



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
PROGRAMA TECNOLOGIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS

**THIAGO SOUSA DE OLIVEIRA**

**REALIDADE VIRTUAL EM TREINAMENTO E SEGURANÇA  
OPERACIONAL: UM ESTUDO APLICADO A CALDEIRA SEMI-  
INDUSTRIAL**

**RIO DE JANEIRO**

**2012**

THIAGO SOUSA DE OLIVEIRA

REALIDADE VIRTUAL EM TREINAMENTO E SEGURANÇA OPERACIONAL:  
UM ESTUDO APLICADO A CALDEIRA SEMI-INDUSTRIAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Tecnologia de Processos  
Químicos e Bioquímicos, para a obtenção do título de  
Mestre em Ciências (M.Sc.).

Orientadores: Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc  
Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO  
SETEMBRO 2012



## FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Thiago Sousa de,  
Realidade Virtual em Treinamento e Segurança  
Operacional: Um Estudo Aplicado a Caldeira Semi-Industrial/  
Thiago Sousa de Oliveira – Rio de Janeiro, 2012.

xvi, 121f. : il.

Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos  
Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2012.

Orientador: Maurício Bezerra de Souza Junior

1. Simulação de processos. 2. Realidade Virtual. 3.  
Segurança de Processos. 4. Maquetes Eletrônicas 3D. 5.  
Interoperabilidade de ferramentas. – Teses. I. De Souza Jr.,  
Maurício Bezerra (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e  
Bioquímicos, Escola de Química. III. Título.

THIAGO SOUSA DE OLIVEIRA

REALIDADE VIRTUAL EM TREINAMENTO E SEGURANÇA OPERACIONAL:  
UM ESTUDO APLICADO A CALDEIRA SEMI-INDUSTRIAL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO  
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS  
QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS DA ESCOLA DE QUÍMICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

APROVADA POR:

---

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

---

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

---

Mario Cesar M. Massa de Campos, D.Sc.

---

Prof. Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

---

Thiago de Sá Feital, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
SETEMBRO DE 2012

A Deus,  
que me deu a oportunidade de estar onde estou hoje.

Aos meus pais,  
que sempre me ensinaram que só se consegue o que se quer com trabalho e força de vontade.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu professor orientador Maurício Bezerra de Souza Jr., que me acompanha desde a graduação e projeto final de curso, por sua paciência, ensinamentos e confiança depositada.

Ao professor e co-orientador Carlos André Vaz Jr., que apesar de entrar na orientação posteriormente, depositou uma atenção e ajuda que foram incalculáveis para a idealização deste trabalho.

Aos meus pais, senhor José de Paula e senhora Maria da Conceição, que me colocaram neste mundo, com a ajuda de Deus, me dando todo o suporte, educação e amor que me propiciaram a ser quem sou hoje.

À professora Rossana Odette Mattos Folly, que nos recebeu no LADEQ com atenção e seriedade e permitiu acesso às instalações usadas neste trabalho.

À doutoranda Andrea Valdman, que nos guiou no LADEQ, informando dados operacionais e características instrumentais e de processo da unidade estudada, além de disponibilizar dados de sua dissertação de mestrado que foram usados neste trabalho.

Ao doutorando Jose Marcio Nikiel, que através de sua dissertação de mestrado, possibilitou a disseminação das rotinas em Matlab usadas como base dos programas desenvolvidos neste trabalho para simulação da caldeira semi-industrial.

À AVEVA do Brasil Informática, por me capacitar, me dar as oportunidades que hoje tenho, por permitir minha ausência para realização das atividades relacionadas a este trabalho e pela autorização de uso de seu software.

A minha namorada Cristiane Altomari Teixeira, que sempre me apoiou, me deu forças e me incentivou em cada momento, com muito carinho e amor, do início ao fim deste e de todos os trabalhos na minha vida.

**Resumo:**

OLIVEIRA, Thiago Sousa de. Realidade Virtual em Treinamento e Segurança Operacional: Um Estudo Aplicado a Caldeira Semi-Industrial. Orientador: Maurício Bezerra de Souza Júnior. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

O curto prazo imposto para se aprender uma determinada tarefa associado às cobranças por maiores níveis de produção, visando a lucros cada vez maiores, são motivos potenciais para a geração de acidentes. Buscando contornar a dificuldade em se treinar um grande número de operadores em ambiente similar ao de trabalho, desenvolveu-se um sistema supervisor tridimensional, integrando simulação fenomenológica dinâmica, programada em Matlab, e Realidade Virtual (RV), elaborada em *Plant Design Management System*® (PDMS). A ferramenta desenvolvida de modelagem tridimensional de planta industrial permite também realizar diferentes análises de segurança, como à localização ótima de extintores e de rotas de fuga, entre outros recursos. Para estudo de caso, escolheu-se uma planta piloto de uma caldeira aquatubular semi-industrial, de 0,3 MW de potência, localizada na Escola de Química da UFRJ. Buscou-se ainda a interação entre o usuário e o modelo, desenvolvendo-se um interpretador de dados de processo, permitindo com que o modelo seja modificado em função de ações realizadas pelo operador. A ferramenta desenvolvida pode minimizar retrabalho, acidentes e perdas, ao propiciar o aumento do entendimento do processo pelo operador. Adicionalmente, essa metodologia pode ser replicada em outras plantas industriais.

**Abstract:**

OLIVEIRA, Thiago Sousa de. Virtual Reality Applied to Training and Operational Safety: A Semi-Industrial Boiler Case Study. Supervisor: Maurício Bezerra de Souza Júnior. Rio de Janeiro: EQ/UFRJ, 2012. Dissertation (Graduate Program on Technology of Chemical and Biochemical Processes).

The short-term time given to learn a particular task associated with the demands for higher levels of production to increase profits are potential reasons for the generation of accidents. Seeking to overcome this situation in training a large number of operators in a similar environment in which they will work, a 3D SCADA, integrating phenomenological simulation developed in Matlab, and Virtual Reality (VR), using Plant Design Management System© (PDMS), were developed in this work. Additionally, the developed 3D plant model based tool allows different safety tasks, such as the optimum location of fire extinguishers and escape routes, among others. As a case-study, a semi-industrial boiler, located in Escola de Química, UFRJ, was chosen. The interaction between the user and 3D model was addressed by developing a process data interpreter, so that the model may be modified on the basis of actions taken by the operator. As the developed tool improves the operator's understanding of the process, it may minimize rework, accidents and damage. Additionally, this methodology may be replicated in other industrial plants.

## Sumário:

CAPÍTULO 1 .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Motivações .....	1
1.2 Objetivo .....	4
1.3 Organização .....	4
CAPÍTULO 2 .....	6
2. A REALIDADE VIRTUAL E SUAS APLICAÇÕES.....	6
2.1 Apresentação .....	6
2.2 Realidade Virtual.....	6
2.3 <i>Plant Design Management System</i> (PDMS) .....	17
2.4 Procedimentos e considerações sobre treinamentos .....	29
CAPÍTULO 3 .....	33
3. ASPECTOS GERAIS SOBRE CALDEIRAS .....	33
3.1 Apresentação .....	33
3.2 Disposições Gerais .....	33
3.4 Modelo Dinâmico Não Linear para Caldeira Aquatubular .....	46
CAPÍTULO 4 .....	52
4. ESTUDO DE CASO .....	52
4.1 Apresentação .....	52
4.2 Planta Semi-industrial Analisada.....	52
4.2 Especificação Técnica.....	56
4.3 Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de dados -SCADA - para monitoramento....	56
4.4 Simulação do Modelo Utilizado.....	59
CAPÍTULO 5 .....	68
5. MODELAGEM E INTEGRAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	68
5.2 Modelo 3D da Planta de Geração de Vapor estudada.....	68
5.3 Integração entre simulação e modelo 3D .....	70
5.4 Interpretação dos dados integrados pelo sistema tridimensional .....	72
CAPÍTULO 6 .....	79
6. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE TREINAMENTO E ANÁLISE DE SEGURANÇA EM REALIDADE VIRTUAL.....	79
6.2 Objetivo da Ferramenta Desenvolvida.....	79
6.3 Interface Gráfica da Ferramenta Desenvolvida .....	79
6.4 Aplicação dos treinamentos e simulações tridimensionais desenvolvidos.....	85
CAPÍTULO 7 .....	93

7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	93
7.2	Conclusões .....	93
7.3	Trabalhos Futuros .....	95
	CAPÍTULO 8 .....	98
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	98
	APÊNDICE .....	104
	APENDICE A – Deduções das Equações do Modelo de ÅSTRÖM & BELL Para Uma Caldeira....	104



## Lista de Figuras:

Figura 1. Ivan Sutherland e o Sketchpad, no MIT, em 1963 .....	8
Figura 2. O Head-mounted Display desenvolvido por Ivan Sutherland .....	8
Figura 3. Exemplos de tipos de Realidade Virtual.....	10
Figura 4. Exemplo de uma Rede de Petri e sua mudança de estado .....	11
Figura 5. Treinamento RV em modo guiado para execução de procedimentos. ....	12
Figura 6. Montagem de peças de um veículo .....	13
Figura 7. Demonstração de dados extras de um determinado elemento da RV.....	14
Figura 8. Exemplificação do sistema VDT usando RV imersiva .....	16
Figura 9. Treinamento de manutenção de peças usando ambiente do <i>V-Realism</i> .....	17
Figura 10. Exemplo de classificação de área 3D .....	18
Figura 11. Exemplificação de possibilidades de modelagens detalhadas de grandes instalações com extração de dados ao mesmo tempo.....	22
Figura 12. Possibilidades de edição de elementos de forma direta e informações explícitas na interface para auxiliar o usuário.....	23
Figura 13. Possibilidades de rotação de elementos em relação aos pontos escolhidos pelo usuário .....	23
Figura 14. Exemplo de desenho extraído do módulo Draft de uma peça de duto de ventilação .....	25
Figura 15. Componentes de um treinamento: Entrada - processo - saída - retroação .....	30
Figura 16. Fases de um ciclo de treinamento .....	31
Figura 17. Modelo Esquemático de uma Caldeira Genética .....	34
Figura 18. Esquema de uma Caldeira Flamotubular .....	35
Figura 19. Caldeira Flamotubular .....	35
Figura 20. Esquema de uma Caldeira Aquatubular .....	36
Figura 21. Caldeira Aquatubular .....	37
Figura 22. Esquema Particionado de uma Caldeira Aquatubular .....	38
Figura 23. Esquema dos Principais Controles de uma Caldeira .....	43
Figura 24. Controle de Nível de uma caldeira a três elementos. ....	44
Figura 25. Exemplo de controle auto operado.....	45
Figura 26. Planta piloto da central de utilidades do Laboratório de Engenharia Química/EQ/UFRJ ....	53
Figura 27. Diagrama P&I da Central de Utilidades .....	55
Figura 28. Tela principal de operação da Caldeira .....	57
Figura 29. Tanques de Biodiesel.....	58
Figura 30. Tanque de Alimentação de Combustível .....	58
Figura 31. Caldeira Aquatubular estudada e seus instrumentos .....	59

Figura 32. Simulação do nível da caldeira em estado estacionário.....	62
Figura 33. Variação de $V_{wt}$ e $V_{st}$ após degrau de -100% em $m_w$ .....	63
Figura 34. Comportamento do Título do Vapor após degrau em $m_w$ de -100% .....	64
Figura 35. Simulação da pressão da caldeira em estado estacionário .....	65
Figura 36. Simulação da pressão da caldeira após degrau em $m_w$ .....	65
Figura 37. Simulação da dinâmica da pressão da Caldeira com degrau de 25% em $m_s$ .....	66
Figura 38. Simulação da dinâmica da pressão da caldeira com diferentes degraus em $Q$ .....	66
Figura 39. Simulação da dinâmica da temperatura do vapor com diferentes degraus em $Q$ .....	67
Figura 40. Modelo 3D da Central de Utilidades estudada - visão geral.....	69
Figura 41. Modelo 3D da planta estudada com operador e equipamentos de segurança .....	70
Figura 42. Conteúdo de Arquivo de importação entre sistemas .....	71
Figura 43. Janela de interface de Controle de tempo de integração.....	71
Figura 44. Mensagens geradas pela integração .....	72
Figura 45. Janela de Gerenciamento de Equipamentos com dados integrados .....	74
Figura 46. Dados de processo importados visualizados no modelo 3D.....	75
Figura 47. Área virtual sem visualização dos dados de processo .....	75
Figura 48. Lista de equipamentos e seus limites operacionais .....	76
Figura 49. Exemplos de equipamentos em diferentes estados operacionais .....	77
Figura 50. Interface Gráfica para Interação com o Operador Virtual .....	80
Figura 51. Movimentação básica do operador virtual nas direções cardeais.....	81
Figura 52. Ferramentas de apoio de movimentação.....	82
Figura 53. Exemplo de uso da verificação de acesso do operador a elementos que estejam acima dele .....	83
Figura 54. Ferramenta de posicionamento explícito do operador virtual.....	84
Figura 55. Funcionalidades de treinamento da interface.....	84
Figura 56. Lista de atividades mapeadas para partida da caldeira estudada.....	85
Figura 57. Exemplo de mensagem de inicialização de uma etapa de treinamento. ....	86
Figura 58. Exemplo da janela com etapas concluídas listadas. ....	86
Figura 59. Exemplo da Aplicação em andamento durante a partida da Caldeira .....	87
Figura 60. Área analisada após a partida da caldeira .....	88
Figura 61. Simulação de rota de fuga pela saída à esquerda da unidade.....	89
Figura 62. Simulação de rota de fuga pela saída à direita da unidade .....	89
Figura 63. Identificação pela ferramenta da unidade extintora mais próxima do operador .....	91
Figura 64. Área de atuação do extintor escolhido mostrado automaticamente .....	91
Figura 65. Barra de ferramentas criada para permitir ao usuário acessar as funcionalidades criadas....	92

Figura 66: Tubo vertical com fluxo de calor uniforme .....	111
--	-----

## **Lista de Tabelas:**

Tabela 1. Lista de equipamentos associados à Caldeira do LADEQ/EQ/UFRJ .....	54
Tabela 2. Especificação Técnica da Caldeira Modelo CV-VDM-500 .....	56
Tabela 3. Variáveis contínuas disponíveis na instrumentação da caldeira .....	57
Tabela 4. Propriedades Termodinâmicas da água saturada (fase líquida) .....	61

## Lista de Abreviaturas:

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BEG	<i>Balanço de Energia Global</i>
BMG	<i>Balanço de Massa Global</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CFD	Fluido Dinâmica Computacional
COSCIP	Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico
EQ	Escola de Química
HH	Homem-hora
HVAC	<i>Heat, Ventilation and Air Conditioning</i>
LADEQ	Laboratório de Engenharia Química
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
P&I	<i>Process and Instrumentation</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagrams</i>
PDM	<i>Product Data Management</i>
PDMS	<i>Plant Design Management System</i>
PML	<i>Programmable Macro Language</i>
PML	<i>Programmable Macro Language</i>
RV	Realidade Virtual
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
TI	Tecnologia da Informação
UDA	<i>User defined attributes</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VDT	<i>Virtual Development and Training Platform</i>

## Lista de Símbolos:

### Símbolos Latinos

$A$	Área da secção transversal do tubo ( $m^2$ )
$C_p$	Calor Específico do metal
$k$	Coefficiente de fricção dimensional
$L$	Comprimento (m)
$u$	Energia Interna Específica
$h_c$	Entalpia de Condensação
$h$	Entalpia Específica (J/kg)
$Q$	Fluxo de Calor (W)
$q$	Fluxo Mássico (kg/s)
$q_{cd}$	Fluxo mássico de condensação (kg/s)
$q_{qd}$	Fluxo Mássico de entrada nos <i>risers</i> (kg/s)
$q_{sd}$	Fluxo mássico de vapor através da superfície líquida no tubulão (kg/s)
$m_t$	Massa Total de Tambor e Tubos de Metal (kg)
$l$	Nível de Água no tubulão
$p$	Pressão da Caldeira
$t_s$	Temperatura de saturação do Vapor
$t_m$	Temperatura do Metal
$t$	Tempo (s)
$T_d$	Tempo de residência do vapor no tubulão
$V$	Volume ( $m^3$ )
$V_{wd}$	Volume de água abaixo do nível líquido no Tubulão ( $m^3$ )
$V_{sd}^0$	Volume de vapor no tubulão considerando a não condensação
$V_{sd}$	Volume do vapor abaixo do nível líquido no Tubulão ( $m^3$ )

### Símbolos Gregos

$\rho$	Densidade Específica (kg/ $m^3$ )
$\alpha_m$	Fração mássica de vapor
$\bar{\alpha}_v$	Fração volumétrica média de vapor

### Índices

w	Água
f	Alimentação de Água
m	Metal
t	Total
r	Tubos Ascendentes ( <i>risers</i> )
dc	Tubos Descendentes ( <i>downcomers</i> )
d	Tubulão
s	Vapor

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivações

Alinhar segurança de processos, alta produtividade e preservação ambiental é um desafio permanente a ser superado pela engenharia. Lidar com essa questão torna-se ainda mais difícil nos dias atuais, tendo em vista a complexidade crescente dos processos industriais e da quantidade crescente de informações sobre suas variáveis, além de prazos ambiciosos de entrega e exigências de elevada produtividade.

Para que tal situação não comprometa a segurança de processos, já que os controladores padrões não podem tratar de maneira adequada condições anormais (CHIANG, RUSSELL e BRAATZ, 2001), o campo de “Detecção e Diagnóstico de Falhas” vem despertando interesse crescente na indústria e na academia (VENKATASUBRAMANIAN et al., 2003a).

Nesta área, alguns trabalhos mostram a grande gama de possibilidades que um sistema com este proporciona. SOUZA et al. (1996 e 2000), mostrou o uso de redes neurais para o controle preditivo para uma unidade de craqueamento catalítico fluidizado e para um reator de polimerização, indicando ótimos resultados. Em outras abordagens, fizeram uso de biosensores para controle de processos. Nesta área, FOLLY & VALDMAN (1993) foram umas das primeiras a analisarem o tema como forma de tecnologia, enquanto que SOUZA et al. (2003) a aplicou como uma alternativa para controle de processos.

Entretanto, mesmo com todo o aparato implementado pelos sistemas de Detecção de Falhas, os erros humanos ainda são responsáveis por uma parcela expressiva de incidentes na indústria (LASALA et al., 1997). Alguns estudos indicam uma média de até 90% de incidentes atribuídos à falha humana (LEE et al., 1988). É importante destacar que tal parcela pode ser atribuída ao fato de que praticamente todos os sistemas de Detecção e Diagnóstico ainda necessitam, direta ou indiretamente, da intervenção humana. Deste modo, permanecem em maior ou menor grau sujeitos a chamada “falha humana”.

CHIANG, RUSSELL e BRAATZ (2001) mostraram diversas fases de monitoramento de um processo. Dentre estas fases, considera-se a etapa de intervenção uma das determinantes para se verificar se todo o trabalho realizado pelo sistema de detecção de falhas teve seu propósito e objetivo alcançados. Assim, pode-se concluir que a prevenção de um acidente, dependerá, na maioria dos casos, do operador que tomará a ação.

Logo, verifica-se que embora os sistemas de detecção sejam cada vez mais avançados, os acidentes continuam ocorrendo. Muitas vezes estando relacionados ao desconhecimento, falhas de treinamento, afastamento entre o trabalho prescrito e realizado, falhas institucionais e até por incompatibilidade entre os comandos humanos e o sistema automático (EVANS, 1998). Assim, torna-se essencial realizar não uma mudança no foco na busca de prevenção de acidentes, e sim uma divisão do foco, para que seja considerado também o fator humano nesta busca por prevenção.

Existem diversos estudos que avaliam a confiabilidade humana nos processos. FILGUEIRAS (1999) foi uma das autoras que desenvolveram trabalhos nesta área, onde mostrou a importância do ser humano ser inserido no contexto da prevenção de acidentes. Essa inclusão deve ir além da operação abrangendo também os desenvolvedores de equipamentos e sistemas.

Entende-se como essencial para o operador o pleno conhecimento do sistema no qual trabalha. Porém com a crescente demanda por aumento de produtividade, dispor de profissionais com tal característica torna-se cada vez mais raro. Isto se deve ao fato das etapas, antes essenciais, de treinamento serem reduzidas e muitas vezes realizadas concomitantes com a atividade diária do profissional. Além disso, o Brasil vive um momento de pleno emprego e consequente elevada rotatividade empregatícia, o que eleva a demanda por mão de obra qualificada, em contrapartida que sofre da falta da mesma especializada. Desta forma, para suprir tal necessidade de treinamento no caso de profissionais recém-chegados ao mercado de trabalho ou para reciclagem de profissionais mais experientes, sente-se a necessidade de se desenvolver ferramentas que auxiliem o operador a entender como operar determinadas plantas ou equipamentos, de forma que o mesmo possa virtualmente operar o mesmo equipamento que irá operar na realidade, isto é, conforme construído.

Há, portanto, uma grande busca por um sistema que possa conter informações sobre o projeto, além de oferecer recursos para visualização tridimensional para que



possa ser usado na revisão do mesmo, mudanças nos sistemas de gerenciamento e treinamentos, além de outras atividades (CORSEUIL e RAPOSO, 2004).

Para tal cenário, as indústrias estão cada vez mais optando pelo uso da Realidade Virtual (RV) para treinamento, onde a RV pode ser definida como um ambiente tridimensional gerado por computador, atualizado em tempo real, que permite a interação humana através de vários dispositivos de entrada e saída (PAMPLONA Jr., 2006). Possuindo uma gama de representações bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), essa ferramenta permite que se explorem objetos virtuais com o nível de detalhe que é requerido para cada situação (BURDEA e COIFFET, 2003).

Além desta função, a realidade virtual é usada em diversos estudos que permitem um entendimento maior em termos de segurança e controle de processos em diversas áreas da engenharia, tais como análises de alocação de alarmes, análises de classificação de área elétrica, análise de molhabilidade de equipamentos por seus bicos aspersores e/ou *sprinklers*, determinação de rotas de fugas, entre outros.

Com todas essas características e vantagens, o uso de maquetes eletrônicas 3D vem sendo ampliado na área de projetos de engenharia, bem como na indústria. Poder associar tal ferramenta com a simulação de processo e operação traz vantagens ainda maiores, com o potencial de minimizar diversos problemas operacionais, bem como riscos e acidentes. Com tal integração, é possível obter maior confiabilidade humana no processo, que fará com que os sistemas de detecção e diagnóstico de falhas associados não precisem ser tão complexos a ponto de se tentar prever todas as inconsistências operacionais possíveis, sendo que tal busca é e sempre será algo utópico, pois prever o que cada profissional fará em uma dada situação é uma tarefa que abre espaços para estudos do perfil do profissional, característica altamente mutável no mercado de trabalho e quase sempre indisponível no desenvolvimento de ferramentas de detecção e diagnóstico. Entretanto, é uma tendência considerar tal fator, que é alvo de estudos da chamada Análise de Confiabilidade Humana (ACH), área esta que possui diversos métodos de análise buscando prever o comportamento do operador em uma situação de emergência. Entre alguns trabalhos, pode-se citar PYY (2000), o qual analisou alguns métodos de Análise de Confiabilidade Humana para segurança probabilística e SETKAR (2005) que revisou os principais métodos de ACH, indicando suas vantagens e considerações.

## 1.2 Objetivo

Esta dissertação tem como o objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação da dinâmica operacional de equipamentos industriais, acoplando representação gráfica em maquete eletrônica 3D. O acoplamento destes recursos deve permitir a possibilidade de visualização de alarmes, estudo de condições operacionais, identificação de riscos, apontamento de rotas de fuga e unidades extintoras mais apropriadas em vista da localização operacional, determinação de parâmetros ergonômicos de operações comuns em uma planta industrial e procedimentos de operação para que possa beneficiar o grupo operacional da referida planta.

Com o desenvolvimento da ferramenta citada, buscar-se-á aplicá-la a um equipamento de geração de vapor em planta de utilidades, estudando, a dinâmica de uma caldeira semi-industrial. A caldeira aqui simulada encontra-se instalada na Central de Utilidades do Laboratório de Engenharia Química da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LADEQ/EQ/UFRJ). Em relação ao modelo matemático empregado na simulação dinâmica, adotou-se o modelo de ÅSTRÖM & BELL (2000), também empregado em MARQUES (2005), NIKIEL (2010) e PALMA (2006). O emprego de simulação dinâmica foi necessário para determinação de procedimentos de partidas e paradas da caldeira com seus equipamentos associados (bombas, tanques, entre outros).

## 1.3 Organização

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação está estruturada como segue.

Nos Capítulos 2 e 3, procedem-se as revisões. No Capítulo 2 é revisada a tecnologia de Realidade Virtual, na forma da construção e utilização de uma maquete 3D, bem como o uso do software *Plant Design Management System*® (PDMS), sendo também brevemente apresentados procedimentos e metodologias de treinamentos. Por sua vez, no Capítulo 3, apresenta-se uma revisão sucinta sobre caldeiras industriais, suas variáveis mais importantes, principais tipos de controle e equações fundamentais que descrevem seu comportamento, as quais serviram de base para o modelo dinâmico implementado neste trabalho, cujo detalhamento é feito no Apêndice A.

O Capítulo 4 apresenta a planta estudada, mostrando seus principais equipamentos e controles. Neste capítulo, são também exibidas simulações do modelo

fenomenológico, ilustrando a dinâmica da caldeira para variação de algumas condições operacionais.

Os Capítulos 5 e 6 introduzem os desenvolvimentos desta pesquisa e seus principais resultados. Assim, no Capítulo 5, é introduzido o modelo 3D da planta. É vista ainda a integração entre a simulação fenomenológica com o modelo 3D, criando uma ferramenta com função de sistema supervisório. Por sua vez, no Capítulo 6 são apresentadas as aplicações desenvolvidas para treinamento e segurança.

O Capítulo 7, de Conclusões e Sugestões, sumariza as conclusões desta dissertação, além de propor novas possibilidades para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2. A REALIDADE VIRTUAL E SUAS APLICAÇÕES

#### 2.1 Apresentação

Neste capítulo será realizado um breve resumo sobre o uso da Realidade Virtual, verificando os principais objetivos e integrações, as ferramentas comumente utilizadas para tal finalidade e seus principais alicerces. Maior enfoque será dado à descrição da ferramenta PDMS que será empregada neste estudo.

No enfoque deste software, o capítulo apresenta conceitos, fundamentos e funções do PDMS (*Plant Design Management System*), software largamente usado no mundo inteiro para modelagem tridimensional de plantas industriais, plataformas de petróleo e usinas nucleares e afins.

Complementarmente, será apresentada uma breve descrição sobre *Programmable Macro Language* (PML), linguagem de programação usada pelo PDMS e que permite customizações no software. A partir destas torna-se viável maximizar os recursos disponíveis, aperfeiçoar procedimentos e melhorar processos, editando o software nativo e adequando-o às necessidades do usuário. Apresentar-se-á também a integração desta linguagem com a plataforma *Microsoft.NET*, que permite customizações ainda mais eficientes.

Adicionalmente serão apresentados alguns pontos relacionados a educação e treinamento, que propõem procedimentos de avaliação para o avaliado, validando um teste realizado.

#### 2.2 Realidade Virtual

##### 2.2.1 Introdução

O detalhamento de sistemas e processos com o uso de ferramentas CAD (*Computer-Aided Design*) e CAE (*Computer-Aided Engineering*), associado com simulação de processos era algo que não ocorria nos projetos de engenharia e plantas industriais. Porém, com os avanços obtidos na área de ferramentas CAD e CAE, foi possibilitado o desenvolvimento de metodologias específicas de integração entre diferentes sistemas. Assim é possível realizar modelagem 3D associada com uma

simulação de processo em larga escala, com o advento da visualização dos efeitos na planta estudada.

A realidade virtual (RV) pode ser descrita como um conjunto de tecnologias que, apoiadas no uso de computadores, simulam a realidade existente ou a realidade projetada (SAMPAIO et al., 2004). Torna-se assim possível a participação quase real de um usuário em ambientes tridimensionais virtuais, permitindo interação com objetos neste espaço, sendo esta interação uma das características mais importantes da realidade virtual (VINCE, 1993).

A interação no ambiente virtual pode ser tanto passiva quanto ativa, sendo possível para o usuário alterar o ambiente em que virtualmente se encontra. Além disso, o ambiente virtual responde a uma ação em tempo real. Em alguns casos de uso da realidade virtual, se faz uso da imersão, onde se simula o usuário dentro do ambiente virtual, usando-se para isso acessórios específicos, como visores e luvas especiais de interação (PAMPLONA Jr., 2006).

### 2.2.2 Histórico da realidade Virtual

O termo Realidade Virtual foi citado pela primeira vez por Jaron Lanier em 1980 (BIOCCA e LEVY, 1995), que foi um artista e cientista que, pela busca da fusão entre o real e o virtual, convergiu tais conceitos. Porém, os alicerces para a Realidade Virtual foram concebidos duas décadas antes. Ivan Sutherland criou um sistema chamado *Sketchpad*, o qual é ilustrado pela Figura 1. Tal sistema serviu de base para a área da computação gráfica.

Após o desenvolvimento do *Sketchpad*, Ivan desenvolveu o primeiro capacete de realidade virtual, o qual recebeu o nome de *Head-mounted Display*. Tal equipamento foi precursor de diversas pesquisas na área, algumas das quais serão vistas na Subseção 2.2.4. A Figura 2 mostra Ivan usando sua própria criação, o *Head-mounted Display*.



**Figura 1.** Ivan Sutherland e o Sketchpad, no MIT, em 1963 (TORI et al., 2006).



**Figura 2.** O Head-mounted Display desenvolvido por Ivan Sutherland (TORI et al., 2006).

### 2.2.3 Caracterização da Realidade Virtual

Neste item, serão listadas as principais características do advento da Realidade Virtual, onde será dissertada sua definição, seus tipos e aplicações.

#### 2.2.3.1 Definição da Realidade Virtual

A Realidade Virtual pode ser definida de muitas maneiras, porém, pode ser dito brevemente que a Realidade Virtual é uma interface avançada para aplicações computacionais, que permite que ao usuário a navegação e interação em tempo real em

ambiente tridimensional, podendo ou não fazer uso de dispositivos multissensoriais, para atuação ou retroalimentação (*feedback*).

Assim, neste contexto, o ambiente tridimensional criado é gerado pelo computador, a partir de descrições e medições do usuário, podendo ser visualizado de qualquer posição de sua escolha.

Sobre a interação com o usuário, este é um aspecto importante da interface e está relacionada com a capacidade do computador em detectar as ações do usuário e reagir a elas, mudando aspectos da visualização.

Em algumas situações pode haver um conflito de conceitos, havendo confusão entre conceituar determinada ferramenta como Realidade Virtual ou não. Assim, devem ser analisadas as características da aplicação, e confrontá-las com o conceito de Realidade Virtual. No caso de filmes (desenhos animados ou efeitos especiais) gerados por computador, não se tratam de Realidade Virtual, uma vez que não há interação com o usuário nem navegação pelo ambiente do filme. Por outro lado, os videogames, mesclam a computação gráfica com a interação do usuário com o ambiente, em tempo real. Assim, quando o sistema deste tipo faz uso de ambientes tridimensionais, pode-se dizer que se trata de um sistema de Realidade Virtual.

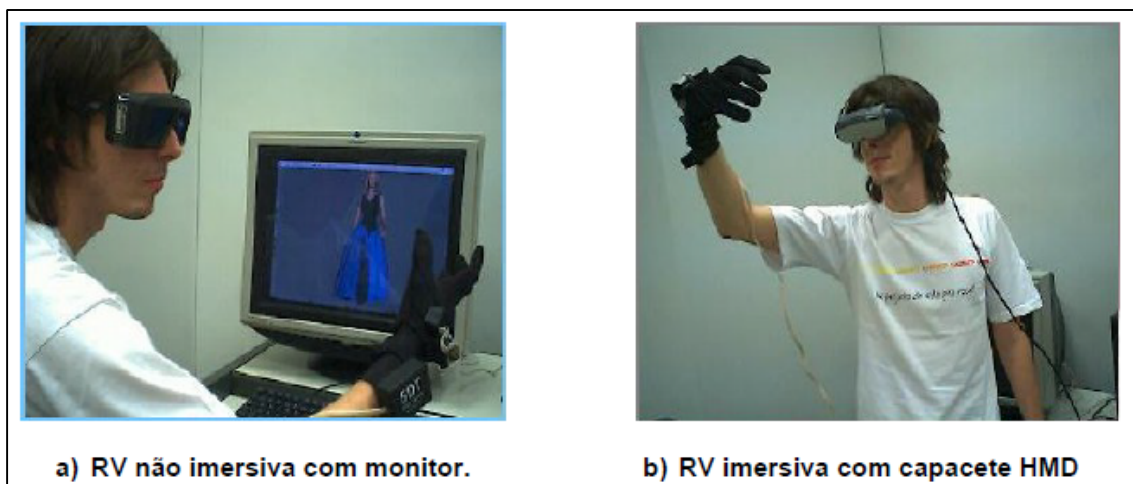
#### 2.2.3.2 Tipos de sistemas de Realidade Virtual

A Realidade Virtual pode ser classificada em função do senso de presença do usuário, em imersiva ou não imersiva.

Neste primeiro, o usuário se sente transportado predominantemente para o domínio da aplicação, através de dispositivos multissensoriais, que capturam seus movimentos e comportamentos e reagem a eles, provocando uma sensação de presença dentro do mundo virtual.

Sobre a Realidade Virtual não imersiva, o usuário é transportado parcialmente ao mundo virtual, através de uma janela (monitor ou projetor, por exemplo), mas continua a sentir-se predominantemente no mundo real.

A seguir é mostrada a Figura 3 que exemplifica o uso da Realidade Virtual não imersiva com monitor (a) e da Realidade Virtual imersiva com capacete e luva (b).



**Figura 3. Exemplos de tipos de Realidade Virtual**  
Adaptado de TORI et al., (2006)

Embora a Realidade Virtual imersiva apresente aplicações que se aproximam mais da realidade e são mais precisas, as aplicações que fazem uso da Realidade Virtual não imersiva são mais populares por serem mais baratas e simples. Entretanto, os avanços tecnológicos seguem para ambas, em função do desenvolvimento da indústria da computação e de dispositivos especiais (TORI et al., 2006).

#### 2.2.4 Aplicações da Realidade Virtual na Indústria

Em relação às aplicações da RV, diversas são as áreas possíveis de se aplicá-la. Neste trabalho será falado sobre aplicações envolvendo procedimentos industriais, procedimentos de montagens e para fins de treinamentos.

##### 2.2.4.1 Modelos para procedimentos industriais

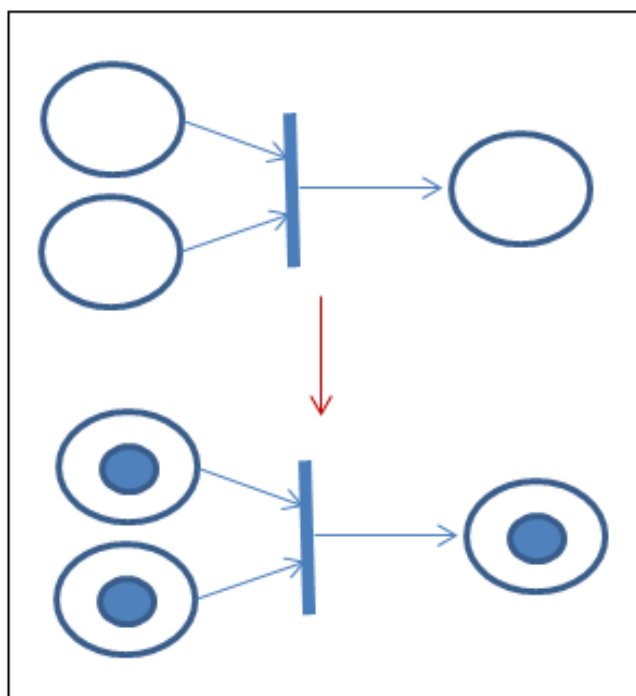
A realidade virtual neste âmbito pode ser usada em diversas áreas da indústria. KASHIWA et al., (1995), um dos precursores desta área, desenvolveu um sistema de treinamento usando realidade virtual para manutenção de máquinas.

Para tanto, KASHIWA et al., (1995) escolheu como abordagem, para representação dos procedimentos simulados a Rede de Petri, que representa uma situação em que o estado final de um dado procedimento depende diretamente de um ou mais estados iniciais.

Realizando uma analogia, seria como se para ligar um equipamento, devesse ligá-lo na gaveta elétrica (elemento que funciona como um disjuntor do equipamento) e posteriormente na sua botoeira. Neste caso o resultado final, que é “ligar o



equipamento”, depende dos estados de ativação da gaveta e finalmente ativação da botoeira. A seguir é ilustrada a Figura 4 contendo um exemplo de Rede de Petri, com uma mudança de estados.



**Figura 4. Exemplo de uma Rede de Petri e sua mudança de estado**

Existem também outras abordagens relacionadas a esta área. BLUEMEL et al., (2003) se destacou por desenvolver um sistema que estabelece alguns fundamentos para treinamento de procedimentos. Em BLUEMEL et al., (2003) é abordado um método em que o sistema de treinamento aumenta gradativamente sua interação com o usuário. Na primeira vez que o sistema é executado, o mesmo realiza a ação e o usuário observa passivamente. De forma gradativa, a cada execução, o usuário irá cada vez mais atuar no sistema, de forma que na última execução o usuário realiza toda a operação sem nenhuma interferência do sistema. Este tipo de aprendizagem é chamado de *learning by doing*, onde ao final de cada teste é apresentada uma avaliação do desempenho do usuário. A seguir é apresentada a Figura 5 ilustrando um exemplo desta metodologia.



**Figura 5. Treinamento RV em modo guiado para execução de procedimentos. (BLUEMEL et al., 2003).**

#### 2.2.4.2 Modelos para procedimentos de montagem

O planejamento de montagem é um ponto extremamente importante em um processo de operação de um determinado produto. Em um ambiente de engenharia de montagem tradicional, o desenho de montagem e o seu planejamento são realizados separadamente, por pessoas de diferentes setores. A compreensão de documentos base para montagem bem como a sequência correta são realizadas de forma cognitiva. Assim, o planejamento de montagem é suscetível a erros de interpretação (PAMPLONA Jr, 2006). Neste âmbito, a RV é inserida para se simular e padronizar a montagem de elementos em uma unidade de produção, fazendo com que a consistência e qualidade sejam maximizadas, bem como o retrabalho e os custos extras por perda de material sejam minimizados.

Existem diversos estudos sobre a utilização de RV nas tarefas de planejamento de montagem de peças e equipamentos, buscando os objetivos citados.

SÁ e ZACHMANN (1999) apresentam pesquisas sobre a utilização da RV como ferramenta de Prototipagem Virtual, com o objetivo de verificar os processos de manutenção e montagem. Ele mostra também as etapas necessárias para prototipagem

virtual de maquetes físicas, que tem início na construção de modelos CAD, que por sua vez são criados a partir de dados armazenados em sistemas de administração dos dados do produto, também chamados de PDM (*Product Data Management*). A seguir é mostrada uma figura de uma exemplificação de prototipagem virtual na indústria automobilística.



**Figura 6. Montagem de peças de um veículo (SÁ e ZACHMANN, 1999).**

Ainda segundo SÁ e ZACHMANN (1999), existem algumas técnicas que são úteis nos sistemas de RV para realizar a verificação de simuladores de montagens, as quais seguem:

- Interação multimodal: uso de reconhecimento de voz, gestos, entre outros;
- Manual de serviço on-line: onde o sistema direciona o usuário às etapas de forma automática, fazendo com que o usuário observe o sistema atuar através de uma animação do processo;
- Meios de investigação: oferecer ao usuário informações extras que o auxiliem na tomada de decisão, a seguir, na Figura 7, é mostrado um exemplo de tal fornecimento de dados;

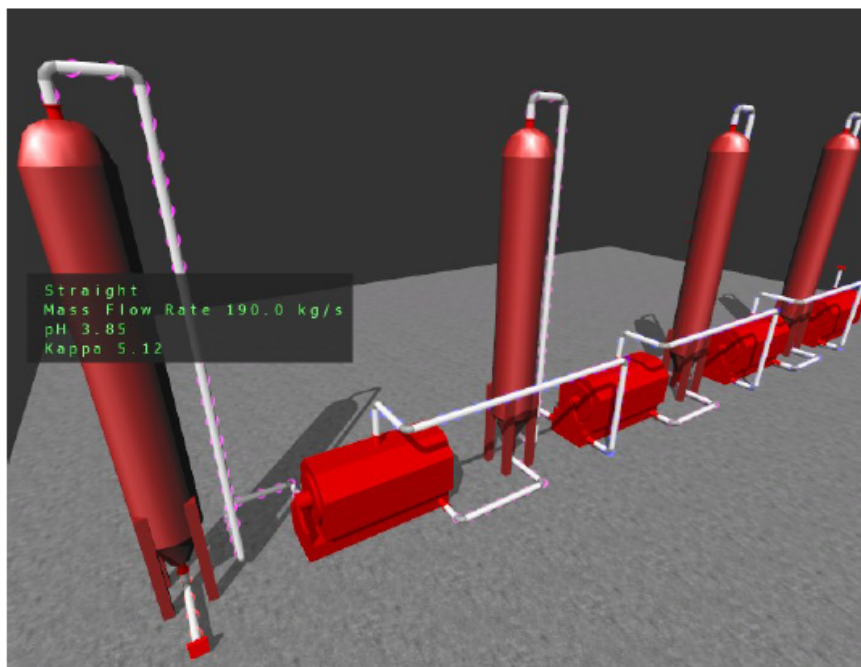


Figura 7. Demonstração de dados extras de um determinado elemento da RV (LUUKKAINEN, M. & KARHELA, 2007).

- Simulação baseada em física: comportamentos físicos devem ser replicados às peças virtuais;
- Verificação sem retro alimentação de força: uso de técnicas que compensem a ausência de força e retro alimentação referente ao tato, como possibilidade de choques de peças ou sobreposição de elementos;
- Documentação: possibilidade de salvar comentários e marcações no modelo tridimensional durante o teste;
- Retro alimentação ao usuário: resposta coerente e rápida a qualquer interação do usuário.

#### 2.2.4.3 Aplicações de *e-learning* usando RV baseadas na aprendizagem pela prática

Uma das primeiras e mais difundidas teorias de aprendizagem organizacional no mundo é a aprendizagem baseada na prática (*learning by doing*) (VIDEIRA, 2001). Tal metodologia é aplicada muito bem quando associada com o advento da imersão e interação da RV. Assim, existem diversas pesquisas abordando o tema.

TAM e BADRA (1999) identificam dois elementos chaves nesta abordagem:

- A experiência própria possibilitada pela simulação do ambiente de mundo real;
- O guia de treinamento proporcionado pela possibilidade da referência dos passos do sistema em RV.

Segundo SCHENK e BLUMEL (2005), o uso de RV é extremamente importante e válido no treinamento de equipes, uma vez que procedimentos de manufatura com alto grau de complexidade podem ser exemplificados visualmente.

Tal possibilidade permite que em momentos críticos e/ou em emergências de uma planta a operação possa tomar a ação cabível e consistente de forma mais rápida, tendo em vista a vivência de tais situações no ambiente em RV.

#### 2.2.4.4 Exemplos de aplicações desenvolvidas para aprendizagem de usuários

Nesta subseção serão descritos alguns exemplos em que sistemas de RV foram desenvolvidos para treinamento e aprendizado de usuários em algum processo industrial.

SCHENK e BLUMEL (2005) apresenta uma ferramenta para o auxílio no aprendizado e treinamento através de RV, chamada VDT (*Virtual Development and Training Platform*). AVDT fornece recursos para gerenciamento do conteúdo, possibilitando a avaliação do usuário. Este sistema se propôs a deixar o entendimento claro das etapas de construção de um empreendimento e função dos componentes especificados e sem dupla interpretação (citando informações essenciais e complementares sobre os componentes de um empreendimento). A VDT fornece guias procedimentais para atividades de manutenção, fornece também métodos guiados para detectar, diagnosticar e remover erros. A VDT fornece ainda treinamentos para situações anormais de operação, visando preparo dos operadores para tais situações. A Figura 8 exemplifica a utilização do VDT.



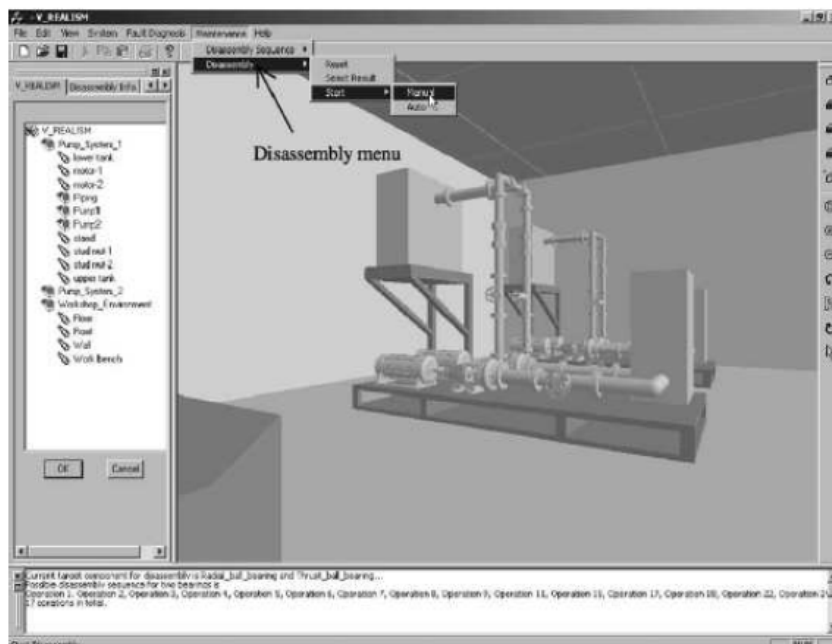
**Figura 8. Exemplificação do sistema VDT usando RV imersiva (SCHENK e BLUMEL, 2005).**

No trabalho de LI, KHOO e TOR (2003), é apresentado o *V-Realism*, um protótipo de sistema orientado a objetos baseado na tecnologia *RV Desktop*, que fornece treinamento de montagem a equipes especializadas. Entre as habilidades que o sistema desenvolve, estão:

- Fornecer sequências de padronização de montagem para equipamentos e peças;
- Fornecer visualização tridimensional dos elementos, com possibilidade de manipulação dos dados do ambiente virtual;
- Integração com as funções de planejamento de manutenção.

Esta ferramenta possui três módulos de operação, que são: o módulo de planejamento da sequência de desmontagem, módulo de ambiente virtual e módulo de interface gráfica do usuário.

A Figura 9 exemplifica o *V-Realism* em funcionamento.



**Figura 9. Treinamento de manutenção de peças usando ambiente do V-Realism (LI, KHOO e TOR, 2003).**

Verifica-se pelos itens apresentados que este campo tecnológico da RV permite o uso de diversas ferramentas, para uma gama considerável de aplicações. A seguir, será apresentada a ferramenta de cunho gráfico tridimensional que será usada para a representação da planta estudada, o *Plant Design Management System* (PDMS).

## 2.3 *Plant Design Management System* (PDMS)

### 2.3.1 Trabalhos Acadêmicos Anteriores Envolvendo o PDMS

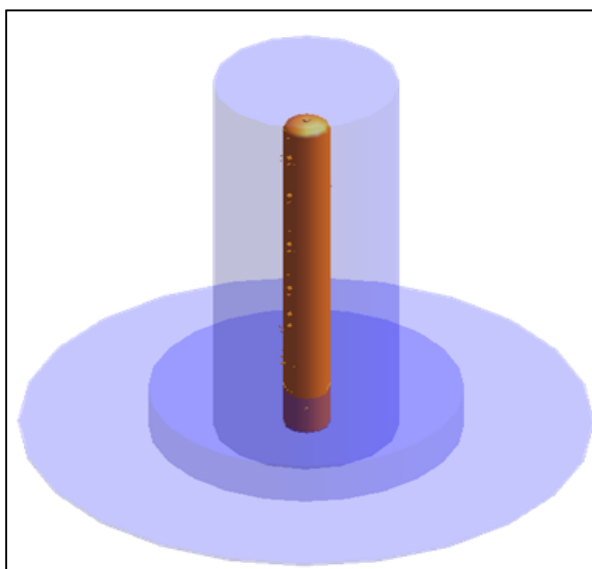
Pelo fato do PDMS ser um software de código aberto, isto é, permite um grande nível de customização na sua interface e funções por parte dos usuários, foram desenvolvidos diversos trabalhos acadêmicos envolvendo tal ferramenta, alguns destes mostrados e brevemente explicados a seguir:

- *3D Electrical area classification applied to plant design projects* (OLIVEIRA et al., 2010)

Este projeto foi desenvolvido em PDMS para que fosse possível a visualização tridimensional das zonas de classificação de áreas elétricas. O cenário é que todo o estudo de classificação de áreas é comumente realizado em diversos desenhos 2D e tal

estudo é de extrema importância, pois especifica todos os equipamentos que estão dentro destas zonas. E a segurança de processo é um dos aspectos ligados diretamente à especificação dos equipamentos.

Com o desenvolvimento das zonas de áreas classificadas 3D é possível que durante a modelagem do equipamento se possa colocá-lo de forma otimizada, buscando menor custo e maior segurança, pode-se realizar a classificação automática dos equipamentos inseridos nestas zonas e tem a posição e tamanho destas zonas atualizadas automaticamente caso os equipamentos mandatórios sejam reposicionados. A Figura 10 ilustra um equipamento que teve suas zonas de classificação criadas de forma tridimensional.



**Figura 10. Exemplo de classificação de área 3D**

- *Plant design project automation using an automatic pipe routing routine* (CALIXTO et al., 2009)

Neste trabalho, houve a proposta de se desenvolver um sistema que modelasse e criasse um encaminhamento automático de tubulações entre dois pontos, informados no software como início e fim da tubulação. Com isso, podem-se economizar diversas horas de modelagem em projetos em que se busca um levantamento prévio dos materiais necessários a um empreendimento. Em diversos testes realizados neste trabalho, foi encontrado um erro médio de 6% entre o real (modelado por um



profissional da área) e o automático (modelado pelo sistema proposto). Este erro está dentro das estimativas de erro de extração de listas de materiais, tendo como vantagem a velocidade com que o sistema fica pronto.

- *Implementing software technologies for the optimization of plant design projects* (CALAZANS et al., 2010)

Foram mostradas neste trabalho diversas formas de customização em PDMS que podem otimizar o trabalho de equipes inteiras, aumentar a consistência e qualidade do projeto e maximizar o controle do andamento das fases do projeto.

Dessa forma, elaboraram-se um sistema de extração de plantas associadas ao modelo de forma automática, um sistema de controle permissionado que maximizava o controle do andamento das atividades das diferentes equipes, extração automatizada de documentos inerentes ao projeto, entre outras customizações.

Assim, é possível com o uso do software, desenvolver diversos estudos em praticamente todas as áreas da engenharia:

- Na área de segurança de processos, podem-se realizar estudos de rotas de fugas, posicionamento de equipamentos de segurança (extintores, canhões de incêndio etc.), entre outros.
- Na área de processo, pode-se realizar análise de carga mínima de sucção de bombas, em função do comprimento de tubulação e número de peças na sucção da bomba.
- Na área de instrumentação, pode-se analisar a quantidade de cabos, alocação de instrumentos associados, verificação de alarmes e alcance dos mesmos.
- Na área da tubulação, podem-se programar modelagens automáticas de tubulações, cadastros de especificações de tubulação de forma automática, preparo de tubulações para montagens de forma automatizada, verificações técnicas em paralelo automáticas etc.

### 2.3.2 Detalhamento do PDMS

O PDMS é um software de engenharia que possui a capacidade de modelagem tridimensional CAD, permitindo múltiplos usuários simultâneos em uma mesma área

de trabalho. O software pode ser usado em todas as áreas de atuação citadas, sendo um dos mais usados no mundo em seu segmento.

Ele possui uma completa interatividade com o ambiente de detalhamento tridimensional, possuindo estilo semelhante aquele adotado pelos softwares do ambiente Windows. A tecnologia que é executada para compor a base de interface com o usuário baseia-se na plataforma .NET.

É possível com o PDMS realizar um controle de permissões de edição em cada parte do projeto, permitindo acesso restrito a certas partes enquanto acesso total a outras.

O software possui uma série de benefícios que, dentre os mais importantes, encontra-se a possibilidade de extrair uma lista de quantitativos de componentes, contendo seus dados de materiais, pesos, entre outras informações. É importante ressaltar que tal lista, dependendo do tamanho da unidade pode ter mais do que mil páginas, o que aumenta consideravelmente a chance de inconsistências, considerada a possibilidade de criação deste documento de forma manual. Desta forma, o software possibilita um importante ganho em termos de tempo, eliminando atrasos, pela geração automatizada de diversos documentos e relatórios, plantas e vistas bidimensionais e isométricos de tubulação, além de outros documentos. É possível checar as informações contidas no modelo 3D e compará-las com os desenhos 2D equivalentes. A estas vantagens soma-se o fato do PDMS ser uma ferramenta contendo diversos usuários treinados ao redor do mundo e ser de fácil aprendizagem.

Este software é composto por uma série de módulos, cada um com uma função específica, que completos fornecem o necessário para um projeto as ferramentas que permitam a criação de um ambiente tridimensional, com possibilidades de extrações de dados relativos a este ambiente. A seguir serão listados cada um dos módulos e suas principais funções:

- Design

Este é o módulo responsável pela criação do modelo tridimensional, onde unidades fabris inteiras ou plataformas petrolíferas podem ser representadas com o máximo de detalhes que um projeto requer. Neste módulo utilizam-se dados de catálogos,

previamente cadastrados em especificações, contendo informações sobre materiais, atributos físicos das peças, como dimensões e pesos para modelar e alocar tubulações.

Podem-se modelar todas as disciplinas que estejam no escopo do projeto: estruturas, equipamentos (mecânicos ou elétricos), segurança (rotas de fuga, extintores, bicos aspersores, entre outros), civil (construções, pisos etc.) ou qualquer outra disciplina específica de um dado projeto.

No caso de modelagem de tubulações, é possível extrair listas de linhas envolvidas, listas de materiais associadas, isométricos de tubulação e quaisquer outros relatórios que se deseja extrair.

Ainda na disciplina de tubulação, é possível rotear uma tubulação entre a sua origem e seu destino de forma automática, seguindo o caminho mais curto, fazendo consequentemente com que a quantidade de trabalho requerida para se estimar a quantidade de material de um dado projeto seja minimizada.

Em relação aos equipamentos, pode-se fazer escolha por criar o elemento a partir de um elemento ou então através de equipamentos pré-montados. Este recurso permite que equipamentos comuns, ou usados frequentemente, possam ser criados através de um modelo e ter suas dimensões facilmente alteradas.

Possui também diversos sistemas nativos que verificam a integridade e consistência do modelo criado, checando se o modelo possui algum par de componentes que deveriam estar separados por um trecho reto e por algum motivo estão desalinhados, em termos da saída de um dos componentes com a seguinte entrada do componente posterior. Há também verificações de consistência de conexões entre os componentes, alertando se dois componentes estão com distância indevida entre eles, quando deveriam estar conectados entre si. O software verifica se há erros de projeto em termos de compatibilidade conexão (um exemplo seria se fosse erroneamente conectado um componente de 300 libras de classe de pressão com um componente de 900 libras de classe de pressão), além de revisar interferências entre elementos gráficos, isto é, se dois ou mais elementos estão se sobrepondo entre si (chocando-se entre si). Tal sobreposição ou choque de elementos é conhecida como *clashes*. Um exemplo de sobreposição seria a existência de uma base de concreto da disciplina de civil que suporta um equipamento no caminho de uma rota de fuga de segurança.

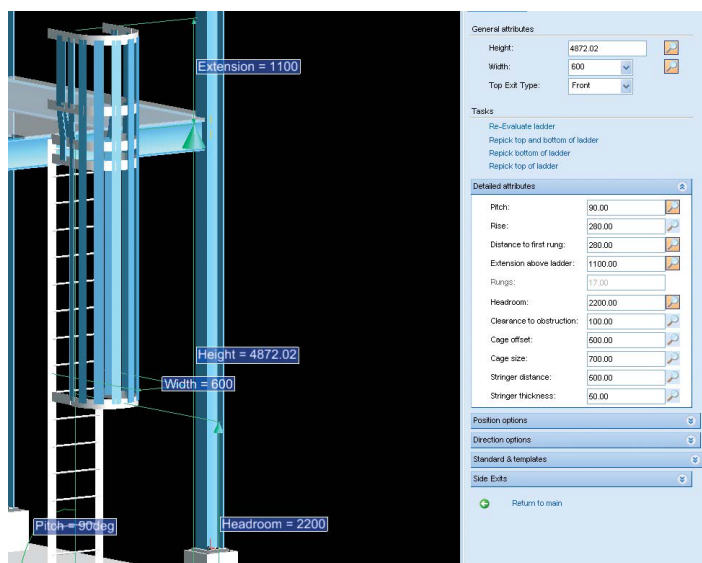
A seguir são mostradas algumas imagens deste módulo em operação, contendo, na Figura 11 uma amostra do módulo de uma maneira geral, contendo a parcela de um setor de uma planta *onshore*, somando à visualização a possibilidade de se possuir diferentes vistas da mesma ou de outras áreas da planta. Finalmente é possível ainda dispor de uma prévia de um isométrico de tubulação, da própria planta, podendo ser visualizado concomitantemente à modelagem da tubulação.



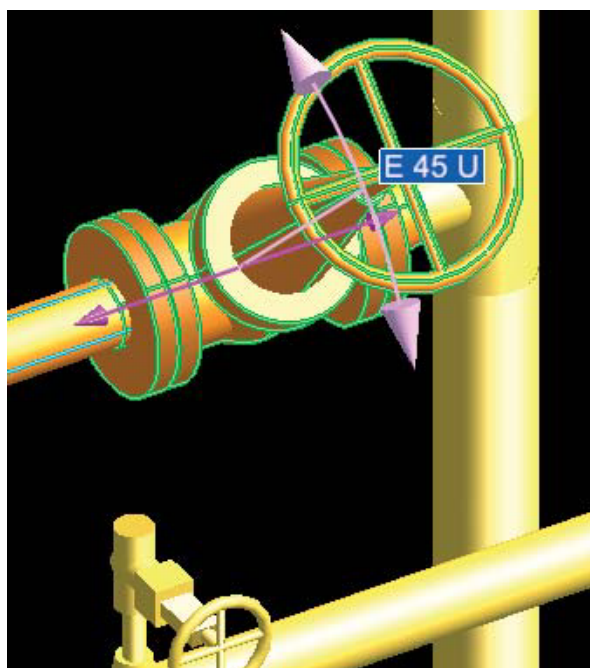
**Figura 11. Exemplificação de possibilidades de modelagens detalhadas de grandes instalações com extração de dados ao mesmo tempo**

A Figura 12 ilustra a possibilidade de edição de determinados elementos, neste caso uma escada de vertical, além de mostrar o quão possível é coletar dados do modelo como dimensões, distâncias e cotas dos elementos. Na situação da Figura 12, pode-se escolher, por exemplo, a forma de saída da escada, quanto de trecho reto extra será disposto ao chegar ao nível desejado da plataforma, a largura da escada, entre outras possibilidades.

A Figura 13 ilustra outras possibilidades de edição dos elementos modelados, como rotação, posicionamento facilitado, escolha de pontos de referência para rotação e posicionamento (caso seja necessário definir um eixo de rotação, por exemplo). No caso em questão da Figura 13, é mostrada uma válvula que pode ter seu volante disposto para outra direção, devido, por exemplo, por questões de acesso à válvula.



**Figura 12.** Possibilidades de edição de elementos de forma direta e informações explícitas na interface para auxiliar o usuário



**Figura 13.** Possibilidades de rotação de elementos em relação aos pontos escolhidos pelo usuário

- Draft

É o módulo responsável pela geração de plantas e vistas bidimensionais, possibilitando a inserção de cotas e marcações, comentários e todos os artifícios relativos a documentos deste tipo. É possível extrair diversas vistas de um mesmo elemento em um único desenho. Uma das vantagens existentes no uso deste módulo é

que a produção de desenhos a partir do modelo 3D faz com que documentos 2D e modelo 3D estejam consistentes, pois o desenho é fiel ao que foi modelado. Diferentes possibilidades de inconsistências podem surgir quando o desenho é realizado de forma manual baseado em documentação de projeto.

Por exemplo, caso haja a modificação da posição de um dado grupo de equipamentos no modelo 3D, seria necessário redesenhar o documento 2D com as posições atualizadas. Caso, alguma modificação realizada no modelo 3D se perca ao passar o para um documento 2D, o projeto ficará inconsistente possuindo dois documentos que tratam do mesmo elemento, porém, com informações distintas. Em um projeto cuja dinâmica seja elevada, o número de revisões do modelo pode ser elevado, o que consequentemente elevará as revisões dos documentos associados ao modelo, aumentando as chances de falhas humanas caso a transferência dos dados do modelo seja realizada de forma manual. Uma vantagem do uso de geração de desenhos 2D automaticamente a partir do modelo 3D associado é que uma vez apresentadas modificações no modelo, podem-se atualizar automaticamente os desenhos 2D, garantindo a consistência dos documentos.

Um cenário em que não se faça uso desta funcionalidade é que no caso de existirem modificações no modelo 3D, seria necessário a um desenhista atualizar manualmente os desenhos associados, aumentando as possibilidades de inconsistências. A seguir é mostrado pela Figura 14 um exemplo de desenho extraído deste módulo. Na Figura 14 pode ser visualizado um trecho de duto de ar (previamente modelado no módulo *Design*), o qual foi exibido, no mesmo desenho, em diferentes vistas, com informações adicionais que complementam o modelo 3D. É possível ainda que cada vista tenha representações e configurações de linhas gráficas distintas, caso seja a necessidade do projeto (seria possível, por exemplo, que a vista lateral tivesse uma configuração de linha contínua verde enquanto que a vista superior tivesse configuração de linha vermelho tracejado para o mesmo tipo de elemento, neste caso o duto de ar).

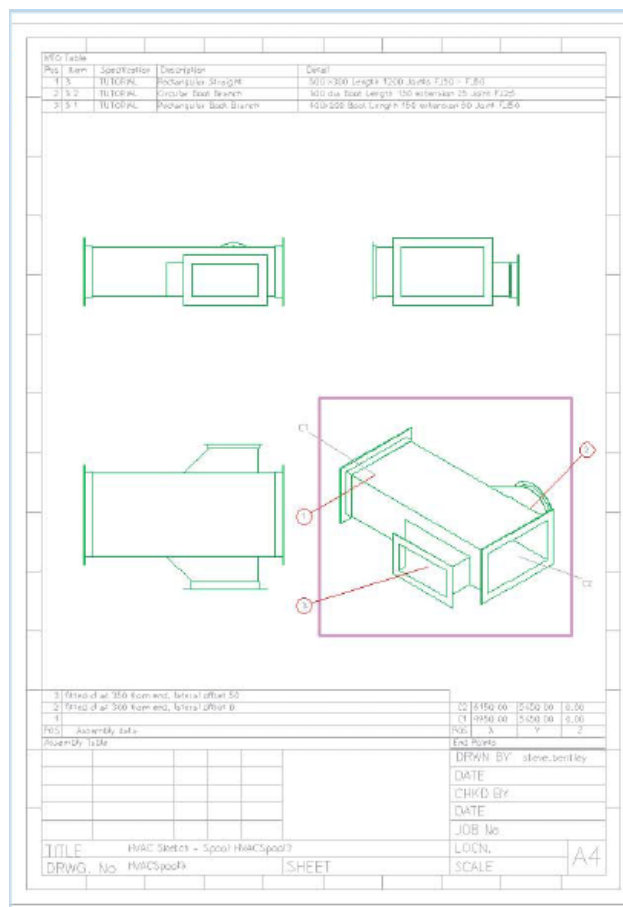


Figura 14. Exemplo de desenho extraído do módulo Draft de uma peça de duto de ventilação

- Schematic

Este módulo pode importar e conter P&IDs (*Piping and Instrumentation Diagrams*) de qualquer sistema que os produza, combinando a liberdade de escolha de produção de um P&ID com o ambiente de modelagem tridimensional do PDMS. Os dados contidos no P&ID podem criar, comparar e modificar o modelo tridimensional, economizando HH (homem-hora) e aumentando a qualidade do modelo, integrando seus documentos ao modelo 3D.

- Paragon

Módulo responsável pelos catálogos de tubulação, de perfis estruturais, de leitos, de elétrica, de HVAC (*Heat, Ventilation and Air Conditioning*) e de modelos de equipamentos pré-formatados. O software é enviado aos clientes com um extensivo conjunto de catálogos, cobrindo padrões nacionais e internacionais.

Cada catálogo fornece uma definição parametrizada de todos os componentes, em suas faixas de dimensões, classes de pressão e tipos. A vantagem é que os catálogos, uma vez criados podem ser compartilhados de projeto para projeto ou entre clientes ao redor do mundo.

- Specon

Módulo responsável pela criação e modificação de especificações de tubulação e de outras disciplinas de um projeto, usando os componentes de catálogo gerados no módulo Paragon.

- Propcon

O Propcon é responsável pelas propriedades de componentes do banco de dados de catálogos, como pesos, densidades, tensões etc. Estas propriedades podem servir para análises de tensões ou outros estudos em plataformas específicas.

- Lexicon

Neste módulo é possível criar atributos definidos pelo usuário (UDA, *user defined attributes*) que sejam necessários ao projeto, caso os atributos pré-existent no PDMS para cada elemento não sejam suficientes.

- Spooler

No momento da construção de uma tubulação, é necessário que a mesma venha pré-montada de forma coerente com os requisitos de engenharia de tubulação, respeitando dimensões, pesos e planos, para isso, as tubulações são divididas em elementos chamados *Spools*, os quais são realizados no PDMS através do módulo Spooler. Sendo assim o Spooler verifica as tubulações geradas no módulo Design e separa os seus Spools de acordo com a técnica imposta pelo usuário, realizando a inserção das devidas soldas e identificando automaticamente as conexões que separam um *Spool* de outro.

- Isodraft



Módulo responsável pela configuração de extração de isométricos de tubulação ou de Spools. Em tal módulo é possível se extrair listas de parafusos, configurar extração de isométricos em batelada, listas de soldas entre outros documentos relacionados.

- Admin

É o módulo responsável pela administração do projeto criado em PDMS. Neste módulo é possível gerenciar usuários, definindo as devidas permissões para cada um, criação de times de trabalhos, bancos de dados de criação de cada elemento do projeto, entre outras funções.

O PDMS possui uma grande gama de possibilidades de integrações com outras ferramentas. Com esta integração é possível trocar dados com ferramentas de gerenciamento de materiais, análise de tensões e flexibilidades, com ferramentas de gerenciamento de informações de projeto ou outras ferramentas CAE existentes.

Como exemplo de integração, no gerenciamento de materiais pode-se integrar tal ferramenta com o sistema SAP de compras, emitindo os dados gerados pelo modelo 3D diretamente para o sistema de compras, seguindo o sistema de codificação de produtos vigente da empresa que o utiliza.

Pode-se integrar o sistema modelado com um software de análise de tensões e flexibilidade denominado CAESAR II, onde dados de materiais e de processo, juntamente com a modelagem tridimensional de tubulações e equipamentos são importados para o referido software, não necessitando remodelar a tubulação e os equipamentos conectados no CAESAR II.

É possível exportar o modelo realizado em PDMS para softwares de Fluido Dinâmica Computacional (CFD), como o PHOENICS, entre outras possibilidades de integrações, como o software de geração de diagramas de processo e demais documentos relacionados COMOS. No primeiro caso podem-se receber os elementos tridimensionais para o volume de controle do CFD restando associar os materiais constituintes para cada elemento gráfico e modelos de simulação de sólidos e fluidos do sistema. Já na integração com o COMOS, podem-se enviar dados de perda de carga ao mesmo tempo em que se podem importar os dados de processo existentes em tal software para o modelo 3D.

Fazendo uso do Global é possível se ter um projeto em PDMS com diversas células de equipes espalhadas em diferentes localidades, com a vantagem de

atualização do trabalho realizado em cada local em uma grande base centralizadora de informações e seu posterior retorno, consistindo em uma troca bilateral de dados.

### 2.3.3 Customização no PDMS

O PDMS tem como característica diferencial o fato de ser um software de código aberto, portanto passível de ser modificado. Tal possibilidade permite a criação de ferramentas adicionais ou adaptação das existentes. Essa característica aumenta a aplicação do software, maximizando enormemente sua capacidade e gama de funções além de permitir integrações ainda inexistentes, possibilitando inovação no segmento.

O PDMS possui uma linguagem base própria que o constitui. Esta linguagem é chamada de *Programmable Macro Language* (PML). Originada na criação do PDMS em 1967, hoje possui três versões distintas:

- PML 1: uma linguagem básica de macros e comandos com capacidades de criação de interfaces de janelas para usuários.
- PML 2: a versão avançada do PML 1, que inclui a capacidade de orientação à objeto para janelas e menus, permite a criação de funções, macros e formulários.
- PML.NET: uma versão alternativa do mecanismo do PML para facilitar o uso dos controles e possibilidades do *Microsoft .NET* dentro do ambiente do PML.

### 2.3.4 Utilização da ferramenta nesta dissertação

O trabalho desenvolvido nesta dissertação faz uso do PDMS, em sua maior totalidade o módulo Design, porém, serão criadas e usadas de forma massiva customizações que farão a integração com um software de cálculo.

Nas customizações desenvolvidas, far-se-á uso das três formas do PML.

Tendo em vista que um dos propósitos da ferramenta a ser desenvolvida neste trabalho é prover o treinamento do grupo de operação em uma dada unidade industrial, serão apresentadas no próximo item considerações sobre treinamentos. Nesta subseção

serão apresentados alguns procedimentos comumente usados assim como alguns objetivos que devem ser amarrados para que o treinamento realizado tenha o máximo rendimento possível.

## **2.4 Procedimentos e considerações sobre treinamentos**

### **2.4.1 Introdução**

A motivação do funcionário em suas atividades diárias é algo que vem sendo focado cada vez mais pelas organizações (VERGARA, 2000). Em relação a isso, o uso de treinamentos, que por sua vez, têm como uma de suas funções preparar o funcionário em sua atividade tem sido usados para trabalhar tal motivação, pois com treinamentos o funcionário tem a percepção de desenvolvimento pessoal e profissional (CAVALCANTE, 2010).

### **2.4.2 Conceito e necessidade de Treinamentos**

Diversos autores têm suas próprias definições sobre treinamentos, porém uma conceitualização interessante de treinamento é dada por MARRAS (2001): “Treinamento é um processo de assimilação cultural a curto prazo, que objetiva repassar ou reciclar conhecimento, habilidades ou atitudes relacionadas diretamente à execução de tarefas ou à sua otimização no trabalho”.

Outra questão igualmente importante ao treinamento é a sua necessidade. Deve-se verificar com atenção a necessidade e público alvo do treinamento, para que o mesmo não seja desviado de sua finalidade (CAVALCANTE, 2010).

MARRAS (2001) definiu algumas perguntas que devem ser realizadas durante o diagnóstico para o treinamento:

- Quem deve ser treinado?
- O que deve ser aprendido?

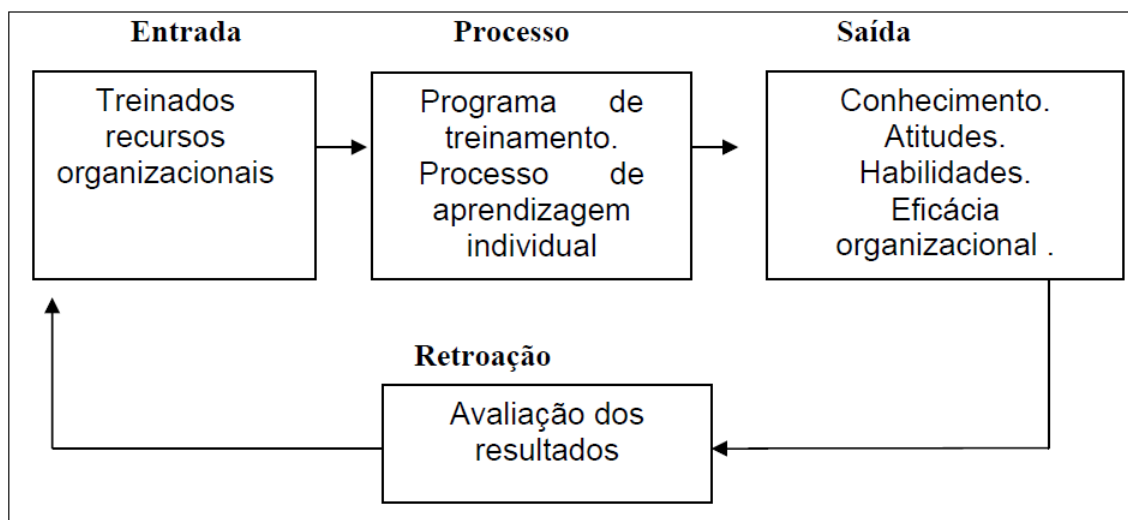
Já CHIAVENATO (2000) estende um pouco mais as perguntas, mas continuando dentro do contexto do assunto:

- O que deve ser ensinado?
- Quem deve aprender?

- Quando deve ser ensinado?
- Onde deve ser ensinado?
- Como se deve ensinar?
- Quem deve ensinar?

Em relação ao ciclo completo do treinamento, deve-se ter conhecimento sobre os treinandos, métodos e recursos, aplicação destes métodos a um programa de treinamento com uma posterior avaliação dos treinados (que validará o aprendizado no treinamento).

A Figura 15 representa o modelo proposto por CHIAVENATO (2000), que assemelha o processo de treinamento a um modelo de sistema aberto.



**Figura 15. Componentes de um treinamento: Entrada - processo - saída - retroação**  
Adaptado de CHIAVENATO (2000)

#### 2.4.3 Avaliação de treinamentos

A etapa de avaliação do treinamento é importante pois se verifica se o objetivo traçado no planejamento do evento foi alcançado. Deve ser avaliado desde a estratégia usada até o resultado alcançado pelos treinados (CAVALCANTE, 2010).

É compreendido que para que as chances de sucesso de um treinamento sejam maximizadas, uma série de etapas deve ser seguida. De acordo com CHIAVENATO (2000) nove fases completam um ciclo de treinamentos. O ciclo proposto tem início no levantamento das necessidades do treinamento (Fase 1). Uma vez definidas as necessidades, parte-se para a escolha e aplicação dos métodos e princípios de

aprendizagem (Fases 2, 3 e 4). Com estes métodos, elabora-se então um programa de treinamento focando no objetivo e necessidades do referido treinamento (Fase 5). Com este programa, realiza-se o treinamento dos instrutores (Fase 6) e só assim, parte-se para a execução do treinamento em si (Fase 7). As demais fases são relativas aos resultados do treinamento (Fase 8 e 9).

Tais fases são ilustradas na Figura 16.

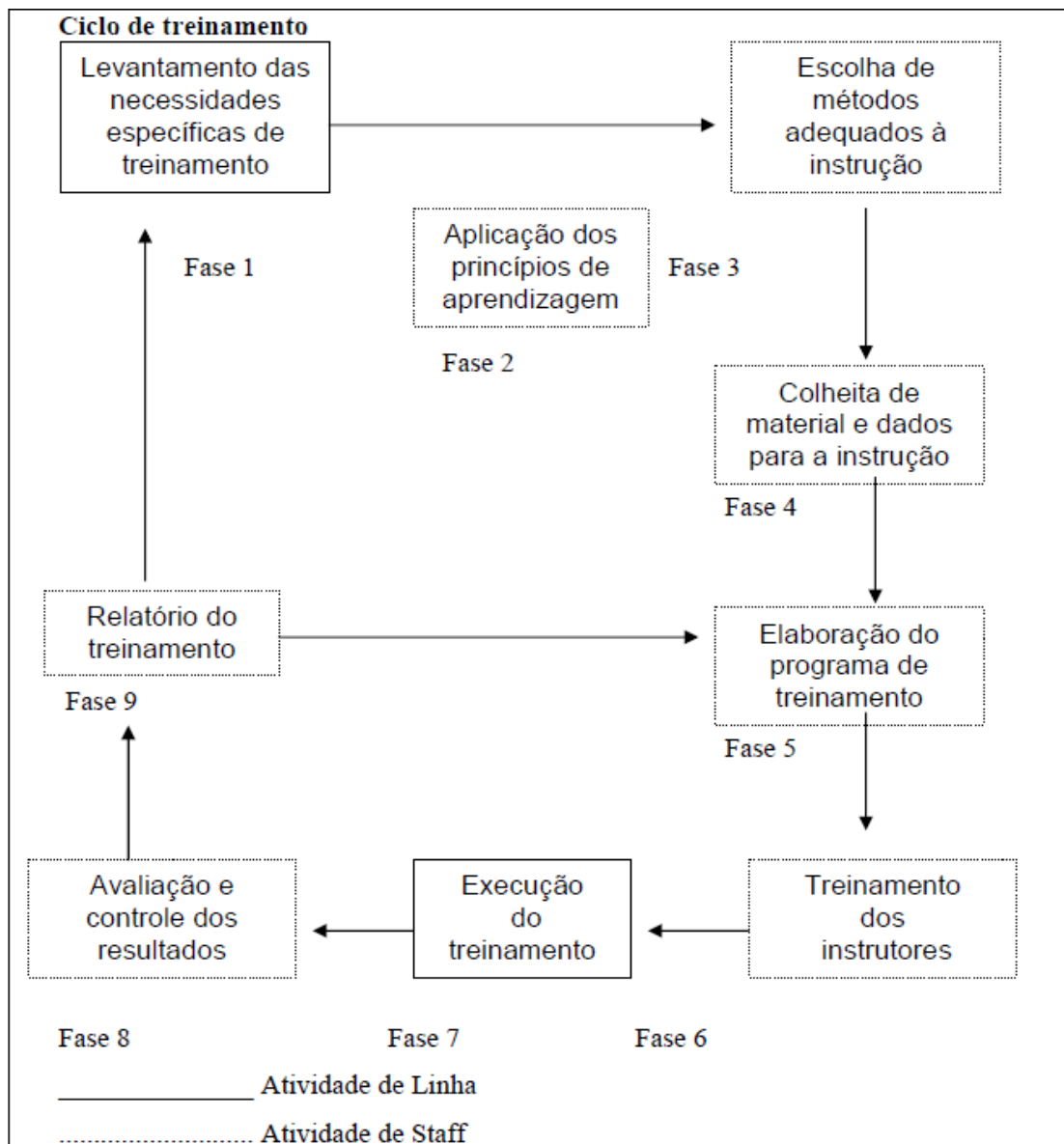


Figura 16. Fases de um ciclo de treinamento  
Adaptado de CHIAVENATO (2000).

No contexto da fonte da Figura 16, entende-se como *Staff* a equipe que participará do processo de planejamento e execução do treinamento, enquanto que *Linha* é o corpo de treinandos.

## CAPÍTULO 3

### 3. ASPECTOS GERAIS SOBRE CALDEIRAS

#### 3.1 Apresentação

Neste capítulo será vista uma breve descrição de caldeiras industriais, onde serão apresentados seus principais tipos, suas variáveis operacionais de maior relevância e as equações fenomenológicas governantes principais que serviram de base para o modelo usado na simulação da caldeira foco do estudo de caso. O capítulo abordará ainda os tipos de controles comumente aplicados.

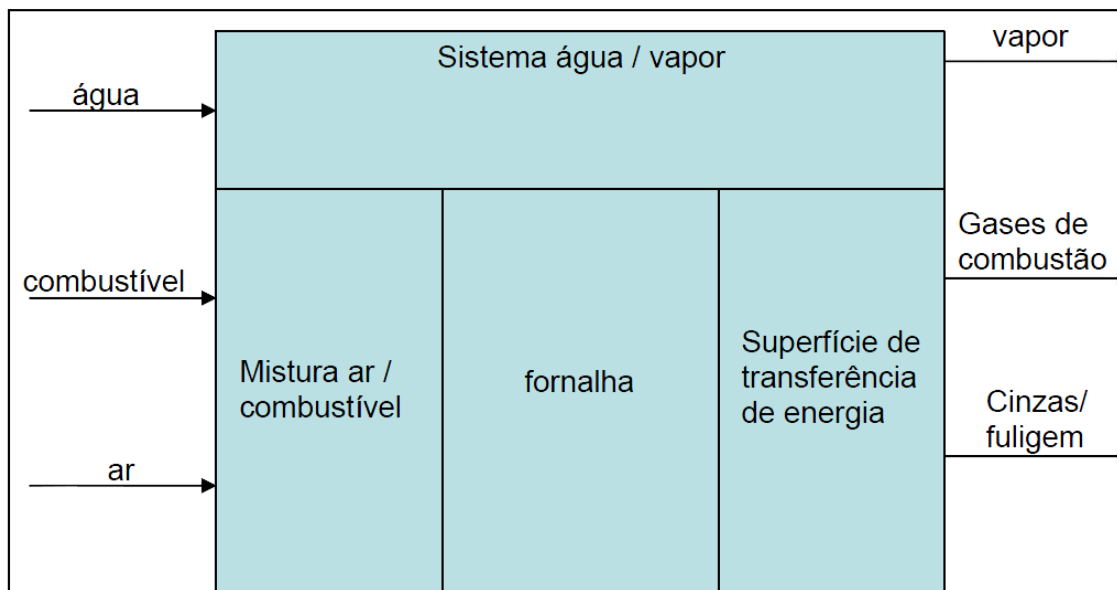
Em adição, o capítulo ilustra a aplicação do modelo citado para a caldeira estudada, mostrando as dinâmicas das variáveis em certo intervalo de tempo.

#### 3.2 Disposições Gerais

De acordo com DUTRA et al., (2006), as caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia. Como o vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial, tais equipamentos são considerados como as principais máquinas da revolução industrial (NIKIEL, 2010).

Este equipamento é o elemento mais influente de um ciclo de Rankine, pois determina a quantidade de trabalho que pode ser realizada pela turbina, bem como a eficiência termal do ciclo (ANDERSON, 2008).

Existem diversos esquemas que tentam explicar basicamente o funcionamento de uma caldeira. Em resumo, o equipamento é composto por dois setores distintos: o de fluxo de água e vapor; e o setor de captação de combustível e ar, sua posterior mistura e queima e a consequente geração de energia. Tem como entrada comum no primeiro setor citado a água, que pode ser oriunda de reprocesso dos sistemas envolvidos, como condensado. No outro setor, a mesma recebe o combustível e ar. A Figura 17 apresenta o esquema de uma caldeira genérica.



**Figura 17. Modelo Esquemático de uma Caldeira Genética**

### 3.2.1 Tipos de Caldeiras

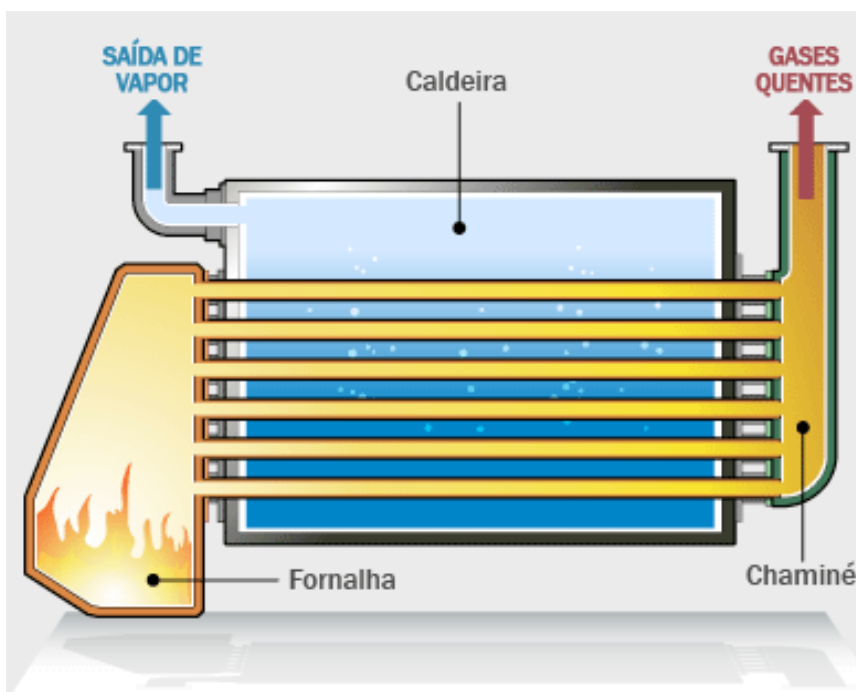
As caldeiras possuem dois tipos comuns, os quais as classificam:

- Flamotubulares ou Fogotubulares
- Aquatubulares ou Aquotubulares

#### 3.2.1.1 Caldeiras Flamotubulares

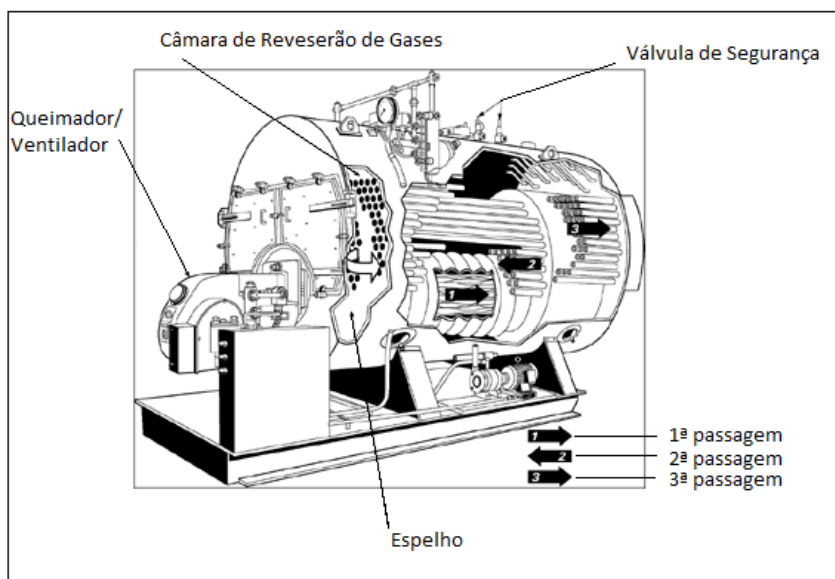
Tais caldeiras têm a configuração de que gases quentes oriundos da queima de combustíveis fluem através de tubos, os quais são envolvidos externamente por água a ser aquecida e posteriormente transformada em vapor. Na Figura 18 é apresentado um modelo exemplificando o funcionamento de uma caldeira flamotubular.





**Figura 18. Esquema de uma Caldeira Flamotubular**  
(<http://ciencia.hsw.uol.com.br>, 2012).

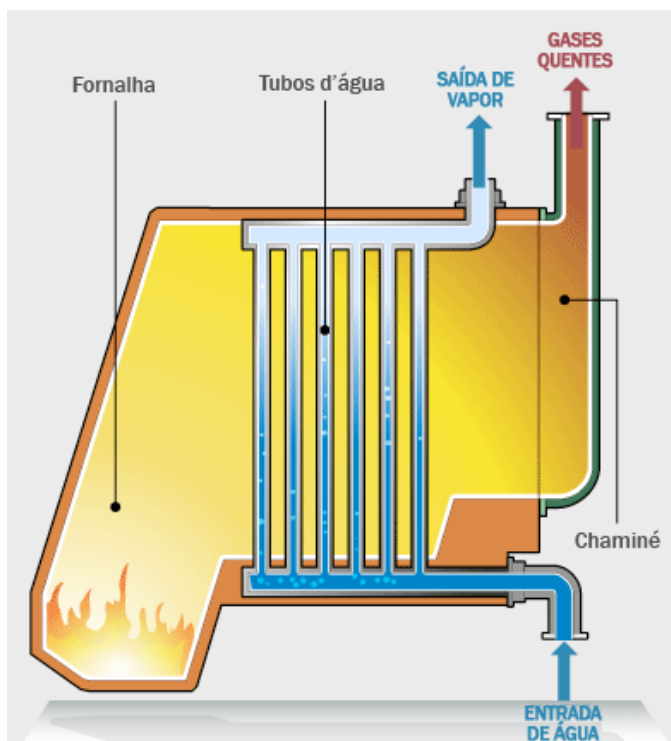
Tais caldeiras são empregadas quando se possui uma grande demanda de vapor a pressões moderadas e/ou baixas. A Figura 19 apresenta os componentes de uma caldeira flamotubular típica.



**Figura 19. Caldeira Flamotubular**  
(<http://www.chdvalvulas.com.br>, 2012).

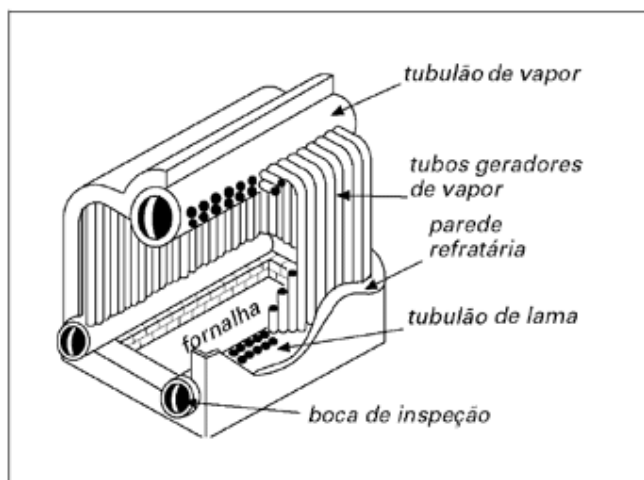
### 3.2.1.2 Caldeiras Aquatubulares

As caldeiras aquatubulares têm o conceito inverso: ao invés de possuírem tubos com gases quentes envoltos de água a ser aquecida, é a água que flui nos tubos envoltos por gases de combustão. A Figura 20 ilustra o esquema de caldeira deste tipo.



**Figura 20. Esquema de uma Caldeira Aquatubular**  
(<http://ciencia.hsw.uol.com.br>, 2012).

Neste, a água é alimentada continuamente. O equipamento possui dois tubulões, o primeiro para retenção de sólidos e o segundo para separação de fases líquida e gasosa (NIKIEL, 2010). A Figura 21 ilustra de modo mais detalhado os principais componentes de uma caldeira aquatubular genérica.



**Figura 21. Caldeira Aquatubular**  
(<http://www.chdvalvulas.com.br>, 2012).

### 3.2.2 Componentes de uma Caldeira Aquatubular

Uma caldeira aquatubular apresenta normalmente diversos componentes comuns a todos estes tipos de caldeiras. A seguir são listados estes componentes e uma breve descrição de suas funções:

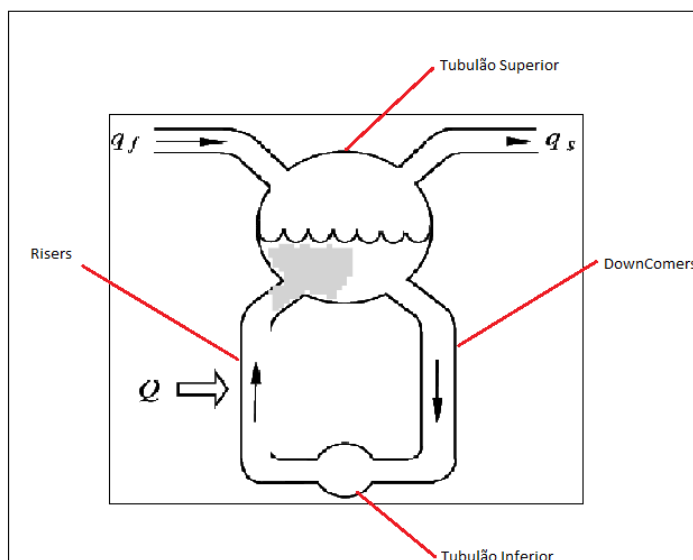
- Tubulão superior: recebe a alimentação de água no sistema, lida com as duas fases e separa a água do vapor gerado;
- Tubos ascendentes (*risers*): através de troca térmica, geram o vapor no sistema e o conduzem até o tubulão superior;
- Tubos descendentes (*downcomers*): conduz a água alimentada até o tubulão inferior;
- Tubulão inferior: recebe a água dos *downcomers* e separa os depósitos permitindo sua coleta, por drenagem;
- Fornalha: gera energia para o sistema, para que esta seja trocada com a água nos *risers* e assim seja vaporizada e com o vapor para que o mesmo seja superaquecido;
- Superaquecedor: secar o vapor, elevando sua temperatura;
- Pré-aquecedor de ar: eleva a temperatura do ar a ser misturado com o combustível, através dos gases de combustão, aumentando assim a eficiência energética;

- Economizador: aquece a água de alimentação, usando os gases de combustão, aumentando ainda mais a eficiência energética;
- Bomba de circulação forçada: mantém o fluxo de água e vapor sempre constante, importante para o controle de pressão e para atendimento de requisitos de projeto da configuração dos tubos.

### 3.2.3 Funcionamento de uma Caldeira Aquatubular

Dos tipos de caldeiras aquatubulares operadas na indústria, as de circulação natural são as do tipo mais comum (MARQUES, 2005), sendo assim será explicado brevemente neste item o funcionamento de uma caldeira deste tipo.

Na Figura 22, o sistema de funcionamento da caldeira é representado de forma bastante simplificada, porém útil para explicar a operação deste equipamento.



**Figura 22. Esquema Particionado de uma Caldeira Aquatubular**  
Adaptado de ÅSTRÖM & BELL, 2000.

Na Figura 22, em relação aos tubos descendentes (*downcomers*), a água alimentada,  $q_f$ , flui através destes tubos, os quais não estão expostos à fonte de calor, passando posteriormente para o tubulão inferior, onde haverá a separação de sólidos que por ventura poderiam diminuir a eficiência de troca gerando incrustações.

Do tubulão inferior, a água então passa para os tubos ascendentes, chamados de *risers*, onde haverá efetivamente a troca de calor da água com a fonte de energia do

sistema, proveniente da queima do combustível da caldeira. Com esta troca de calor, a água que flui nestes tubos evapora, diminuindo com isso a massa existente nesta parte do sistema. Tal evento provocará um diferencial de pressão hidrostática entre os *risers* e os *downcomers*, gerando um fluxo do lado descendente para o ascendente (MARQUES, 2005). Com este fenômeno, a circulação da água no sistema fica possibilitada de tal forma em que a água alimentada é direcionada para o tubulão inferior enquanto que o vapor gerado nos tubos ascendentes é direcionado para o tubulão superior, para ser separado e coletado.

### 3.2.4 Transferência de Calor em Caldeiras Aquatubulares

A transferência de calor nestes equipamentos ocorre tanto pela condução e convecção quanto pela radiação.

Em uma caldeira, ocorre normalmente a geração de vapor em diversos níveis de pressão, para tanto, devem existir diferentes áreas de trocas específicas para cada um desses níveis de vapor (MARQUES, 2005).

Conforme explicado, a troca de calor ocorre nos tubos ascendentes, porém em certas situações é necessário um sistema de pré-aquecimento para se atingir um determinado nível de pressão e temperatura do vapor.

Para a obtenção de vapor superaquecido, são necessários elementos chamados superaquecedores, nos quais ocorre uma troca de calor menos favorecida, pois em ambos os lados dos tubos há gases (MARQUES, 2005).

### 3.2.5 Circulação de Água em Caldeiras Aquatubulares

Em relação à circulação de água do sistema, a mesma ocorre em função de algumas forças motrizes, as quais devem ser avaliadas em função das condições em que se deseja retirar o vapor da caldeira:

- Diferença entre os pesos das massas da água que flui pelos tubos descendentes e da massa da mistura de vapor e água que fluem pelos tubos ascendentes;
- Forças de atrito dos tubos nos quais fluem a água e o vapor.

A circulação ocorre de forma natural enquanto houver uma diferença significativa entre essas duas forças motrizes.

A pressão influencia fortemente nestas forças, uma vez que com o aumento de pressão há uma diminuição no atrito, porém há uma diminuição também na diferença entre as densidades entre o vapor e a água. Assim, os pesos gerados pelas colunas existentes nos *risers* e *downcomers* tornam-se semelhantes, fazendo com que não seja suficiente a superação das forças de atrito nos tubos.

Com este panorama, em caldeiras com altas pressões (maiores do que 180 kgf / cm<sup>2</sup>) a circulação é realizada de maneira forçada, fazendo-se uso de uma bomba para prover a circulação (MARQUES, 2005).

### 3.2.6 Separação da mistura Líquido-Vapor

Conforme brevemente listado na subseção 3.2.2, o tubulão superior é o elemento da caldeira responsável por realizar a separação da mistura água-vapor gerada nos *risers*.

Uma separação eficiente influencia diretamente na qualidade do vapor gerado, em termos de umidade residual. Esta propriedade é de extrema importância para o vapor e para as suas aplicações, pois em diversos casos, existem limitações quanto à umidade no vapor.

Desta forma, o tubulão possui diversos artifícios (conhecidos como internos) para que a separação seja realizada de forma eficiente.

Estes internos se baseiam em diferentes forças e operações, possuindo funções específicas. As chicanas, os ciclones, labirintos entre outros internos baseiam-se nas forças de gravidade, inercial (momento) e centrífuga. Existem, porém outros internos que se baseiam na filtração e na lavagem. Estes últimos são de extrema importância para a geração de vapor de alta pressão.

### 3.2.7 Combustíveis usados

Para a geração de energia em uma caldeira, é necessária a queima de um determinado combustível. A escolha de tal combustível dependerá da disponibilidade (BABCOCK & WILCOX, 2007), podendo ser sólido líquido ou gasoso e ainda uma mistura destes.

Dependendo da escolha do combustível e seu estado físico, o mesmo poderá sofrer um processo de modificação para que a mistura com o ar e a posterior queima sejam eficientes. No caso de um combustível líquido, por exemplo, é comum que o mesmo seja atomizado, para que a área de superfície seja maximizada. No caso de combustíveis sólidos os mesmos podem ser queimados em leitos fixos ou leitos fluidizados, sendo que no caso do leito fluidizado, o mesmo entra em contato com o ar atmosférico que fluidiza o material granulado, assumindo características de fluido (BEGA, 2003).

É comum, em algumas situações, o uso de subprodutos e/ou resíduos como combustíveis de caldeiras. OLIVEIRA et al., (2012), mostrou o uso de resíduos alimentares como combustível de caldeiras.

Considerando um combustível líquido para a queima, algumas propriedades deste são de extrema importância para que a caldeira opere de forma contínua, segura e eficiente. A viscosidade de um combustível influencia diretamente na sua injeção no sistema, pois se a mesma for incompatível com a caldeira, pode haver entupimentos, diminuição nas vazões de combustível no sistema e consequentemente diminuição na eficiência de queima e até mesmo o não acendimento da chama na caldeira (NIKIEL, 2010). A temperatura é outra propriedade importante para um combustível, pois além de influenciar a viscosidade, outras propriedades deste líquido estão relacionadas diretamente com a temperatura.

A escolha de combustível também deve estar associada à sua eficiência de combustão. Logo, quanto mais energia liberada pela queima de uma determinada massa de combustível, menor será a quantidade necessária para se produzir a energia requerida na geração do vapor desejado.

### 3.3. Controles Típicos de Caldeiras

O controle de processos é uma atividade extremamente importante em uma planta industrial, pois permite que a mesma opere com suas variáveis os mais constantes possíveis, isto é, com a mínima variabilidade.

Tal condição traz diversas vantagens, como aumento de produtividade, otimização dos recursos, maximização da segurança do processo associado, melhor operabilidade de equipamentos, diminuição de custos, entre outros.

Tradicionalmente o detalhamento do processo e o desenvolvimento do sistema de controle são atividades separadas na engenharia de uma planta ou sistema. Desta forma, o detalhamento do sistema de controle não é iniciado até que o detalhamento do processo tenha sido realizado bem como os equipamentos definidos.

Esta abordagem traz sérias limitações devido ao fato que o detalhamento do processo determina a dinâmica do processo, bem como a operabilidade da planta. Uma abordagem diferente seria o desenvolvimento e entendimento da dinâmica do processo previamente ao detalhamento do processo (SEBORG et al., 2004).

SEBORG et al., (2004) lista duas abordagens gerais utilizadas para desenvolvimento de sistemas de controle:

- Abordagem tradicional: A estratégia de controle e os equipamentos do sistema de controle são selecionados baseados no conhecimento do processo e experiência. Após instalado o sistema de controle, os parâmetros inerentes do controlador são ajustados, em uma atividade conhecida como ajuste do controlador.
- Abordagem baseada em modelo: A dinâmica do modelo do processo é desenvolvida primeiramente e pode ser útil em pelo menos três vertentes: (i) Pode ser usada como base para o controlador baseado em modelo; (ii) a dinâmica do modelo pode ser incorporada diretamente nas leis de controle, como por exemplo um modelo de controle preditivo; e (iii) o modelo pode ser usado em uma simulação computacional para levantamento de diferentes estratégias de controle para determinar dados preliminares da configuração do controlador.

Verificando as duas abordagens, percebe-se que é possível controlar um conjunto de variáveis de processo de diversas formas diferentes. A escolha de uma ou outra abordagem é dada após a análise detalhada de cada problema, que pode concluir o uso das duas abordagens, se o sistema demandar tal nível de criticidade.

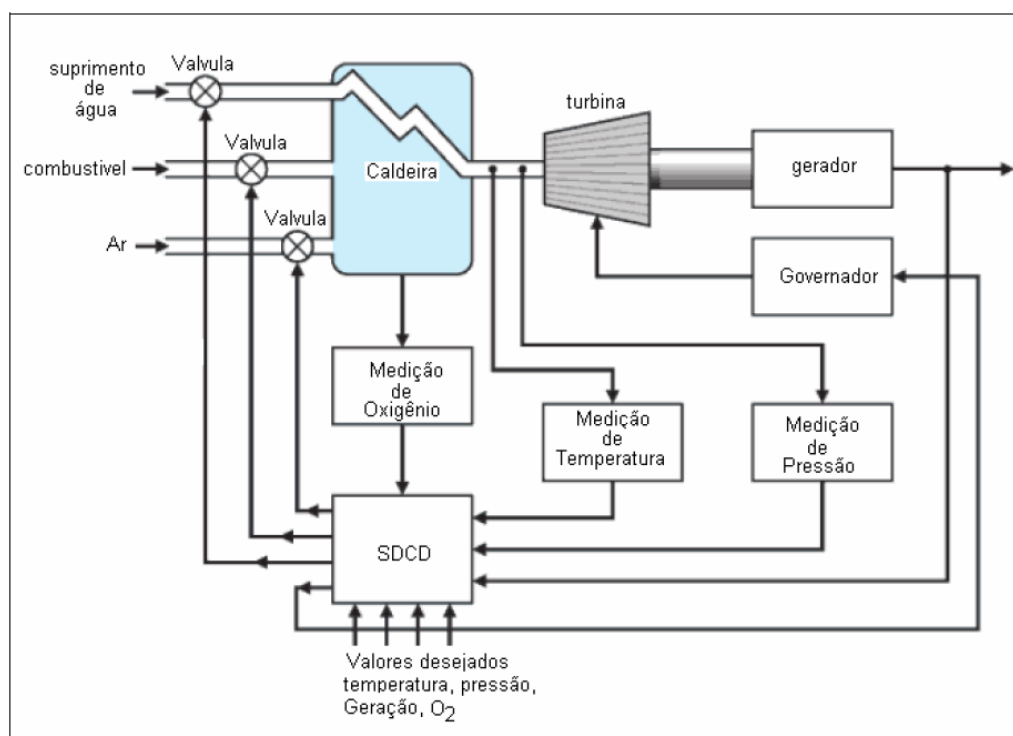
As caldeiras, por sua vez, são equipamentos complexos e que demandam diversos tipos de controles por possuírem diferentes variáveis críticas à operação. As variáveis mais importantes e mais comumente controladas nas caldeiras são enumeradas abaixo:

- Nível da mistura água-vapor no tubulão superior
- Vazão de água para a caldeira
- Vazão de vapor de saída da caldeira



- Pressão do vapor de saída da caldeira
- Vazão de ar de mistura para queima de combustível
- Excesso de ar.

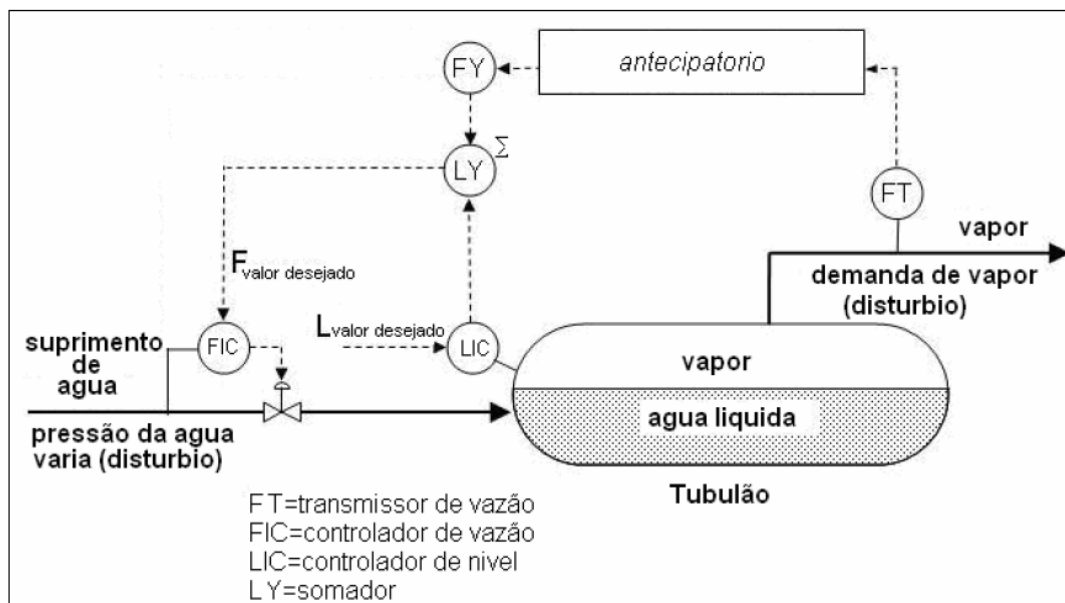
A Figura 23 apresenta um esquema dos principais controles de uma caldeira, associados ao sistema de controle distribuído (SDCD) de uma central de utilidades produtora de energia. Tal figura foi adaptada de DORF & BISHOP (2007, *apud* NIKIEL, 2010).



**Figura 23. Esquema dos Principais Controles de uma Caldeira**  
(DORF & BISHOP, 2007).

### 3.3.1 Controle de Nível de Tubulão

O controle de nível de mistura água-vapor no tubulão tem como objetivo manter o nível de água dentro da faixa de operação desejada. Este controle é obtido pela variação da vazão de água de alimentação do tubulão (também uma variável controlada) (HOUTZ, 2006), de acordo com a Figura 24.



**Figura 24. Controle de Nível de uma caldeira a três elementos.**  
(www.controlguru.com, 2012).

As principais dificuldades relacionadas a este controle são os fenômenos causados pela ascensão de bolhas de vapor no seio do líquido presente no tubo. Tal presença faz com que a densidade da mistura diminua o que ocasiona expansão do volume, aumentando, consequentemente sua variabilidade. Esta expansão é aumentada pelo aumento da carga na caldeira. Em contrapartida, uma diminuição da carga, faz com que a presença de bolhas seja reduzida e com isso a densidade da mistura tende a aumentar, contraindo o volume.

Em caldeiras de pequeno porte, este tipo de controle é geralmente auto operado. O Controle Auto operado é o sistema em que a energia necessária para movimentar a parte operacional pode ser obtida diretamente, através da região de detecção, do sistema controlado. Deste modo, este controle obtém toda a energia necessária ao seu funcionamento do próprio meio controlado (a energia para movimentar a válvula é proveniente do sistema controlado). Este controle é largamente utilizado em aplicações de controle de pressão e menos comumente no controle de nível e de temperatura. A Figura 25 ilustra um exemplo de aplicação de controle auto operado, onde a energia presente na tubulação de saída da válvula (na forma de pressão) fornece a energia necessária para operação da válvula.

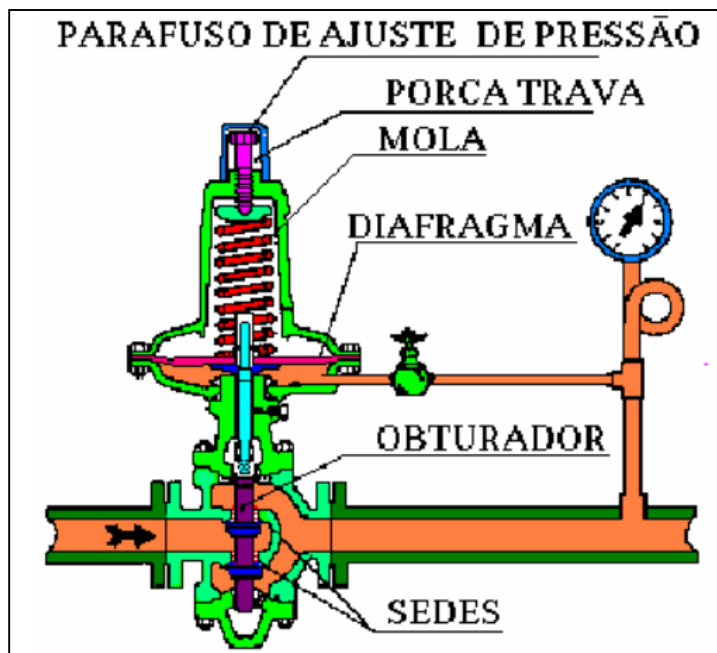


Figura 25. Exemplo de controle auto operado  
(<http://pt.scribd.com/doc/43547547/7/Controle-Auto-operado>, 2012)

Já nas caldeiras de grande porte (produção de vapor acima de sete toneladas por hora) o controle de nível é realizado com válvulas de controle normais e não auto operadas a um, dois ou três elementos, onde o elemento se refere à variável de processo (BEGA, 2003).

O controle de nível a um elemento leva em consideração a medição de uma única variável de processo, neste caso, o transmissor de nível. É simples e tem baixo custo de instalação, entretanto, sofre grande influência dos fenômenos de contração e expansão da mistura água-vapor no tubulão, aumentando a variabilidade e ocasionando controle oscilatório.

O controle a dois elementos conta também a vazão de vapor para os consumidores, o que acarreta um controle antecipatório de demanda de vapor no controle de nível. Tal sistema tem a desvantagem de ser vulnerável a variações na pressão de alimentação de água (HESELTON, 2004).

Já o controle a três elementos tem como variáveis medidas: nível de mistura no tubulão, vazão de água de alimentação e vazão de vapor produzido. Este tipo de controle minimiza a variabilidade do controle em função de distúrbios em uma ou outra variável.

### 3.3.2 Controle de Combustão de Caldeiras

O controle de combustão em uma caldeira é extremamente importante, pois envolve a força motriz da geração de vapor, a geração de energia para troca com a água alimentada.

Portanto, quanto mais vapor é requerido pela vizinhança, mais energia é requerida para ser trocada com uma maior vazão de água alimentada. Assim, caso tal energia extra não seja fornecida, a tendência é que a pressão do vapor gerado tenha uma diminuição em relação ao que se deseja.

Em relação a processos que envolvam combustão, a mesma tem diferentes faixas, as quais podem ser divididas em termos de eficiência e segurança, logo, busca-se em uma caldeira, trabalhar a combustão em uma zona ótima.

Para se trabalhar em tal região ótima, implementa-se um controle de excesso de ar associado a uma curva de combustão.

O controle de combustão pode ser realizado também seguindo certas configurações, priorizando o controle de um dos componentes responsáveis pela combustão, assim os demais componentes seguirão a tendência da variável priorizada.

Assim se pode implementar controle de combustão tendo como variável priorizada o ar e o combustível seguindo este controle. Ou ao contrário, priorizando o controle do combustível. Ambas as opções possuem inconvenientes relacionados à segurança da caldeira, desta forma existe uma opção em que realiza um controle por limite cruzado. Existe uma chave seletora que permite a escolha entre pressão e vazão, dependendo da necessidade. Tal possibilidade permite que em um conjunto de caldeiras, escolha-se por controlar a combustão por pressão algumas dessas caldeiras, enquanto que outras seriam controladas por vazão. Tal arranjo tem a vantagem de minimizar os riscos impostos pelas abordagens de priorizar somente uma variável (BRANAN, 2007).

### **3.4 Modelo Dinâmico Não Linear para Caldeira Aquatubular**

#### **3.4.1 Introdução**

MARQUES (2005) listou alguns modelos existentes na literatura. Particularmente, enfocou o proposto por ÅSTRÖM & BELL (2000), que apresentaram um modelo dinâmico não linear para uma caldeira aquatubular, baseado em princípios básicos de

conservação de massa e energia. Neste aspecto, MARQUES (2005) adicionou ao estudo de tais autores os detalhes relacionados aos procedimentos de obtenção do modelo. Assim, o modelo empregado nesta dissertação baseia-se no proposto por ÅSTRÖM & BELL (2000), com as considerações e detalhamentos de MARQUES (2005). Justifica-se a adoção aqui deste modelo por sua simplicidade e pelo fato dele ter sido validado com dados reais pelos seus autores (ÅSTRÖM & BELL, 2000).

### 3.4.2 Sumário do modelo

Apenas um sumário do modelo será apresentado aqui, sendo seu detalhamento realizado no Apêndice 1. Considerando todas as equações e variáveis vistas no Apêndice 1, verifica-se que o sistema é composto pelas seguintes variáveis de estado:

$p$ : pressão na caldeira.

$V_{wt}$ : volume total de água;  $p$ : pressão no tubulão;

$\alpha_r$ : qualidade do vapor

$V_{sd}$ : volume de vapor abaixo do nível de líquido do tubulão.

Assim, têm-se as seguintes equações de estado:

$$\begin{aligned} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} &= q_f - q_s, \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s, \\ e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} &= Q - \alpha_r h_c q_{dc}, \\ e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} &= \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f, \end{aligned} \quad (1)$$

com,

$$h_c = h_s - h_w,$$

$$e_{11} = \rho_w - \rho_s,$$

$$e_{12} = V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p},$$

$$e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s,$$

$$e_{22} = V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \right) + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} + V_{wt} \left( h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p},$$

$$\begin{aligned}
e_{32} &= \left( \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + \\
&\quad + \left[ (1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right] \bar{\alpha}_v V_r + [\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_r] h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - \\
&\quad - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}, \\
e_{33} &= [(1 - \alpha_r) \rho_s + \alpha_r \rho_w] h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}, \\
e_{42} &= V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} (\rho_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + \\
&\quad + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}) + \alpha_r (1 + \beta) V_r \left[ \bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_s - \rho_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right], \\
e_{43} &= \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}, \\
e_{44} &= \rho_s,
\end{aligned}$$

onde:

$\bar{\alpha}_v$ : fração volumétrica média;  $q_{dc}$ : fluxo mássico de circulação;  $T_d$ : tempo de residência do vapor no tubulão;  $t_s$ : temperatura do vapor;  $V_r$ : volume dos tubos ascendentes;  $m_r$ : massa dos tubos ascendentes;  $\beta$ : parâmetro empírico e  $V_{wd}$ : volume de água abaixo do nível do tubulão.

Desta forma, o sistema resultante é do tipo:

$$\begin{aligned}
\underline{\underline{E}}(\underline{x}) \dot{\underline{x}} &= \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}), \\
\underline{y} &= \underline{l}(\underline{x}),
\end{aligned} \tag{2}$$

onde:

$$\underline{x} = [V_{wt} \quad p \quad \alpha_r \quad V_{sd}]^T, \tag{3}$$

$$\underline{u} = [q_f \quad q_s \quad Q]^T, \tag{4}$$

$$\underline{f}(\underline{x}, \underline{u}) = \begin{bmatrix} q_f - q_s \\ Q - q_f h_f - q_s h_s \\ Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\ \rho_s \frac{V_{sd}^0 - V_{sd}}{T_d} + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f \end{bmatrix}, \tag{5}$$

### 3.4.3 Linearização dos coeficientes $e_{ij}$

Conforme apresentado no Apêndice A, o modelo faz uso de linearização dos coeficientes  $e_{ij}$  para diminuição da complexidade dos cálculos. Assim, no Apêndice são demonstrados dois meios de realizar essa linearização. Usando o método de linearização considerando uma aproximação para os termos  $e_{ij}$ , PALMA (2006) gerou equações a partir de aproximações das curvas em função das variáveis: entalpia específica ( $h$ ), massa específica ( $\rho$ ), temperatura de saturação ( $t_s$ ), dentre outras variáveis. Tais curvas possuem erros baixos, na ordem de 0,1%. As equações determinadas no referido estudo, seguem listadas a seguir, no conjunto de equações (6).

$$\begin{aligned} h_s &= 46469 \ln(p) + 2675000, \\ \rho_s &= -0,0014 \cdot p^2 + 0,5198 \cdot p + 0,093, \\ h_w &= 420998 \cdot p^{2583}, \\ \rho_w &= 0,3081 \cdot p^2 - 10,984 \cdot p + 964,35, \\ t_s &= 100,67 \cdot p^{0,2522}. \end{aligned} \quad (6)$$

Fazendo uso das equações (6), derivando-as nas equações das derivadas totais em relação à pressão, são obtidas as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_s}{\partial p} &= \frac{43469}{p}, \\ \frac{\partial \rho_s}{\partial p} &= -2,8 \cdot 10^{-3} \cdot p + 0,5198, \\ \frac{\partial h_w}{\partial p} &= 108743,7834 \cdot p^{-0,7417}, \\ \frac{\partial \rho_w}{\partial p} &= 0,6162 \cdot p - 10,984, \\ \frac{\partial t_s}{\partial p} &= 25,388974 \cdot p^{-0,7478}. \end{aligned} \quad (7)$$

Desta forma, fazendo uso das Equações (1), aplicando as Equações (7) e considerando, no cálculo da pressão que a variação volume de água total na caldeira é zero, pôde-se simplificar as equações citadas, calculando a pressão em Matlab.

#### 3.4.4 Modelo considerando pressão constante

Considerando que será estudado apenas o nível, sem dependência deste da pressão, o modelo será modificado considerando controle por outro controlador independente do Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). Tal consideração é válida, uma vez que em operação normal, os dados utilizados para controle do nível são gerados a partir de uma caldeira que possui sua pressão controlada, logo, considerada constante.

O procedimento de modificação do modelo se inicia pela eliminação do fluxo de calor  $Q$ , que é a variável manipulada responsável pelo controle de pressão no tubulão. Para isso, transforma-se  $Q$  em outras variáveis as quais farão  $Q$  ficar em função dos coeficientes e de outras variáveis do sistema. Fazendo o seguinte procedimento:

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad (8)$$

E substituindo na equação (1), tem-se que:

$$\begin{aligned} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} &= q_f - q_s, \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s. \end{aligned} \quad (9)$$

Multiplicando a primeira equação do sistema (9) por  $e_{21}$  e a segunda por  $e_{11}$  e em seguida subtrair a segunda equação da primeira, tem-se:

$$e_{21}(q_f - q_s) - e_{11}(Q + q_f h_f - q_s h_s) = 0,$$

Isolando  $Q$ , vem:

$$Q = \frac{e_{21}(q_f - q_s)}{e_{11}} - q_f h_f + q_s h_s. \quad (10)$$

Substituindo as equações (8) e (10) nas Equações (1), resulta no seguinte sistema:



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_{wt}}{dt} = \frac{(q_f - q_s)}{e_{11}}, \\ e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} = \frac{e_{21}}{e_{11}} (q_f - q_s) - q_f h_f + q_s h_s - \alpha_r h_c q_{dc}, \\ e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f. \end{array} \right. \quad (11)$$

De forma análoga ao método do cálculo da pressão, neste caso calculou-se o volume total de água, fazendo uso das equações (6) e das substituições destas nas equações (11), integrando-as em Matlab e assim determinando o volume total de líquido.

## CAPÍTULO 4

### 4. ESTUDO DE CASO

#### 4.1 Apresentação

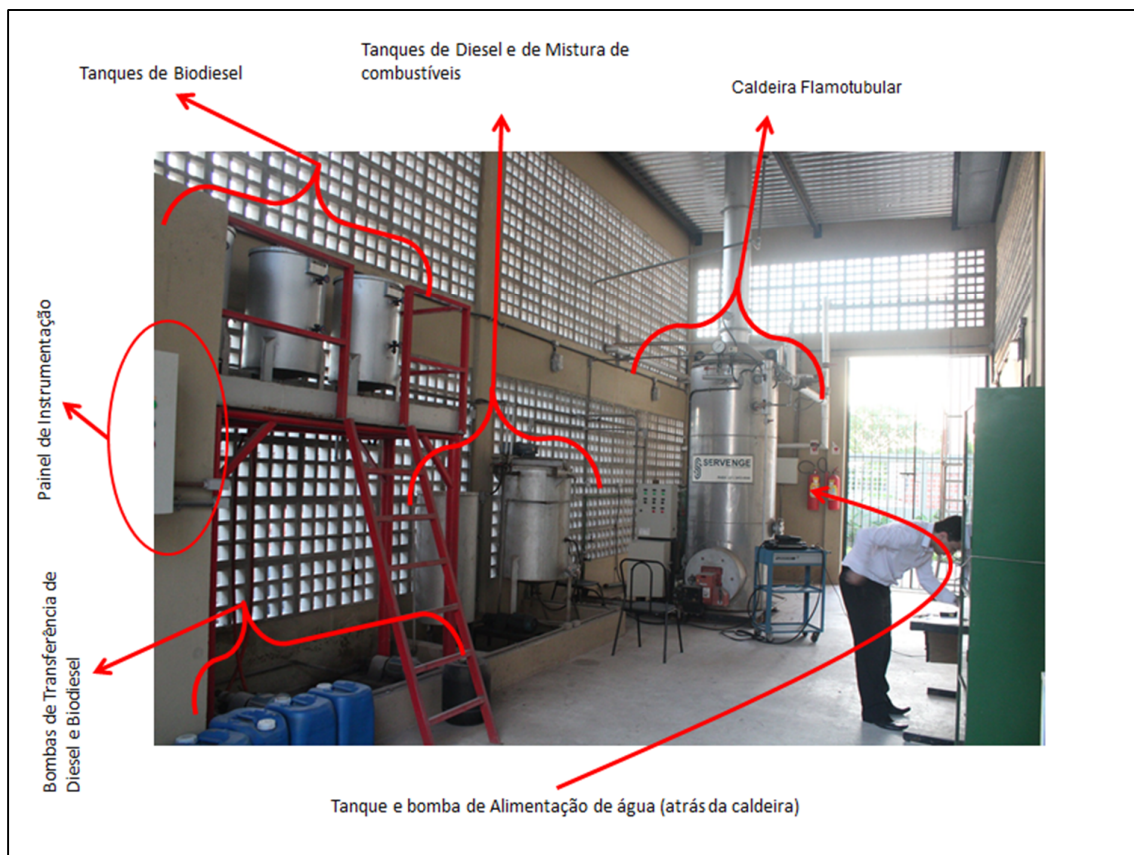
Este capítulo apresenta inicialmente a planta estudada, mostrando seus principais equipamentos e controles. Na sequência, o equipamento é simulado, aplicando suas características às equações do modelo apresentado no Capítulo 3. Assim, são exibidas simulações dinâmicas com o modelo, usando o software MATLAB (*Mathworks*). É observado o comportamento do nível de água, da pressão de vapor da caldeira e da temperatura do vapor gerado na presença de variações em condições operacionais.

#### 4.2 Planta Semi-industrial Analisada

A aplicação da ferramenta desenvolvida nesta dissertação foi testada e aplicada em uma caldeira flamotubular vertical de pequeno porte, modelo CV-VDM-500, assumindo, para fins acadêmicos, o modelo de cálculo utilizado por ÅSTRÖM & BELL (2000), MARQUES (2005), NIKIEL (2010) e PALMA (2006).

Tal caldeira está localizada em uma planta piloto, que por sua vez encontra-se na Central de Utilidades do Laboratório de Engenharia Química da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LADEQ/EQ/UFRJ).

Além da caldeira, neste trabalho serão consideradas algumas variáveis dos equipamentos diretamente relacionados, tais como tanques de alimentação de água e combustível, por exemplo. Na Figura 26 é mostrada uma fotografia do local onde a caldeira está instalada, contemplando a tubulação envolvida, a maioria dos principais equipamentos associados e a parte estrutural da planta.



**Figura 26. Planta piloto da central de utilidades do Laboratório de Engenharia Química/EQ/UFRJ**

Conforme é visto na Figura 26, além da caldeira, esta Central de Utilidades possui outros equipamentos. Os demais equipamentos que são diretamente relacionados a ela são listados na Tabela (1).

Em adição aos equipamentos listados na Tabela (1), a Central possui também uma linha de vapor saturado, além de conter um sistema de tubulação que interliga os equipamentos à caldeira.

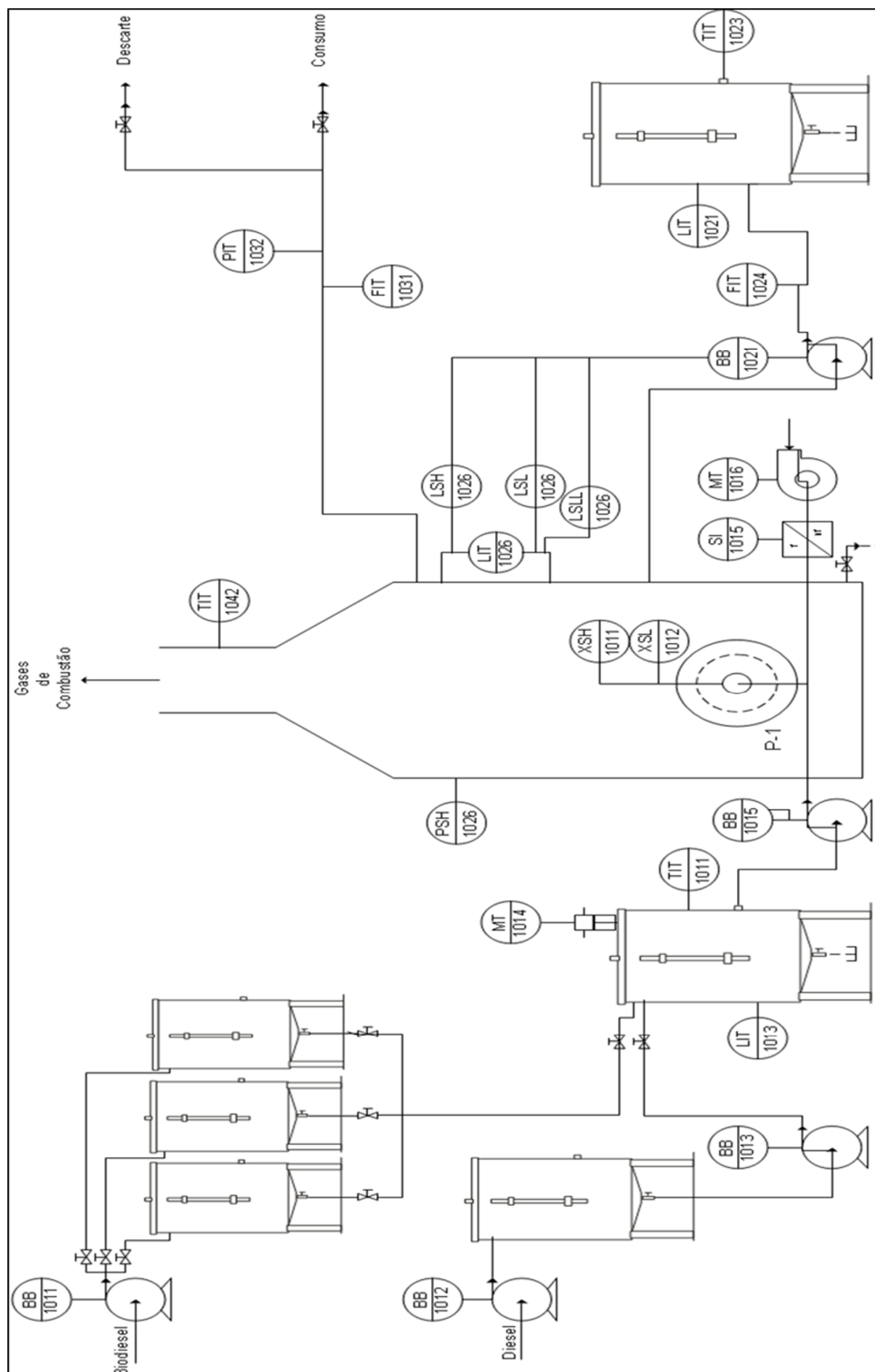
O queimador recebe a mistura de combustíveis e o ar em uma proporção ótima para a queima. O ignitor é o elemento responsável por iniciar a queima.

O vapor gerado nesta caldeira é saturado, o qual excesso é descartado para a atmosfera, através de um silenciador e um tanque de retenção de líquido.

VALDMAN (2010) apresentou o diagrama *Process and Instrumentation* (P&I) desta Central de Utilidades, contendo o fluxograma de processo e a instrumentação instalada na planta. Este diagrama é ilustrado na Figura 27.

Tabela 1. Lista de equipamentos associados à Caldeira do LADEQ/EQ/UFRJ

Equipamento	Descrição	Diâm ou Comp (m)	Altura (m)	Quant.
Tanque de Alimentação de Biodiesel	Armazenamento de biodiesel alimentado na caldeira	0,65	1	3
Tanque de Alimentação de Diesel	Armazenamento de diesel alimentado na caldeira	0,7	1,4	1
Tanque de Mistura de Diesel e Biodiesel	Mistura de combustíveis previamente à alimentação na caldeira	0,9	1,1	1
Tanque de Alimentação de Água	Armazenamento de água alimentada na caldeira	1,1	1,1	1
Bomba de Biodiesel	Transferência de biodiesel da estocagem para os tanques de alimentação de biodiesel	0,4	0,3	1
Bomba de Diesel	Transferência de diesel da estocagem para o tanque de alimentação de diesel	0,4	0,3	1
Bomba de descarga de Diesel	Transferência de diesel do tanque de alimentação de diesel para o tanque de mistura	0,4	0,3	1
Bomba de alimentação de combustível	Transferência da mistura de combustíveis para a Caldeira	0,4	0,4	1
Bomba de Alimentação de água	Transferência de água para a Caldeira	0,4	0,4	1
Soprador	Transferência de ar para providenciar a mistura para queima	0,3	0,3	1



**Figura 27. Diagrama P&I da Central de Utilidades (VALDMAN, 2010).**

### 4.3 Especificação Técnica

Serão apresentadas a seguir, através da Tabela (2), as principais características técnicas da caldeira estudada que serão relevantes para a simulação do equipamento no MATLAB:

**Tabela 2. Especificação Técnica da Caldeira Modelo CV-VDM-500**

Variável	Valor
Capacidade de Produção de Vapor, com água a 20°C	500 kg/h
Potencia térmica nominal	0,3 MW
Característica do Vapor	saturado
Pressão máxima de trabalho	8,00 kgf/cm <sup>2</sup>
Combustível principal	óleo diesel
Combustível auxiliar	não possui
Número de Passes	01 (um)
01 (uma)	câmara de combustão
Volume médio de água durante o uso normal	0,6m <sup>3</sup>
Vazão de combustível	26 g/h

### 4.4 Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de dados -SCADA - para monitoramento

VALDMAN (2010) apresentou a tela principal de operação da caldeira, contendo um sinótico da caldeira e suas principais variáveis de processo, onde é possível também visualizar telas de tendências destas variáveis, telas de alarmes e emissões de relatórios. O software utilizado para desenvolvimento do SCADA desta caldeira foi o iFixProficy®, da empresa GE *Intelligent Platforms*. O sinótico desenvolvido por VALDMAN (2010) é exibido na Figura 28.

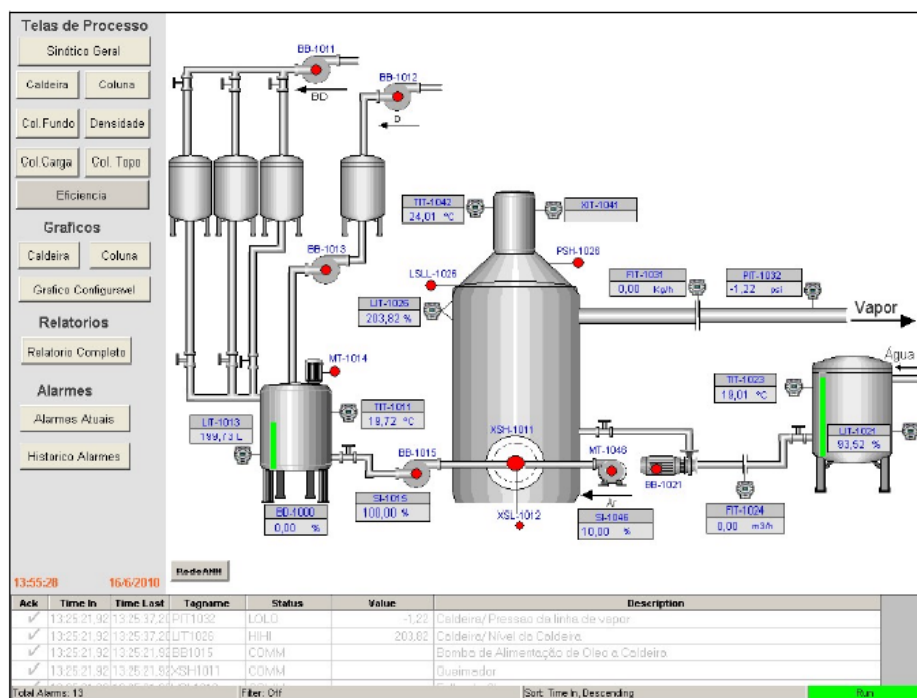


Figura 28. Tela principal de operação da Caldeira

Através do trabalho de VALDMAN (2010) pôde-se também visualizar as faixas de medida de algumas das principais variáveis contínuas disponibilizadas ao sistema supervisório. Estes dados serão listados na Tabela (3).

Tabela 3. Variáveis contínuas disponíveis na instrumentação da caldeira

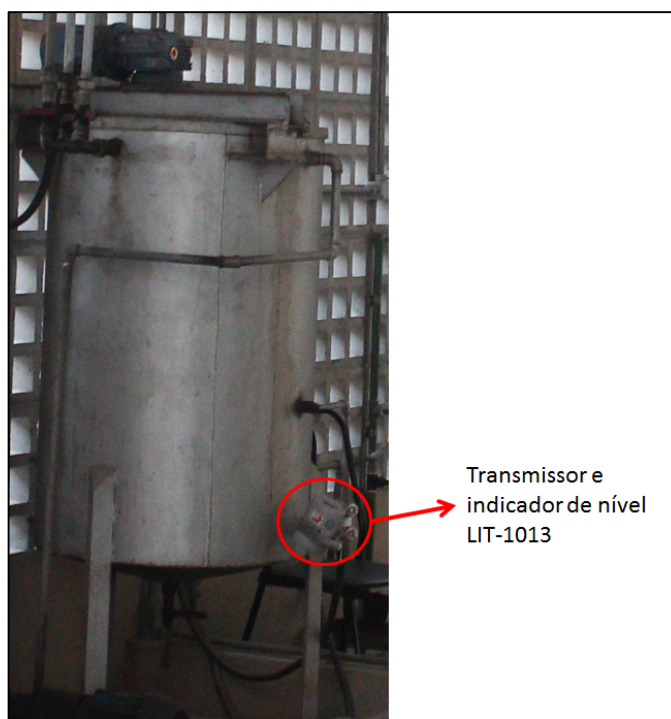
Variável	Tag	Descrição	Faixas de medida
1	LIT-1013	Nível do tanque de alimentação de combustível	37,50 a 353,00 L
2	LIT-1021	Nível do tanque de alimentação de água	0 a 100,00 %
3	LIT-1026	Nível da caldeira	0 a 100,00 %
4	FIT-1024	Vazão de água de alimentação	0 a 5,2 m3/h
5	FIT-1031	Vazão de vapor	0 a 500,00 kg/h
6	PIT-1032	Pressão de vapor na linha	0 a 100,00psi
7	TIT-1011	Temperatura do óleo combustível	0 a 100,00oC
8	TIT-1023	Temperatura da água de alimentação	0 a 400,00oC
9	TIT-1042	Temperatura dos gases residuais	0 a 100,00oC

Os equipamentos e instrumentos listados encontram-se funcionais na planta, sendo a seguir, ilustrados em algumas fotos atualizadas tiradas do local (Figuras 29 a 31).



**Figura 29. Tanques de Biodiesel**

Sobre a Figura 29, pode-se visualizar os 3 tanques de biodiesel que ficam sobre a plataforma suspensa de elevação 1,8 m. É possível visualizar na figura as réguas que indicam o nível de cada tanque. O diâmetro e altura de cada tanque foram medidos e os dados deste e os demais equipamentos mostrados nas fotos a seguir seguem na Tabela (1). A Figura 30 exibe o tanque de alimentação de combustível, que recebe a mistura de diesel e biodiesel.

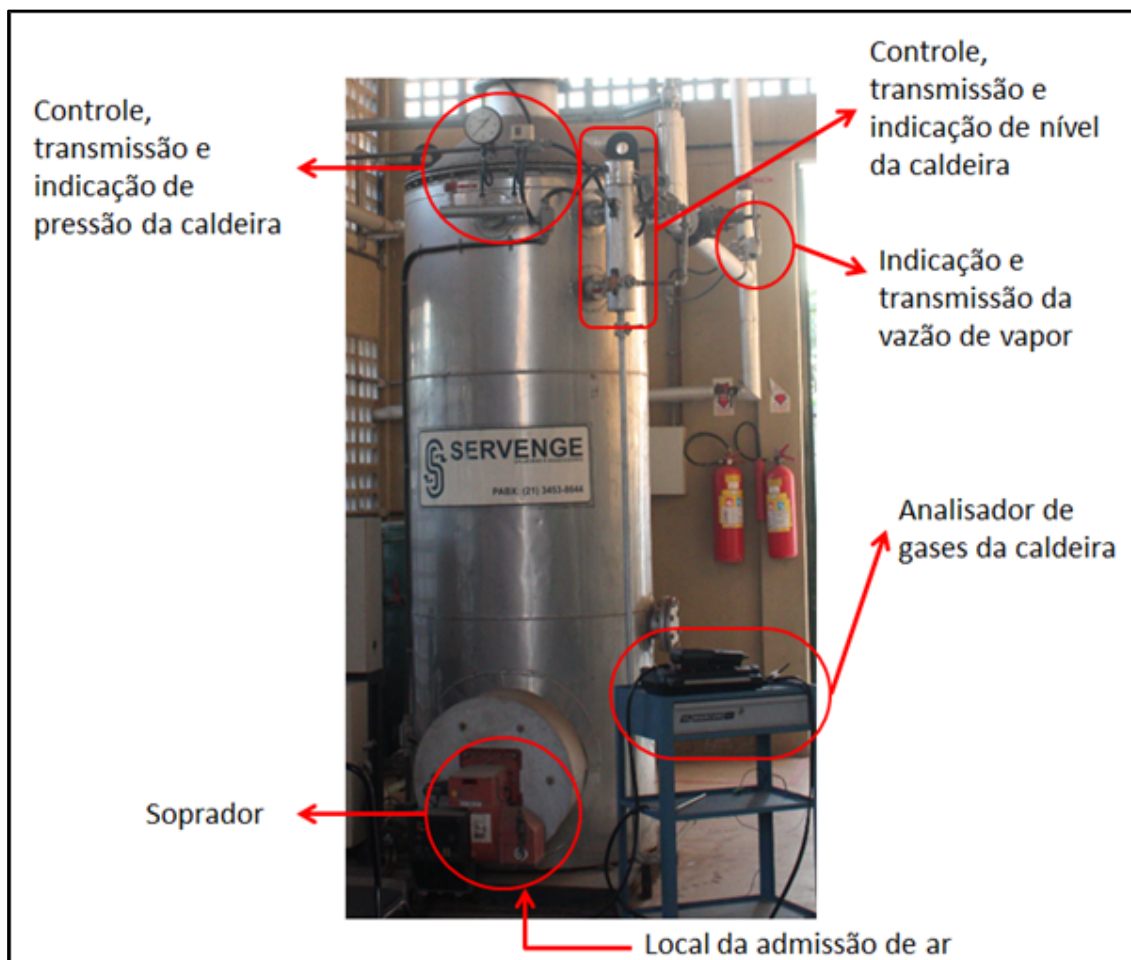


Transmissor e  
indicador de nível  
LIT-1013

**Figura 30. Tanque de Alimentação de Combustível**



A Figura 31 mostra a caldeira e seus principais instrumentos e equipamentos associados.



**Figura 31. Caldeira Aquatubular estudada e seus instrumentos**

É possível verificar também na Figura 31, a existência de uma válvula de segurança para o caso da pressão da caldeira ir além da máxima permitida de projeto (8 bar).

## 4.5 Simulação do Modelo Utilizado

### 4.5.1 Apresentação

Neste item serão verificados os resultados das simulações, usando o modelo proposto por ÅSTRÖM & BELL (2000), MARQUES (2005), NIKIEL (2010) e PALMA (2006). É importante ressaltar que a caldeira foi simulada sem considerar

nenhuma malha de controle, o que em algumas simulações ocasiona o não atingimento de um novo estacionário após a inserção de um degrau na variável perturbada.

#### 4.5.2 Resultados das simulações

Neste item falar-se-á sobre como as simulações foram executadas em termos de escolha de variáveis de entrada e por estratégia de cálculo. Além disso, serão mostrados como seus resultados foram obtidos, exemplificando algumas das simulações realizadas.

##### 4.5.2.1 Definição das variáveis de entrada do modelo

A partir da Tabela (2), é disponibilizado um conjunto de variáveis da caldeira que serão aplicadas ao modelo, sendo usadas como condições iniciais para as simulações.

Sobre a vazão de entrada de água e de saída de vapor saturado, será considerado que a caldeira opera em estado estacionário em sua capacidade máxima de produção de vapor, portanto, a vazão de entrada é igual à de saída. Sendo assim, observando tal informação na Tabela (2), verifica-se tal vazão como valor 500 kg/h ou convertendo para kg/s, o valor de 0,13 kg/s. Sobre o volume total da caldeira, será utilizada uma relação relativamente menor da apontada por PALMA (2006) em que o volume total de água da caldeira equivale a 85% do volume total do equipamento. Neste trabalho será usada a relação de 80%, devido ao fato da capacidade da caldeira utilizada neste trabalho ser de uma capacidade menor da aplicada em PALMA (2006). Sendo assim, o volume total da caldeira será de 0,75 m<sup>3</sup>.

Em relação à entalpia específica da água de alimentação, foi usada a Tabela (4), de propriedades termodinâmicas da água de SONNTAG et al., (2003).

Desta forma, foi considerada que a temperatura da água de alimentação é de 25°C e consequentemente possuindo entalpia de 104,89 kJ/kg.

Em relação à pressão de trabalho, foi informado que a pressão máxima de operação é de 8 kgf/cm<sup>2</sup>. Assim, estipulou-se que a pressão de trabalho fosse 5 bar, aproximadamente 62 % da pressão máxima de trabalho.

E em relação à energia envolvida no processo de geração de vapor com as variáveis passadas, a mesma tem o valor de 300 kJ.

**Tabela 4. Propriedades Termodinâmicas da água saturada (fase líquida)**  
(SONNTAG et al., 2003).

<b>Temperatura</b>	<b>Pressão</b>	<b>Volume Específico</b>	<b>Energia Interna</b>	<b>Entalpia Específica</b>	<b>Entropia Específica</b>
°C	bar	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg.K
0,01	0,00611	1,002	0,00	0,01	0,0000
5	0,00872	1,0001	20,97	20,98	0,0761
10	0,01228	1,0004	42,00	42,01	0,1510
15	0,01705	1,0009	62,99	62,99	0,2245
20	0,02339	1,0018	83,95	83,96	0,2966
25	0,03169	1,0029	104,88	104,89	0,3674
30	0,04246	1,0043	125,78	125,79	0,4369
35	0,05628	1,006	146,67	146,68	0,5053
40	0,07384	1,0078	167,56	167,57	0,5725
45	0,09593	1,0099	188,44	188,45	0,6387
50	0,1235	1,0121	209,32	209,33	0,7038
55	0,1576	1,0146	230,21	230,23	0,7679
60	0,1994	1,0172	251,11	251,13	0,8312
65	0,2503	1,0199	272,02	272,06	0,8935
70	0,3119	1,0228	292,95	292,98	0,9549
75	0,3858	1,0259	313,90	313,93	1,0155
80	0,4739	1,0291	334,86	334,91	1,0753
85	0,5783	1,0325	355,84	355,90	1,1343
90	0,7014	1,0360	376,85	376,92	1,1925
95	0,8455	1,0397	397,88	397,96	1,2500
100	1,014	1,0435	418,94	419,04	1,3069
110	1,433	1,0516	461,14	461,30	1,4185
120	1,985	1,0603	503,50	503,71	1,5276
130	2,701	1,0697	546,02	546,31	1,6344
140	3,613	1,0797	588,74	589,13	1,7391
150	4,758	1,0905	631,68	632,20	1,8418

#### 4.5.2.2 Cálculo do volume de água, vapor e título do vapor da caldeira

Conforme pode ser visto no Apêndice 1, o volume total é dado pela soma dos volumes totais de água e vapor. Com isso, como o volume total da caldeira é fixo, focou-se na determinação de um dos volumes totais (água ou vapor) e a partir deste, calculou-se o outro volume. De posse dos volumes totais das duas fases, calcularam-se as densidades para ambas as fases (em função da pressão) e aplicaram-se as equações abaixo para o cálculo das massas das duas fases:

$$M_{st} = V_{st} \cdot \rho_s, \quad (12)$$

$$M_{wt} = V_{wt} \cdot \rho_w. \quad (13)$$

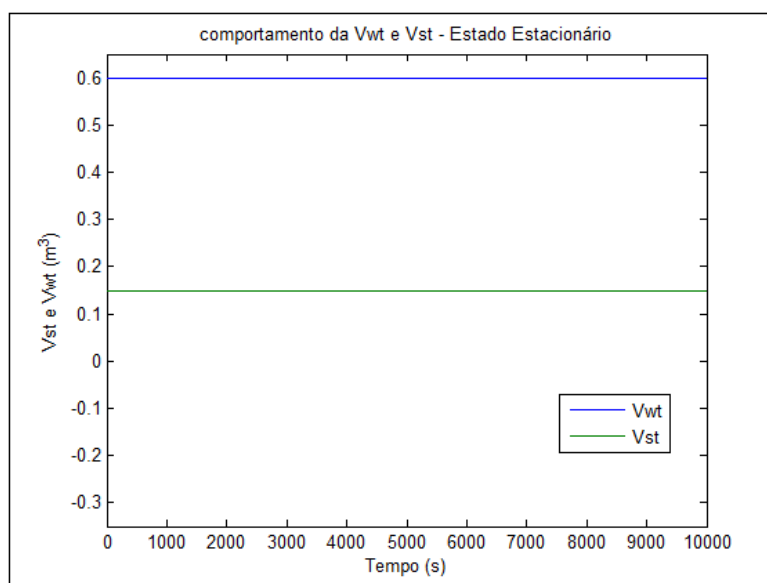
Com tais variáveis, pôde-se então calcular o título do vapor,  $\alpha$ , através da equação 14:

$$\alpha = \frac{M_{st}}{(M_{st} + M_{wt})} \quad (14)$$

Sendo assim, utilizou-se o modelo para cálculo das variáveis de estado e parâmetros de interesse, isto é, volume total de água, volume total de vapor, densidades para as fases e título do vapor.

A seguir são mostrados alguns resultados das simulações para o cálculo dos volumes e título da caldeira e vapor respectivamente.

Na Figura 32 é mostrada a situação em que foi simulada a caldeira em estado estacionário, onde a variável  $V_{wt}$  (linha azul) representa o volume total de água, enquanto que a variável  $V_{st}$  (linha verde) representa o volume total de vapor.



**Figura 32. Simulação do nível da caldeira em estado estacionário**

Realizando simulações com a inserção de um degrau em algumas variáveis de entrada, foi possível estudar a variação do nível de forma dinâmica. A Figura 33 mostra a variação dos níveis de água da caldeira, quando se anula a vazão de alimentação de água da caldeira no tempo de 700 s, ou seja,  $m_w = 0$ :

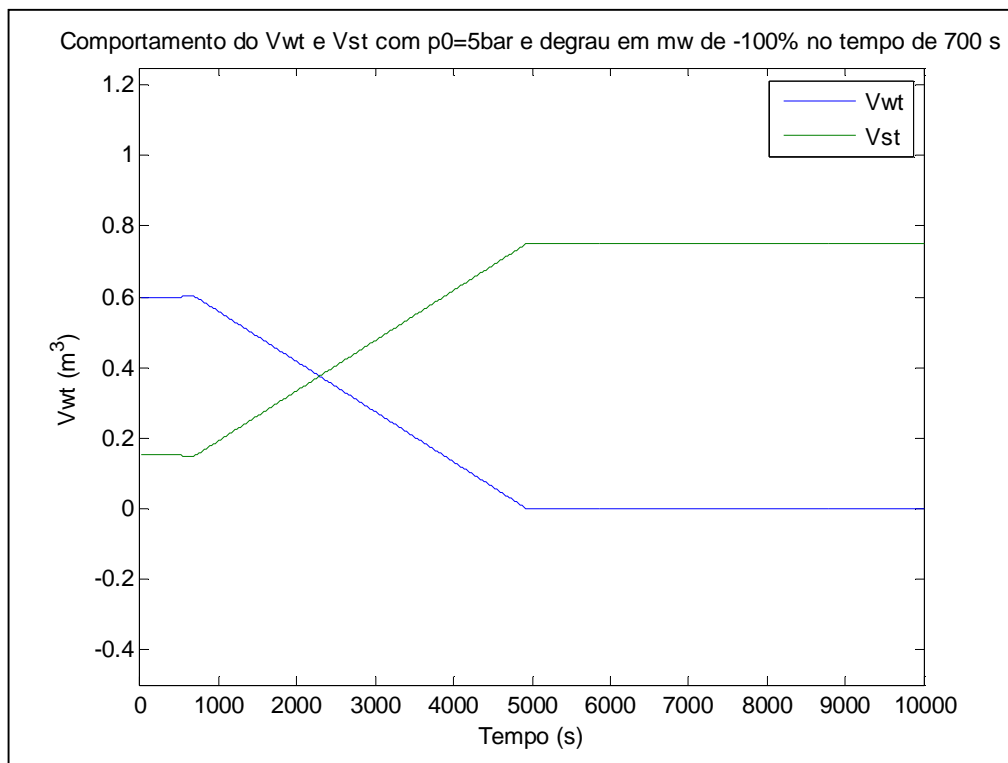


Figura 33. Variação de  $V_{wt}$  e  $V_{st}$  após degrau de -100% em  $m_w$

Vale ressaltar que a simulação verifica o nível total da caldeira e limita os volumes das fases entre zero e o volume total. Evitam-se assim valores negativos para volume.

Sobre o título do vapor obtido, foram realizadas simulações da mesma forma que se analisou o nível da caldeira. Assim, para o degrau realizado em  $m_w$ , cujos efeitos nos níveis são vistos na figura anterior, o efeito obtido no título do vapor pode ser visto na Figura 34.

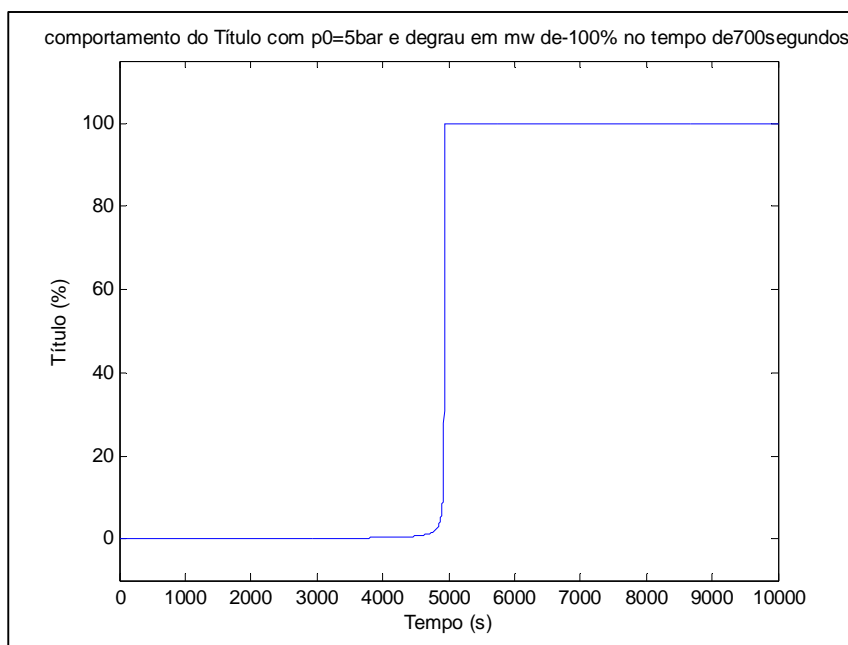


Figura 34. Comportamento do Título do Vapor após degrau em  $m_w$  de -100%

Um tratamento semelhante ao realizado para a limitação do volume foi realizado para o título, limitando à faixa de zero a cem por cento.

#### 4.5.3 Cálculo da pressão da caldeira

Fazendo uso das equações expostas no sumário do modelo e associando com as aproximações calculadas por PALMA (2006) em (6) e (7), foi possível resolver a equação diferencial para a pressão e com isso determinar a dinâmica da pressão da caldeira em função das variáveis de entrada.

De forma análoga ao realizado para o volume das fases, foi simulado o comportamento da pressão no estado estacionário, representado pela Figura 35.

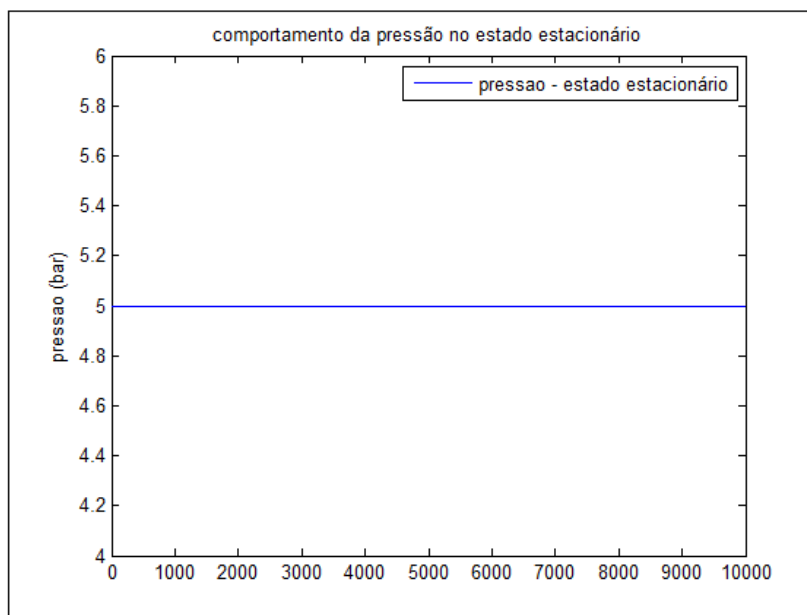


Figura 35. Simulação da pressão da caldeira em estado estacionário

Analogamente às simulações previamente realizadas, foi verificado o efeito do degrau em  $m_w$  sobre a pressão da caldeira. Desta forma, a Figura 36 ilustra o resultado da dinâmica da caldeira em termos de pressão de vapor da mesma.

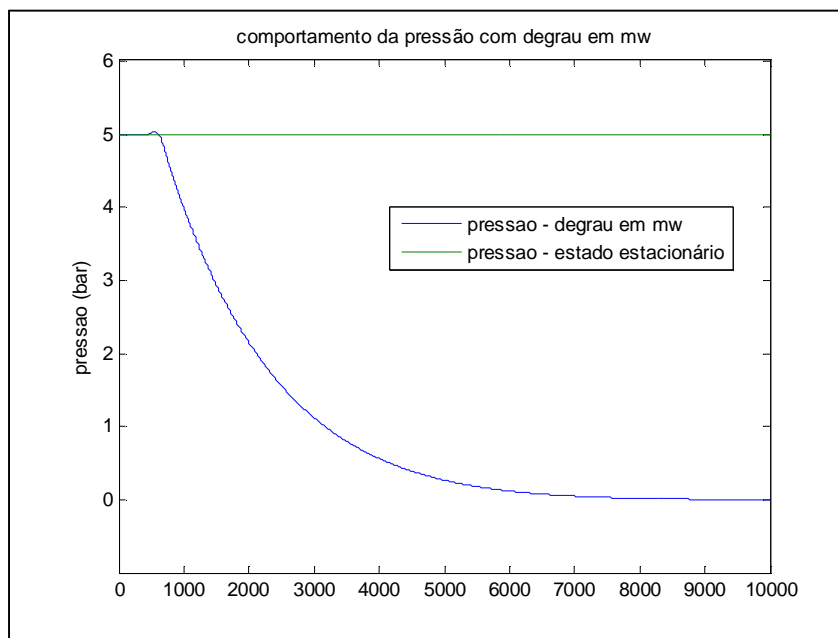


Figura 36. Simulação da pressão da caldeira após degrau em  $m_w$

Foi simulada também a variação da pressão da caldeira quando ocorrido um degrau positivo de 25% na vazão de vapor. O resultado desta simulação é exibido na Figura 37.

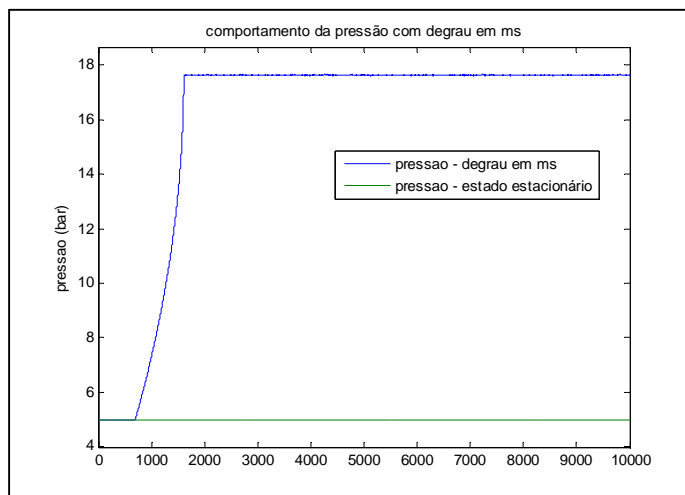


Figura 37. Simulação da dinâmica da pressão da Caldeira com degrau de 25% em  $m_s$

Simulou-se também a variação da pressão em função a energia dada ao sistema, na forma de calor, conforme apresentado na Figura 38.

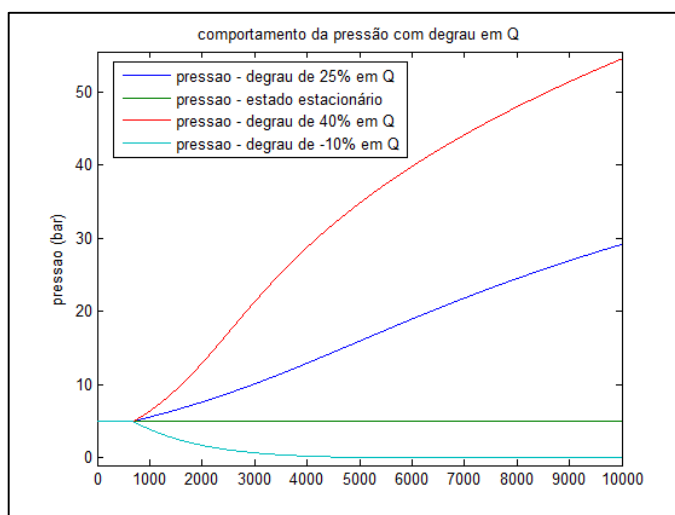


Figura 38. Simulação da dinâmica da pressão da caldeira com diferentes degraus em Q

#### 4.5.4 Cálculo da temperatura do vapor gerado

Usando a equação para a temperatura de saturação aproximada em (6), calculou-se a temperatura do vapor gerado, em função da pressão para variações no calor fornecido. Os degraus simulados são os mesmos apresentados na simulação da Figura 38. A Figura 39 mostra o resultado desta simulação.



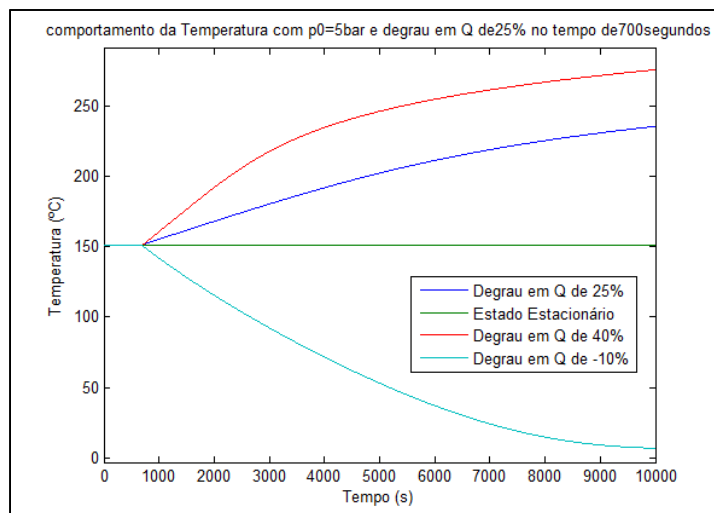


Figura 39. Simulação da dinâmica da temperatura do vapor com diferentes degraus em Q

## CAPÍTULO 5

### 5 MODELAGEM E INTEGRAÇÃO TRIDIMENSIONAL

#### 5.1 Modelo 3D da Planta de Geração de Vapor estudada

##### 5.1.1 Levantamento dos dados necessários para modelagem

Os principais dados coletados da unidade de estudo para criação do modelo 3D foram dados dimensionais de tanques (Tabela (1)) e das bombas; comprimento e altura da caldeira; dados dimensionais civis e estruturais do local.

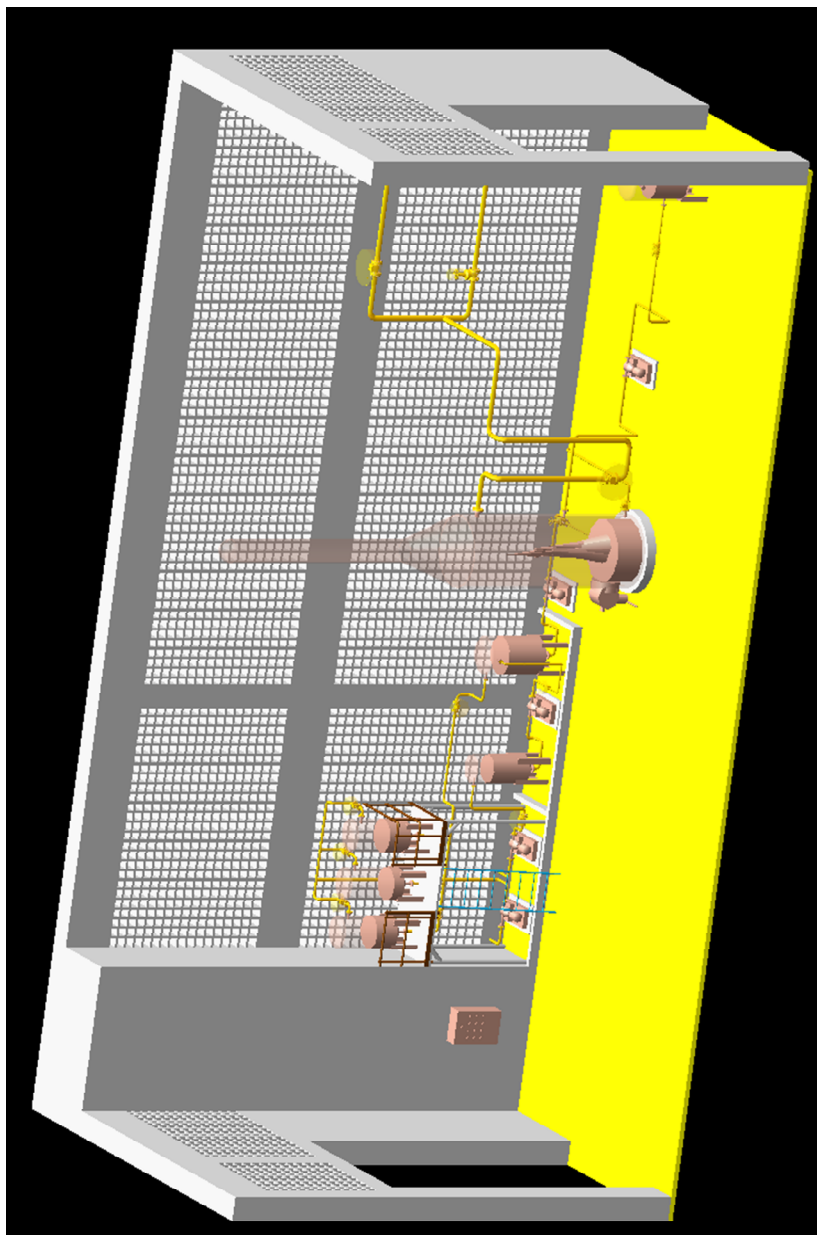
##### 5.1.2 Criação do modelo 3D

Para o modelo 3D, foram considerados os seguintes itens:

- Equipamentos;
- Estruturas, escadas de acesso e plataformas;
- Equipamentos de segurança;
- Piso.

Em relação à área externa à unidade estudada, a mesma não foi considerada e portanto, não será modelada. Sobre o nível de detalhes dos equipamentos, buscou-se modelar seus contornos básicos, não realizando a modelagem dos instrumentos associados e sim, mostrar os dados de processos pelos quais tais instrumentos são responsáveis. Tal procedimento foi realizado para o caso de temperatura, pressão e nível.

Usando o software PDMS, construiu-se o modelo 3D da central de utilidades estudada, obtendo o resultado demonstrado na Figura 40.



**Figura 40. Modelo 3D da Central de Utilidades estudada - visão geral**

Na Figura 40, podem-se verificar as estruturas civis da central, os equipamentos citados na Tabela (1), tubulações do sistema e as saídas da planta.

Por sua vez, na Figura 41 é possível ver o operador (em amarelo) e os extintores de incêndio (circulados em preto) nas extremidades esquerda e direita da planta, próximos às saídas da central de utilidades.

Com o modelo que representa a planta estudada, mostrar-se-á agora a etapa em que variáveis calculadas por simulações, em Matlab, são integradas ao modelo 3D.

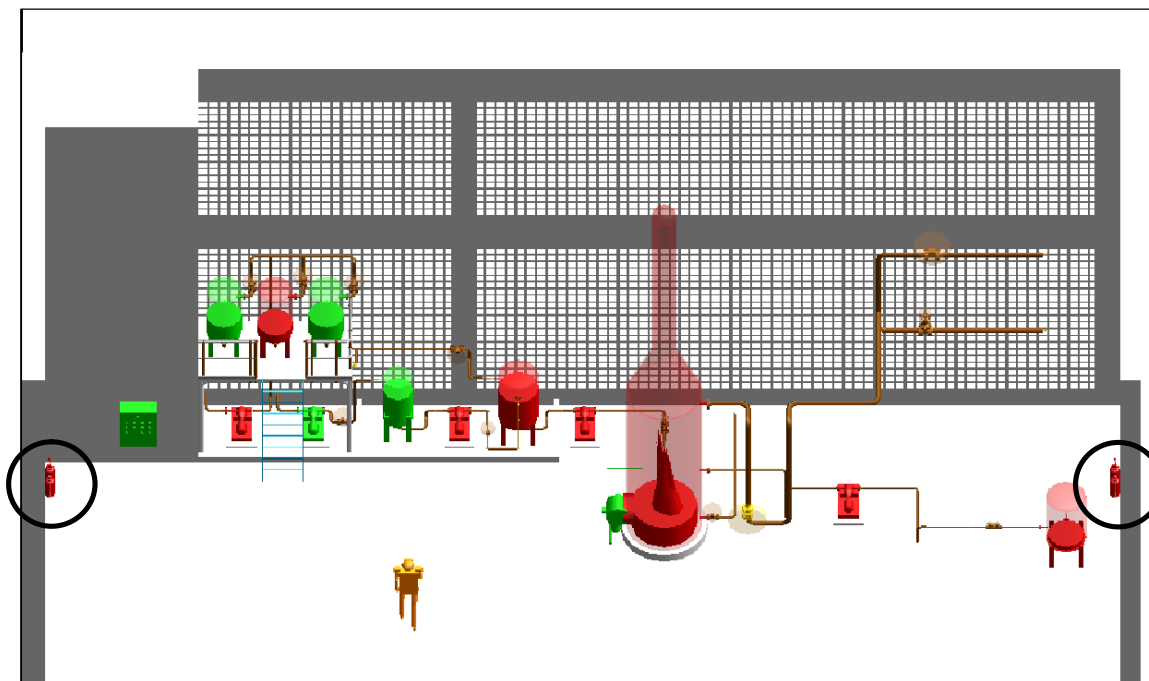


Figura 41. Modelo 3D da planta estudada com operador e equipamentos de segurança

## 5.2 Integração entre simulação e modelo 3D

Usando o modelo citado no Capítulo 3 e o programa desenvolvido cujos resultados foram ilustrados no Capítulo 4, foi programado para que a cada simulação fosse gerado um arquivo contendo os resultados da simulação, de forma que somente os resultados finais da simulação fossem exportados. Isto significa que os dados dinâmicos simulados foram descartados para este estudo, dando a ideia de simulações estáticas, compostas por diferentes estados.

De posse de tal arquivo, gerado pelo Matlab, foi programado em PML 1, PML 2 e PML.NET uma rotina que coletaria os dados existentes no arquivo e os importasse no modelo tridimensional para cada equipamento, e tal forma que pressão, temperatura e nível fossem importados ao modelo oriundos da simulação realizada.

A programação de integração realizada analisa sempre que uma simulação for executada e quando ocorrer ela importará automaticamente os dados gerados por ela.

A Figura 42 mostra um exemplo de conteúdo de um arquivo gerado pela simulação em Matlab e importado ao modelo 3D.

1	>>:NIVEL	>>		
2	/LADEQ-CALDEIRA		: :NIVEL	:0.00000
3	/TQ-BIODIESEL-A		: :NIVEL	:40.00000
4	/TQ-BIODIESEL-B		: :NIVEL	:20.00000
5	/TQ-BIODIESEL-C		: :NIVEL	:40.00000
6	/FIT-1024		: :NIVEL	:0.00000
7	/FIT-1031		: :NIVEL	:0.00000
8	>>:TEMPERATURA>>			
9	/LADEQ-CALDEIRA		: :TEMPERATURA;	211.97863
10	/TQ-BIODIESEL-A		: :TEMPERATURA;	40.00000
11	/TQ-BIODIESEL-B		: :TEMPERATURA;	32.00000
12	>>:PRESSAO	>>		
13	/LADEQ-CALDEIRA		: :PRESSAO	:19.15508
14	/BB-1011		: :PRESSAO	:1.00000
15	/BB-1012		: :PRESSAO	:4.00000
16	>>:VAZAO	>>		
17	/FIT-1024		: :VAZAO	:0.03250
18	/FIT-1031		: :VAZAO	:0.13000

Figura 42. Conteúdo de Arquivo de importação entre sistemas

Para que houvesse a integração dos dados, os elementos do modelo 3D possuem atributos de ligação entre os sistemas (Matlab e PDMS). Tais atributos seguem após o nome de cada equipamento e antes do valor de cada variável, tendo como separador o ponto-e-vírgula. Assim, cada um dos elementos do modelo possuem os atributos: “:NIVEL”, “:TEMPERATURA” e “:VAZAO”, os quais serão importados quando o equipamento envolvido possuir logicamente tal informação. Um caso prático do explicado na última frase seria a não importação do atributo “:NIVEL” para um indicador de vazão, por exemplo.

Para se ter a possibilidade de ligar ou não o sistema de integração, foi criada uma janela de interface com o usuário, onde tal interface permite a ativação da integração ou não e o intervalo com que os dados serão importados, caso existam novas simulações. Tal janela está ilustrada na Figura 43.

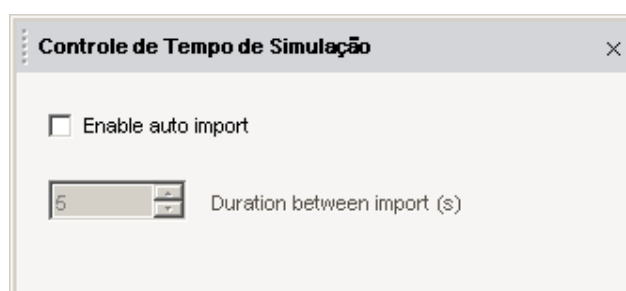


Figura 43. Janela de interface de Controle de tempo de integração

Nesta janela verifica-se pela caixa de marcação “*Enable auto import*” a possibilidade de se ligar ou não o sistema de integração e abaixo desta, a escolha do tempo entre as integrações em segundos.

Foi criado também um sistema de armazenamento de histórico de importações enquanto o sistema de integração estiver ligado. Assim, pode-se verificar o tempo em que as integrações ocorreram ou não. Na Figura 44 são listadas algumas mensagens resultantes das integrações realizadas:



**Figura 44. Mensagens geradas pela integração**

Assim pode-se perceber pela Figura 44, que no momento em que o programa de integração identificou que houve a execução de uma simulação, a integração é realizada, guardando o horário em que as informações foram importadas. Quando não são identificados novos dados, o programa imprime na tela a mensagem “SEM ATUALIZAÇÕES!!” e em seguida o horário em que a mensagem foi impressa.

### 5.3 Interpretação dos dados integrados pelo sistema tridimensional

#### 5.3.1 Considerações sobre a interpretação e visualização dos dados

Foi desenvolvida uma rotina que é executada todas as vezes que há uma integração entre os sistemas que interpretam os dados importados, alterando a visualização do modelo 3D em função dos dados importados pela simulação em Matlab e os mostrando para o operador da ferramenta, de forma que o mesmo tenha acesso a tais dados de forma direta.

Assim, tal rotina tem um papel de sistema supervisorio estático, uma vez que ela atualiza o modelo virtual a cada vez que novos dados são gerados pelas simulações e por outro lado, dados estes que representam estados finais após um intervalo de tempo.

#### 5.3.2 Vantagens do uso de um sistema supervisorio tridimensional

A possibilidade de se verificar dados simulados de equipamentos em um ambiente virtualizado, com o advento da interpretação de tais dados como a indicação de alarmes, equipamentos fora de operação ou em manutenção, permite ao usuário da ferramenta um entendimento e um nível de imersão muito mais avançado do que em uma ferramenta que realize uma representação bidimensional. Considerando a grande quantidade de elementos existentes em uma planta, equívocos podem ocorrer quando visualizado algum problema na tela de um sistema supervisório convencional (bidimensional) e há a necessidade de atuação manual no elemento físico. Isto se deve pela representação da tela do supervisório ser um modelo simplificado do processo e não necessariamente a forma com que o processo está construído no campo.

Assim a falta de dados de posicionamento dos elementos (equipamentos, instrumentos etc.) é causa de dúvidas quando a necessidade de atuação presencial na planta, principalmente no caso de operadores com pouco tempo de experiência.

Desta forma a ferramenta proposta, informa os dados dos equipamentos, simulando a transmissão de dados oriundos de instrumentos, porém, com a vantagem principal de se verificar o elemento a ser atuado de uma forma muito mais aproximada da realidade. Outras vantagens são a visualização prévia de acessos ao local antes da ida efetiva para que se obtenha o máximo rendimento da atuação em menor tempo.

### 5.3.3 Gerenciamento de Equipamentos e visualização interpretada dos dados integrados

A ferramenta criada para interpretação dos dados importados da simulação possui uma interface gráfica com o usuário que o auxilia a ter uma maior compreensão dos principais equipamentos da unidade, suas condições operacionais atuais e seus limites operacionais. A janela que representa tal ferramenta é apresentada na Figura 45.

**Gerenciamento de Equipamentos**

Efeitos Gráficos

Mostrar dados   Remover dados   Limites Operacionais   Recarregar Limites

Lista de Equipamentos

TAG		TEMPERATURA	PRESSÃO	NÍVEL
BB-1011	✖	60	1	70
BB-1012	✔	31	4	0
BB-1013	✖	44	2	0
BB-1015	✖	57	3	0
BB-1021	✖	40	1	0
TQ-DIESEL	✔	35	1	70
TQ-ALIMENTACAO-AGUA-CALDEIRA	✖	25	2	10
TQ-MISTURA-DIESEL-BIODIESEL	✖	30	5	70
TQ-BIODIESEL-A	🔧	40	3	40
TQ-BIODIESEL-B	✖	32	2	20
TQ-BIODIESEL-C	🚫	50	4	40
LADEQ-CALDEIRA	✖	211.98	19.16	0
LADEQ-SOPRADOR	✔	21	5	0

Legenda de Ícones

✔ Equipamento em funcionamento normal	🔧 Equipamento em Manutenção
✖ Equipamento alarmado	⚠ Alarme para valores altos
🚫 Equipamento fora de Operação	⬇ Alarme para valores baixos

Escolha a ação

Atualizar informações   Sair

**Figura 45. Janela de Gerenciamento de Equipamentos com dados integrados**

A interface tem algumas divisões que serão explicadas a seguir:

- **Efeitos gráficos:** neste setor da ferramenta, é possível visualizar os dados importados pela integração, através do botão “Mostrar dados”, diretamente no modelo 3D, simulando diretamente um sistema supervisorio tridimensional. A Figura 46



demonstra uma parcela da unidade contendo os dados de processo importados pela integração.

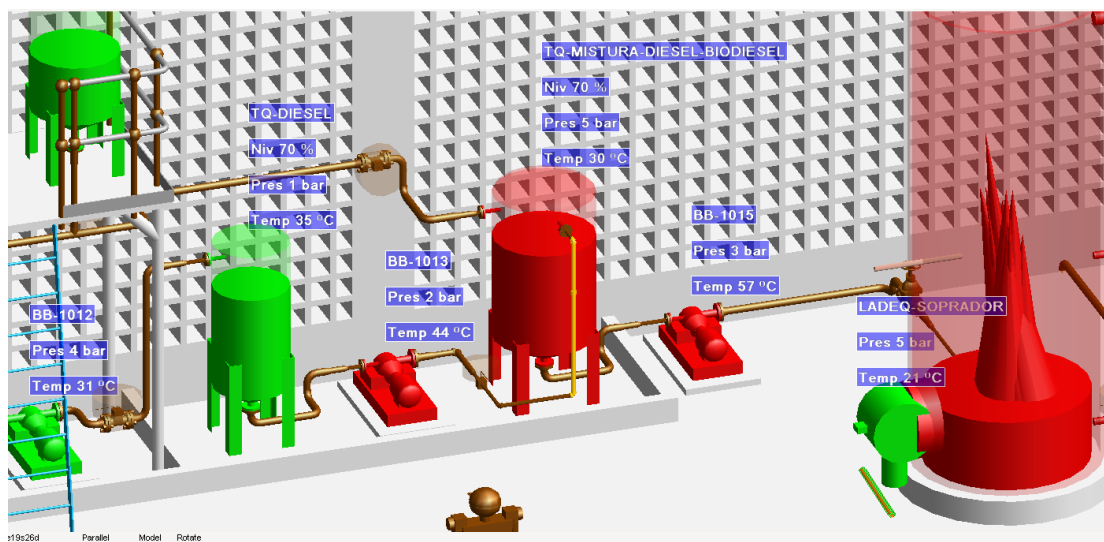


Figura 46. Dados de processo importados visualizados no modelo 3D

Ao lado deste botão tem a interface “Remover dados” que possui a função inversa de “Mostrar dados”, isto é, retirar os dados de processo, para que a informação visual mostrada não seja tão densa e facilite para o operador a visualização da região e dos equipamentos em si. A Figura 47 é semelhante à Figura 46, porém, sem possuir os dados de processos no modelo 3D.

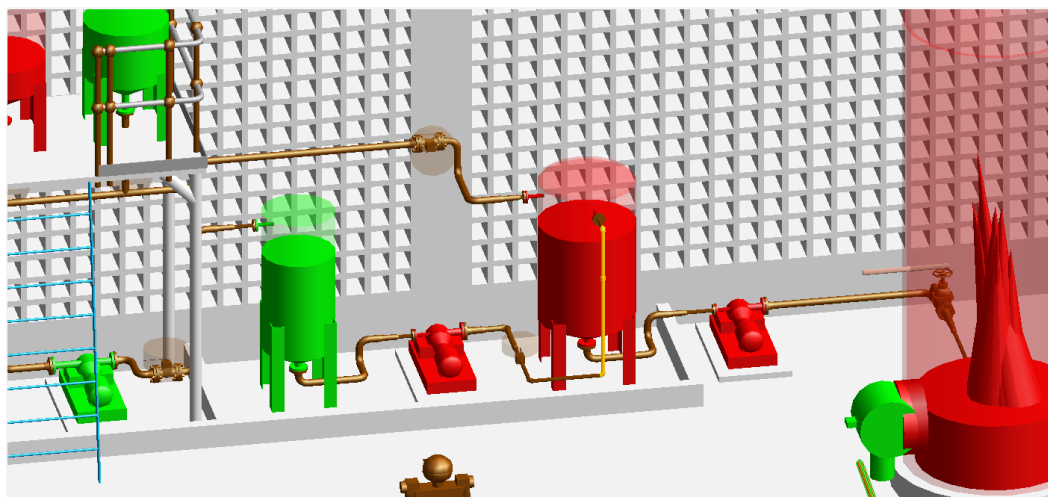


Figura 47. Área virtual sem visualização dos dados de processo

O próximo botão desenvolvido permite visualizar os limites operacionais de cada equipamento, para que se possa definir se o dado importado está dentro do limite operacional ou não, informando para a ferramenta se cada equipamento cujo dado foi

importado encontra-se em estado de alarme em alguma das variáveis estudadas. Ao clicar o botão “Limites Operacionais” a janela da Figura 48 é visualizada.

The screenshot shows a window titled "Dados de Equipamentos" with a sub-header "Lista de Equipamentos". It contains a table with columns for TAG, TEMPERATURA (INF, SUP), PRESSÃO (INF, SUP), and NÍVEL (INF, SUP). The table lists 14 pieces of equipment with their respective operational limits. At the bottom, there is a section "Escolha a ação" with a "Sair" button.

TAG	TEMPERATURA		PRESSÃO		NÍVEL	
	INF	SUP	INF	SUP	INF	SUP
BB-1011	15	55	4	8	0	100
BB-1012	15	55	4	8	0	100
BB-1013	20	55	4	8	0	100
BB-1015	20	55	4	8	0	100
BB-1021	20	55	4	8	0	100
TQ-DIESEL	15	70	0	4	30	80
TQ-ALIMENTACAO-AGUA-CALDEIRA	10	60	0	2	30	80
TQ-MISTURA-DIESEL-BIODIESEL	15	70	0	4	30	80
TQ-BIODIESEL-A	15	70	0	4	30	80
TQ-BIODIESEL-B	15	70	0	4	30	80
TQ-BIODIESEL-C	15	70	0	4	30	80
LADEQ-CALDEIRA	150	650	2	6.5	30	80
LADEQ-SOPRADOR	15	65	4	8	0	100

Escolha a ação  
Sair

Figura 48. Lista de equipamentos e seus limites operacionais

Nesta janela, é possível informar para cada equipamento os limites inferior e superior para as variáveis: temperatura, pressão e nível.

O último botão age de forma a atualizar graficamente a interface gráfica e o modelo 3D com os limites operacionais, caso os mesmos sejam modificados.

- **Lista de Equipamentos**: nesta área da janela é possível visualizar a lista de equipamentos da unidade estudada, informando imediatamente ao lado direito do equipamento a condição atual do mesmo, isto é, se o mesmo está operacional em normalidade, operacional em alarme, parado em espera ou em manutenção. De acordo com a situação do equipamento o símbolo apropriado é exibido na interface de forma automática.

Ao lado direito destes símbolos são mostrados os dados de processo importados pela integração com a simulação realizada. E no momento em que tal variável é exibida ela é comparada com os limites operacionais informados pelo usuário de forma a representar ao operador se a variável está alarmada alta (indicada por um

símbolo de H à direita do valor) ou alarmada baixa (indicada por um símbolo de L à direita do valor) ou em normalidade (sem indicação de símbolo específico).

É importante ressaltar que o modelo 3D tem sua representatividade alterada em função da condição em que o equipamento se encontra. Desta forma, o programa modifica as cores dos equipamentos analisados para: verde, caso o equipamento encontre-se em condição normal de operação, vermelho, caso o equipamento encontre-se em condição alarmada, amarelo, caso o equipamento encontre-se parado ou cinza, caso o equipamento encontre-se em manutenção. Uma exemplificação de tal efeito pode ser visualizada nas Figura 41, 46 e Figura 47. A Figura 48 ilustra uma exemplificação de um equipamento fora de operação e outro em manutenção.

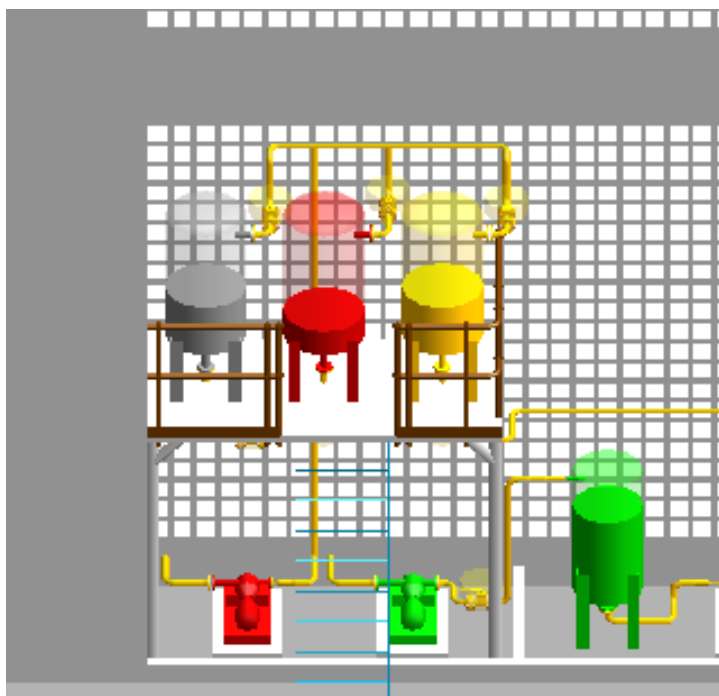


Figura 49. Exemplos de equipamentos em diferentes estados operacionais

- **Legenda de Ícones**: em seguida é ilustrada na janela uma legenda dos símbolos mostrados na janela para auxiliar o operador e minimizar ao máximo uma possível dúvida quanto à condição operacional atual do equipamento.

E por último existe a possibilidade de se executar a rotina de importação dos dados da última simulação de forma manual, clicando no botão “Atualizar Informações”. À direita deste botão, o último o botão da interface, “Sair”, fecha a ferramenta, interrompendo sua execução.

Com a integração e interpretação dos dados de processos criada e implementada, será demonstrado agora o desenvolvimento e funcionalidades da ferramenta desenvolvida para o treinamento do grupo de operadores da planta estudada, objetivo este, um dos propósitos deste trabalho.

## CAPÍTULO 6

### 6 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE TREINAMENTO E ANÁLISE DE SEGURANÇA EM REALIDADE VIRTUAL

#### 6.1 Objetivo da Ferramenta Desenvolvida

A ferramenta criada, utilizando novamente as linguagens PML 1 e PML 2, tem como objetivo principal neste trabalho auxiliar o operador a visualizar e fixar determinados procedimentos operacionais e de segurança.

O procedimento operacional estudado foi a partida da caldeira situada na Central de Utilidades alvo de interesse desse trabalho, contemplando todos os passos significativos e expressivos para a partida do equipamento citado.

Em relação aos parâmetros de segurança, foram analisados dois aspectos quanto à operabilidade segura da planta e integridade física de seus operadores: Análise das rotas de fuga e dos extintores de incêndio disponíveis.

Além de tais funções, foi também objetivado com a ferramenta analisar se um operador encontrar-se-á ergonomicamente confortável na realização de atividades diversas na planta. Pode-se verificar também se acessos e posição de equipamentos, válvulas e instrumentos são de fácil acesso ao operador, antes do mesmo ir ao local. O efeito contrário também é válido, uma vez que se o acesso ao local desejado não for possível por algum motivo, seja por impedimento espacial ou falta de um meio de acesso, pode-se estudar previamente a melhor forma de se contornar tal impedimento através da análise em ambiente virtual.

De posse de tais informações, os próximos itens deste capítulo demonstrarão as funcionalidades citadas previamente, buscando uma visualização completa da ferramenta desenvolvida.

#### 6.2 Interface Gráfica da Ferramenta Desenvolvida

Assim como nos casos anteriores ilustrados, para esta ferramenta, também foi desenvolvida uma interface gráfica que possibilita a interação do operador virtual com o modelo 3D e o usuário em treinamento ou avaliação. A Figura 50 ilustra a janela desenvolvida para este fim.

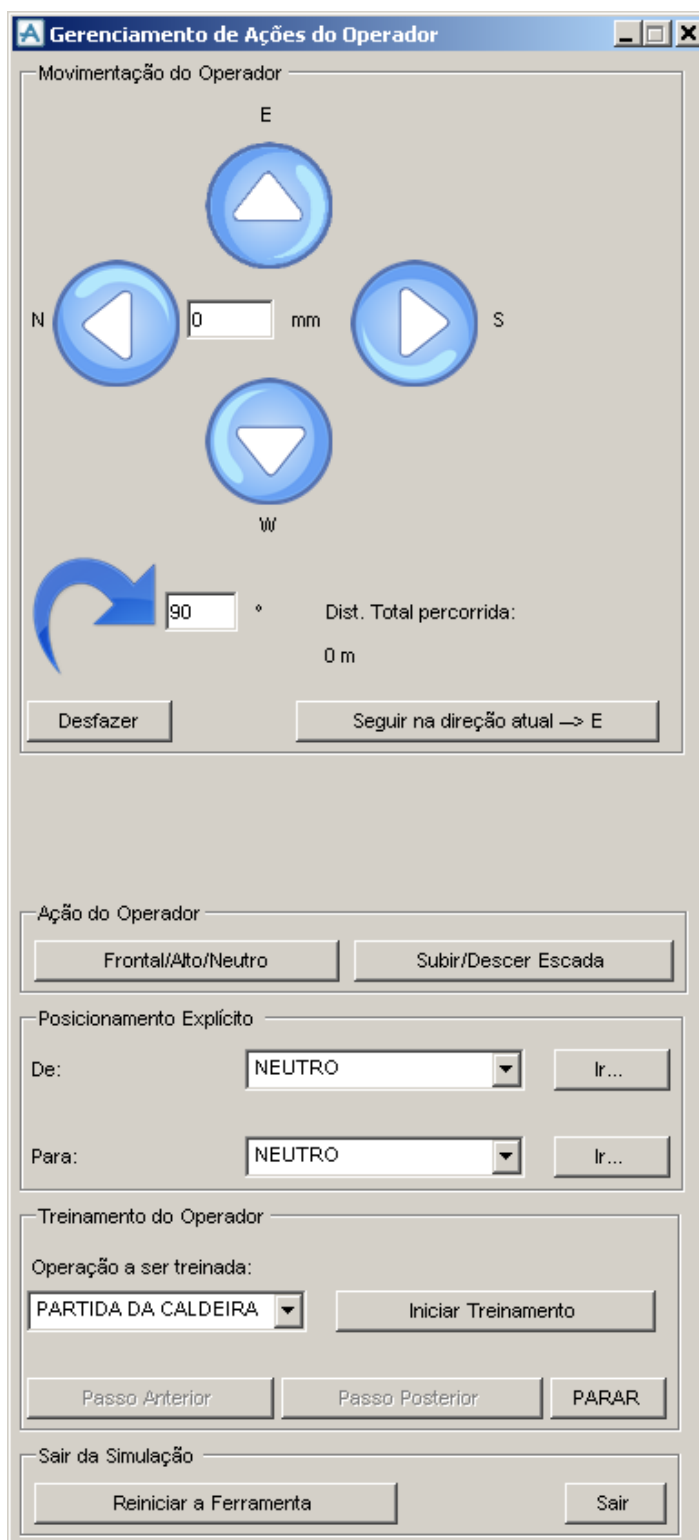


Figura 50. Interface Gráfica para Interação com o Operador Virtual

A seguir, será explicado cada setor da interface ilustrada na Figura 50.

### 6.2.1 Movimentação do Operador

Esta é a parte da interface que permite uma movimentação livre do operador pela planta no plano do piso, seguindo quaisquer direções neste plano. Isto é, não é permitido ao usuário movimentar o operador para cima ou para baixo livremente.

Assim, foram inseridos quatro botões que representam a ação de confirmar a movimentação do operador virtual em uma dada direção. Cada um desses botões representa uma direção cardinal: N – Norte, E – Leste, W – Oeste e S – Sul.

Entre os quatro botões foi inserida uma caixa de texto responsável por informar à ferramenta qual a distância a ser percorrida em milímetros pelo operador virtual na direção escolhida.

A Figura 51 ilustra os botões citados acima juntamente com a caixa de texto.

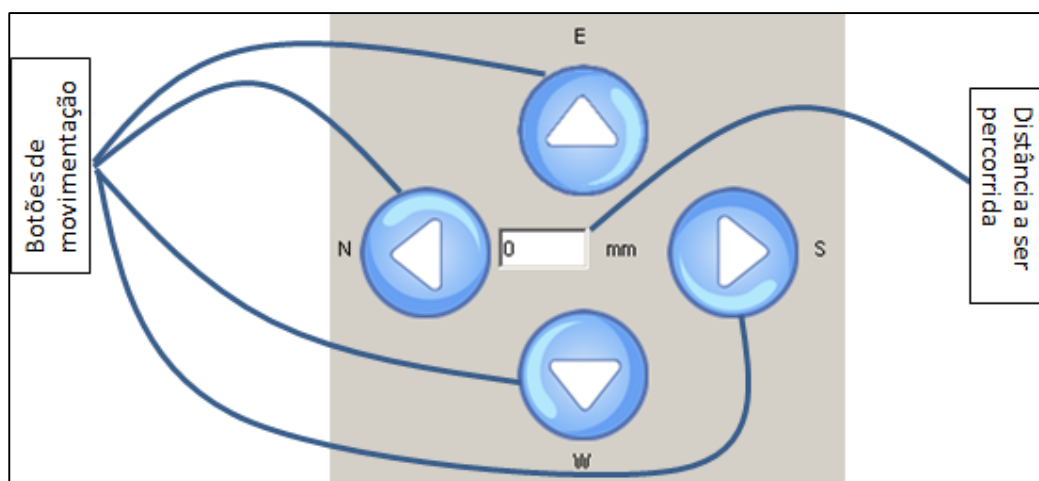


Figura 51. Movimentação básica do operador virtual nas direções cardinais

Vale ressaltar que a movimentação do operador virtual através da ferramenta descrita na Figura 51 ocorre de forma diferente da movimentação realizada durante a etapa de treinamento a ser explicada na subseção 6.2.4, onde explica que, durante o treinamento o sistema encaminha o operador de forma automatizada integralmente.

Abaixo deste conjunto, foram inseridas funcionalidades de apoio e complementação à movimentação do operador. O primeiro conjunto delas é o que permite o operador virtual a rotacionar sobre o seu eixo longitudinal permitindo ao mesmo mudar a direção para qual está focado. Este conjunto é composto por um botão que representa a ação de confirmar a rotação do operador virtual e por uma caixa de texto que indica o ângulo a ser rotacionado.

Ao lado direito deste conjunto é expressa a distância total, em metros, realizada pelo operador durante o uso da ferramenta. Tal função totalizadora é vantajosa para indicar o quanto que um operador percorre entre dois equipamentos, tendo que realizar desvios ou ainda, pode-se realizar um estudo para determinar rotas otimizadas entre duas localidades na planta.

A Figura 52 mostra o botão juntamente com a caixa de texto associada e o totalizador de distância à direita da caixa de texto.

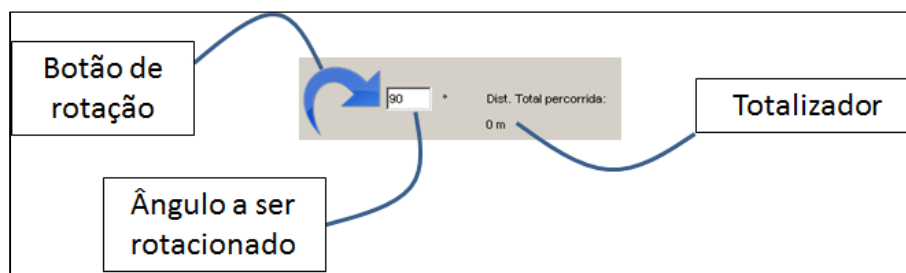


Figura 52. Ferramentas de apoio de movimentação

Abaixo deste conjunto foram posicionados dois botões que da direita para a esquerda, respectivamente, permitem desfazer ações previamente realizadas pelo operador virtual e fazer com que o mesmo caminhe em uma direção qualquer que esteja voltado, uma vez que pelos botões de movimentação nas direções cardeais (Figura 51) não se pode caminhar em direções diferentes das correlacionadas com os quatro botões previamente explicados. Os nomes escritos em cada botão são “Desfazer” e “Seguir na direção atual --> ABC”, onde “ABC” representa a direção em que o operador está apontado, podendo ser qualquer direção cardinal ou combinações de direções cardeais. Um exemplo de combinação de direções seria “E 45 N”, que representa a direção de 45° entre as direções Leste e Norte.

### 6.2.2 Ação do Operador

Para esta parte da ferramenta, foram programados dois botões: O primeiro, de nome “Frontal/Alto/Neutro” faz com que os braços do operador virtual sejam movimentados de forma a tentar alcançar algum elemento que esteja à sua frente (representando a ação “Frontal”) e acima dele (representando a ação “Alto”). Tal efeito e possibilidade permite verificar se um determinado elemento está ao alcance do operador, caso o mesmo, por exemplo, levante os braços, assim, pode-se analisar



posicionamento e acesso de válvulas e a posição exata de isolamento necessária de proteção pessoal em tubulações e equipamentos.

A Figura 53 ilustra um exemplo desta aplicação onde o operador está fazendo uso da ação “Alto”.

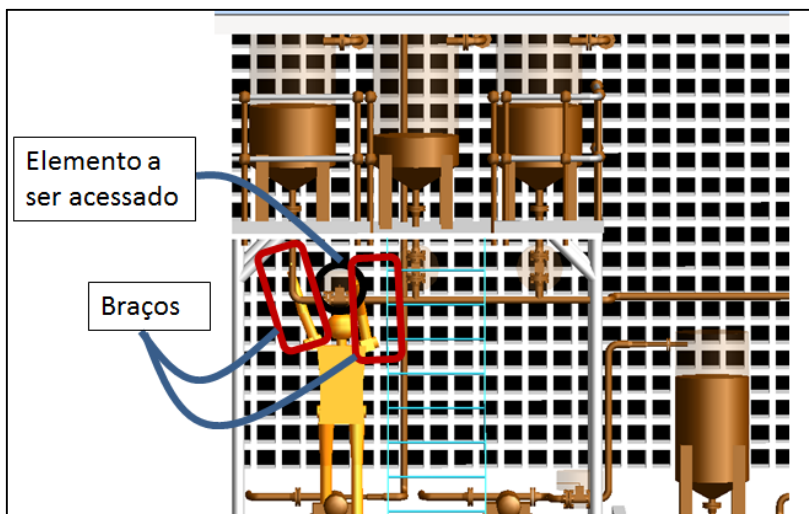


Figura 53. Exemplo de uso da verificação de acesso do operador a elementos que estejam acima dele

O outro botão presente neste setor da interface permite que o operador suba ou desça escadas, caso esteja próximo a ela. Caso o operador virtual não esteja próximo a alguma escada, uma mensagem de erro será exibida, informando que o mesmo não está na coordenada correta para subir uma escada.

### 6.2.3 Posicionamento Explícito

Neste setor da ferramenta, automatizaram-se diferentes percursos entre equipamentos chaves da planta, de forma que o usuário da ferramenta necessite apenas escolher um equipamento de partida e outro de chegada. Assim, o operador fará o caminho entre os dois equipamentos de forma automática, seguindo por um caminho previamente configurado.

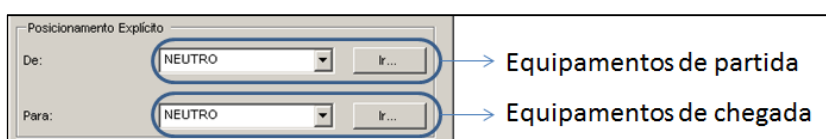
Desta forma, esta parte possui duas listas de equipamentos que farão o papel de equipamento de partida (lista superior) e o equipamento de chegada (lista inferior).

Ao lado de cada lista, existe um botão com o texto “Ir...” cada um destes botões tem funções específicas. O botão superior, que é relativo ao equipamento de partida possui a função de transportar diretamente o operador virtual para o equipamento

escolhido na lista citada. Por outro lado, o botão inferior verifica o equipamento escolhido na lista de equipamentos de origem e o equipamento escolhido na lista de equipamentos de destino e realiza o traçado de forma automática do operador virtual entre as duas extremidades.

Vale ressaltar que a totalização da distância percorrida usando esta ferramenta é mantida, permitindo assim, analisar de forma automatizada distâncias a serem percorridas entre equipamentos chaves da planta.

A Figura 54 contém a parte da janela explicada neste item.



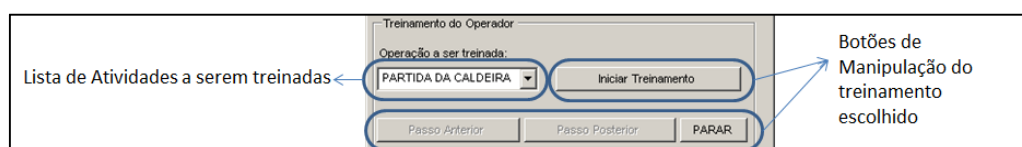
**Figura 54. Ferramenta de posicionamento explícito do operador virtual**

#### 6.2.4 Treinamento do Operador

Nesta parte da ferramenta se escolhe qual atividade será treinada. Para este trabalho, foram configuradas e programadas três rotinas operacionais: Partida da Caldeira, Escolha de Rotas de Fuga e Escolha de Extintores de Incêndio.

Assim, o usuário possui uma lista de rotinas a ser treinada e/ou simulada que fica abaixo do texto “Operação a ser treinada:”. A janela possui um botão que habilita o início do treinamento, chamado “Iniciar Treinamento”. Ao clicar neste botão o botão “Passo Posterior” fica habilitado para se realizar a primeira ação e/ou simulação escolhida. Ao lado esquerdo deste botão existe um botão chamado “Passo Anterior” que quando aplicado realiza o passo anterior realizado no conjunto de etapas da atividade treinada. Finalizando este setor, o botão restante, de nome “Parar”, interrompe o treinamento em evolução, permitindo ao operador o uso das demais funções explicadas anteriormente.

A Figura 55 ilustra o setor da interface responsável pelo treinamento do operador.



**Figura 55. Funcionalidades de treinamento da interface**

A última parte da interface permite que se reinicie a mesma, através do botão “Reiniciar a ferramenta”. Tal botão reinicia um determinado treinamento, independente de qual etapa o mesmo estiver e anula o valor do totalizador de distância percorrida. Ao lado deste botão está posicionado o botão “Sair” que interrompe a execução da ferramenta, fechando a mesma.

### 6.3 Aplicação dos treinamentos e simulações tridimensionais desenvolvidos

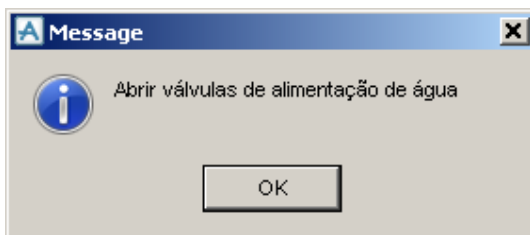
#### 6.3.1 Procedimento de Partida da Caldeira

Em VALDMAN (2010) verificou-se a lista de atividades necessárias para que se houvesse a partida do referido equipamento. Tais procedimentos foram confirmados em visita ao local. Desta forma, a Figura 56 exibe a lista de atividades relacionadas à partida da caldeira analisada.

Ligar a bomba de alimentação de água
Abrir válvulas de alimentação de água
Manipular nível da caldeira para 60%
Fechar a válvula de dreno de água
Fechar a válvula de saída de vapor e automatizar controle de nível
Fechar válvulas de alim. de combustível para o tq de mistura
Ligar bomba de alim. e abrir válvulas de alimentação de combustível
Ligar painéis de instrumentação
Posicionar o inversor de frequência do soprador para 100% (60Hz)
Inserir sonda do analisador de gases
Preparar a mistura de diesel/biodiesel desejada
Acender a chama da caldeira
Aguardar 15 min para inicializar o analisador de gases
Ajustar o inversor de frequência para 30% de excesso de ar
Aguardar até pressão de vapor atingir 4 bar
Regular saída de vapor para 450 kg/h

**Figura 56. Lista de atividades mapeadas para partida da caldeira estudada (Adaptado de VALDAM, 2010).**

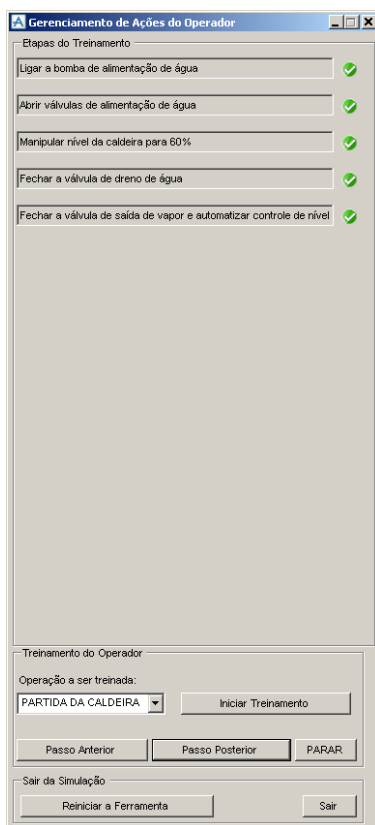
Para aumentar a orientação ao usuário durante a partida da caldeira, antes da inicialização de cada etapa de treinamento, é mostrada ao usuário qual a etapa que o operador irá realizar automaticamente, conforme exemplifica a Figura 57.



**Figura 57. Exemplo de mensagem de inicialização de uma etapa de treinamento.**

Ao iniciar o treinamento da partida caldeira, a janela de interface é modificada de forma que os setores não relacionados ao treinamento ficam invisíveis, dando espaço para a lista de atividades a serem realizadas. Assim, à medida que as etapas são concluídas, o nome da etapa é guardado na janela, como uma indicação para o usuário por quais etapas foram realizadas.

Na Figura 58 é mostrado um exemplo da janela durante a partida da caldeira.

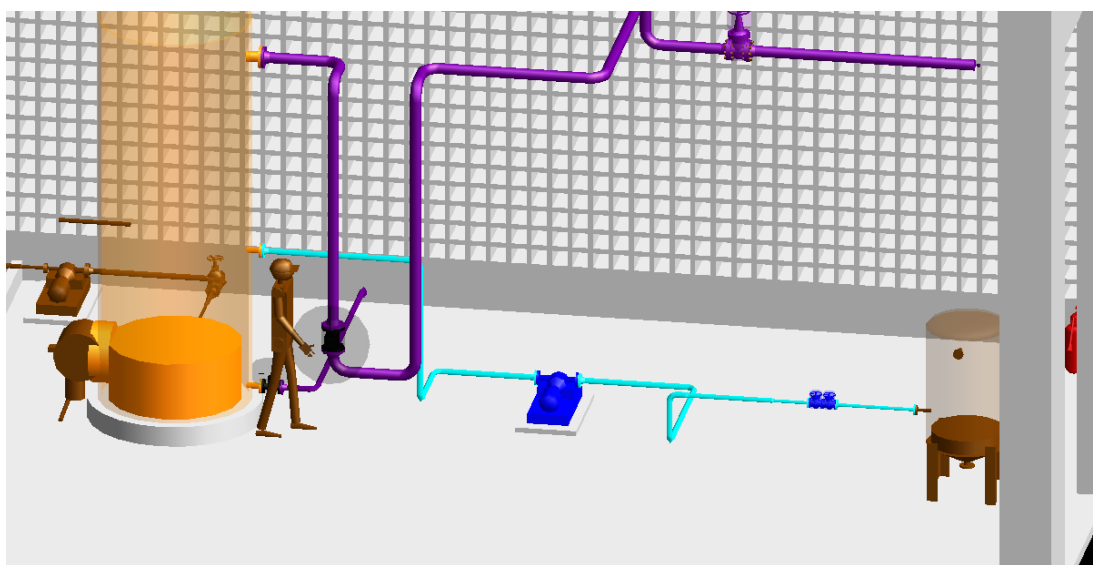


**Figura 58. Exemplo da janela com etapas concluídas listadas.**

A ferramenta foi programada para que, em cada etapa, o operador possa se movimentar automaticamente entre os equipamentos e elementos envolvidos, interagindo com eles e com isso, alterando alguns dados de processo dos equipamentos e elementos envolvidos. Assim a forma visual adotada foi a alteração gráfica dos elementos interagidos, através da atualização de suas cores visualizadas.

Desta forma, a Figura 59 ilustra um exemplo do explicado acima, onde a bomba e as válvulas em azul foram ligadas pelo operador, ativando o fluido, representado por azul claro, a ser transferido do tanque até a caldeira.

Em contrapartida, as tubulações em roxo e as válvulas em preto, indicam o fato de que o fluxo foi interrompido na tubulação, devido ao fechamento das válvulas.



**Figura 59. Exemplo da Aplicação em andamento durante a partida da Caldeira**

Assim, com o objetivo de ilustrar a ferramenta ao final do treinamento, a Figura 60 mostrará uma parte da planta ao final da partida da caldeira, em conjunto da interface preenchida com todas as etapas realizadas listadas.

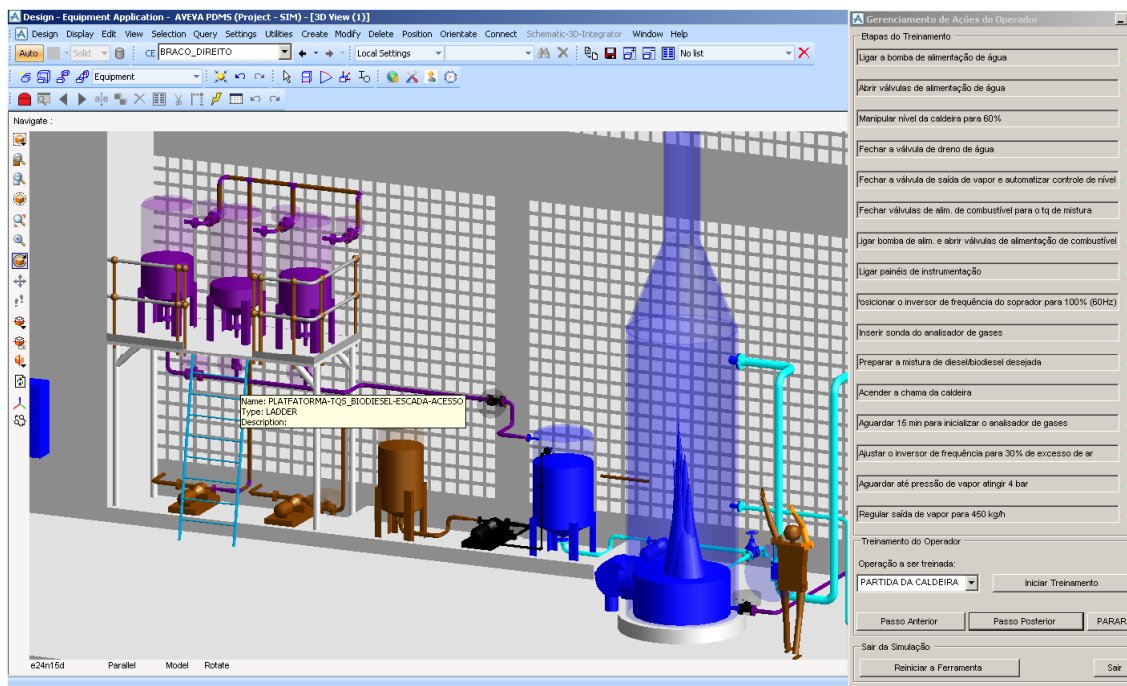


Figura 60. Área analisada após a partida da caldeira

### 6.3.2 Simulação de rotas de fuga da unidade

Foi programada na ferramenta uma análise que consiste em avaliar a posição do operador virtual e verificar a distância entre este e as saídas existentes da planta.

Assim, o programa verifica automaticamente qual é a saída mais próxima e indica ao usuário por onde que a fuga se dará mais rápido.

A forma com que se buscou indicar ao usuário tal informação foi indicar diversas setas na cor verde que são direcionadas para a saída ótima, e posicionadas pela rota que o operador deve realizar durante a fuga.

Na planta analisada, existem duas saídas possíveis. Assim, foram configuradas duas possibilidades de rotas de fugas. Desta forma, as Figuras 61 e 62 demonstram a ferramenta simulando as rotas de fuga para as duas possibilidades reais, contendo o operador virtual circulado em preto:

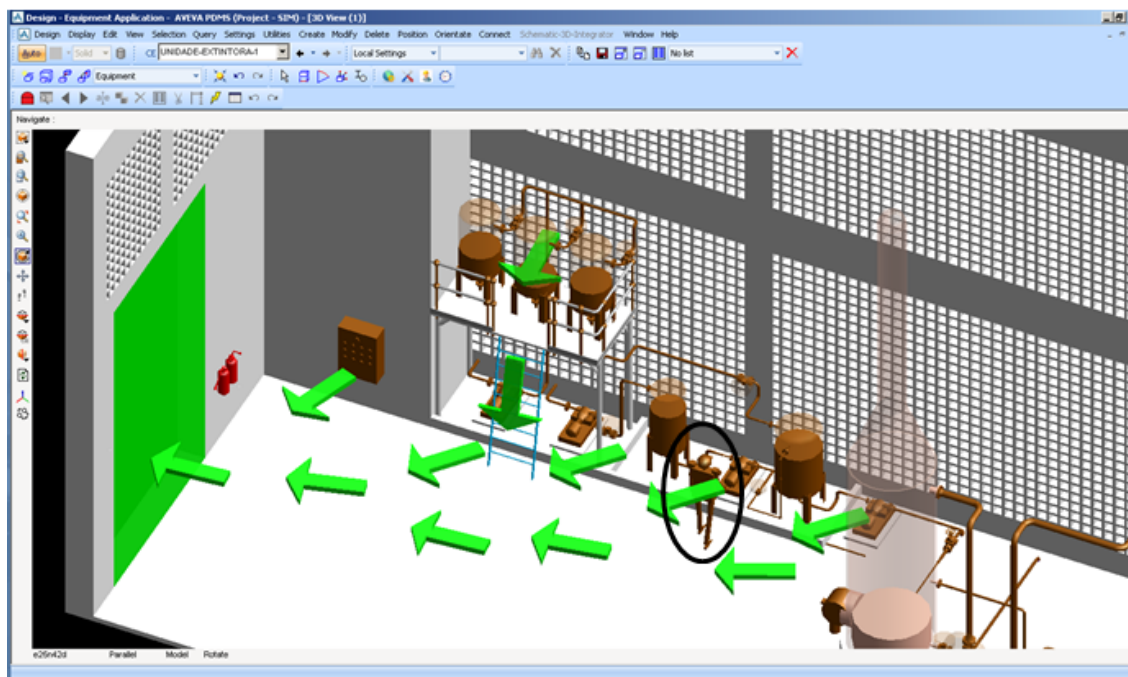


Figura 61. Simulação de rota de fuga pela saída à esquerda da unidade

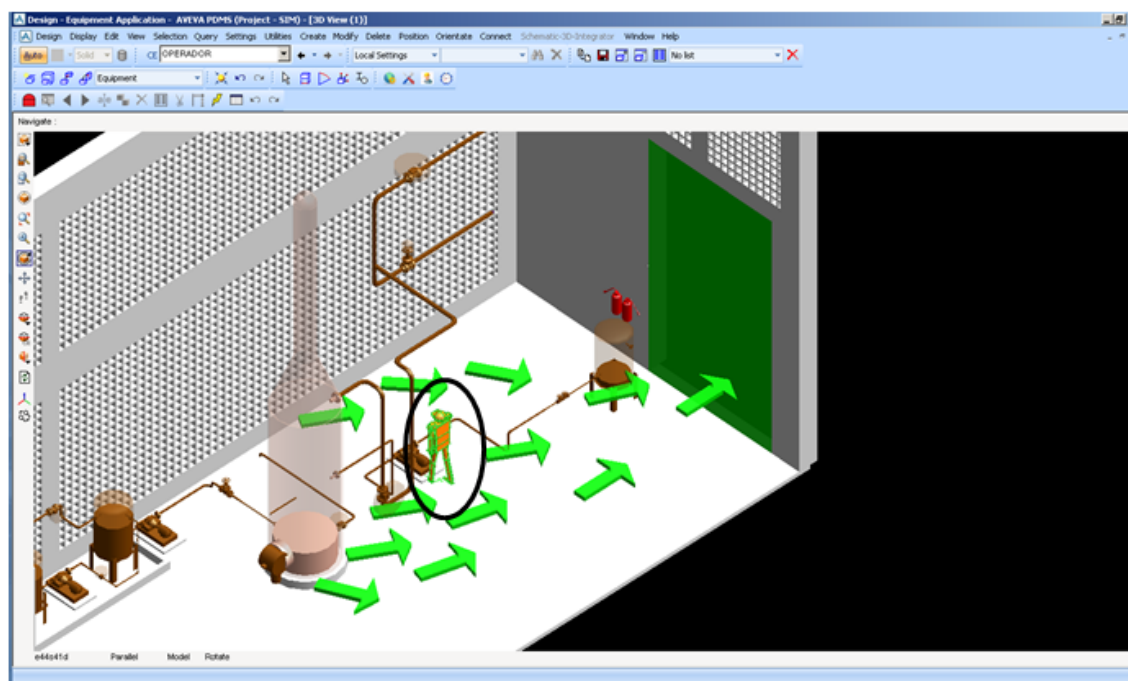


Figura 62. Simulação de rota de fuga pela saída à direita da unidade

### 6.3.3 Simulação de escolha e distância máxima para alcance de extintores

De modo similar com o que foi realizado para a escolha das rotas de fuga, foram identificados na planta as unidades extintoras e com elas, calculadas as distâncias entre

o operador e as respectivas unidades. A que se apresentar mais próxima do mesmo é dito como a mais adequada para ser usada em um momento em que ambas estejam disponíveis.

Em adição a esta análise, foi verificado também o alcance de atuação de cada unidade extintora, isto é, se o extintor escolhido pela ferramenta está dentro da sua área protegida.

Para se verificar o padrão de área protegida por unidades extintoras, foi consultado o Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico (COSCIP), que regulamenta procedimentos para instalação de unidades extintoras.

Desta forma, foi verificado que para cada 10 metros de raio, deve haver um extintor.

Assim, a ferramenta mostra que se o operador encontra-se dentro do raio de 10 metros do extintor escolhido, indicando assim, se a área necessita ou não da instalação de mais unidades extintoras.

Vale ressaltar que a ferramenta desenvolvida usou o padrão citado no COSCIP para efeitos de estudo de caso. Porém não é obrigatória a fixação de uma norma ou padrão, é possível fazer a escolha e adaptar a ferramenta para qualquer norma ou padronização escolhida. Tal atividade de adaptação e escolha de padronização a ser adotada não será escopo deste trabalho.

Fazendo a escolha por simular os extintores de incêndio, a ferramenta ilustrará conforme a Figura 63, o extintor escolhido automaticamente, com base na menor distância entre o extintor e o operador situado na planta.



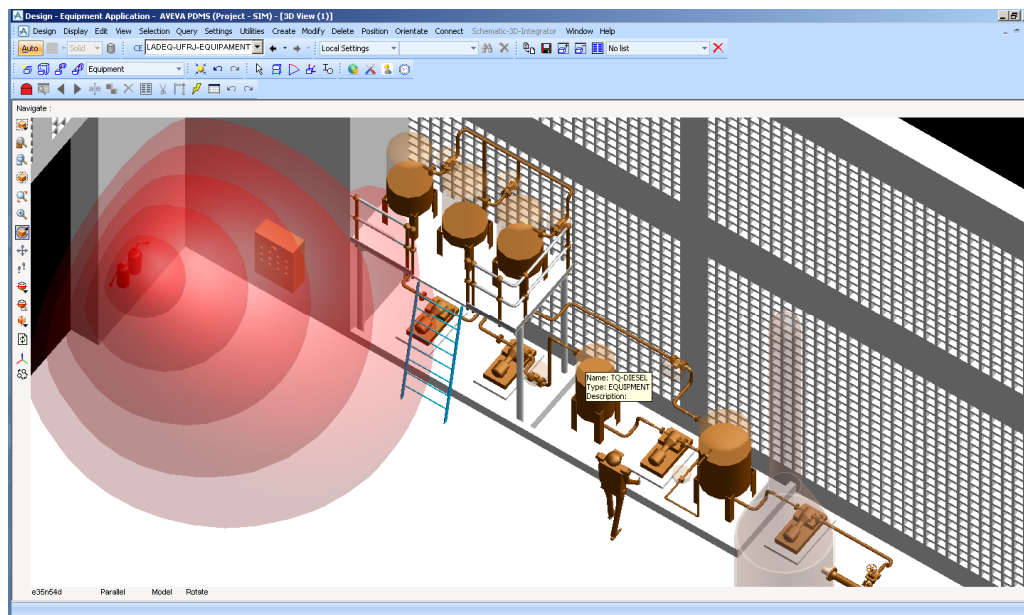


Figura 63. Identificação pela ferramenta da unidade extintora mais próxima do operador

E em adição a ferramenta mostra a seguir, como exibe a Figura 64, onde o operador está circulado de preto, o raio de atuação do extintor escolhido:

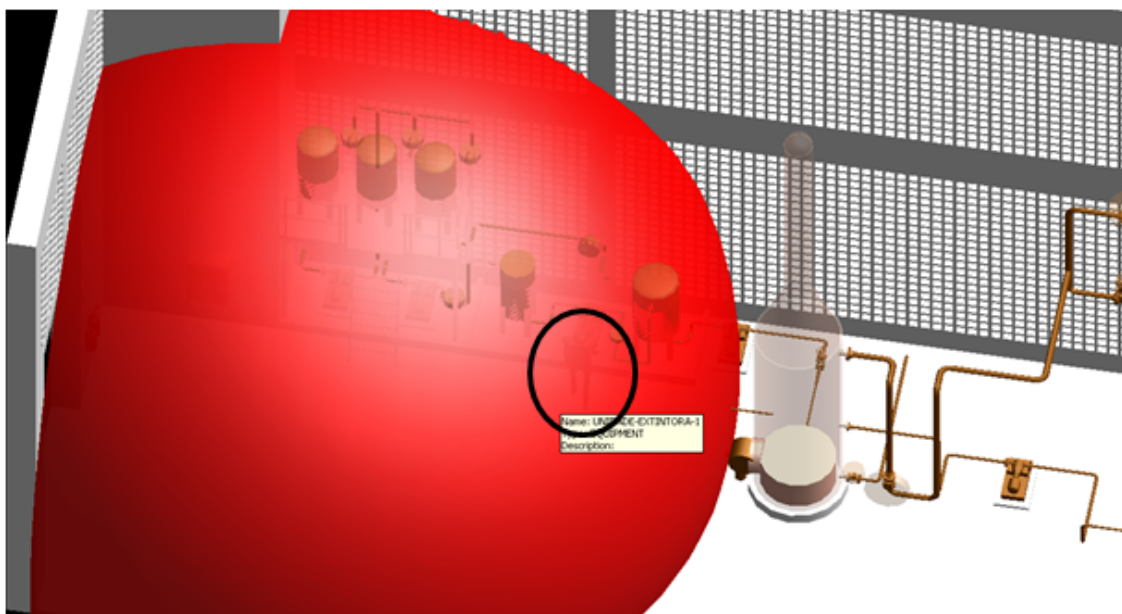


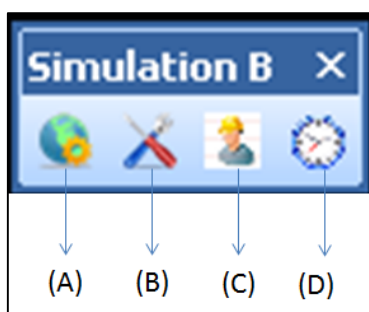
Figura 64. Área de atuação do extintor escolhido mostrado automaticamente

#### 6.3.4 Barra de Ferramentas Customizada para Simulação

Buscando criar uma ponte entre o usuário e as interfaces gráficas mostradas até então, criou-se uma barra de ferramenta que tem como objetivo abrir cada uma das ferramentas descritas neste trabalho. E estas são:

- Interface de Gerenciamento de Equipamentos (A);
- Interface de Manipulação de limites Operacionais (B);
- Interface de Gerenciamento do Operador Virtual (C);
- Interface de Integração entre Simulações em Matlab e Modelo 3D (D);

Assim, a Figura 65 ilustra essa barra de ferramentas, a qual possui quatro botões que fazem a ponte com as quatro ferramentas itemizadas previamente:



**Figura 65. Barra de ferramentas criada para permitir ao usuário acessar as funcionalidades criadas**

## CAPÍTULO 7

### 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 7.1 Conclusões

A ferramenta desenvolvida permitirá que profissionais da área de utilidades possam adquirir conhecimento sobre a central estudada, uma vez que a planta foi representada a partir de sua descrição real, levando em conta restrições físicas e operacionais. Em outras palavras, treinando no sistema desenvolvido, o usuário poderá obter informações sobre a planta sem efetivamente ir à mesma.

Conforme realizado no presente estudo, a simulação deve ser acoplada a um modelo fenomenológico. Em uma situação ideal, o modelo fenomenológico deve ser exaustivamente testado e referenciado, incluindo situações de emergência, para que se produzam resultados confiáveis, fazendo com que o usuário treinado esteja de fato preparado caso se depare com uma situação semelhante na planta real.

Sobre a ferramenta de integração, pela forma que a mesma foi concebida, pode-se concluir que a mesma suporta quaisquer volumes de dados dentro do porte de grandes unidades petroquímicas, já que a integração é realizada via arquivo texto. Além disso, conclui-se que a melhor prática de implementação do sistema é de forma que o processador que irá executar a simulação em Matlab esteja conectado ao processador que irá executar a simulação tridimensional, uma vez que este último, sempre monitorará uma pasta chave a ser definida pelo usuário por novos dados da simulação em Matlab.

Sobre o desenvolvimento de um protótipo de sistema supervisor tridimensional, conclui-se que o mesmo é interessante e totalmente válido para fins de treinamento, porém, mais atividades devem ser desenvolvidas para que ele seja aplicado em um caso real, em uma tentativa de se substituir um sistema supervisor tradicional. Tal comentário se baseia no fato de que os instrumentos comumente utilizados possuem uma capacidade interna de memória muito limitada, que se restringe a conter o software necessário para o funcionamento de tal elemento. Assim, tais instrumentos precisariam de um elemento de suporte para que fosse realizada a ligação entre os dados coletados e transmitidos por eles e o modelo tridimensional, que atualmente,

como citado anteriormente, usa um arquivo texto para fazer a ponte entre os diferentes sistemas. Uma proposta a ser considerada para se usar a ferramenta atual para um sistema real, isto é, usando dados oriundos de instrumentos reais instalados na planta em operação, seria o uso conjunto entre a ferramenta tridimensional acoplada ao sistema supervisório convencional instalado na planta. Assim, as informações já contidas no sistema supervisório convencional poderiam ser acessadas no modelo tridimensional de forma a ser atualizada em tempo real.

Sobre a ferramenta de treinamento e interação do operador virtual com o modelo tridimensional, tendo em vista as vantagens obtidas com o uso de tal ferramenta, conclui-se que o desenvolvimento de um sistema similar para todas as unidades industriais facilitaria o treinamento de novos operadores, facilitaria a determinação de operações e/ou ações de manutenção na planta, estudando a melhor forma de acessar ao local, sem a necessidade de realizar uma análise completa no local da atividade a ser desenvolvida.

Além disso, as análises de segurança podem ser de grande utilidade para a equipe de operação e para o grupo de engenharia de segurança, pois auxilia na determinação da localização ideal das unidades extintoras.

Considerando o desenvolvimento da ferramenta e do modelo, conclui-se que a ferramenta apresentada neste trabalho pode ser totalmente adaptada para qualquer unidade industrial, seja ela *offshore* ou *onshore*. Em diversas situações, o modelo tridimensional já existe, sendo somente necessário definir as ações operacionais a serem implementadas na ferramenta.

Os padrões escolhidos para a representação dos equipamentos (diferenciação de cores) em diferentes condições operacionais permitem concluir que a abordagem utilizada é uma estratégia válida, uma vez que tais efeitos são utilizados, mesmo nos sistemas supervisórios convencionais.

Sobre o estudo de forma geral, pode-se concluir que o uso da realidade virtual, primeiramente para fins de treinamento e complementarmente como uma ferramenta de suporte operacional à operação da unidade, tem muito a contribuir para a operabilidade sadia da planta. A implementação da realidade virtual vem se tornando uma opção cada vez mais viável, tendo em vista o desenvolvimento de sistemas de software e hardware capazes de suportar as ferramentas desenvolvidas de forma que o custo de tais equipamentos não seja elevado como seria no início deste milênio.

Assim, as principais vantagens que a ferramenta pôde adicionar à central de utilidades estudada são listadas abaixo:

- a. Desenvolvimento de um programa que simula um modelo fenomenológico para a caldeira da central de utilidades estudada;
- b. Criação de um modelo tridimensional que retrata a planta estudada;
- c. Criação de uma integração entre a simulação fenomenológica e o sistema tridimensional;
- d. Criação de uma ferramenta de análise dos dados integrados de forma a modificar representativamente o modelo tridimensional em questão;
- e. Criação de uma ferramenta de interação do usuário com um operador virtual;
- f. Desenvolvimento de rotinas de treinamento para a partida da caldeira estudada;
- g. Desenvolvimento de rotinas para determinação da rota de fuga ótima frente à localização do operador virtual;
- h. Desenvolvimento de rotinas para determinação da escolha da unidade extintora ótima frente à localização do operador virtual;

Entretanto, alguns itens, além dos já citados, podem ser desenvolvidos de forma a melhorar e complementar a ferramenta estudada neste trabalho. O próximo item terá o papel de citá-las.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Com os resultados obtidos no Capítulo 6 pela ferramenta desenvolvida, pode-se verificar que tal aplicação pode ser aplicada para plantas de maior porte, onde uma gama extensa de operações pode ser desenvolvida. Porém, diversas possibilidades de melhoria podem ser desenvolvidas de forma a deixar a ferramenta com um nível de

robustez ainda mais elevado e deixa-la cada vez mais com funcionalidades diferenciadas que a tornem mais útil para o grupo que a usar.

A seguir serão listados alguns pontos que poderão ser desenvolvidos, a curto, médio ou longo prazo.

#### 7.2.1 Desenvolvimento de operadores customizáveis

Tal atividade visaria permitir aos usuários da ferramenta criarem verdadeiros avatares próprios dentro da ferramenta, em termos de altura, largura e peso. Isto faria com que o usuário se identificasse ainda mais com o operador virtual, aumentando sua probabilidade de aprendizado à atividade treinada e também seria possível uma análise ergonômica diferenciada para o grupo operacional real e não para um operador com altura padrão.

#### 7.2.2 Desenvolvimento de formas de avaliação da atividade treinada

Esta proposta busca avaliar se o usuário treinado conseguiu absorver as informações passadas de forma satisfatória, fazendo uso de técnicas vistas na subseção 2.4, relacionados aos treinamentos. Ao saber que o treinado será avaliado após o treinamento, faz com que haja uma tendência de se fixar mais nas informações passadas, com o objetivo de se realizar uma boa avaliação e consequentemente absorver as informações passadas.

#### 7.2.3 Implementação da simulação de jatos de extintores

Baseando-se em suas potências, permitia-se-rá a visualização do jato emanado pelo extintor, para verificar a posição ótima em que o operador deva estar para que a chama seja atingida pelo fluido do extintor.

#### 7.2.4 Implementação dos modelos dinâmicos para os demais equipamentos associados à caldeira estudada

Tendo em vista que o equipamento focado neste estudo de caso foi a caldeira, os demais equipamentos não tiveram sua dinâmica estudada bem como suas simulações associadas com a operação da caldeira não foram realizadas.

Assim, buscar-se-á implementar em Matlab as demais rotinas que simularão a dinâmica dos demais equipamentos, aumentando assim a integração entre as ferramentas e o nível de imersão do usuário no modelo, uma vez que além da caldeira, os demais equipamentos possuirão suas variáveis calculadas.

## CAPÍTULO 8

### 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANDERSON, S., *Modeling of a Drum Boiler using MATLAB/SIMULINK*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Youngstown State University, 2008.
- [2] ÅSTRÖM, K. J.; BELL, R.D., *Drum Boiler Dynamics*. Automatica, v.36, n.3, p. 363-378, 2000.
- [3] BABCOCK G. H.; WILCOX S., *Steam: Its Generation and Use*. 36th ed. New York: Merchant Books, 2007.
- [4] BEGA, E. A., *Instrumentação aplicada ao controle de Caldeiras*. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciencia, 2003.
- [5] BIOCCA, F.; LEVY, M. R., *Communication in the Age of Virtual Reality*. Lawrence Erlbaum Associates. Hillsdale, NJ, 1995.
- [6] BLUEMEL, E., HINTZE A., SCHULZ T., SCHUMANN M., STUERING S., *Virtual Environments for the Training of Maintenance and Service Tasks*, In: Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, vol.2. The Fairmont 74New Orleans, New Orleans, LA. 7-10 Dec. 2003. p.p. 2001-2007. Digital Object Identifier 10.1109/WSC.2003.1261664, 2003.
- [7] BRANAN, C., *Rules of thumb for chemical engineers*. 4. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2007.
- [8] BURDEA G.; COIFFET, P., *Virtual Reality Technology*. Second Edition, John Willey & Sons – IEEE, 2003.
- [9] CALAZANS, H. T., *Implementing Software Technologies for the Optimization of Plant Design Projects*. Em Congresso Bicentenário da Argentina. Buenos Aires, 2010.
- [10] CALIXTO, E. S. C. et al., *Plant Design Project Automation Using an Automatic Pipe Routing Routine*. Em 10th International Symposium on Process Systems



Engineering - PSE2009. Salvador, 2009.

- [11] CAMPOS, M.C.M.M.; TEIXEIRA, H. C. G., *Controle Típicos de Equipamentos Industriais*, 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blucher, 2007.
- [12] CASTRO, R.M., *Desenvolvimento de ferramentas de apoio operacional para uma unidade de hidrotratamento*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, UFRJ, 2009.
- [13] CAVALCANTE, A. M. S., *Treinamento como Ferramenta Estratégica para o Crescimento Organizacional*. 2010. Disponível em: <[http://www.novomilenio.br/foco/1/artigo/4\\_Artigo\\_TreinamentoANDRE.pdf](http://www.novomilenio.br/foco/1/artigo/4_Artigo_TreinamentoANDRE.pdf)>. Acesso em: 26 abr. 2012.
- [14] CHD VÁLVULAS, *Artigos Técnicos: Caldeiras Aquatubulares*. Disponível em: <[http://www.chdvalvulas.com.br/artigos\\_tecnicos/caldeiras/aquatubulares.html](http://www.chdvalvulas.com.br/artigos_tecnicos/caldeiras/aquatubulares.html)>, acessado em: 22/03/2012.
- [15] CHD VÁLVULAS, *Artigos Técnicos: Caldeiras Flamotubulares*. Disponível em: <[http://www.chdvalvulas.com.br/artigos\\_tecnicos/caldeiras/flamotubulares.html](http://www.chdvalvulas.com.br/artigos_tecnicos/caldeiras/flamotubulares.html)>, Acessado em: 22/03/2012.
- [16] CHIANG, L. H.; RUSSELL, E. L.; BRAATZ, R. D., *Fault detection and diagnosis in industrial systems*. Cap. 1-4, p. 1-55, Springer, 2001.
- [17] CHIAVENATO, I. *Recursos Humanos*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- [18] CODEÇO, L., *Sistemas de Controle Industrial*. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/43547547/7/Controle-Auto-operado>>. Acessado em: 13/06/2012.
- [19] CORREA, C. R. P.; JUNIOR, M. M. C.. *Análise e classificação dos fatores humanos nos acidentes industriais*. UNICSUL; ITA, São Paulo, v. 17, n. 1, jan./abr. 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/>>. Acesso em: 26 jan. 2012.
- [20] CORSEUIL, E. T. L.; RAPOSO, A. B. et al., *ENVIRON – Visualization of CAD Models in a Virtual Reality Environment*, In: Proceedings of the Eurographics Symposium on Virtual Environment, pp. 79-82, 2004.

- [21] DORF, R. C.; BISHOP, R. H., *Modern control systems*. 11th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.
- [22] DUTRA, C. A. et al., *NR-13: Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão*. Brasília: Secretaria de Inspeção do Trabalho, 2006.
- [23] EVANS, B., *Cockpit automation: The Good, the Bad, and the Ugly*; Avionics Magazine, pg. 34-38, 1998.
- [24] FILGUEIRAS, L. V. L., *APIS: Método para Desenvolvimento de Interfaces Homem-Computador em Sistemas de Segurança visando à Confiabilidade Humana*. In: I Workshop sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais: Compreendendo Usuários, Construindo Interfaces, Maringá. Anais do I Workshop sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais, 1998.
- [25] FOLLY, R. O. M.; VALDMAN, B., *Biosensores: Nova Tecnologia em Desenvolvimento*. Revista Instec Instrumentação E Controle de Processos, v. 9, p. 29-32, 1993.
- [26] HESELTON, K. E., *Boiler Operator's Handbook*. 1. ed. [S.l.]: Fairmont Press, 2004.
- [27] HEUSSER, P. A., *Modeling and simulation of boiling channels with a general front tracking approach*, San Diego: Society for Computer Simulation, Inc., 1996.
- [28] HOUTZ, A. D., *Cascade, Feed Forward and Boiler Level Control*. 2006. Disponível em: < <http://www.controlguru.com/wp/p44.html> >. Acesso em: 04 abr. 2012.
- [29] HOWSTUFFWORKS, *Como Funcionam os Motores a Vapor: Caldeiras*. Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-a-vapor2.htm>>, acessado em: 22/03/2012.
- [30] KASHIWA, K., MITANI, T., TEZURA, T., YOSHIKAWA H., *Development of Machine-Maintenance Training System in Virtual Environment*, In: Proceedings of Fourth IEEE International Workshop on Robot and Human Communication RO-MAN'95, Tokyo, Japan, 1995, pp. 295-300, 1995.
- [31] KWANTNY, H. G. & BERG, J., *Drum level at all loads*, In Preprints IFAC 12<sup>th</sup> world congress, v. 3, pp. 405-408, 1993.

- [32] LASALA, K.P; FILGUEIRAS, L.V.L; GIGLEY, H.; ULLMAN, R., *Designing Systems for Reliable Human Performance*, IEEE Tutorial Video, 1997.
- [33] LEE, K.W.; TILLMAN, F.A.; HIGGINS, J.J., *A Literature Survey of the Human Reliability Component in a Man-Machine System*. IEEE Transactions on Reliability, vol. R-37, no. 1, p.24-34, 1988.
- [34] LI, J. R., KHOO L. P., TOR, S. B., *Desktop Virtual Reality for Maintenance Training: an Object Oriented Prototype System (V-Realism)*, COMPUTERS IN INDUSTRY 52 (ELSEVIER), p.p. 109-125, 2003.
- [35] LUUKKAINEN, M. & KARHELA, T., *Ontology Approach for Co-Use of 3D Plant Modeling and Large Scale Process Simulation*, In: The 48th Scandinavian Conference on Simulation and Modeling (SIMS), Göteborg (Särö), 2007.
- [36] MARQUES, F. A. P., *Modelagem e Controle de Nível do Tubulão de uma Caldeira de Vapor Aquatubular de uma Refinaria de Petróleo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2005.
- [37] MARRAS, J. P., *Administração de Recursos Humanos: Do Operacional ao Estratégico*. 4. ed. São Paulo: Futura, 2001.
- [38] MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO (MTE), *Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho. NR 23: Proteção Contra Incêndios* (123-000-0), 2001. Disponível em: <www.mtb.gov.br>, acessado em 18/06/2012.
- [39] NIKIEL, J. M., *Sistema de Instrumentação e Automação de Caldeira com Combustíveis Alternativos*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, UFRJ, 2010.
- [40] OLIVEIRA, T. M. M. et al., *Utilização de resíduos de macarrão como combustível em caldeira*. Em I COLASSA: Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental. Foz do Iguaçu, 2011.
- [41] OLIVEIRA, T. S. de, *3D Electrical Area Classification applied to Plant Design Projects*. Em DIGITAL PLANT 2010. Houston, 2010.

- [42] PALMA, R. A., *Uma Metodologia de Suporte a Hardware-In-The-Loop Simulation para Modelagem de uma Caldeira a Gás*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, UFPR, 2006.
- [43] PAMPLONA Jr, A. R. S., *Hidrogeradora Virtual: Utilização De Técnicas De Realidade Virtual Desktop Para O Estudo De Uma Unidade Hidrelétrica De Energia*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará, 2006.
- [44] PYY, P., *Human reliability analysis method for probabilistic safety assessment*. Lappeenranta University of Technology, Finland, Dissertação de Doutorado em Tecnologia, 2000.
- [45] SÁ, A. G.; ZACHMANN, G., *Virtual Reality as a Tool for Verification of Assembly and Maintenance Process*, Computer & Graphics Journal, vol. 23, num.3.pp.389-403. Ed. Elsevier Science Ltd, 1999.
- [46] SAMPAIO, A. Z. et al., *Aplicação de Técnicas de Realidade Virtual na Simulação Visual de Processos Construtivos*. Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho. Lisboa, 2004.
- [47] SCHENK, M.; BLUMEL, E., *Technology Enhanced Training at Workplace: A Virtual Reality Based Training System for the Technical Domain*. In: 1st International Conference on EBusiness and E-Learning Proceedings, ISBN 9957-8585-0-5, p.p. 57-62, 2005.
- [48] SEBORG, D. E. et al., *Process Dynamics and Control*. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004
- [49] SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE C.; VAN WYLEN G. J., *Fundamentals of Thermodynamics* 5<sup>nd</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [50] SOUZA JR, M. B.; FERREIRA, L. S.; TRIERWEILER, J. O.; BROXTERMANN, O.; FOLLY, R. O. M.; HITZMANN, B., *Aspects concerning the use of biosensors for process control: experimental and simulation investigations*, Computers & Chemical Engineering, 27, 8-9, 15, 1165-1173, 2003.
- [51] SOUZA JR, M. B.; Pinto, J. C.; Lima, E. L., *Control of a Chaotic Polymerization Reactor: A Neural Network Based Model Predictive Approach*, Pol. Eng. Sci., 36, 4, P. 433-447, 1996.

- [52] SOUZA JR, M. B.; SANTOS, V. M. L., CARVALHO, F. R., *Predictive Control Based on Neural Networks: an Application to a Fluid Catalytic Cracking Industrial Unit*, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 17, No. 04-07, pp. 897-905, ISSN 01046632, 2000.
- [53] STETKAR, J. W., *Overview of Human Reliability Analysis Methods*. National Training Course on Probabilistic Safety Assessment. Islamabad, 2005.
- [54] TAM, E.; BADRA, F.; et al., *A Web-based virtual environment for operator training (for power systems)*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14 No.3, p.p.802-808, 1999.
- [55] TORY, R. et al, *Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada*. Em VIII Symposium on Virtual Reality. Belém, Pará, 2006.
- [56] VALDMAN, A., *Sistema de automação para monitoramento online de gases residuais e diagnóstico de uma caldeira operada com misturas diesel/biodiesel*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, UFRJ, 2010.
- [57] VENKATASUBRAMANIAN, V. et al., *A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods*. Computers and Chemical Engineering 27, 2003a, p. 293-311.
- [58] VERGARA, S. C., *Gestão de Pessoas*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000.
- [59] VIDEIRA, A., *Dinâmicas de Aprendizagem no Contexto de uma Economia em Estado Intermédio de Desenvolvimento: Casos de Estudo no Sector de Componentes para Automóvel*. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, Dissertação de Mestrado em Engenharia e Gestão de Tecnologia, 2001.
- [60] VINCE, J., *Virtual reality systems*. ACM SIGGRAPH Books series, Addison-Wesley, ISBN 0201876876, 1998.

## APÊNDICE

### APENDICE A – Deduções das Equações do Modelo de ÅSTRÖM & BELL Para Uma Caldeira

#### A.1 Balanços de massa e de energia globais do sistema

Conforme explicado no Capítulo 3, o modelo proposto por ÅSTRÖM & BELL (2000) é estruturado sobre equações de massa e de energia globais de uma caldeira. Sendo assim, tomando como base os símbolos e índices ilustrados na Figura 22, o balanço de massa global do sistema é mostrado abaixo:

$$q_f - q_s = \frac{d}{dt}(\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}), \quad (\text{A.1})$$

onde,

$q_f$ : fluxo mássico de água alimentado no tubulão superior (kg/s),

$q_s$ : fluxo mássico de vapor expelido pelo tubulão superior (kg/s),

$\rho_s$ : massa específica do vapor (kg/m<sup>3</sup>),

$\rho_w$ : massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>),

$V_{wt}$ : volume total de água no sistema (m<sup>3</sup>),

$V_{st}$ : volume total de vapor no sistema (m<sup>3</sup>),

De forma análoga, o balanço de energia global (BEG) do sistema é dado por:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt}(\rho_s u_s V_{st} + \rho_w u_w V_{wt} + m_t C_p t_m), \quad (\text{A.2})$$

onde,

$Q$ : fluxo de calor (W),

$h_f$ : entalpia específica da água alimentada (J/kg),

$h_s$ : entalpia específica da vapor gerado(J/kg),

$u_w$ : energia interna da água alimentada (J/kg),

$u_s$  : energia interna da vapor gerado (J/kg),

$m_t$  : massa total do metal (kg),

$C_p$  : calor específico do metal (J/kg°C),

$t_m$  : temperatura do metal (°C).

Considerando o volume total do sistema  $V_t$ , como sendo o somatório do volume total de água no sistema com o volume total de vapor gerado:

$$V_t = V_{st} + V_{wt}. \quad (\text{A.3})$$

Conhecendo a expressão da energia interna específica, em função da pressão  $p$ :

$$u = h - \frac{p}{\rho}. \quad (\text{A.4})$$

Pode-se então inserir os índices subscritos para a água e o vapor no sistema:

$$\begin{cases} u_w = h_w - \frac{p}{\rho_w} \\ u_s = h_s - \frac{p}{\rho_s} \end{cases}. \quad (\text{A.5})$$

Realizando substituições das equações anteriores no sistema acima, obtém-se:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p(V_{st} + V_{wt}) + m_t C_p t_m). \quad (\text{A.6})$$

Usando então do volume total e substituindo-a na equação anterior por  $V_t$ , resulta em um BEG modificado:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p(V_t) + m_t C_p t_m). \quad (\text{A.7})$$

Representar-se-á então as equações do balanço de massa global e do balanço de energia modificado como um sistema de segunda ordem, buscando um melhor entendimento do comportamento dinâmico do processo.

Partindo do balanço de massa global e aplicando a derivada em função de  $t$  para a soma usando a regra de derivadas para multiplicação tem-se:

$$q_f - q_s = \rho_s \frac{dV_{st}}{dt} + V_{st} \frac{d\rho_s}{dt} + \rho_w \frac{dV_{wt}}{dt} + V_{wt} \frac{dp}{dt}. \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{dV_{st}}{dt} = \frac{d}{dt}(V_t - V_{wt}).$$

Considerando  $V_t$  constante no sistema, a equação é simplificada para:

$$\frac{dV_{st}}{dt} = -\frac{dV_{wt}}{dt}. \quad (\text{A.9})$$

Voltando tal expressão na equação com derivada desenvolvida, obtém-se:

$$q_f - q_s = -\rho_s \frac{dV_{wt}}{dt} + V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} + \rho_w \frac{dV_{wt}}{dt} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \frac{dp}{dt}. \quad (\text{A.10})$$

Desenvolvendo e agrupando:

$$q_f - q_s = (-\rho_s + \rho_w) \frac{dV_{wt}}{dt} + (V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p}) \frac{dp}{dt}. \quad (\text{A.11})$$

Fazendo então:

$$\begin{cases} e_{11} = -\rho_s + \rho_w \\ e_{12} = V_{st} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \end{cases} \quad (\text{A.12})$$

É obtida a equação abaixo:



$$q_f - q_s = e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt}. \quad (\text{A.13})$$

Desejando obter o BEG modificado composto por equações de estado, é necessário desenvolver cada termo do diferencial desta equação.

Retomando BEG modificado:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = \frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p(V_t) + m_t C_p t_m). \quad (\text{A.14})$$

Tem-se que o desenvolvimento do seu primeiro termo se dá, novamente fazendo uso da regra de multiplicação de derivadas:

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = \frac{d}{dt} (\rho_s h_s) V_{st} + (\rho_s h_s) \frac{dV_{st}}{dt}. \quad (\text{A.15})$$

Aplicando novamente a regra da multiplicação no primeiro termo do somatório e fazendo uso do volume total no segundo termo do somatório:

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = V_{st} \left( \frac{d\rho_s}{dt} (h_s) + \frac{dh_s}{dt} (\rho_s) \right) + (\rho_s h_s) \frac{d}{dt} (V_t - V_{wt}), \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = V_{st} \left( \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} (h_s) + \frac{\partial h_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} (\rho_s) \right) + (\rho_s h_s) \left( \frac{dV_t}{dt} - \frac{dV_{wt}}{dt} \right).$$

Conforme informado,  $V_t$  será considerado constante, logo, sua derivada é nula. Assim, é possível simplificar a última equação obtida:

$$\frac{d}{dt} (\rho_s h_s V_{st}) = V_{st} \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} - (\rho_s h_s) \left( \frac{dV_{wt}}{dt} \right). \quad (\text{A.17})$$

O segundo termo tem tratamento semelhante ao do primeiro termo, como se verá a seguir:

$$\frac{d}{dt} (\rho_w h_w V_{wt}) = \frac{d}{dt} (\rho_w h_w) V_{wt} + (\rho_w h_w) \frac{dV_{wt}}{dt}. \quad (\text{A.18})$$

Desenvolvendo as derivadas, resulta a equação:

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = \frac{d\rho_w}{dt} h_w V_{wt} + \frac{dh_w}{dt} \rho_w V_{wt} + (\rho_w h_w) \frac{dV_{wt}}{dt}, \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = V_{wt} \left( \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \frac{dp}{dt} h_w + \frac{\partial h_w}{\partial p} \frac{dp}{dt} \rho_w \right) + (\rho_w h_w) \frac{dV_{wt}}{dt}.$$

Sendo assim, obtém-se:

$$\frac{d}{dt}(\rho_w h_w V_{wt}) = V_{wt} \left( \frac{\partial \rho_w}{\partial p} h_w + \frac{\partial h_w}{\partial p} \rho_w \right) \frac{dp}{dt} + (\rho_w h_w) \frac{dV_{wt}}{dt}. \quad (\text{A.20})$$

Sobre o terceiro termo, a equação é obtida diretamente por:

$$\frac{d}{dt}(pV_t) = V_t \frac{dp}{dt}, \quad (\text{A.21})$$

Sobre o último e quarto termo, tem-se que:

$$\frac{d}{dt}(m_t C_p t_m) = m_t C_p \left( \frac{\partial t_m}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right). \quad (\text{A.22})$$

Como a absorção de calor a partir dos gases de combustão pela mistura de água e vapor são altas nos *risers*, pode-se aproximar a temperatura do metal,  $t_m$ , para a temperatura de saturação do vapor,  $t_s$ . Sendo assim, aplicando tal aproximação na equação do quarto termo:

$$\frac{d}{dt}(m_t C_p t_m) = m_t C_p \left( \frac{\partial t_s}{\partial p} \frac{dp}{dt} \right). \quad (\text{A.23})$$

Com todos os termos desenvolvidos, é possível agora substituí-los na equação do BEG modificado:

$$Q + q_f h_f - q_s h_s = (-\rho_s h_s + \rho_w h_w) \left( \frac{dV_{wt}}{dt} \right) + \left[ \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) V_{st} + \left( \frac{\partial \rho_w}{\partial p} h_w + \frac{\partial h_w}{\partial p} \rho_w \right) V_{wt} - (V_t) + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right] \frac{dp}{dt}. \quad (\text{A.24})$$

Trabalhando os termos desta equação, é possível agrupar certos termos de tal forma que se pode definir:

$$e_{21} = -\rho_s h_s + \rho_w h_w, \quad (\text{A.25})$$

$$e_{22} = \left[ \left( h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) V_{st} + \left( \frac{\partial \rho_w}{\partial p} h_w + \frac{\partial h_w}{\partial p} \rho_w \right) V_{wt} - (V_t) + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right].$$

Desta forma, substituindo os termos  $e_{21}$  e  $e_{22}$  na equação atualizada do BEG modificado, pode-se agrupar esta equação com a equação de " $q_f - q_s$ " e com isso formar um sistema de segunda ordem, descrito a seguir:

$$\begin{cases} e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s, \\ e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s. \end{cases} \quad (\text{A.26})$$

Tal sistema representa um modelo capaz de reproduzir o comportamento da pressão e da quantidade total de água no sistema muito bem (ÅSTRÖM & BELL, 2000). Porém apresenta uma séria deficiência: pelo fato de não ser possível com este modelo determinar a distribuição de água e vapor no sistema, não é possível reproduzir o comportamento do nível no tubulão superior.

Tendo em vista esta limitação, se faz necessário o desenvolvimento de um modelo que contemple tal dinâmica do nível do tubulão superior. Desta forma, ÅSTRÖM & BELL (2000) seguiram na direção do desenvolvimento de dividir o sistema em diversos subsistemas (tubos ascendentes, descendentes e tubulão superior), elaborando para cada subsistema seus respectivos balanços de massa e de energia, fazendo quando necessário e aplicável as devidas simplificações.

## A.2 Balanços de massa e de energia nos subsistemas

### A.2.1 Balanço de Massa e de energia nos tubos ascendentes e no tubulão

Já é conhecida a necessidade da determinação da distribuição de água e vapor no tubulão superior. Porém, tal distribuição causa um efeito de contração e expansão na dinâmica do nível do tubulão da caldeira. KWANTNY & BERG (1993) desenvolveram um trabalho em que é possível se visualizar tal efeito, associado à consequência de comportamento de fase não mínima do nível.

Uma das consequências deste efeito é que o nível aumentará quando houver mistura de vapor e água, em função das bolhas de vapor que se expandirão sob o nível do tubulão.

O comportamento do fluxo em duas fases é complicado e normalmente muitos autores optam por modelar tais situações usando equações diferenciais parciais (HEUSSER, 1996). A modelagem aqui desenvolvida, baseada no trabalho de ÅSTRÖM & BELL (2000), que também optaram por usar equações diferenciais parciais, apresentar-se-á baseada em alguns parâmetros e que se ajusta bem com os dados experimentais.

Na modelagem dos tubos ascendentes, será feita a aproximação para um tubo vertical contendo fluxo de calor uniforme, considerando as definições a seguir:

$q$  : fluxo de mássico (kg/s),

$\rho$  : massa específica da mistura vapor-água (kg/m<sup>3</sup>),

$A$  : área da secção transversal do tubo(m<sup>2</sup>),

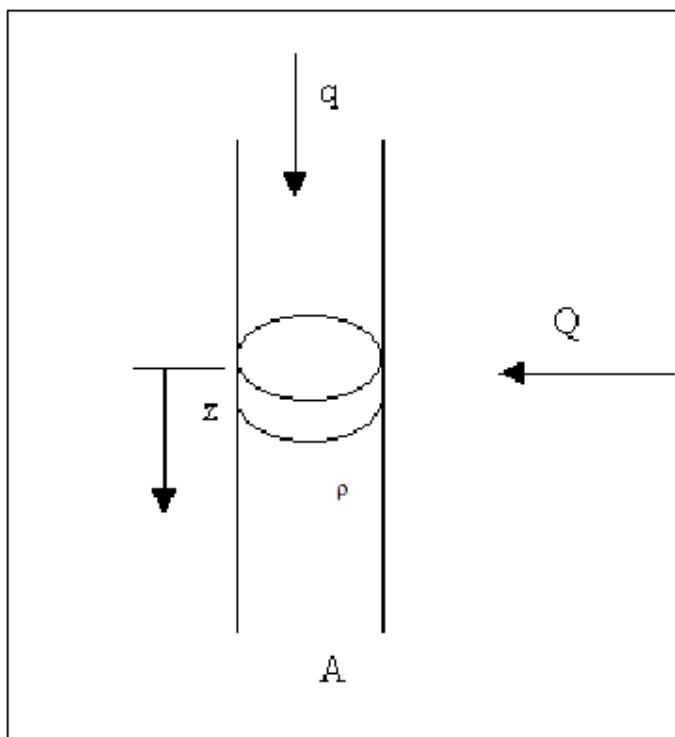
$V$  : volume (m<sup>3</sup>),

$h$  : entalpia específica da mistura vapor-água (kg/m<sup>3</sup>),

$Q$  : fluxo de calor fornecido ao tubo (W).

Levando-se em consideração que o sistema é unidimensional (na direção  $z$ ), que as quantidades também estão distribuídas no tempo e que a distribuição é uniforme em uma secção transversal do tubo, pode-se então obter as equações que representam os balanços de massa e de energia para os tubos ascendentes.

A Figura 66 representa o sistema que será considerado como aproximação.



**Figura 66: Tubo vertical com fluxo de calor uniforme**  
Adaptado de MARQUES, 2005

Com tais definições feitas, verifica-se que o balanço de massa e de energia de uma seção  $z$  de um dos *risers* são dados pelas seguintes equações:

$$\text{Balanço de Massa} \rightarrow A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.27})$$

$$\text{Balanço de Energia} \rightarrow \frac{\partial(ph)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial(qh)}{\partial z} = 0$$

Considera-se como expressão para a energia interna específica da mistura água-vapor como:

$$h = \alpha_m h_s + (1 - \alpha_m) h_w = h_w + h_c, \quad (\text{A.28})$$

nesta equação,  $h_c$  é a entalpia específica de condensação e  $\alpha_m$  é a fração mássica de vapor no fluxo.

O estado estacionário é dado por:

$$\frac{\partial(q)}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.29})$$

Inserindo as equações de  $h$  e da derivada de  $q$  em função de  $z$  nas equações de balanço de massa e de energia, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial(qh)}{\partial z} = q h_c \frac{\partial(\alpha_m)}{\partial z} = \frac{QA}{V} \quad (\text{A.30})$$

Normalizando o comprimento ao longo dos tubos ascendentes e convencionando que esta variável será chamada de  $\xi$  e que  $\alpha_r$  será a qualidade de vapor na saída dos tubos ascendentes, resulta que a fração mássica de vapor ao longo do tubo é:

$$\alpha_m(\xi) = \alpha_r \xi, \quad (\text{A.31})$$

Como  $\xi$  é normalizado, seu valor varia somente entre zero, inclusive e um, inclusive. A equação  $\alpha_v = f(\alpha_m)$ , indica a relação entre o volume e a fração mássica de vapor, onde:

$$f(\alpha_m) = \frac{\rho_w \alpha_m}{\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_m} \quad (\text{A.32})$$

Como está se buscando o comportamento da mistura de vapor e água no tubulão, se faz necessário descrever o acúmulo de vapor no componente que vem imediatamente anterior ao tubulão, isto é, nos *risers*. Tal acúmulo é regido pela fração volumétrica média nos *risers*. Fazendo a consideração de que a fração mássica é linear ao longo dos tubos ascendentes, a fração volumétrica média,  $\alpha_v$ , é dada por:

$$\begin{aligned}
\bar{\alpha}_v &= \int \alpha_v(\xi) d\xi \\
\bar{\alpha}_v &= \frac{1}{\alpha_r} \int (\xi) d\xi \\
\bar{\alpha}_v &= \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left[ 1 - \frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_s) \alpha_r} \ln \left( 1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_w} \alpha_r \right) \right]
\end{aligned} \tag{A.33}$$

Os fenômenos de condensação e evaporação são extremamente importantes na modelagem, tais que se tais sendo que se tais eventos forem modelados separadamente, a transferência de massa associada com estes fenômenos, deve ser considerada explicitamente. Isto pode ser evitado articulando-se as equações de balanço para a água e para o vapor. Desta forma, o balanço de massa global para o subsistema dos *risers* é dado por:

$$\frac{d}{dt} [\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] = q_{qd} - q_r, \tag{A.34}$$

Nesta equação,  $q_r$  é o fluxo mássico total que deixa os *risers*, enquanto que  $q_{qd}$  é o fluxo mássico que é introduzido nos *risers*.

Usando e desenvolvendo as equações deste item, pode-se chegar à equação do balanço global de energia para uma seção do *riser*, obtendo a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} [\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r - p V_r + m_r C_p t_s] = \\
Q + q_{dc} h_w - (\alpha_r h_c + h_w) q_r,
\end{aligned} \tag{A.35}$$

Nesta equação,  $q_{dc}$  é o fluxo mássico dos tubos descendentes (*downcomers*). No caso de circulação forçada em caldeiras, esta é uma variável controlada. Porém, se for considerada a caldeira com circulação natural, esta variável é regida pelos gradientes de massa específica nos *risers* e *downcomers*. O balanço de quantidade de movimento no sistema formado pelos *downcomers* e *risers* é dado por:

$$(L_r + L_{dc}) \frac{dq_{dc}}{dt} = (\rho_w - \rho_s) \bar{\alpha}_v V_r g - \frac{k}{2} \frac{q_{dc}^2}{\rho_w A_{dc}}, \tag{A.36}$$

onde

$k$  : coeficiente de fricção dimensional,  
 $L_r$  : comprimento do *riser* (m),  
 $L_{dc}$  : comprimento do *downcomer* (m),  
 $A_{dc}$  : área do *downcomer* (m<sup>2</sup>).

Como os valores do tempo para se atingir o estado estacionário da caldeira do trabalho de ÅSTRÖM & BELL (2000) e da caldeira de MARQUES (2005) variam de 0,3s a 10s, verifica-se que tais tempos são menores que o tempo de amostragem para os casos estudados. Desta forma, pode-se usar a relação para o estado estacionário, em relação ao fluxo do *downcomer*:

$$\frac{dq_{dc}}{dt} = 0, \quad (\text{A.37})$$

Substituindo esta equação na equação de balanço da quantidade de movimento, obtém a seguinte equação:

$$\frac{1}{2} k q_{dc}^2 = \rho_w A_{dc} (\rho_w - \rho_s) \bar{\alpha}_v V_r g, \quad (\text{A.38})$$

Com o balanço para os *risers* definido, parte-se para a determinação da dinâmica do tubulão, com o objetivo de se obter o comportamento do nível do mesmo. Porém, os fenômenos físicos neste subsistema da caldeira são complicados, pois existe um fluxo constante de vapor fluindo através dos tubos ascendentes, cujas descargas se dão no próprio tubulão superior. Este vapor recém-chegado ao tubulão é enviado para tratamento e/ou consumo. O tubulão, por sua vez, está com um determinado nível de água, a qual é recebida da alimentação da caldeira e enviada para o *downcomer*.

Pode-se então, neste subsistema, explicitar algumas variáveis chaves para a construção do balanço de massa dos elementos envolvidos no tubulão:



$V_{sd}$  : volume do vapor abaixo do nível líquido ( $m^3$ ).

$V_{wd}$  : volume de água abaixo do nível líquido ( $m^3$ ).

$q_{sd}$  : fluxo mássico de vapor através da superfície líquida no tubulão (kg/s).

Com tais variáveis, constrói-se o balanço de massa para o vapor, abaixo do nível do líquido do tubulão:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_{sd}) = \alpha_r q_r - q_{sd} - q_{cd}. \quad (A.39)$$

Nesta equação,  $q_{sd}$  é regido pela diferença de massa específica entre a água e o vapor e o movimento do fluxo mássico entrando no tubulão. Após analisar que existem diversos modelos para diferentes aplicações e com vários níveis de complexidade, chegou-se à conclusão que o modelo empírico a seguir escrito para o fluxo mássico de condensação,  $q_{cd}$ , gera um bom ajuste para os dados experimentais (ÅSTRÖM & BELL, 2000):

$$q_{cd} = \frac{h_w - h_f}{h_c} q_f + \frac{1}{h_c} \left[ \rho_s V_{sd} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dt} - (V_{sd} + V_{wd}) \frac{dp}{dt} + m_d C_p \frac{dt_s}{dt} \right]. \quad (A.40)$$

De forma análoga, a expressão para  $q_{sd}$  que representa bons resultados para os dados experimentais é mostrada a seguir:

$$q_{sd} = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \alpha_r \beta (q_{dc} q_r). \quad (A.41)$$

Onde,

$V_{sd}^0$ : Volume de vapor no tubulão considerando uma situação onde não há condensação;

$T_d$ : Tempo de residência do vapor no tubulão.

Considerando o volume de água no tubulão, o mesmo é dado por:

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - (1 - \bar{\alpha}_v) V_r. \quad (A.42)$$

Sabendo que o tubulão possui uma geometria difícil de ser modelada, parte-se para a abordagem de um comportamento linearizado, obtida pela área superficial do líquido  $A_d$  no nível de operação. Considerando tal abordagem, o nível do tubulão  $l$  medido do seu nível normal de operação é:

$$l = \frac{V_{wd} + V_{sd}}{A_d} = l_w + l_s, \quad (\text{A.43})$$

Nesta equação,  $l_w$  representa a variação de nível causada pela mudança no acúmulo de água no tubulão e  $l_s$  a variação de nível causada pela mudança no acúmulo de vapor no tubulão.

A dinâmica dos tubos ascendentes é representada pelos balanços de massa e de energia neste setor. Se o fluxo mássico de saída dos risers for eliminado, em seguida multiplicar o balanço de massa por  $-(h_w + \alpha_r h_c)$  e adicionando ao balanço de energia, tem-se que:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} (\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r) - (h_w + \alpha_r h_c) \frac{d}{dt} (\rho_s \bar{\alpha}_v V_r) + \frac{d}{dt} [\rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] - \\ & (h_w + \alpha_r h_c) \frac{d}{dt} [\rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] - V_r \frac{dp}{dt} + m_r C_p \frac{dt_s}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc}. \end{aligned} \quad (\text{A.44})$$

Simplificando a equação anterior, é obtida a seguinte equação:

$$\begin{aligned} & h_c (1 - \alpha_r) \frac{d}{dt} (\rho_s \bar{\alpha}_v V_r) + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r \frac{dh_s}{dt} - \alpha_r h_c \frac{d}{dt} [\rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r] + \\ & \rho_s \bar{\alpha}_v V_r \frac{dh_s}{dt} - V_r \frac{dp}{dt} + m_r C_p \frac{dt_s}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc}. \end{aligned} \quad (\text{A.45})$$

Considerando que as variáveis  $p$  e  $\alpha_r$  são conhecidas, pode-se obter o fluxo mássico  $q_r$  através da equação de balanço de massa nos *risers*:

$$q_r = q_{dc} - \frac{d}{dt}(\rho_s \bar{\alpha}_v V_r) - \frac{d}{dt}[\rho_w(1 - \bar{\alpha}_v)V_r], \quad (\text{A.46})$$

$$q_r = q_{dc} - V_r \frac{d}{dt}[\rho_w(1 - \bar{\alpha}_v) - (\rho_s \bar{\alpha}_v)], \quad (\text{A.47})$$

$$q_r = q_{dc} - V_r \frac{d}{dt}[\rho_w - \bar{\alpha}_v(\rho_w - \rho_s)], \quad (\text{A.48})$$

$$q_r = q_{dc} - V_r \frac{\partial}{\partial p}[\rho_w(1 - \bar{\alpha}_v) + \bar{\alpha}_v \rho_s] \frac{dp}{dt} + V_r(\rho_w - \rho_s) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} \frac{d\alpha_r}{dt}. \quad (\text{A.49})$$

Após inserir as equações anteriores na equação do balanço de massa para o vapor, abaixo do nível do tubulão é obtida a equação:

$$\begin{aligned} \rho_s \frac{dV_{sd}}{dt} + V_{sd} \frac{d\rho_s}{dt} + \frac{1}{h_c} \left[ V_{sd} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dt} - (V_{sd} + V_{wd}) \frac{d}{dt} + m_d C_p \frac{dt_s}{dt} \right] + \\ \alpha_r(1 + \beta) V_r \frac{d}{dt}[(1 - \bar{\alpha}_v)\rho_w + \bar{\alpha}_v \rho_s] = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f. \end{aligned} \quad (\text{A.50})$$

## A.2.2 Modelo linearizado

### A.2.2.1 Modelo considerando termos $e_{ij}$ fixos

Com o objetivo de se obter um modelo linearizado, os coeficientes  $e_{ij}$  são calculados de forma a serem considerados no ponto de operação e fazendo uso do Jacobiano no lado direito das equações para encontrar os termos lineares. Fazendo  $E^0$  como matriz dos coeficientes  $e_{ij}$  no ponto de operação, é obtido um sistema do tipo:

$$E^0 \dot{x} = f(x, u), \quad (\text{A.51})$$

$$y = l(x), \quad (\text{A.52})$$

Sabendo que:

$$l = \frac{V_{wd} + V_{sd}}{A_d}. \quad (\text{A.53})$$

Na equação anterior,  $l$  é uma representação do nível que considera a área do tubulão no nível normal de operação,  $A_d$ , e  $V_{wd}$  é o volume de água no tubulão, logo,

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - (1 - \bar{\alpha}_v)V_r, \quad (\text{A.54})$$

Observando os vetores  $x$ ,  $u$ ,  $y$  e o sistema  $f(x,u)$ , pode-se por analogia deduzir que  $y$  representa o nível  $l$ ,  $x$  é o vetor de estados e  $u$  é o vetor das entradas do modelo.

Desta forma, o modelo linearizado tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} E^0 \dot{\tilde{x}} &= J_1 \tilde{x} + J_2 u, \\ y &= J_3 \tilde{x}, \end{aligned}$$

De forma similar:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= J_a \tilde{x} + J_b u, \\ y &= J_c \tilde{x}, \end{aligned}$$

onde

$$\begin{aligned} J_a &= (E^0)^{-1} J_1, \\ J_b &= (E^0)^{-1} J_2, \\ J_c &= J_3, \\ J_1 &= \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0, u=u_0}, \\ J_2 &= \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_0, u=u_0}, \\ J_3 &= \left. \frac{\partial l}{\partial x} \right|_{x=x_0}. \end{aligned}$$

A matriz Jacobiana  $J_1$  é dada por:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_1}{\partial p} \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_1}{\partial V_{sd}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_2}{\partial p} \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_2}{\partial V_{sd}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_3}{\partial p} \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_3}{\partial V_{sd}} \\ \frac{\partial f_4}{\partial V_{wt}} & \frac{\partial f_4}{\partial p} \frac{\partial f_4}{\partial \alpha_r} & \frac{\partial f_4}{\partial V_{sd}} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.55})$$

Calculando esta matriz, tem-se que:

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(h_c q_{dc} + \alpha_r h_c \frac{\partial q_{dc}}{\partial \alpha_r}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\rho_s}{T_d} \end{bmatrix}. \quad (\text{A.56})$$

onde,

$$q_{dc} = \sqrt{\frac{2\rho_w A_{dc}(\rho_w - \rho_s)g\bar{\alpha}_v V_r}{k}},$$

$$\frac{\partial q_{dc}}{\partial \alpha_r} = \frac{1}{2} \left( \frac{2\rho_w A_{dc}(\rho_w - \rho_s)g\bar{\alpha}_v V_r}{k} \right)^{-0.5} \left( \frac{2}{k} \rho_w A_{dc}(\rho_w - \rho_s)gV_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} \right),$$

$$\bar{\alpha}_v = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left( 1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s)\alpha_r} \ln \left( 1 + \frac{(\rho_w - \rho_s)}{\rho_s} \alpha_r \right) \right),$$

$$\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} = \frac{\rho_w}{\rho_s \eta} \left[ \frac{1}{\eta} \ln(1 + \eta) - \frac{1}{1 + \eta} \right],$$

$$\eta = \alpha_r \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s}.$$

Analogamente ao cálculo da matriz  $J_1$ , as matrizes  $J_2$  e  $J_3$  são dadas por:

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_f} \frac{\partial f_1}{\partial q_s} \frac{\partial f_1}{\partial Q} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_f} \frac{\partial f_2}{\partial q_s} \frac{\partial f_2}{\partial Q} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_f} \frac{\partial f_3}{\partial q_s} \frac{\partial f_3}{\partial Q} \\ \frac{\partial f_4}{\partial q_f} \frac{\partial f_4}{\partial q_s} \frac{\partial f_4}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ h_f & -h_s & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{h_f - h_w}{\partial V_{wt}} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (A.57)$$

$$J_3 = \left[ \frac{\partial l}{\partial V_{wt}} \frac{\partial l}{\partial p} \frac{\partial l}{\partial \alpha_r} \frac{\partial l}{\partial V_{sd}} \right]^T, \quad (A.58)$$

Após desenvolver cada diferencial de  $J_3$ , obtêm-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial l}{\partial V_{wt}} = \frac{1}{A_d}, \quad (A.59)$$

$$\frac{\partial l}{\partial p} = 0, \quad (A.60)$$

$$\frac{\partial l}{\partial \alpha_r} = \frac{\partial}{\partial \alpha_r} \left( \frac{V_{wd}}{A_d} \right) = \frac{1}{A_d} \frac{\partial V_{wd}}{\partial \alpha_r}, \quad (A.61)$$

$$\frac{\partial l}{\partial V_{sd}} = \frac{1}{A_d}, \quad (A.62)$$

Substituindo em  $J_3$ :

$$J_3 = \left[ \frac{1}{A_d} \quad 0 \quad \frac{1}{A_d} \frac{\partial V_{wd}}{\partial \alpha_r} \frac{1}{A_d} \right]^T. \quad (A.63)$$

#### A.2.2.2 Modelo considerando uma aproximação para os termos $e_{ij}$

No item anterior, foi proposta a linearização através da consideração dos termos  $e_{ij}$  serem fixos. Existe, entretanto, uma forma alternativa de linearização, considerando que os coeficientes  $e_{ij}$  variem de acordo com uma aproximação. A aproximação para os coeficientes considerada neste trabalho, baseada no desenvolvimento de MARQUES (2005), será a quadrática. A seguir serão mostradas as equações utilizadas para tal abordagem, levando em consideração que os coeficientes dependem de entalpias específicas ( $h$ ), massas específicas ( $p$ ), temperatura de saturação ( $t_s$ ), massas de metal ( $m$ ), dentre outras variáveis:

$$h_s = a_{01} + (a_{11} + a_{21}(p - p_1))(p - p_1), \quad (\text{A.64})$$

$$\frac{\partial h_s}{\partial p} = a_{11} + 2a_{21}(p - p_1), \quad (\text{A.65})$$

$$\rho_s = a_{02} + (a_{12} + a_{22}(p - p_1))(p - p_1), \quad (\text{A.66})$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial p} = a_{12} + 2a_{22}(p - p_1), \quad (\text{A.67})$$

$$h_w = a_{03} + (a_{13} + a_{23}(p - p_1))(p - p_1), \quad (\text{A.68})$$

$$\frac{\partial h_w}{\partial p} = a_{13} + 2a_{23}(p - p_1), \quad (\text{A.69})$$

$$\rho_w = a_{04} + (a_{14} + a_{24}(p - p_1))(p - p_1), \quad (\text{A.70})$$

$$t_s = a_{05} + (a_{15} + a_{25}(p - p_1))(p - p_1), \quad (\text{A.71})$$

$$\frac{\partial t_s}{\partial p} = a_{15} + 2a_{25}(p - p_1), \quad (\text{A.72})$$

$$h_f = C_{fw}t_{f1} + \frac{p}{\rho_w}. \quad (\text{A.73})$$