatubular, “ <i>Top Supported</i> ”, Queima por suspensão
Produção de Vapor	230 t/h
Produção de Pico (*)	245 t/h
Pressão de Operação	67 bar
Temperatura do Vapor	530°C
Combustível	Biomassa

(*) Produção de pico: 2 h para cada 24 h

2.6 - SISTEMA DE CONTROLE DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR

No quadro de evolução tecnológica, o maior e mais célere avanço nas caldeiras foi a área do sistema de controle. As chaves sequenciais foram substituídas por painéis dotados de Controladores Lógicos Programáveis (PLCs) e instrumentação de campo inteligente (*Field-Bus*), sendo que os *softwares* de supervisão monitoram os processos e transferem as informações (*setpoints*) e comandos para os PLCs (NOGUEIRA et al., 2005). De acordo com GILMAN (2010), existem, cinco estratégias de controle consagradas que são utilizadas no controle de processo - controle *feedback* simples, controle *feedforward*, *feedforward* combinado com controle *feedback*, controle em cascata e controle de razão. No controle de caldeiras, as cinco estratégias de controle podem ser contempladas, sendo que muitas empresas oferecem algoritmos ou blocos de função para controle definidos como controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

Nesse contexto, nas caldeiras aquatubulares, os objetivos de controle apresentados nos tópicos subsequentes são fundamentados nas duas variáveis mais importantes a serem controladas: a pressão de vapor e o nível do tubulão superior. Porém, a descrição de detalhes das malhas de controle complementares (por exemplo, o controle da temperatura do vapor superaquecido, o controle de temperatura no pré-aquecedor de ar e o controle de pressão na câmara de combustão), que podem influenciar no rendimento, estabilidade e segurança operacional das caldeiras a combustível, não será discutida neste trabalho.

A pressão de vapor deve ser mantida numa faixa de variação estreita, uma vez que este vapor é normalmente empregado em equipamentos complexos que precisam operar com grande estabilidade, como é o caso das turbinas. Esta pressão é controlada através da variação do combustível e do ar de combustão, injetados no(s) queimadore(s). Nesta estratégia de controle, quanto maior a vazão do combustível e do ar injetado, maior a troca de calor e, portanto, maior a vaporização (BEGA, 2003).

O controle do nível do tubulão superior também deve ser mantido numa faixa estreita, pois tanto o nível alto quanto o nível baixo são deletérios ao funcionamento da caldeira – o nível alto resultará no arraste de água no vapor; por outro lado, o nível baixo poderá minguar a água dos tubos, levando-os à fusão ou superaquecimento. Além disso, durante um aumento brusco na demanda de vapor de uma caldeira ocorre a chamada expansão ou “*swell*” (súbita elevação do nível de líquido do tubulão superior), causada pela intensa formação de vapor na massa de líquido em razão da queda instantânea de pressão no tubulão superior; o efeito

oposto, denominado de contração ou “*shrink*”, acontece durante uma redução brusca na demanda de vapor (NOGUEIRA et al., 2005). Como configuração de controle, o nível é controlado através da atuação na válvula de nível (LV) que regula a quantidade de água de alimentação adicionada ao tubulão superior (BEGA, 2003).

As Figuras 20 e 21 demonstram o efeito da mudança na demanda de vapor e inventário de água da caldeira, sendo que SF representa o fluxo de vapor e WF, o fluxo de água. Se o fluxo de vaporização for aumentado e o fluxo de água para a caldeira aumentar imediatamente na mesma quantidade, o inventário de água permaneceria constante. Nesta situação, o nível do tubulão superior seria forçado a continuar na condição de expansão (*swell*). Somente ao atrasar a mudança do fluxo de água, parte do excesso do inventário pode ser transformada em vapor para que o nível da água do tubulão superior possa ser retornado ao *setpoint* (nível normal de água – NWL). A ação reversa que ocorre à medida que a demanda de vapor é reduzida requer uma adição ao inventário de água, atrasando a redução do fluxo de água (DUKELOW, 1991).

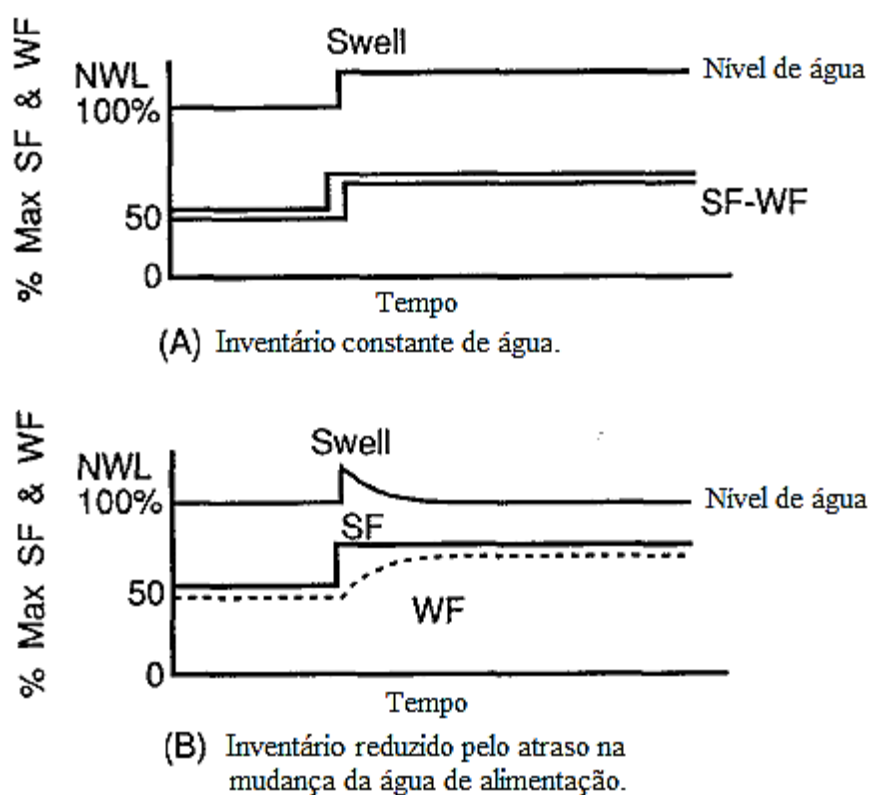


Figura 20 - O efeito do *Swell*. Fonte: adaptado de DUKELOW, 1991.

Diversos fatores podem alterar a magnitude aparente do efeito do *swell* ou *shrink* com uma determinada mudança na demanda de vapor. Um desses fatores é o tamanho do tubulão de vapor da caldeira, o qual está relacionado com o inventário de água e a alteração na capacidade de vaporização. Em virtude do maior volume do tubulão superior, a expansão ou a contração terão seus efeitos minimizados. Além disso, operando a caldeira com maior pressão, a densidade do vapor aumenta e o efeito sobre a densidade da mistura é minimizado e, portanto, o resultado do *swell* ou *shrink*, é reduzido (DUKELOW, 1991).

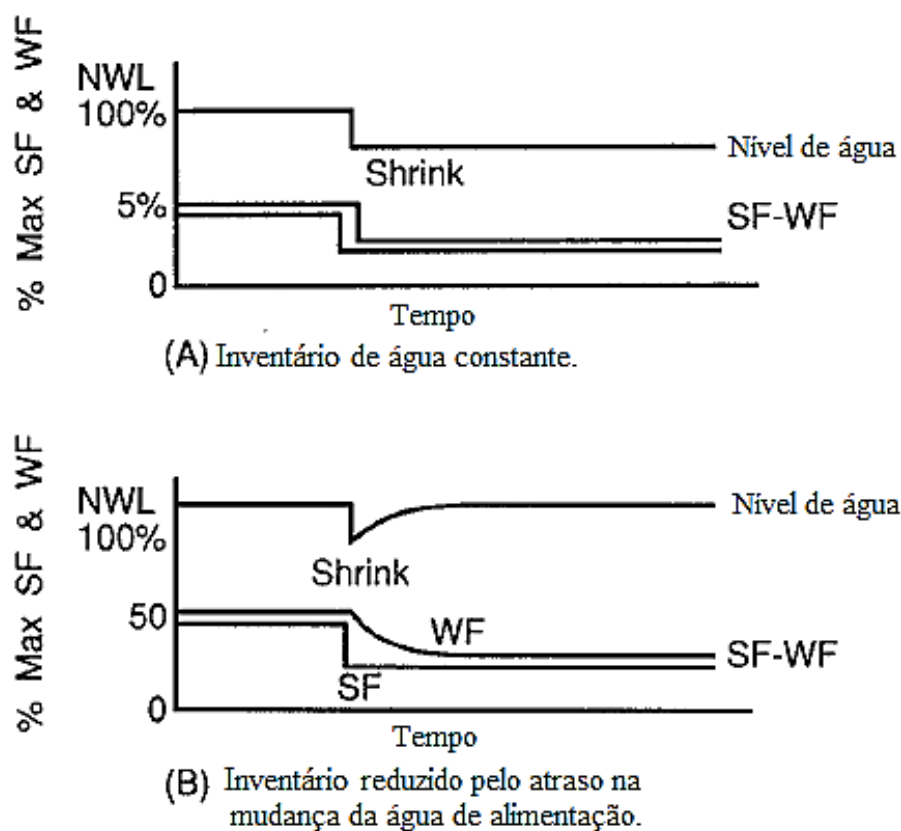


Figura 21 - O efeito do *Shrink*. Fonte: adaptado de DUKELOW, 1991.

2.6.1 - Controle de combustão de combustível sólido

A opção por este tipo de combustível confere, muitas vezes, vantagens em termos econômicos, pois seu preço é competitivo no mercado e existem grandes disponibilidades e estoques do combustível sólido como resíduo de processo industrial, a exemplo do bagaço de cana-de-açúcar das usinas sucroenergéticas. Porém, além das dificuldades de manuseio e

medição, os combustíveis sólidos normalmente apresentam frequentes variações no poder calorífico, teor de umidade, teor de cinzas e outras impurezas, granulometria, etc.

Nesse caso, para dirimir de forma aceitável as oscilações que fornecem resultados pouco representativos de vazão volumétrica ou mássica do combustível ou ar de combustão, é utilizado medidas de inferências. A maneira comum de medição inferencial considera a caldeira como um calorímetro e que a vazão de vapor gerado pelo equipamento tem uma relação definida com a quantidade de energia liberada pela queima do combustível na câmara de combustão (BEGA, 2003).

Um problema adicional atestado no controle de combustão de combustível sólido se refere aos atrasos iminentes que geralmente ocorrem na queima deste tipo de combustível – dificuldade para iniciar sua queima e, conseqüentemente, gerar vapor no processo (BEGA, 2003).

2.6.1.1 - Controle de combustão simplificado com acionamento independente

Este tipo de malha de controle, representada na Figura 22, é utilizado para controlar a combustão de combustível sólido em face das problemáticas elencadas no item 2.6.1 e nas situações em que as limitações técnicas e econômicas permitirem, sob a perspectiva de desempenho e segurança do processo.

A seguinte estratégia de controle é implementada: o sinal de saída do controlador de pressão (PRC) atua diretamente no sistema de alimentação de combustível sólido, ao passo que no *damper* de ar a atuação é feita mediante a estação automático/manual com polarização ajustável. O uso desta estação aumenta enormemente a flexibilidade operacional, pois possibilita que a válvula de combustível e o *damper* de ar sejam acionados de forma independente quando o sistema estiver em controle manual e permite que a relação ar/combustível seja facilmente variada através da polarização (positiva ou negativa) do sinal transmitido pelo controlador de pressão ao *damper* de ar (BEGA, 2003).

Este sistema de controle apresenta como vantagens: a simplicidade e funcionalidade, rápida velocidade de resposta e baixo custo de implantação. Em contrapartida, enseja-se como desvantagem a falta de precisão para manter a razão ar/combustível no valor desejado, uma vez que tal razão não é controlada com base em medições (BEGA, 2003).

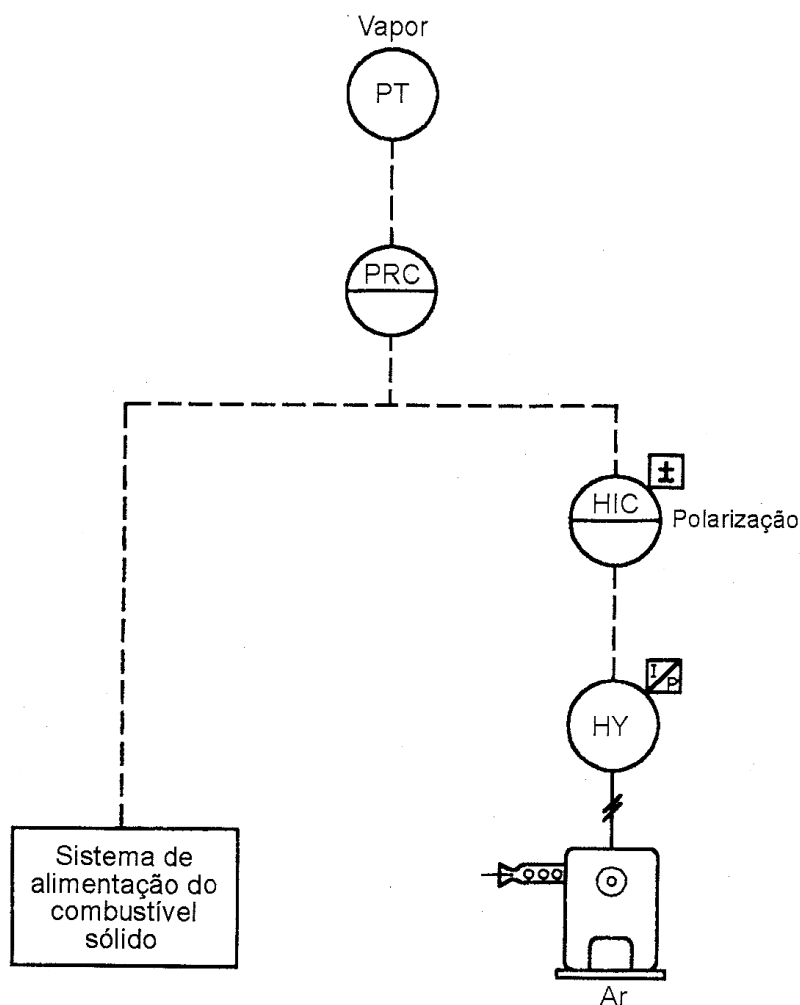


Figura 22 - Controle de combustão simplificado com acionamento independente e aplicado a combustível sólido. Fonte: BEGA, 2003.

2.6.1.2 - Controle de combustão simplificado com correção vazão de vapor/vazão de ar

A relação vazão de vapor/vazão de ar é uma das formas mais utilizadas de medição inferencial das condições de combustão da caldeira. A Figura 23 mostra a malha de controle que coaduna esta inferência com o controle de combustão simplificado da Figura 22.

Nessa malha, o sinal de saída do controlador de pressão (PRC) atua diretamente no sistema de alimentação do combustível sólido, enquanto que no *damper* de ar a atuação é realizada através do somador FY. Este somador FY recebe tanto o sinal do PRC quanto do FIC, que controla a vazão do ar de combustão em função da vazão de vapor (BEGA, 2003). Vale ressaltar que em condições estáveis, esta malha de controle funciona de maneira idêntica à estratégia descrita no subitem 2.6.1.1.

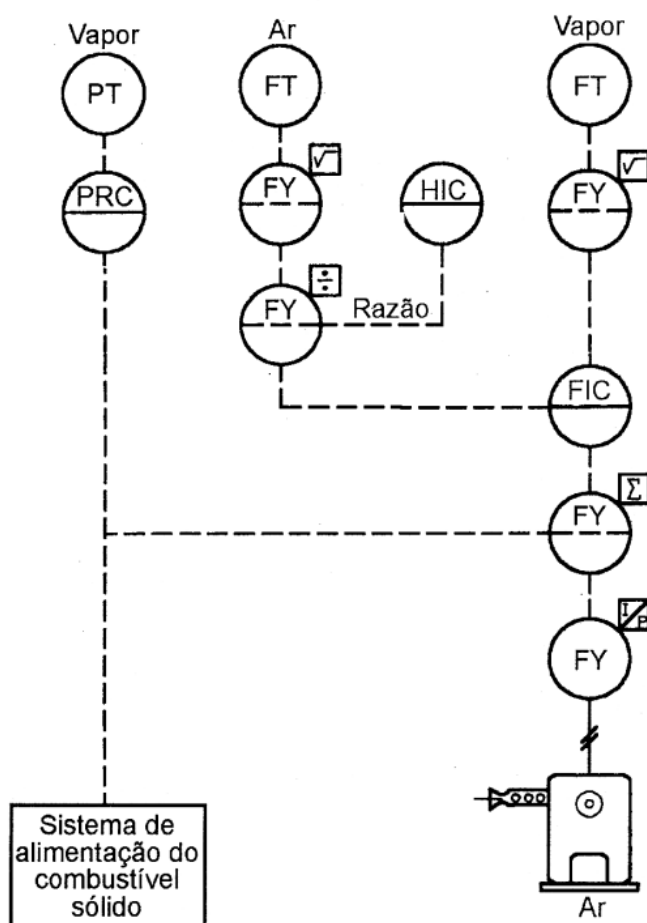


Figura 23 - Controle de combustão simplificado com correção vazão de vapor/vazão de ar.
Fonte: BEGA, 2003.

2.6.1.3 - Controle de combustão série – Combustível seguindo ar

Esta configuração de controle é mais efetiva para controlar a vazão do ar de combustão, conforme mostrada na Figura 24. O controlador de pressão (PRC) fornece o *setpoint* do controlador de vazão de ar (FIC), enquanto o sinal de saída do FT do ar, após passar pelo extrator (FY) e pelo relé de razão (FY), é enviado diretamente para posicionar o sistema de alimentação do combustível sólido, resultando numa resposta mais lenta a variações de carga.

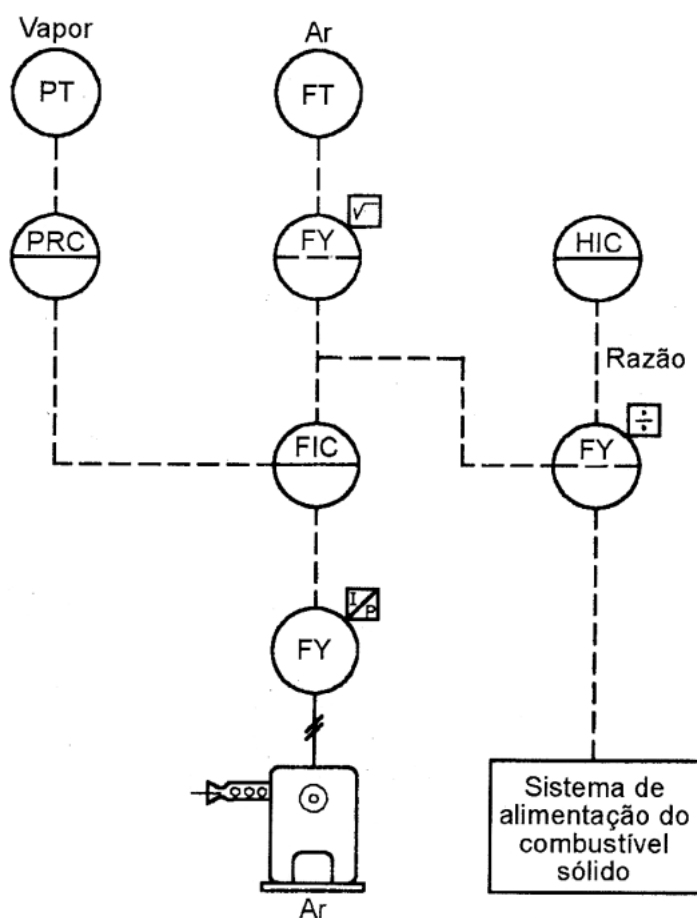


Figura 24 - Controle de combustão série – combustível seguindo ar, aplicado a combustível sólido. Fonte: BEGA, 2003.

2.6.1.4 - Controle de combustão paralelo com correção de poder calorífico

Neste tipo de malha, aplicado mais em operações com combustível pulverizado, a caldeira funciona como um calorímetro, isto é, um medidor de poder calorífico do combustível. Infere-se, portanto, que a vazão de vapor gerado pela caldeira tem uma relação definida com a quantidade de calor sendo liberado, em condições estáveis, na câmara de combustão.

O poder calorífico é calculado no divisor FY (razão entre as vazões de vapor gerado e de combustível adicionado à caldeira). Este sinal é empregado para corrigir o posicionamento do sistema de alimentação de combustível, de acordo com as variações em seu poder calorífico.

Para esta estratégia de controle, o controlador de pressão (PRC) fornece o *setpoint* do controlador de vazão de ar de combustão (FIC) e, em paralelo e simultaneamente, atua no sistema de alimentação do combustível através do divisor FY, conforme apresentado na

2.6.2 - Controle de nível

O objetivo de controle das malhas de controle de nível é manter o nível do tubulão superior dentro dos limites desejados, manipulando a vazão de água de alimentação adicionada ao tubulão superior através da atuação na válvula de controle de nível (LV). Além disso, estas malhas deverão garantir a supressão da interação existente entre o sistema de controle de nível e o de combustão, evidenciada pela vazão irregular da água de alimentação.

Os reptos para o controle de nível são provenientes da expansão (*swell*) e contração (*shrink*) e das variações na pressão do sistema de fornecimento de água de alimentação da caldeira. Segundo BEGA (2003), quanto maior a capacidade da caldeira, mais estreitos serão os limites de variação do nível do tubulão superior e, portanto, mais completa deverá ser a malha de controle implementada.

No caso das caldeiras de maior porte e de alta pressão de operação utilizadas nas indústrias sucroenergéticas, são empregadas malhas de controle de nível com acionamento pneumático ou eletrônico, com relativa complexidade funcional, como controles de nível a dois e três elementos (PINTO, 2000), conforme os subitens subsequentes.

2.6.2.1 - Controle de nível a um elemento

O controle de nível a um elemento é equivalente a uma malha comum com realimentação negativa, que opera com um transmissor (LT) e um controlador de nível (LRC). De acordo com a Figura 26, transmite-se o sinal de nível ao controlador LRC, que, por sua vez, é comparado ao *setpoint*, enviando um sinal de correção para a válvula de controle, variando a vazão de água adicionada ao tubulão superior. Para esta estratégia com realimentação negativa, o LRC somente corrigirá a vazão de água de alimentação depois que o nível sofrer alguma variação. Assim, o sistema de controle apresentado é limitado aos casos de caldeiras de pequeno porte, onde o nível não é uma variável crítica ao processo (BEGA, 2003).

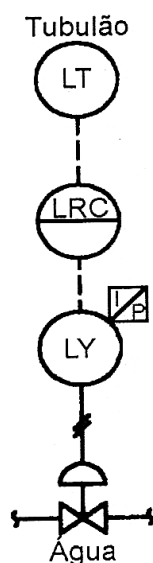


Figura 26 - Controle de nível a um elemento. Fonte: BEGA, 2003.

2.6.2.2 - Controle de nível a dois elementos

Nas caldeiras de grandes dimensões, o nível é uma variável que deve ser mantida com precisão, uma vez que o volume do tubulão superior é muito pequeno quando comparado com a vazão de vapor – pequenas deficiências no controle de nível poderão resultar em problemas operacionais e de segurança.

O controle de nível a dois elementos consiste em medir o nível do tubulão superior e a vazão de vapor gerada pela caldeira e controlar a vazão de água de alimentação (PINTO, 2000). Em outras palavras, trata-se de um controle antecipatório com realimentação - matiza as estratégias de controle *feedforward* e *feedback*, incorporando o uso da ação proporcional + integral para o controlador LRC (NOGUEIRA et al., 2005) - em que a medida da vazão de vapor realiza a correção antecipada do nível e a realimentação é feita pelo transmissor de nível (LT) e pelo controlador de nível (LRC), conforme mostrado na Figura 27.

Neste sistema de controle, o sinal de correção antecipada fornecido pelo transmissor de vazão de vapor (FT) neutraliza as perturbações de expansão e contração no sistema vapor-água que influenciam as malhas de controle de nível. Entretanto, o requisito desta malha de controle é a água de alimentação apresentar pressão constante; caso contrário, obrigará incessantes correções em sua vazão. Não se recomenda, pois, a utilização do controle de nível a dois elementos quando uma mesma bomba alimentar diversas caldeiras ao mesmo tempo (BEGA, 2003).

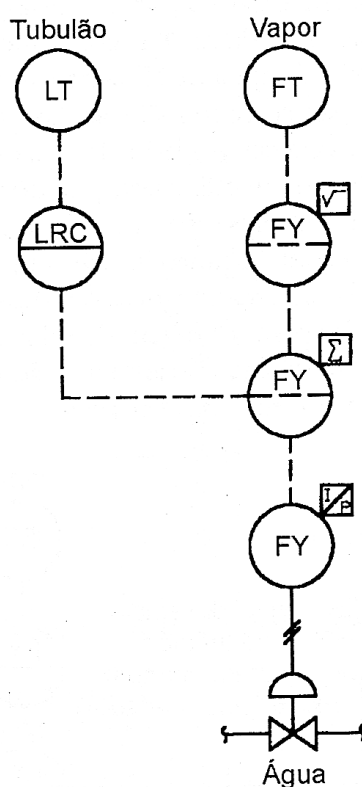


Figura 27 - Controle de nível a dois elementos. Fonte: BEGA, 2003.

2.6.2.3 - Controle de nível a três elementos

O controle de nível a três elementos foi desenvolvido para auferir um melhor controle de nível e eliminar os problemas de controle oriundos das variações na pressão da água de alimentação. A configuração é análoga à conferida no subitem 2.6.2.2, incorporando o terceiro elemento: a medição da vazão de água de alimentação, conforme apresentada na Figura 28. Por existirem uma gama de versões desta malha de controle de nível, neste trabalho será descrita apenas a concepção moderna que utiliza controle antecipativo com realimentação, combinado com controle em cascata.

Nesse sistema de controle, a correção antecipada do nível é realizada pela vazão do vapor e a realimentação, pelo transmissor e controlador de nível, de forma idêntica ao verificado no controle de nível a dois elementos – ou seja, o controlador LRC possui ação proporcional + integral, a fim de neutralizar os efeitos de expansão e contração (NOGUEIRA et al., 2005). Ao mesmo tempo, a vazão da água será mantida pela malha secundária (escrava) de controle da água (FIC), em função do *setpoint* recebido pelo somador FY.

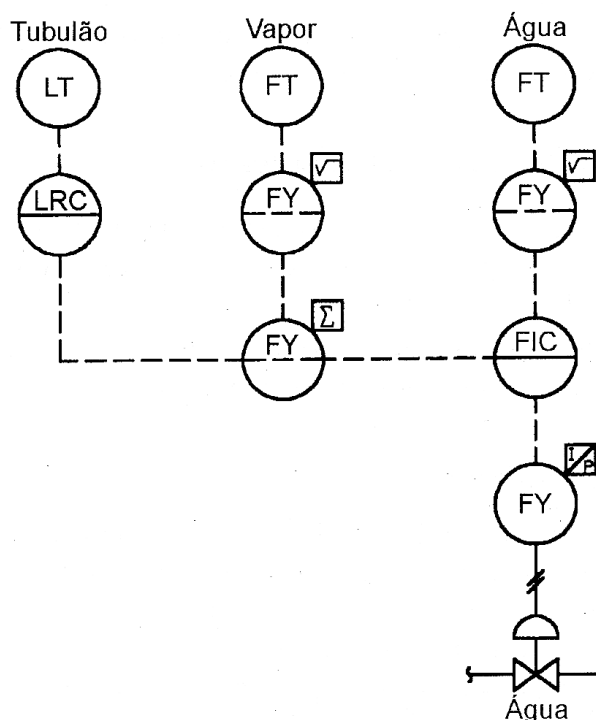


Figura 28 - Concepção moderna do controle de nível a três elementos.
Fonte: BEGA, 2003.

Como são empregados dois controladores, além de ser funcional, obtém-se a vantagem inerente de todos os tipos de controle de nível a três elementos: possibilidade de ajustar externamente o *setpoint* do nível do tubulão superior. Por outro lado, aumenta-se o custo de instalação e advém a dificuldade de sintonia dos controladores. Outra desvantagem decorrente do uso de dois controladores é que, mesmo na situação de ajuste local, o LRC não atua diretamente na válvula de controle e, por isto, não é possível controlar o nível manualmente de maneira independente das demais variáveis definidas nesta malha de controle (BEGA, 2003).

2.6.3 - Direções e estratégias futuras para o controle de caldeiras

A aplicação de controle é essencialmente independente do conjunto particular de *hardware* e *software* com os quais o sistema de controle é implementado, seja na forma pneumática, elétrica, analógica ou digital. No contexto atual, a revolução do *hardware/software* está em estágio célere de desenvolvimento e mais de 90% dos futuros sistemas de controle de caldeiras devem ser implementados com controle digital. Assim, com toda a potência e flexibilidade, em especial, do Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) à disposição, o engenheiro responsável pelo controle de caldeira possui todas as

ferramentas necessárias para ser prócer no uso de materiais e energia desses equipamentos (DUKELOW, 1991).

O controle digital não apenas promove a integração do controle *on-line* com a lógica digital para inicialização, desligamento e monitoramento para segurança industrial, mas também torna possível a implementação por *software* de algoritmos de controle mais complexos, uma vez que o controle analógico se mostra letárgico pelo dispêndio de *hardware* adicional. Esta vantagem é de considerável benefício na gama de tamanhos de caldeiras industriais e para caldeiras de serviço elétrico, isto é, com o propósito de produzir vapor para geração de energia elétrica (*electric utility boiler* ou *electric utility steam generating unit*), e particularmente vantajoso para o controle destes geradores de vapor de dimensões maiores e mais complexos (DUKELOW, 1991; KILGROE et al., 2002).

De acordo com DUKELOW (1991), o sistema de controle dessas unidades, porém, foi fundamentado até hoje na habilidade e intuição de engenheiros experientes em controle de caldeiras. Uma direção auspiciosa de mudança estratégica é o uso de modelos de processos incorporados (*embedded process models*) em um método conhecido como “Controle Preditivo Baseado em Modelo” (MPC) para resolver problemas complexos e interativos de sistemas multivariáveis. A implementação de tal método depende inerentemente do desenvolvimento e inclusão de um modelo de caldeira preciso no sistema de controle que seja significativamente mais rápido do que a sua contrapartida em tempo real.

DUKELOW (1991) caracteriza uma forma desses sistemas, em que o modelo da caldeira é conectado ao sistema de controle como um observador de estados com o mesmo conjunto de entradas de processo que o sistema real avaliado. Uma alteração nas entradas resulta em uma computação rápida das variáveis de saída do modelo que predizem as medidas do sistema real, com base nas ações de controle a serem aplicadas. Todos os desvios entre os valores do *setpoint* do sistema de controle e os futuros valores de medição do processo previstos são usados para corrigir as ações de controle antes que os desvios previstos apareçam como desvios reais. Caso o modelo do processo seja consistente com o processo real e o controlador for devidamente projetado e sintonizado, será obtido o desempenho de controle desejado, mais estável e preciso.

Nessa perspectiva, o modelo deve ser capaz de “aprender” e constantemente melhorar a precisão das medidas. Miríades de pesquisas estão sendo conduzidas neste sentido: um modelo incompleto que pode “aprender” e melhorar a si mesmo como modelo para alcançar melhores resultados de controle. Um exemplo genérico e simplificado é apresentado na Figura 29. Segundo DUKELOW (1991), este parece ser o caminho mais promissor em direção ao

pleno uso da estratégia do MPC. MAJANNE (2005) ainda advoga que o MPC simplifica a estrutura de controle e facilita o compromisso do sistema desejado, pois contempla parâmetros de sintonia com claros significados físicos, como horizontes de limites absolutos (Horizonte de Predição e Horizonte de Controle) e ponderação na velocidade de mudança das variáveis de processo (Peso nas Variáveis Controladas e Matriz de Supressão de Movimento).

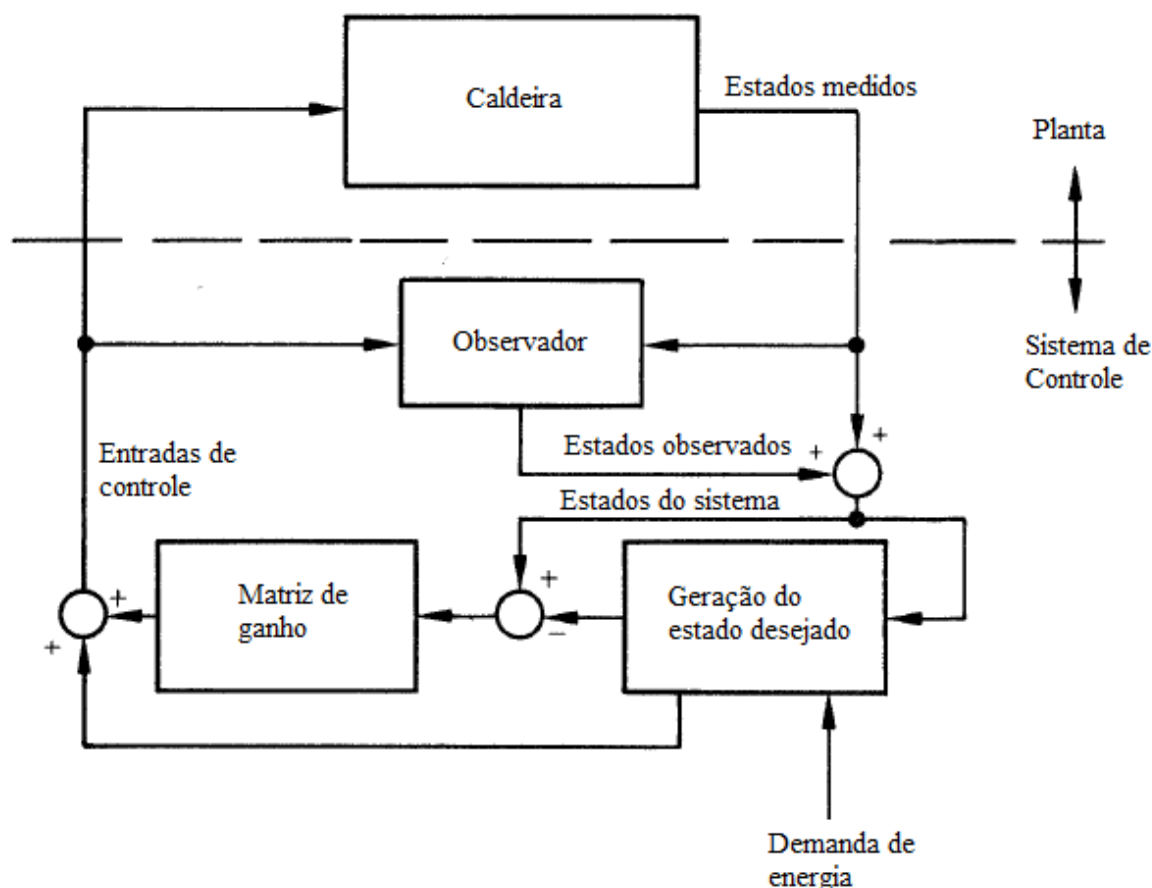


Figura 29 - Sistema de controle moderno com estimador de estados.
Fonte: DUKELOW, 1991.

O elevado custo de desenvolvimento do modelo e a falta de compreensão do sistema pelo engenheiro de sistemas de controle, o qual deve cuidar do funcionamento diário da planta, são duas limitações que resvalam a uma reduzida utilização dessa técnica. Tais métodos também não serão usados a menos que seja possível demonstrar que os padrões de desempenho do controle atual resultam em perdas que pagariam o custo do desempenho do controle melhorado. Não é suficiente que o controle da pressão do vapor, da temperatura do vapor ou da razão combustível/ar de combustão seja realizado com maior precisão. O benefício econômico deve justificar qualquer aumento de custo e substituição ou modificação de um equipamento (*retrofit*), permitindo aumento de eficiência no uso de matéria-prima,

energia e produtividade (*debottlenecking*). Por fim, podem-se citar outros importantes meandros de pesquisa nessa área como a aplicação de controle não linear (ALAMOUDI; DAOUITIDIS, 2017) e controle preditivo com redes neurais (BAKAR; HUSSAIN, 2009).

2.7 - NORMAS DE SEGURANÇA ADOTADAS EM SISTEMAS DE COMBUSTÃO

Todos os sistemas de combustíveis (líquidos, gasosos e sólidos) devem atender aos requisitos mínimos acedidos pelas normas específicas vigentes para uma operação considerada segura, conduzindo à prevenção contra explosões nas câmaras de combustão. No Brasil, o Ministério do Trabalho, em junho de 1978, instituiu, como norma de segurança sobre Caldeiras e Vasos de Pressão, a NR-13, que estabeleceu as medidas de segurança e orientações de cuidados mínimos para os usuários das caldeiras (BOTELHO; BIFANO, 2011).

Para acompanhar a evolução tecnológica e transformações dos equipamentos, a NR-13 passou pela quarta revisão em maio de 2014 (na sequência, as outras adaptações foram conferidas em maio de 1984, dezembro de 1994 e junho de 2008), incorporando também tubulações ou sistemas de tubulações interligados a caldeiras ou vasos de pressão. Assim, a norma atualizada de 2014 foi intitulada “Norma Regulamentadora N° 13 - Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações”.

O excesso de burocracia definida para as inspeções dos equipamentos e o busílis do elevado número de acidentes ocorridos em anos precedentes (verificou-se que no período de 2003 a 2012 foram registrados pelo menos 70 acidentes relacionados a caldeiras, vasos de pressão e tubulações, com uma média de 7 acidentes por ano), amalgamaram as motivações para adequar e aprimorar essa norma regulamentadora em 2014. Como a NR-13 deve ser seguida obrigatoriamente no esteio da lei brasileira, apenas ela está detalhada no Anexo 1 deste trabalho.

Porém, além da exigência dessa norma regulamentadora, são recomendadas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), destacando-se a NBR-12177 (antiga NB-55) que trata dos procedimentos de inspeção de segurança para as caldeiras flamotubulares e aquatubulares, e a NB-227 que contempla os códigos para projeto e construção de caldeiras estacionárias. Outras entidades, como o INMETRO, IBP e a Abiquim, oferecem estudos, pesquisas e discussões salutareis sobre os aspectos de segurança em

caldeiras (ALTAFINI, 2002). Já para o caso específico de sistemas que utilizam óleo e gás combustíveis no Brasil, de acordo com LAGEMANN (2016), as normas mais adotadas são: NFPA 85 – *Boiler and Combustion Systems Hazards Code*, e ABNT-NBR 12313 – Sistema de Combustão – Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura.

2.8 - ANÁLISE DE SEGURANÇA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

A multiplicidade dos riscos (probabilidade ou chance de lesão ou morte) e perigos (definido como uma condição ou um liame de circunstâncias que têm o potencial de contribuir para uma lesão ou morte) é pensada principalmente como decorrentes de falhas ou defeitos no projeto, material, mão-de-obra ou erro humano. Neste sentido, existem diversos métodos de análise de segurança que estão disponíveis e podem ser aplicados a uma instalação ou projeto para suplantiar e dirimir os erros humanos e as falhas do sistema avaliado (NOLAN, 2015). Essas diretrizes podem ser de natureza qualitativa ou quantitativa (geralmente aplicados para obter uma avaliação mais precisa de um perigo identificado), conforme elencadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação dos métodos de segurança.

Métodos Qualitativos	Métodos Quantitativos
<i>Checklists</i>	Árvore de eventos (<i>Event Trees</i>)
Análise Preliminar de Perigos (<i>Preliminary Hazard Analysis</i> - PHA)	Árvores de falhas (<i>Fault Trees</i>)
Análise “E se” (“ <i>What if</i> ”)	Modos de Falha e Análises de Efeitos (<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>)
Estudo de Perigo e Operabilidade (<i>Hazard and Operability Study</i> – HAZOP)	Análise de Camadas de Proteção (<i>Layers of Protective Analysis</i> - LOPA)
Análise Gravata-Borboleta (<i>Bow-Tie Analysis</i>)	Análise de Nível de Integridade de Segurança (<i>Safety Integrity Level Analysis</i> - SIL)
Espinha de peixe (<i>fishbone</i>)	

Fonte: NOLAN, 2015.

Neste trabalho, será definido e discutido somente o método HAZOP, uma vez que tal análise se consagra como a primeira ferramenta de escolha para a identificação de deficiências na concepção de projetos e é utilizado mundialmente na indústria de processo (CRAWLEY; TYLER, 2015).

2.8.1 - Estudo HAZOP

O estudo HAZOP constitui uma técnica detalhada para o exame sistemático de uma operação ou processo bem definido, planejado ou existente. Sob o panorama histórico, o método de estudo de perigo e operabilidade (mais tarde abreviado para HAZOP) foi desenvolvido pela *Imperial Chemical Industries* (ICI) na década de 1960, no Reino Unido, e seu pleno uso e desenvolvimento foram fomentados pelo Guia da Associação de Indústrias Químicas (*Chemical Industries Association Guide* - CIA) publicado em 1977 (CRAWLEY; TYLER, 2015; NOLAN, 2015). Desde então, tornou-se a principal técnica de muitos engenheiros envolvidos no projeto de novos processos e operações.

Além da sua capacidade na identificação de perigos de segurança, saúde e meio ambiente, o estudo HAZOP pode ser utilizado na pesquisa de possíveis problemas operacionais, sendo aplicado de diferentes formas nas indústrias de processo. Assim, apesar do estudo ser empregado em novas instalações industriais, é frequente a aplicação em projetos existentes ou modificações no processo (CRAWLEY; TYLER, 2015).

2.8.2 - Características essenciais do estudo HAZOP

Um estudo HAZOP é uma análise estruturada de um sistema, processo ou operação, realizada por uma equipe multidisciplinar, em que informações de projeto detalhadas estão disponíveis – Diagramas de Fluxo de Processo (PFDs) atualizados, Diagramas de Tubulação e Instrumentação (P&IDs), especificações delineadas do equipamento, materiais de construção e balanços de massa e energia (CRAWLEY; TYLER, 2015; CROWL; LOUVAR, 2002).

A equipe deve conduzir um exame “linha-a-linha” ou “etapa por etapa” de um projeto de indústria para o processo ou operação. Embora seja sistemática e rigorosa, essa análise pretende ser aberta e criativa. Isto é feito usando um conjunto de palavras-guia em combinação com os parâmetros do sistema para buscar desvios significativos em relação à proposta do projeto. Um desvio significativo é aquele considerado como fisicamente possível de ocorrer no processo em estudo - por exemplo, “sem fluxo”, “alta pressão” ou “reação

reversa” (uma lista de palavras-guia será detalhada no subitem 2.8.3). Portanto, o grupo responsável pela análise HAZOP deve se concentrar nos desvios que podem levar a potenciais perigos para a segurança, a saúde ou o meio ambiente (CRAWLEY; TYLER, 2015).

As Tabelas 6 e 7 descrevem as principais vantagens e limitações, respectivamente, deste método qualitativo de análise de segurança.

Tabela 6 - Principais vantagens do método HAZOP.

Vantagens	Descrição/Complemento
Uso de aproximações sistemáticas e lógicas na análise de segurança.	Utiliza uma lista de palavras-guia específicas e subdivide o processo avaliado em pequenas seções para análise.
Pode analisar uma combinação de falhas.	A opção de abordar falhas sequenciais contínuas pode ser investigada para o resultado final da análise.
Fornecer uma visão sobre as características de operabilidade do processo.	Os métodos de controle de operação são completamente investigados para possíveis condições de desvios para todo o fluxo de processo. A partir desta análise um operador pode facilmente deduzir quais perigos podem estar presentes na instalação. Numa visão mais ampla, as empresas que realizam estudos detalhados consideram que seus processos operam de maneira melhor, têm menos tempo de inatividade, a qualidade do produto é melhorada, reduz o desperdício e seus funcionários ficam mais confiantes na segurança do processo.

Fonte: adaptado de NOLAN, 2015; CROWL; LOUVAR, 2002.

Tabela 7 - Principais limitações do método HAZOP.

Limitações	Descrição/Complemento
Necessita de um nível de habilidade moderado para implementar a análise.	A análise é um processo completo e sistemático que deve ser conduzido de forma

Continua

Continuação da Tabela 7

	adequada e registrada com precisão. Para realizar o estudo HAZOP, um líder de equipe com formação especializada e experiência no método deve ser indicado para orientar o grupo da análise durante o processo.
Pode ser mais lento de implementar quando comparado a outros métodos.	O líder da equipe segue um formato padrão com palavras-guia específicas e desvios significativos que precisam ser contemplados. Como uma lista padronizada é usada para todos os sistemas, algumas questões desnecessárias e sem importância podem ser abordadas em determinadas partes do sistema em análise. Em outras palavras, além de tediosa de aplicar, o método requer um tempo de equipe considerável e pode potencialmente identificar perigos independente dos riscos.

Fonte: adaptado de NOLAN, 2015; CROWL; LOUVAR, 2002.

2.8.3 - Procedimento do estudo HAZOP

Conforme já definido, o estudo HAZOP completo exige um comitê multidisciplinar composto por profissionais com conhecimento e experiência na planta industrial e em seus recortes na forma de operações unitárias, no laboratório, além da capacidade técnica e de segurança. De acordo com CROWL; LOUVAR (2002), o método HAZOP compreende as seguintes etapas para consolidar uma análise:

- I. Inicie o estudo com um diagrama de processo detalhado. Separe tal diagrama em várias unidades de processo. Assim, por exemplo, a área do reator pode ser uma unidade e o tanque de armazenamento pode ser considerado outra unidade do processo. Selecione uma unidade para estudo.
- II. Escolha um nó (seção) de estudo (vaso, linha de operação, etc.).
- III. Descreva a finalidade deste nó de estudo. Por exemplo, o vaso V-1 é projetado para armazenar uma determinada matéria-prima e fornecê-la sob demanda a um reator.

- IV. Selecione um parâmetro de processo: fluxo, nível, temperatura, pressão, concentração, pH, viscosidade, estado físico (sólido, líquido ou gás), agitação, volume, reação, amostra, componente, início, parada, estabilidade, potência, inerte.
- V. Aplique uma palavra-guia no parâmetro do processo para sugerir possíveis desvios. Uma lista de palavras-guia é mostrada na Tabela 8. Algumas das combinações de parâmetros do processo de palavras-guia não têm sentido (resultam em desvios não significativos), como mostrado na Tabela 9 para linhas de processo.
- VI. Se o desvio for aplicável, determine possíveis causas e proponha sistemas de proteção.
- VII. Avalie as consequências do desvio (se houver).
- VIII. Recomende ações - Qual(is)? Por quem? Quando?
- IX. Registre todas as informações.
- X. Repita as etapas de V a IX até que todas as palavras-guia aplicáveis tenham sido contempladas no parâmetro de processo selecionado.
- XI. Repita as etapas IV a X até que todos os parâmetros de processo aplicáveis tenham sido considerados para o nó de estudo.
- XII. Repita as etapas II a XI até que todos os nós de estudo tenham sido considerados para a seção fornecida e passe para a próxima seção no diagrama de processo.

Na forma de fluxograma, conforme apresentado na Figura 30, CRAWLEY; TYLER (2015) propõem que na “abordagem de primeiro parâmetro” (“*parameter-first approach*”), um parâmetro do processo é selecionado e, em seguida, considerado em combinação com todas as palavras-guia que resultem em um desvio significativo. Uma vantagem desta abordagem é que todos os aspectos de um parâmetro são tomados em conjunto em vez de serem intercalados entre desvios que envolvem outros parâmetros. Em contraste, na “abordagem de primeira palavra-guia” (“*guideword-first approach*”), a palavra-guia é considerada previamente e coadunada com todos os parâmetros do processo sensivelmente vinculados a ela. Segundo os autores, esta outra abordagem é particularmente aplicada a processos em batelada.

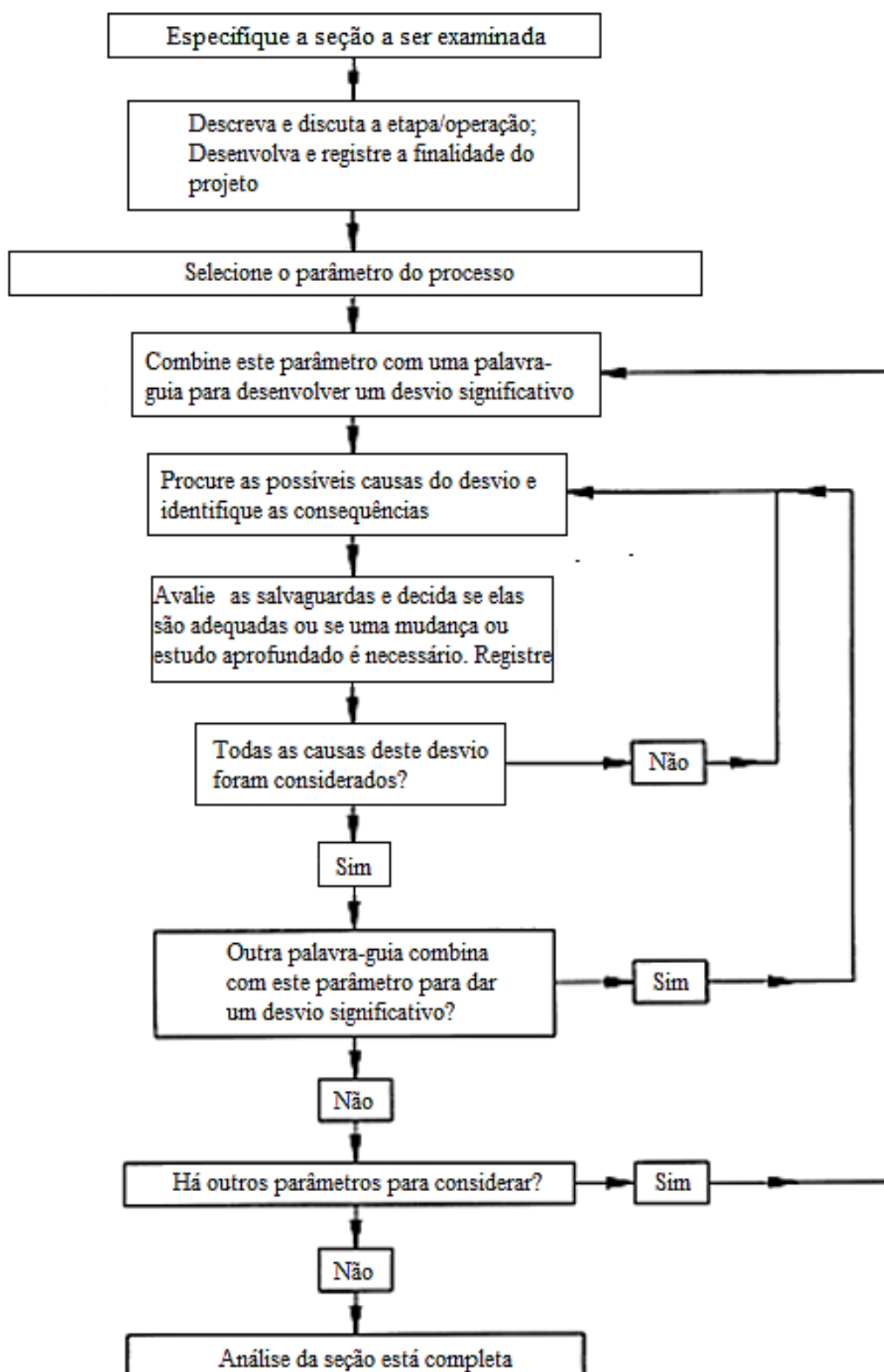


Figura 30 - Diagrama de blocos da análise HAZOP de uma seção/nó de um processo.

Fonte: adaptado de CRAWLEY; TYLER, 2015.

Tabela 8 - Palavras-guia padrões e seus significados genéricos no método HAZOP.

Palavra-guia	Significado
Não, nenhum / <i>No, not, none</i>	Nenhuma das finalidades do projeto é alcançada
Mais, maior (que) / <i>more, more of, higher</i>	Aumento quantitativo em um parâmetro
Menos, menor (que) / <i>less, less of, lower</i>	Redução quantitativa em um parâmetro
Bem como, mais do que / <i>As well as, more than</i>	Uma atividade adicional ocorre
Parte de / <i>Part of</i>	Somente parte das finalidades do projeto é alcançada
Reverso / <i>Reverse</i>	Oposição lógica da finalidade do projeto ocorre
Diferente de (outro) / <i>Other than (other)</i>	Substituição completa - outra atividade ocorre / advém uma atividade incomum / condição incomum existe
Outras palavras-guia úteis incluem:	
Onde mais / <i>Where else</i>	Em locais adicionais / Aplicável para fluxos, transferências, fontes e destinos
Mais cedo que / <i>Sooner than</i>	Muito cedo ou na sequência errada
Mais tarde que / <i>Later than</i>	Muito tarde ou na sequência errada

Fonte: CRAWLEY; TYLER, 2015; CROWL; LOUVAR, 2002.

Tabela 9 - Palavras-guia válidas e combinação de parâmetros de projeto para linhas de processo - “x” representa as combinações válidas.

Parâmetro do Processo	Não/ <i>No, not, none</i>	Mais (que)/ <i>More (of), higher</i>	Menos (que)/ <i>Less (of), lower</i>	Bem como/ <i>As well as</i>	Parte de/ <i>Part of</i>	Reverso/ <i>Reverse</i>	Diferente de/ <i>Other than</i>	Mais cedo que/ <i>Sooner than</i>	Mais tarde que/ <i>Later than</i>	Onde mais/ <i>Where else</i>
Fluxo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Temperatura		x	x					x	x	
Pressão		x	x	x				x	x	
Concentração	x	x	x	x	x		x	x	x	
pH		x	x					x	x	
Viscosidade		x	x					x	x	
Estado				x				x	x	

Fonte: CROWL; LOUVAR, 2002.

A Tabela 10 apresenta um tipo de formulário HAZOP genérico para um parâmetro de processo. A primeira coluna lista as palavras-guia (ou desvios) para o nó de estudo considerado. As próximas três colunas elencam os resultados mais importantes da análise. A segunda coluna descreve as possíveis causas que são determinadas pelo comitê e são baseadas na combinação específica da palavra-guia e desvio. Na sequência, a terceira coluna lista as possíveis consequências do desvio, e a última coluna incorpora as ações necessárias para evitar que o perigo resulte em um acidente. Os restantes dos espaços de preenchimento são usados para identificação e rastreamento da responsabilidade da análise, bem como a conclusão do trabalho.

Tabela 10 - Planilha HAZOP para registro de dados.

Sistema:		Equipe:		Data:
Parâmetro:		Nó:		Página:
Palavra Guia (Desvio)	Causas	Consequências	Providências	

Fonte: adaptado de AGUIAR, 2001.

2.8.4 - Relação entre HAZOP e LOPA

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma ferramenta semi-quantitativa para analisar e avaliar risco, utilizada amplamente para determinar o nível de proteção necessário para garantir salvaguardas adequadas contra os principais riscos que possam surgir em uma planta ou processo. Esta análise contempla métodos simplificados para caracterizar as consequências e estimar suas frequências, incorporando diversas camadas de proteção ao processo, conforme mostrado na Figura 31, para alcançar um risco considerado tolerável ou aceitável. Os critérios para estabelecer o limite entre o risco aceitável e inaceitável podem apresentar variações nas indústrias com a avaliação e inclusão, por exemplo, da frequência de

fatalidades, frequência de incêndios e frequência máxima de uma determinada categoria de consequência (CROWL; LOUVAR, 2002).

Como o objetivo principal do estudo HAZOP é a identificação de eventos perigosos e a avaliação das consequências, ele pode ser combinado a um estudo LOPA, pois compreende a geração de desvios, causas, consequências e salvaguardas que alimentam diretamente a análise semi-quantitativa (CRAWLEY; TYLER, 2015). Em suma, a metodologia HAZOP deve fornecer informações completas, avaliadas e registradas em sua totalidade pela equipe responsável e, na sequência, ser integrada à técnica LOPA para determinar se existem camadas independentes de proteção suficientes para os cenários de acidentes identificados na análise de riscos.

2.8.5 - Uma breve visão do estudo CHAZOP

O uso de computadores no controle processos químicos em parte ou na totalidade é hoje generalizado e diversos dispositivos de controle contêm alguma forma de lógica programável. O elevado número de incidentes relatados em tais sistemas desvela a necessidade de um estudo de perigo mais específico e o HAZOP estendido/avançado evidenciou ser um método eficaz de análise crítica de segurança em sistemas controlados por computador. O estudo de Perigo e Operabilidade de Controle/Computador (*Control or Computer HAZOP*) é uma abordagem recomendada para sistemas de controle complexos, quando há grandes perigos envolvidos ou quando as funções relacionadas à segurança estão sob o controle do computador (CRAWLEY; TYLER, 2015).

Conforme definido por NOLAN (2015), CHAZOP é um estudo estruturado de sistemas de controle e segurança para avaliar e minimizar o efeito de falhas de subsistemas, impactando de maneira profícua a planta ou afetando a capacidade de um operador a tomar medidas corretivas. Apesar de ser considerada uma extensão da metodologia HAZOP, essa abordagem avançada é especializada em sistemas de controle e segurança, incluindo palavras-guia e parâmetros particulares - por exemplo, o CHAZOP faz uso de desvios como “sem sinal”, “sinal fora da faixa”, “sem energia”, “sem comunicação”, “falha na placa de E/S”, “programação de *software* incorreta/inadequada” e “ataque cibernético”.

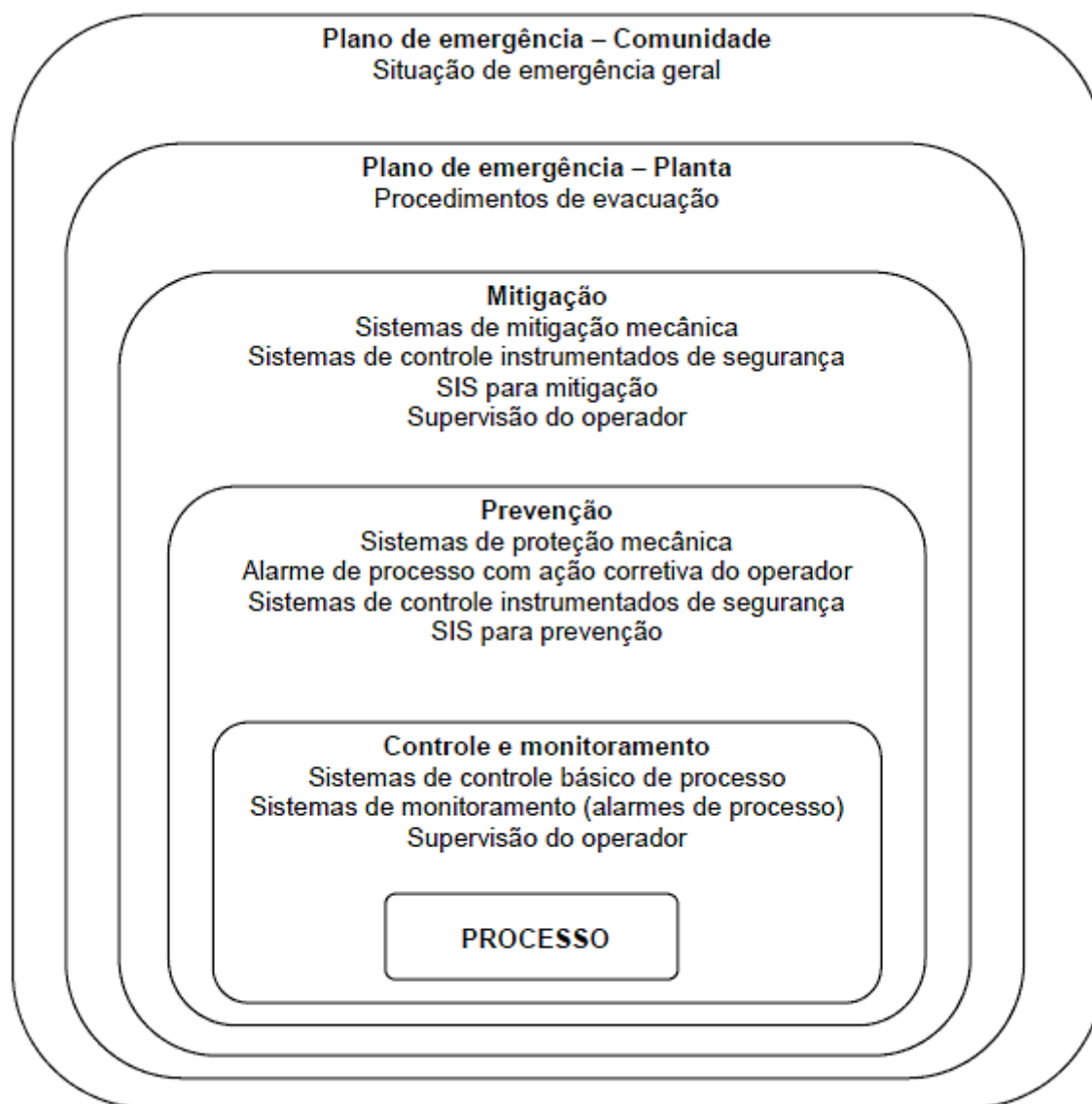


Figura 31 - Camadas de proteção para redução de riscos em plantas industriais.
Fonte: INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003.

2.8.6 - Método SHARD

De acordo com MCDERMID et al. (1995), o estudo HAZOP “tradicional” descrito no subitem 2.8.1 apresenta a desvantagem de se constituir como uma abordagem em equipe dispendiosa, sendo que o custo poderia não justificar ou refletir os potenciais benefícios. Nesta concepção, a proposta indicada pelos autores foi um método alternativo, chamado de “*Software de Análise de Perigo e Resolução em Projeto*” (SHARD, *Software Hazard Analysis and Resolution in Design*), em que a análise deve integrar o desenvolvimento do sistema avaliado.

Na nova abordagem, a maior parte do estudo se torna uma tarefa individual, em vez de um trabalho com uma equipe. À medida que cada seção do projeto do sistema é desenvolvida, o engenheiro de projeto ou um único avaliador independente é responsável por implementar uma análise de segurança com base nas diretrizes do estudo HAZOP. Na sequência, o relatório deve ser encaminhado para um ou mais revisores.

A fase final desse processo é uma reunião para revisar a análise, na qual as preocupações ou questões levantadas pelos revisores podem ser discutidas. Caso apresente sérios problemas, divergências ou discordâncias, esta reunião pode ser estendida em investigações adicionais seguindo a orientação de um estudo HAZOP “tradicional”. Entretanto, a parcela majoritária do trabalho preparatório da análise deve garantir que o esforço da reunião seja concentrado somente nas áreas em que se observaram sérios problemas.

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE CASO: CALDEIRA AQUATUBULAR

3.1 - METODOLOGIA

Para o horizonte deste trabalho foi realizado a análise e coleta de dados da literatura, e o estudo teórico aplicado nas caldeiras a combustível de bagaço de cana-de-açúcar por meio da avaliação de um cenário comum de cogeração em uma usina sucroenergética. A “abordagem de primeiro parâmetro” foi adotada nesta análise, seguindo o fluxograma da Figura 30, com o modelo de formulário HAZOP, em que se reúnem os parâmetros do processo para as diversas seções estudadas com a identificação das possíveis causas, consequências e ação requerida/salvaguardas, transcrito da obra de CROWL; LOUVAR (2002) e mostrado na Tabela 11.

No estudo de caso, endossado nos diversos catálogos de fabricantes disponíveis, foi selecionada uma caldeira aquatubular, nos moldes da Figura 19, com as características descritas na Tabela 12. Tal estudo foi estruturado e fundamentado no fluxograma de um processo genérico de cogeração de uma usina sucroenergética (definido na fase de projeto ou em operação), conforme representados na Figura 34 e Figura 35 (setor das caldeiras ampliado) do Anexo 1, e nas informações de correntes da Figura 36 do Anexo 1. De maneira qualitativa, foi proposta a metodologia inspirada no modelo SHARD como análise de segurança, uma vez que o estudo foi implementado por um avaliador de projeto independente

e dirigido a um grupo de revisores, em consonância com a avaliação do sistema de controle e aspectos ambientais inerentes ao completo funcionamento da caldeira.

Tabela 11 - Formulário HAZOP.

Nome do Projeto:				Data:	Página de		Concluído
Processo:							Nenhuma ação
Seção:				Desenho de referência:			Data de resposta
Item	Nó de estudo	Parâmetros do processo	Desvios (palavras-guia)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida/ Salvaguardas	Assinado por:

Fonte: adaptado de CROWL; LOUVAR, 2002.

A partir do recorte do setor de caldeiras apresentado no fluxograma do processo genérico da Figura 34 do Anexo 1, construiu-se um esquema deste sistema de utilidades, mostrada na Figura 32, para identificar as seções/nós de estudos examinados, de acordo com a associação estabelecida na Tabela 13.

Tabela 12 - Características da caldeira aquatubular para o estudo de caso.

Tipo	Aquatubular, Queima por suspensão
Produção de Vapor	74 t/h
Pressão de Operação	67 bar
Temperatura do Vapor	530°C
Combustível	Biomassa

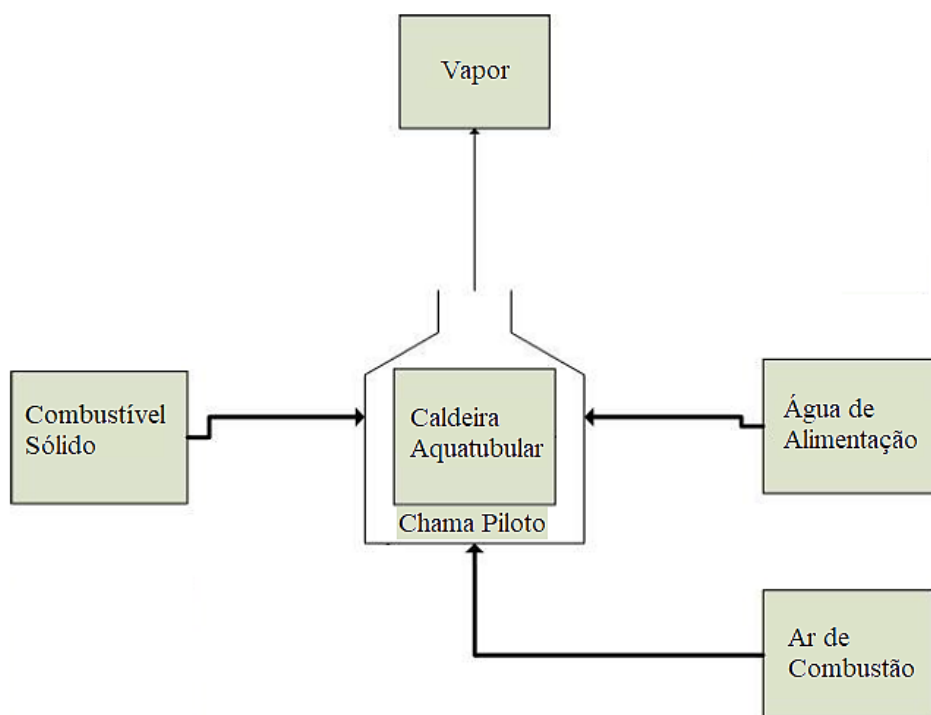


Figura 32 - Diagrama de blocos da caldeira. Fonte: adaptado de IELO; SILVA, 2015.

Para o processo investigado (intitulado “Caldeira Aquatubular - Cogeração”), considerou-se que as principais malhas de controle estão presentes (controle da pressão de vapor, o qual compreende os controladores das vazões do combustível e do ar de combustão, e controle do nível do tubulão superior por uma das estratégias descritas nos subitens de 2.6 - Sistema de controle de uma caldeira aquatubular). Ademais, cada formulário “HAZOP” elencou os parâmetros combinados com as palavras-guia que resultaram em desvios significativos no processo (caso contrário, não se aplicam ou não foram considerados neste cenário) e que não foram contemplados em outro nó de estudo.

Tabela 13 - Identificação das seções de estudo.

Identificador	Seção/Nó de estudo
Seção/Nó 1	Água de alimentação
Seção/Nó 2	Caldeira aquatubular
Seção/Nó 3	Ar de combustão
Seção/Nó 4	Combustível sólido (biomassa)

3.2 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na seção de estudo 1 (Água de alimentação) foram avaliados os parâmetros pH, dureza, concentração de sílica (pura ou misturada com outros sais) e concentração de gases dissolvidos (em especial, O₂ e CO₂). Pela análise das possíveis causas e consequências, nota-se a importância em se realizar o tratamento da água de alimentação/reposição (abrandamento ou desmineralização da água), desaeração (mecânica ou química), controle e monitoramento do pH, e procedimento correto de limpeza química da caldeira. Segundo BEGA (2003), o tipo de tratamento e os fatores a serem controlados devem ser cuidadosamente atendidos, pois a maioria das dificuldades operacionais da caldeira é advinda de problemas no tratamento da água de alimentação.

Em condições de exposição ao ataque ácido, de acordo com DANTAS (1988), a corrosão nas superfícies internas da caldeira é suscitada durante a etapa de operação das caldeiras ou associada à limpeza química nos períodos de paradas. Por estas duas situações, os desvios dos parâmetros selecionados, conforme descritos no Formulário HAZOP da Tabela 14, indicam diversas formas de corrosão: ácida generalizada, ácida localizada, cáustica localizada sob camadas de vapor (*nucleating boiling*) ou sob depósitos porosos, etc.

Além disso, o excesso de salinidade e/ou alcalinidade, e a presença de sólidos em suspensão (como borra de fosfatos e silicato de magnésio) podem gerar espuma (grande número de pequenas bolhas de vapor na superfície da água) e *priming* (projeção de bolhas no tubulão de vapor pela extrema vaporização em determinados tubos da caldeira), os quais em conjunto com a volatilização de sílica, perfazem as causas químicas de contaminação do vapor com gotículas de água da caldeira aquatubular.

Nesse sentido, os valores recomendados para alguns parâmetros definidores da qualidade da água de alimentação em função da pressão de trabalho da caldeira estão elencados na Tabela 14. Já entre as causas mecânicas responsáveis por este arrasto no equipamento, podem-se mencionar, sobretudo, as incrustações nas tubulações, o que reduz a produção nominal de vapor, e demanda de vapor superior à capacidade da caldeira. Como consequências, existe a possibilidade de incrustações no superaquecedor, com o risco ainda de rompimento da parede dos tubos pela falta de refrigeração; deposição nas sedes das válvulas, impedindo o fechamento; deposição nas linhas; diminuição da eficiência térmica; e contaminação de processos industriais em caso do uso de vapor direto (DANTAS, 1988).

Na seção de estudo 2 (Caldeira aquatubular), verificou-se o uso imanente de uma camada de proteção de controle para a pressão de vapor e nível do tubulão superior. Os efeitos deletérios na operação do processo em malha aberta para estes dois parâmetros já foram brevemente apresentados no item 2.6 e estão mais bem descritas no Formulário HAZOP da Tabela 15 como consequências de possíveis falhas do sistema de controle, incluindo falsas indicações dos medidores, vazamentos, ou imperícia na condução do equipamento.

Tabela 14 – Características recomendadas para água de caldeiras aquatubulares.

Pressão de serviço da caldeira (bar)	20	60	120
Água de alimentação à entrada do economizador			
Dureza total (mg/L CaCO ₃ máx.)	10	0,5	ND
pH	8,5 – 9,5	8,5 – 9,5	8,5 – 9,5
Oxigênio (mg/L máx.)	0,05	0,01	0,005
Ferro + Cobre + Níquel (mg/L máx.)	-	0,02	0,01
Sólidos totais, alcalinidade e sílica (mg/L máx.)	consistente com % de purgas		
Óleo (mg/L máx.)	ND	ND	ND
Água da caldeira			
Fosfato de sódio (mg/L Na ₃ PO ₄)	50 - 100	20 - 50	3 -10
Alcalinidade cáustica (mg/L CaCO ₃ mín.)	300	60	5
Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃ máx.)	700	300	40
Sílica (mg/L SiO ₂ máx.)	< 0,4 x alcalin. cáust.	20	2
Sulfito de sódio (mg/L Na ₂ SO ₃) ou hidrazina ⁽¹⁾ (mg/L N ₂ H ₄)	30 – 50 0,1 – 1,0	15 – 30 0,05 – 0,3	Nenhum -
Sólidos em suspensão ⁽²⁾ (mg/L máx.)	200	minimizar	minimizar
Sólidos dissolvidos (mg/L máx.)	3000	1200	100
Cloretos (mg/L Cl ⁻ máx.)	-	-	5

⁽¹⁾ A hidrazina decompõe-se em caldeiras a 120 bar: não se pode medir o teor residual; ele deve ser fixado com base no teor de O₂ da água de alimentação;

⁽²⁾ Em caldeiras que funcionam acima dos 40 bar, o teor de sólidos em suspensão deve ser minimizado para valores inferiores a 200 mg/L.

Fonte: ADENE, 2010.

As falhas nos sistemas de alimentação de ar de combustão e do combustível sólido, avaliados nas Tabelas 16 e 17 para as seções de estudo 3 (Ar de combustão) e 4 (Combustível sólido), respectivamente, constituem matizes perigosas de explosão e de fontes de poluentes atmosféricos (gases como monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dioxinas, fumaça e outros materiais particulados) com danos ambientais que, em muitos casos, são irreparáveis (MILARÉ, 2005). Neste sentido, o excesso de ar utilizado na caldeira deve garantir a combustão completa e a economia de bagaço de cana-de-açúcar no processo.

Verifica-se também que existe uma condição mínima no queimador, a qual é definida para se evitar o *flashback* ou retorno da chama (o fenômeno ocorre quando a velocidade da chama excede a velocidade da mistura ar-combustível).

Na seção de estudo 4, merecem atenção possíveis condições para uma deflagração de pó (*dust deflagration*) ou explosão de pó (*dust explosion*). Os eixos para as cinco condições para explosão de pó estão simbolizados pelo pentagrama de pó combustível da Figura 33. Foi identificado que parte do bagaço de cana-de-açúcar pulverizado pode ser desviado do sistema de alimentação do combustível sólido e depositado ao longo do tempo nos locais do setor da caldeira.

Quando esses pós são agitados ou colocados em suspensão, formando uma nuvem em ambiente confinado, na presença de uma fonte de ignição (faíscas de fricção, condutos de vapor de alta pressão e outras superfícies quentes) com energia suficiente para deflagração, o sistema poderá explodir. A explosão primária dissemina vibrações subsequentes pela onda de choque, que impelem e suspendem no ar pós depositados em outros locais, resultando em sucessivas explosões secundárias. Essa nuvem de pó, em geral, queima de modo mais fácil e violentamente quanto menor forem as dimensões das partículas (ECKHOFF, 2003).

A acumulação de pó/poeira pode ser evitada com a execução de manutenção preditiva (limpeza adequada para remoção de pó) e pelo uso de sistema de controle de perigo por pó/poeira explosiva. Já a eliminação das fontes de ignição e outras recomendações para prevenção de explosão de pó representam pilares atendidos nas normas da *National Fire Protection Association* (NFPA) – NFPA 652 (*Standard on the Fundamentals of Combustible Dust*) e NFPA 654 (*Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*).

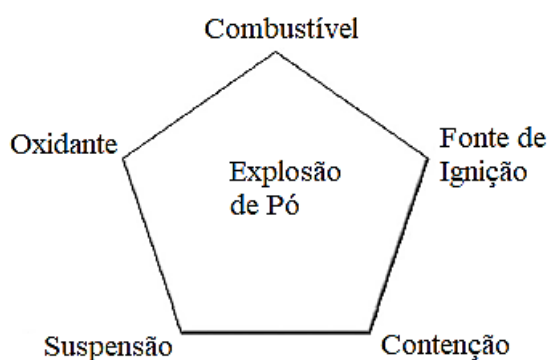


Figura 33 – Pentagrama de pó combustível. Fonte: Adaptado de OGLE, 2016.

Em uma visão análoga à hierarquia do gerenciamento de resíduos e sob a mesma ótica que orienta o direito ambiental, a prevenção deve ser o alvo de confluência das ações no critério de segurança (mesma ênfase dada na hierarquia de sistema de segurança para controle de perigos ou na concepção de projetos inerentemente mais seguros). A coalescência desta prioridade estratégica se manifesta, mormente, em evitar o perigo em sua totalidade, executar sequências de inspeção, análise de controle de qualidade e manutenção preditiva (de caráter preventivo e não corretivo) periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; e treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais. Deve-se considerar também as salvaguardas projetadas por engenheiros de controle para mitigar as consequências de eventos perigosos, implementando sistemas de controle com adequada sintonia dos controladores para manter a caldeira estável num cenário de desvio de um parâmetro do processo, perturbação na carga ou mudança de *setpoint*.

Em outras palavras, devem-se obedecer as diretrizes da NR-13, que exige a atualização do manual de operação, contendo no mínimo os procedimentos de partidas e paradas, procedimentos e parâmetros operacionais de rotina, procedimentos para situações de emergência e procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente. Somado a isto, aconselha-se incorporar possíveis recomendações de outras normas técnicas de segurança consagradas internacionalmente (a exemplo da NFPA).

Com efeito, foi observado, nos Formulários HAZOP propostos, que seguindo esse conjunto de ações de prevenção de perdas ou de redução dos riscos vinculados à segurança do trabalhador e do meio ambiente, o calvário das consequências alertadas pode ser evitado ou eliminado. Em cumprimento à norma regulamentadora adotada e à análise HAZOP, a documentação é de suma importância para atestar a conformidade das condições de segurança para operação da caldeira. A NR-13, neste contexto, define que imediatamente após a inspeção de segurança, realizada sob responsabilidade técnica de um Profissional Habilitado (PH), deve ser anotado no registro de segurança a condição operacional da caldeira e, na sequência, emitir o relatório para fazer parte da documentação do equipamento.

O relatório de inspeção deve conter informações como dados constantes na placa de identificação da caldeira; categoria da caldeira; tipo da caldeira; tipo de inspeção executada; data de início e término da inspeção; descrição das inspeções, exames e testes executados; registros fotográficos do exame interno da caldeira; resultado das inspeções e providências; relação dos itens da NR-13 que não estão sendo atendidos; recomendações e providências necessárias; parecer conclusivo quanto à integridade da caldeira até a próxima inspeção; data prevista para a nova inspeção da caldeira; nome legível, assinatura e número do registro no

conselho profissional do PH; nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção.

Tabela 15 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 1 (Água de alimentação).

Nome do Projeto: TCC - Estudo de Caso				Data: 14/11/2017		Página 1 de 11		Concluído:	
Processo: Caldeira Aquatubular - Cogeração								Nenhuma ação:	
Seção: Água de alimentação				Desenho de referência: Figura 32				Data de resposta:	
Item	Nó de estudo	Parâmetros do processo	Desvios (palavras-guia)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida/ Salvaguardas	Assinado por:		
1A	Nó 1	pH	Baixo (Less)	1. Ácida generalizada: escape de ácidos regeneradores durante a operação da caldeira ou proveniente de limpeza química conduzida incorretamente. 2. Ácida localizada: concentração elevada de sais ou de cloretos em geral.	1. Corrosão nas superfícies internas da caldeira. 2. Corrosão que se estende por todas as áreas cobertas onde se armazenou o ácido formado.	1. A prevenção consiste em alcalinizar a água de alimentação, utilizando soda cáustica não carbonatada e isenta de cloretos. Realizar pesquisas analíticas periódicas. 2. Utilizar águas abrandadas ou programa de dispersão avançado com a finalidade de evitar depósitos porosos; limitar o valor de cloretos na água de caldeira, conforme sua pressão de trabalho ou utilizar águas desmineralizadas.	HCO	11/2017	
1B	Nó 1	pH	Alto (More)	1. Cáustica localizada: concentração elevada de hidróxido de sódio.	1. Corrosão sob depósitos porosos (goivadura cáustica) ou sob camadas de vapor.	1. Limitar a presença de alcalinidade em função da pressão de trabalho das caldeiras.	HCO	11/2017	
1C	Nó 1	Dureza (Cálcio)	Alta (More)	1. Pouco e ineficiente controle da água da caldeira; tratamento inadequado, promovendo concentração elevada de sais.	1. Depósitos no interior dos tubulões ou nas superfícies de troca térmica (incrustação que reduz a produção de vapor e a eficiência térmica da caldeira); pode causar expansão e	1. Controlar qualidade da água da caldeira; aplicar produtos químicos na caldeira; uso de água abrandada.	HCO	11/2017	

Continua

Continuação da Tabela 15

					rompimento dos tubos; contaminação de vapor com gotículas de água (arrasto em caldeira); depósito em superaquecedores e nas sedes das válvulas.					
1D	Nó 1	Dureza (Cálcio)	Baixa (<i>Less</i>)/ Não (<i>No</i>)	1. Não se aplica.	1. Sem riscos de explosão ou danos à caldeira.	1. Não se aplica.	HCO	11/2017	x	
1E	Nó 1	Concentração (Sílica)	Alta (<i>More</i>)	1. Pouco e ineficiente controle da água da caldeira; tratamento inadequado; concentração elevada de sais.	1. Depósitos no interior dos tubulões ou nas superfícies de troca térmica (incrustação que reduz a produção de vapor e a eficiência térmica da caldeira); pode causar expansão e rompimento dos tubos; contaminação de vapor com gotículas de água; depósito em superaquecedores e nas sedes das válvulas.	1. Desmineralização; controlar qualidade da água da caldeira; aplicar produtos químicos na caldeira.	HCO	11/2017		
1F	Nó 1	Concentração (Sílica)	Baixa (<i>Less</i>)/ Não (<i>No</i>)	1. Não se aplica.	1. Sem riscos de explosão ou danos à caldeira.	1. Não se aplica.	HCO	11/2017	x	
1G	Nó 1	Concentração (gases dissolvidos: O ₂ e CO ₂)	Alta (<i>More</i>)	1. Tratamento incompleto na remoção de oxigênio; caldeira parada.	1. Corrosão da caldeira e sistema de alimentação. A maior ou menor difusão na água é responsável pela extensão do ataque à superfície metálica, que pode se alastrar por toda a caldeira.	1. Desaeração; uso de eliminador de oxigênio.	HCO	11/2017		
1H	Nó 1	Concentração (gases dissolvidos: O ₂ e CO ₂)	Baixa (<i>Less</i>)/ Não (<i>No</i>)	1. Não se aplica.	1. Sem riscos de explosão ou danos à caldeira.	1. Não se aplica.	HCO	11/2017	x	

Continua

Continuação da Tabela 15

II	Nó 1	Concentração	Parte de (<i>Part of</i>)/ Diferente de (<i>Other than</i>)	1. Não considerado possível neste cenário.	1. Não considerado possível neste cenário.	1. Não se aplica.	HCO	11/2017	x	
IJ	Nó 1	Concentração	Bem como (<i>As well as</i>)	1. Contaminação por outras impurezas como a dissolução de gás sulfídrico em água (absorção do gás H ₂ S do ambiente pela água de alimentação), produzindo ácido sulfídrico.	1. Depósitos no interior dos tubulões ou nas superfícies de troca térmica (por exemplo, depósito de sulfeto de ferro formado); corrosão intensa em todas as áreas da caldeira em função da concentração do contaminante.	1. Controlar qualidade da água da caldeira com pesquisas analíticas periódicas; não utilizar água contendo contaminantes como H ₂ S.	HCO	11/2017		

Tabela 16 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 2 (Caldeira aquatubular).

Nome do Projeto: TCC - Estudo de Caso				Data: 15/11/2017		Página 4 de 11		Concluído:		
Processo: Caldeira Aquatubular - Cogeração								Nenhuma ação:		
Seção: Caldeira aquatubular				Desenho de referência: Figura 32				Data de resposta:		
Item	Nó de estudo	Parâmetros do processo	Desvios (palavras -guia)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida/ Salvaguardas	Assinado por:			
2A	Nó 2	Pressão de vapor	Baixa (Less)	1. Vazamento oriundo da entrada de ar de combustão e do combustível sólido; falsas indicações de pressão ou imperícia na condução do equipamento; falha no controlador de pressão.	1. Menor rendimento na produção de vapor; resulta em gastos com manutenção e atraso na produção; perigo de explosão ou graves acidentes.	1. Realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de pressão (PRC).	HCO	11/2017		
2B	Nó 2	Pressão de Vapor	Alta (More)	1. Falsas indicações de pressão ou imperícia na condução do equipamento; falha no controlador de pressão; falha na(s) válvula(s) de segurança para abrir na pressão ajustada (Pressão Máxima de Trabalho Admissível); excesso de entrada de ar de combustão e combustível sólido; falha na bomba de alimentação de água.	1. Menor rendimento na produção de vapor; resulta em gastos com manutenção e atraso na produção; perigo de explosão ou graves acidentes (risco de acidente aumentado se houver falhas em juntas soldadas).	1. Realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de pressão (PRC).	HCO	11/2017		

Continua

Continuação da Tabela 16

2C	Nó 2	Nível (Tubulão Superior)	Alto (<i>More</i>)	1. Falsas indicações de nível ou imperícia na condução do equipamento; falha no controlador de nível; aumento brusco na demanda de vapor da caldeira (expansão ou “ <i>swell</i> ”).	1. Arraste de água no vapor e queda da temperatura na caldeira.	1. Uso de medidores de nível (direto, indireto ou descontínuo) em pleno funcionamento; realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de nível (LRC); em caso de aumento brusco na demanda de vapor, atrasar a mudança de aumento do fluxo de água.	HCO	11/2017		
2D	Nó 2	Nível (Tubulão Superior)	Baixo (<i>Less</i>)	1. Falsas indicações de nível ou imperícia na condução do equipamento; falha no controlador de nível; redução brusca na demanda de vapor da caldeira (contração ou “ <i>shrink</i> ”).	1. A superfície imersa na água fica reduzida e a ação do calor provoca deformações nos tubos, vazamentos, danos no refratário e, no pior dos casos, explosão.	1. Uso de medidores de nível (direto, indireto ou descontínuo) em pleno funcionamento; realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de nível (LRC); em caso de redução brusca na demanda de vapor, atrasar a diminuição do fluxo de água.	HCO	11/2017		
2E	Nó 2	Nível (Tubulão Superior)	Não (<i>No</i>)	1. Falsas indicações de nível ou imperícia na condução do equipamento; falha no controlador de nível.	1. O esgotamento da água dos tubos leva-os à fusão ou superaquecimento. Perigo de explosão iminente.	1. Uso de medidores de nível (direto, indireto ou descontínuo) em pleno funcionamento; realizar sequências de inspeção e	HCO	11/2017		

Continua

Continuação da Tabela 16

						manutenção periodicamente; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de nível (LRC).				
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabela 17 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 3 (Ar de combustão).

Nome do Projeto: TCC - Estudo de Caso				Data: 15/11/2017		Página 7 de 11		Concluído:	
Processo: Caldeira Aquatubular - Cogeração								Nenhuma ação:	
Seção: Ar de combustão				Desenho de referência: Figura 32				Data de resposta:	
Item	Nó de estudo	Parâmetros do processo	Desvios (palavras-guia)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida/ Salvaguardas	Assinado por:		
3A	Nó 3	Vazão	Baixa (Less)	1. Falha no controlador de vazão; injeção de ar de combustão abaixo do exigido para a combustão completa; vazamentos ou entupimentos na tubulação.	1. Combustão parcial/incompleta com formação de CO, fuligem e outros materiais particulados; redução da qualidade da combustão; fonte de poluição atmosférica; perigo de explosão em razão do acúmulo de combustível não queimado.	1. Análise dos produtos de combustão; realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de vazão (FIC).	HCO	11/2017	
3B	Nó 3	Vazão	Não (No)	1. Falhas no sistema de alimentação de ar de combustão.	1. Perigo de acidente/explosão em razão do acúmulo de combustível não queimado.	1. Realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais.	HCO	11/2017	
3C	Nó 3	Vazão	Alta (More)	1. Falha no controlador de vazão; injeção de ar de combustão além do excesso exigido para a combustão	1. O excesso de ar acima do exigido, diminui a temperatura e o comprimento da chama,	1 e 2. O excesso de ar deve ser mantido em níveis mínimos, compatíveis com a exigência de combustão completa; realizar	HCO	11/2017	

Continua

Continuação da Tabela 17

				completa.	e reduz sensivelmente a troca de calor por radiação, prejudicando a eficiência dos equipamentos; possível parada obrigatória para remoção do excesso de gás.	seqüências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador de vazão (FIC).				
				2. Falhas no sistema de alimentação de ar com perda momentânea da chama.	2. Enriquecimento no interior da fornalha com a mistura ar-combustível; explosão deflagrada pelo sistema de ignição ou por partes incandescentes da fornalha.					
3D	Nó 3	Vazão	Bem como (<i>As well as</i>)	1. Contaminação por impurezas como enxofre e NOx.	1. Corrosão ácida no pré-aquecedor de ar; fonte de poluição atmosférica.	1. Análise dos produtos de combustão; realizar seqüências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais.	HCO	11/2017		
3E	Nó 3	Vazão	Parte de (<i>Part of</i>)/ Reverso (<i>Reverse</i>)/ Diferente de (<i>Other than</i>)	1. Não considerado possível neste cenário.	1. Não considerado possível neste cenário.	1. Não se aplica.	HCO	11/2017	x	

Tabela 18 - Formulário HAZOP do Nó de Estudo 4 (Combustível sólido).

Nome do Projeto: TCC - Estudo de Caso				Data: 15/11/2017		Página 9 de 11		Concluído:	
Processo: Caldeira Aquatubular - Cogeração								Nenhuma ação:	
Seção: Combustível sólido				Desenho de referência: Figura 32				Data de resposta:	
Item	Nó de estudo	Parâmetros do processo	Desvios (palavras-guia)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida/ Salvaguardas	Assinado por:		
4A	Nó 4	Vazão	Baixa (Less)	1. Falha no controlador associado ao sistema de alimentação do combustível sólido; vazamentos ou entupimentos no sistema de alimentação do combustível sólido.	1. Reduz a quantidade de vapor produzido; pode ocorrer o fenômeno de "flashback"; acúmulo de ar no sistema.	1. Análise dos produtos de combustão; realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador associado ao sistema de alimentação do combustível sólido.	HCO	11/2017	
4B	Nó 4	Vazão	Não (No)	1. Falhas no sistema de alimentação do combustível sólido.	1. Passagem de apenas ar frio pela fornalha e pelo sistema de recuperação de calor, resfriando a caldeira.	1. Realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais.	HCO	11/2017	

Continua

Continuação da Tabela 18

4C	Nó 4	Vazão	Alta (More)	1. Falha no controlador associado ao sistema de alimentação do combustível sólido. 2. Falhas no sistema de alimentação do combustível sólido com perda momentânea da chama.	1. Combustão parcial/incompleta com formação de CO, fumaça e outros materiais particulados; redução da qualidade da combustão; fonte de poluição atmosférica. 2. Enriquecimento no interior da fornalha com a mistura ar-combustível; explosão deflagrada pelo sistema de ignição ou por partes incandescentes da fornalha.	1 e 2. O excesso de ar deve ser mantido em níveis mínimos, compatíveis com a exigência de combustão completa; realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais; adequada sintonia do controlador associado ao sistema de alimentação do combustível sólido.	HCO	11/2017		
4D	Nó 4	Vazão	Bem como (As well as)	1. Contaminação por impurezas como enxofre e NOx. 2. Combustão do bagaço de cana-de-açúcar na presença de traços de cloro. 3. Agitação ou suspensão do bagaço de cana-de-açúcar pulverizado no ar satisfazendo as condições definidas pelo pentagrama de pó combustível. Depósito de pó orgânico nos locais do	1. Corrosão ácida no pré-aquecedor de ar; fonte de poluição atmosférica. 2. Formação de dioxina, poluente orgânico persistente altamente tóxico e bioacumulativo. 3. Explosão de pó (Dust Explosion).	1 e 2. Análise dos produtos de combustão; realizar sequências de inspeção e manutenção periodicamente; avaliar e assegurar o cumprimento das etapas de serviço; treinar os operadores envolvidos na montagem das instalações e procedimentos operacionais. 3. A acumulação de pó/poeira pode ser prevenida com a execução de um projeto de limpeza adequado. Manutenção preditiva (remoção de pó). Uso de sistema de controle de perigo por pó/poeira explosiva. Seguir as	HCO	11/2017		

Continua

Continuação da Tabela 18

				setor da caldeira.		definições e recomendações da NFPA 652 e NFPA 654.				
4E	Nó 4	Vazão	Parte de (<i>Part of</i>)/ Reverso (<i>Reverse</i>)/ Diferente de (<i>Other than</i>)	1. Não considerado possível neste cenário.	1. Não considerado possível neste cenário.	1. Não se aplica.	HCO	11/2017		x

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

4.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho de conclusão de curso reúne informações, histórico e aplicações auferidas através de fragmentadas (re)leituras, análises e recortes temáticos vinculados ao estudo das caldeiras, com ênfase nas aquatubulares, e a cogeração na usina sucroenergética. Foi examinado o processo de venda de energia elétrica neste setor pelo ACR e ACL, bem como os sistemas de ciclo a vapor com destaque para o sistema de cogeração tipo *topping*. Contemplou-se também o quadro mais moderno em termos de resolução ambiental do CONAMA para os limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor; normas de segurança adotadas em sistemas de combustão e o amparo da análise HAZOP como método basilar para um estudo sistemático de um processo bem definido seja na fase de projeto ou em operação.

Sob a ótica do controle de caldeiras, foram investigadas somente as duas variáveis mais decisivas a serem controladas para o requisito de segurança - a pressão de vapor e o nível do tubulão superior. Vale ressaltar que o sistema de controle de uma caldeira deve ser estruturado e planejado sob o estratagema de mantê-la operando com segurança, com satisfatório rendimento e de forma estável. Por esta razão, a seleção das malhas de controle e do sistema de segurança infundido passa por um criterioso estudo, sendo que controles complementares são, amiúde, incorporados ao processo. Doravante, novas e mais sofisticadas caldeiras, turbinas e sistemas de energia exigirão a concepção e implementação de sistemas de controle digital. Trata-se, pois, de um momento histórico ímpar ao engenheiro de controle de caldeira a se perpetuar como parte integrante nas próximas gerações de processo.

A etapa final foi uma análise inspirada no método SHARD realizada a partir de um estudo de caso, fundamentado em um fluxograma de processo genérico de cogeração de uma usina sucroenergética. O processo escolhido foi a “Caldeira Aquatubular - Cogeração” (recorte do setor de caldeiras), avaliando os nós de estudo 1 (Água de alimentação), 2 (Caldeira aquatubular), 3 (Ar de combustão) e 4 (Combustível sólido). Verificou-se que as falhas por corrosão estão relacionadas, sobretudo, pela falta de tratamento da água de alimentação e de limpeza química adequada. Já as consequências advindas de falhas dos sistemas de controle (indigente sintonia ou equivalente operação em malha aberta) estão concentradas nas seções 2, 3 e 4, sendo estes dois últimos nós fontes potenciais de poluição atmosférica.

Em face dos desvios significativos apresentados neste trabalho, os esforços das ações requeridas e salvaguardas devem ser norteados pela prevenção como filosofia de projeto mais confiável de controle de perigo em prol do trabalhador e do meio ambiente. Urge, neste sentido, o cumprimento incessante dos procedimentos da NR-13 e consulta de outras metodologias de segurança, respaldado em registros de inspeção de segurança, como melhores estratégias de prevenção de perdas.

4.2 - SUGESTÕES

Para fornecer evidências de que a abordagem de análise de prevenção de perdas proposta neste trabalho é eficiente e desvela benefícios econômicos quando comparado ao estudo HAZOP, sugere-se a avaliação de outros cenários e sistemas mais complexos. Ademais, propõe-se a integração das informações, análises e registros desta ferramenta, nos moldes da metodologia HAZOP, com a técnica LOPA para atestar se existem camadas independentes de proteção suficientes para o conjunto de eventos perigosos identificados no estudo levantado.

ANEXO 1

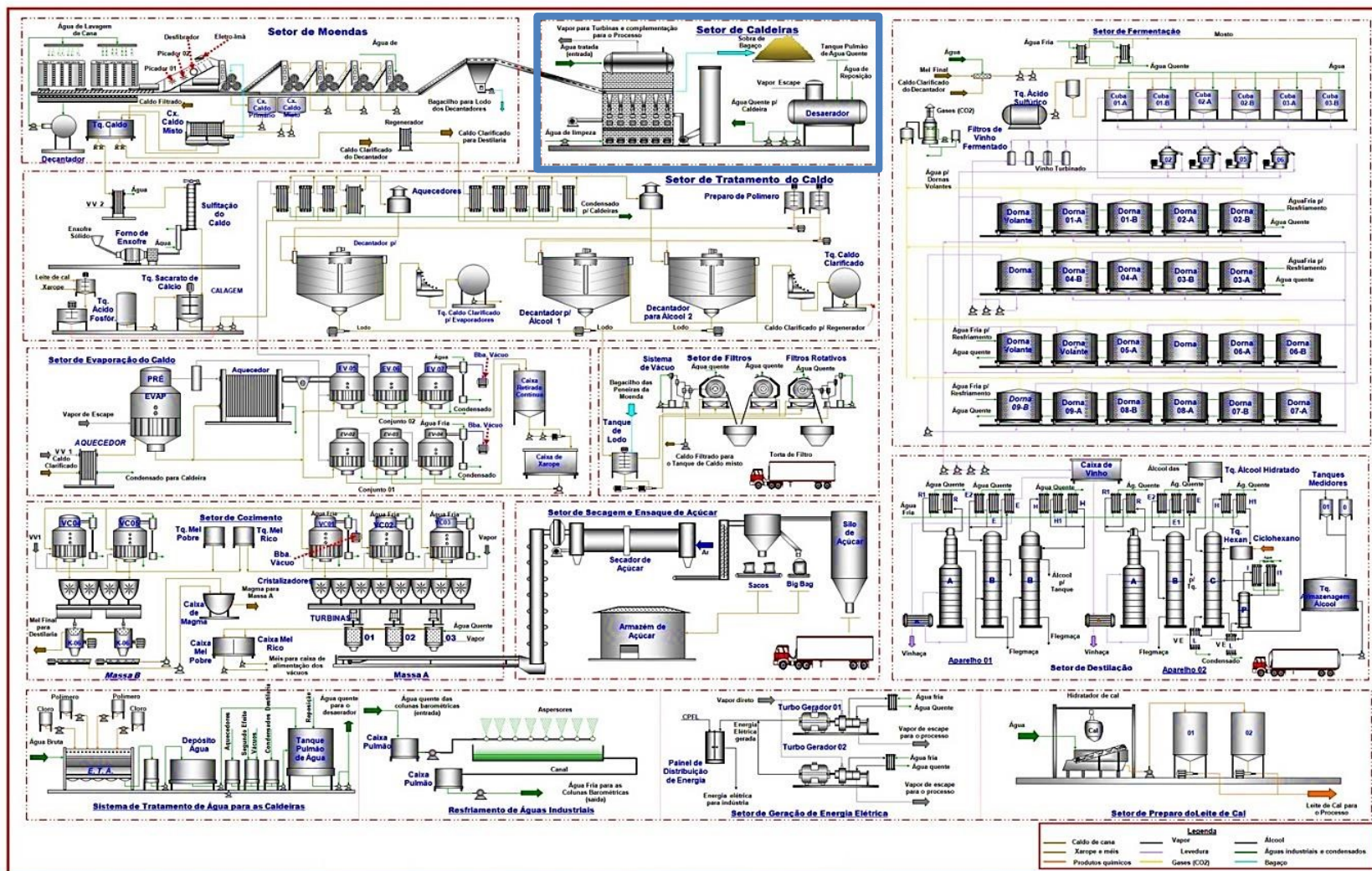


Figura 34 - Fluxograma de processo de uma usina sucroenergética. Fonte: adaptado de CTC, 2017.

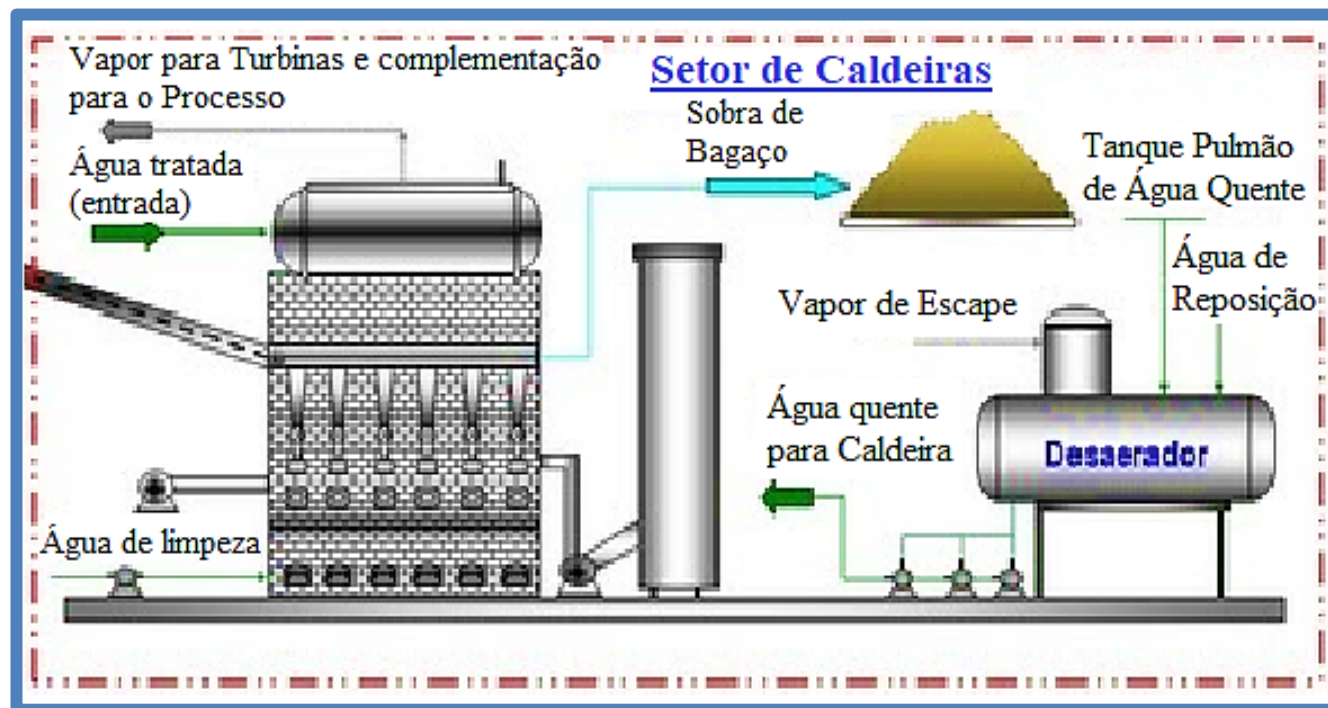


Figura 35 - Recorte do setor das caldeiras do fluxograma de processo de uma usina sucroenergética. Fonte: adaptado de CTC, 2017.

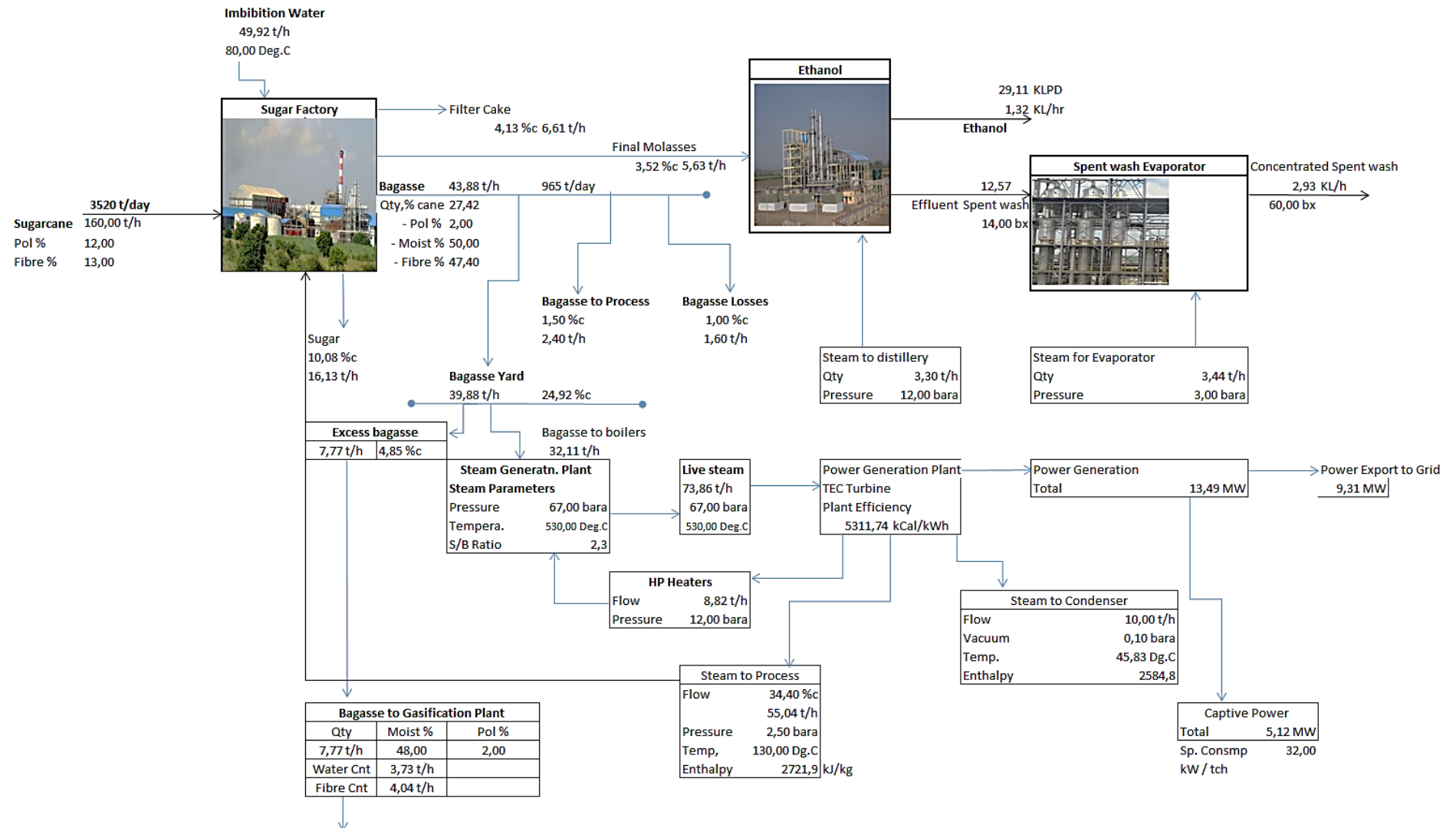


Figura 36 - Informações de correntes de uma usina sucroenergética. Fonte: adaptado de FLOW DIAGRAM SUGAR PLANT-1, 2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR-12177-1: Caldeiras estacionárias a vapor – Inspeção de segurança – Parte 1 – Caldeiras fogotubulares.**

ABNT. **NBR-12177-2: Caldeiras estacionárias a vapor – Inspeção de segurança – Parte 2 – Caldeiras aguatubulares.**

ABRADEE. **Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – A Distribuição de Energia.** Disponível em: <<https://goo.gl/WTD2Ve>>. Acesso em: agosto de 2017.

ADENE. **Relatório Final de Ação de Promoção de Eficiência Energética em Caldeiras de Vapor e de Termofluido.** 2010. Disponível em: <<https://goo.gl/ycnJJM>>. Acesso em: novembro de 2017.

AGUIAR, L. A. **Metodologias de análises de riscos: APP & HAZOP.** Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <goo.gl/9ehYs8>. Acesso em: agosto de 2017.

ALAMOUDI, N.; DAOUTIDIS, P. *Nonlinear control of coal-fired steam power plants. Control Engineering Practice* 60, p. 63-75, 2017.

ALTAFINI, C. R. **Curso de Engenharia Mecânica – Disciplina de Máquinas Térmicas – Apostila sobre Caldeiras,** 2002. Disponível em: <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeirasapostila.pdf>>. Acesso em: maio de 2017.

BAKAR, A. T.; HUSSAIN, M. A. *Advanced Control for a Fire-Tube Shell Boiler System. Chemical Product and Process Modeling*, v. 4: Iss. 1, Article 6, 2009.

BARJA, G. J. A. **A Cogeração e sua Inserção ao Sistema Elétrico.** 2006. 157 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 1.ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1992. 216 p.

BEGA, E. A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 179 p.

BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. **Operação de Caldeiras – gerenciamento, controle e manutenção**. São Paulo: Blucher, 2011. 204 p.

BRASIL. **Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004**. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL. **Resolução normativa nº 235, de 14 de novembro de 2006**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>>. Acesso em: agosto de 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 436, de 22 de dezembro de 2011**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: agosto de 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: novembro de 2017.

BRUNELLI, A. M. M. P.; PISANI JÚNIOR, R. **Proposta de disposição de resíduo gerado a partir da queima de bagaço de cana em caldeiras como fonte de nutriente e corretivo de solo**. In: Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 30º, Punta Del Este, 2006. Anais, 2006.

CARSON, R. **Primavera Silenciosa**. Trad. Claudia Sant'Anna Martins. São Paulo: Gaia, 2010. 327 p.

CARVALHO, F.R.; NOGUEIRA, L.A.H.; TEIXEIRA, F.N. **Cogeração e geração distribuída**. In: LORA, E.E.S.; NASCIMENTO, M.A.R. (2004). Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 1296 p.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **InfoMercado Semanal**, nº016 ao nº066. 2015a. Disponível em: <goo.gl/Z2J6Xd>. Acesso em: junho de 2017.

_____. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Geração Verificada das Usinas Térmicas a Biomassa**. Acordo Institucional. 2015b.

_____. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Comercialização**. Disponível em: < goo.gl/KDBqk1> . Acesso em: agosto de 2017.

COGEN EUROPE. *Educogen – An educational tool for cogeneration*. 2 ed. Brussels, Belgium: COGEN Europe, 2001.

CRAWLEY, F.; TYLER, B. *HAZOP: Guide to Best Practice – Guidelines to Best Practice for Process and Chemical Industries*. 3. ed. Elsevier, 2015.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*. 2. ed. Prentice Hall PTR, 2002.

CTC. **Fluxograma de Processo – Açúcar e Alcool**. Disponível em: <https://goo.gl/2Typ46>. Acesso em: outubro de 2017.

DANTAS, E. **Geração de Vapor e Água de Refrigeração: Falhas - Tratamentos - Limpeza Química**. Rio de Janeiro : José Olympio, 1988

DEAN, W. **A ferro e fogo: A história da devastação da Mata Atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1997. 484 p.

DUKELOW, S. G. *The Control of Boilers. International Society of Automation*. 2. ed. 1991. 414 p.

ECKHOFF, R. *Dust explosions in the process industries*. 3. ed. 2003. 719 p.

ENSINAS, A. V.; ARNAO, J. H. S.; NEBRA, S. A. *Increasing Energetic Efficiency In Sugar, Ethanol, and Electricity Producing Plants*. p.583-600. In Luis Augusto Barbosa Cortez (Coord.). *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*, São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/PeY1Xq>>. Acesso em: maio de 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2007. 408 p.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional - 2015, ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/mXHDgC>>. Acesso em: junho 2017.

_____. Empresa de Pesquisa Energética. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<https://goo.gl/XqHffA>>. Acesso em: junho de 2017.

FLOW DIAGRAM SUGAR PLANT-1. *Sugar Plant data 3500 TPD crushing plant*. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/315468088/Flow-Diagram-Sugar-Plant-1#>>. Acesso em: outubro de 2017.

GILMAN, G. F. *Boiler control systems engineering*. 2.ed. *International Society of Automation*. 2010. 217 p.

IELO, R. F.; SILVA, S. Y. **Estudo de caso: aplicação da ferramenta hazop em segurança de processos – empresa M&G - Poços de Caldas /MG**. 2015. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61511-3: *Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 3:*

guidance for the determination of the required safety integrity levels. 1. ed. Genebra: IEC, 2003.

KILGROE, J. D.; SEDMAN, C. B.; SRIVASTAVA, R. K.; RYAN, J. V.; LEE, C. W.; THORNELOE, S. A. ***Control of Mercury Emission from Coal-Fired Electric Utility Boilers: Interim Report***. EPA, 2002.

LAGEMANN, V. **Combustão em caldeiras industriais: óleos & gás combustível**. 1.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2016. 281 p.

LIMA, T. M. **Estudo energético do bagaço de diferentes variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 73 f. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/97755>>. Acesso em: junho de 2017.

LIZARRAGA, J. M. S. **Cogeneración. Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos**. Servicio Editorial Universidad Pais Vasco, Bilbao, 1994.

LORA, E. S. **Controle da Poluição do Ar na Indústria Açucareira**. Stab, 2000. 74p.

MAJANNE, Y. ***Model predictive pressure control of steam networks***. *Control Engineering Practice* 13, p. 1499–1505, 2005.

MCDERMID, J.; NICHOLSON, M.; PUMFREY, D.; FENELON, P. ***Experience with the application of HAZOP to computer-based systems***. *The 10th Annual Conference on Computer Assurance*; Gaithersburg, MD; USA. 1995.

MILARÉ, É. **Direito do ambiente: doutrina, prática, jurisprudência e glossário**. 5. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2005. 1119 p.

NETO, V. C.; RAMON, D. **Análises de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro**. Vibhava Consultoria S.A. Ltda – *Sustainable Energy Technology Assistance Program (SETAP) Brazil Representation*, Brasília, 2002.

NOGUEIRA, L. A.; ROCHA, C. R.; H. NOGUEIRA, F. J. **Eficiência energética no uso de vapor**. Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA. Rio de Janeiro. 2005.

NOLAN, D. P. *Safety and Security Review for the Process Industries: Application of HAZOP, PHA, What If and SVA Reviews*. 4 ed. Elsevier, 2015.

NOVA CANA. **A produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo)**. Disponível em: <<https://goo.gl/W4VdFX>>. Acesso em: junho de 2017.

NR-13. Norma Regulamentadora 13 do Ministério do Trabalho e Emprego. Manual Técnico de Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br>>. Acesso em: maio de 2017.

OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025**. OECD Publishing, Paris. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-en>. Acesso em: junho de 2017.

OGLE, R. A. *Dust Explosion Dynamics*. Elsevier, 2016. 686 p.

PAZIAN, J. A., **Desenvolvimento de um sistema de análise do potencial de cogeração de energia elétrica em uma usina de açúcar e álcool**. 2004. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.

PERA, H. **Geradores de vapores**. Editora Fama: São Paulo, 1990.

PEREA, L. A. **Avaliação Técnico-Econômica do Processo de Cogeração em uma Indústria Sucroalcooleira**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

PERES, N. P. **Eficiência em caldeiras na agroindústria canavieira**. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. 1982. 45 p.

PERLATTI, B. **Desenvolvimento de métodos para estudo de dioxinas presentes na cinza do bagaço da cana-de-açúcar: avaliação do potencial biorremediador de cepas microbianas em compostagem aeróbica.** 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química/UFSCar, São Carlos, 2012.

PINTO, S. S. **Qualificação do trabalho dos operadores de equipamentos automatizados em uma empresa sucroalcooleira paulista.** 2000. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - DEP/UFSCar, São Carlos, 2000.

SACHS, I. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável.** In: STROH, Paula Yone (Org.). Rio de Janeiro: Garamond, 2000. 96 p.

TEIR, S. ***Steam Boiler Technology.*** 2.ed. *Helsinki University of Technology.* 2003. 218 p.

UNICA. União da indústria de cana-de-açúcar. **Unicadata.** Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em: agosto de 2017.