IVAN RAUL HERRERA SOSA

SISTEMAS MULTIAGENTES PARA CONTROLE INTELIGENTE
DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2007

IVAN RAUL HERRERA SOSA

SISTEMAS MULTIAGENTES PARA CONTROLE INTELIGENTE
DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração.
Engenharia Química.

Orientador: Prof.
Song Won Park.

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Herrera Sosa, Ivan Raul

**Sistemas multiagentes para controle inteligente da caldeira de recuperação / I.R. Herrera Sosa. -- São Paulo, 2007.
176 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Controle (Teoria de sistema e controle) 2.Sistemas multiagentes 3.Agentes inteligentes 4.Caldeiras de recuperação Química (Simulação) 5.Processo *Kraft* I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa,
aos meus pais e aos meus sogros.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Song, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho.

Aos meus pais e as minhas irmãs pelo incentivo, confiança e amor.

Aos meus sogros pela acolhida e ajuda na minha adaptação no Brasil.

À minha esposa pela dedicação e compreensão durante a minha jornada, e a todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

RESUMO

Engenheiros têm introduzido um melhor suporte para procedimentos de monitoramento de condições complexas através da aplicação de sistemas descentralizados inteligentes usando uma variedade de técnicas de inteligência artificial. Agora é largamente reconhecido que estes problemas decorrentes da complexidade funcional do monitoramento de condições podem ser resolvidos com arquiteturas que contenham muitos módulos distribuídos e inteligentes, que interajam dinamicamente, os quais são chamados de agentes inteligentes. A tecnologia baseada em agentes tem gerado muita agitação nos últimos anos por causa da promessa de ser um novo paradigma na hora de definir os conceitos para modelar e implementar sistemas de controle. O objetivo do presente estudo é implantar esta tecnologia no controle de uma caldeira de recuperação com a finalidade de gerenciar e integrar produção, qualidade e segurança no processo. A caldeira de recuperação tem dois objetivos bem definidos, cada um com suas restrições operacionais: (1) geração de vapor vivo a ser utilizado no processo, e, (2) redução de reagentes inorgânicos para recuperar sulfeto e carbonato de sódio, necessários no ciclo do processo de fabricação de celulose. Cada um destes objetivos é um sistema com funções independentes dentro da caldeira, mas que, no entanto tem seus desempenhos interligados entre si através das variáveis comuns existentes no processo. Esta é exatamente a definição de um sistema agente, ou melhor, de um Sistema Multi-Agente (SMA), no qual não existe uma otimização e sim a busca de uma solução possível. O modelo dinâmico da Caldeira foi simulado em Matlab™ Simulink™ baseado no modelo matemático da caldeira de recuperação de licor negro B&W (Babcock&Wilcox). O SMA foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação JAVA e a plataforma de agentes JADE.

Palavras-chave: Controle (Teoria de sistema e controle), Sistemas Multi-Agentes, Agentes Inteligentes, Caldeiras de recuperação Química, Processo Kraft, Simulink, JADE.

ABSTRACT

Engineers have been introducing better support for procedures of monitoring complex conditions through the application of intelligent decentralized systems, implementing a variety of artificial intelligent techniques. Nowadays it is vastly known that these problems that are consequence of the functional complexity of monitoring conditioning can be solved through architectures, built by many intelligent distributed modules, which interact dynamically, known as intelligent agents. Technology based on agents have been creating excitement over the last years because of its promise of being a new paradigm that can be used to define modeling and implementing concepts for control systems. The goal of this thesis is to implement this new technology on controlling a recovery boiler, aiming to manage and integrate production, quality and security to the process. The operation of the recovery boiler has two well defined objectives, each one with its operational constraints: (1) steam production, an important asset in the pulp and paper process, and, (2) reduction of inorganic reagents to recover sulfate and sodium carbonates, the necessary chemicals in the Kraft pulp production. Each one of these functions, is an independent system inside the recovery boiler, however they have their performances connected to each other by common variables present in the process. This is exactly the definition of an agent system, in other words, a definition of a Multi-Agent System (MAS), for which there is not an optimization, but the search for the best possible outcome. The recovery boiler dynamic model was simulated using Matlab™ Simulink™ based on the mathematic model of B&W (Babcock&Wilcox) recovery boiler of black liquor. The MAS was implemented using JAVA™ programming language and JADE™ agent platform.

Keywords: Process Control, Multi-Agent Systems, Intelligent Agents, Kraft Recovery Boilers, Simulink, JADE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Formato de uma mensagem FIPA-ACL	46
Figura 2: Unidade de recuperação e de Utilidades do processo “Kraft” de produção de celulose.	51
Figura 3: Representação esquemática de uma caldeira de Recuperação (ADAMS et al., 1997).	54
Figura 4: Bico ejetor de licor negro na caldeira de recuperação (ADAMS et al., 1997) (Fotos Tacla, 2001).	56
Figura 5: Etapas na combustão do licor negro. (HUPA et al., 1987)	58
Figura 6: Leito carbonizado na parte inferior da caldeira.	59
Figura 7: Entradas de ar na caldeira..	61
Figura 8: Parte superior da Caldeira.	62
Figura 9: Precipitadores Eletrostáticos.	64
Figura 10: Efeito do ar da parte inferior da fornalha sobre a eficiência de redução (LEFEBVRE; SANTYR, 1989).	68
Figura 11: Efeito da temperatura do leito sobre a eficiência de redução e emissões (LEFEBVRE; SANTYR, 1989).	70
Figura 12: Diagrama do processo utilizado na simulação	73
Figura 13: Reações que ocorrem no Leito	79
Figura 14: Diagrama para calcular a eficiência de redução na caldeira. Modelo de Bauer e Dorland	81
Figura 15: Representação o fluxo do sistema água-vapor dentro dos trocadores de calor incluindo o balão.	86
Figura 16: Sistema de produção de vapor na parte alta da caldeira.	87
Figura 17: Sistema de controle da pressão no balão	92
Figura 18: Sistemas de controle de emissões da caldeira.	93
Figura 19: Modelo dinâmico da caldeira em simulink.	96
Figura 20: Graphical User Interface (GUI)	99
Figura 21: Arquitetura de comunicação entre o SMA em JADE e o modelo dinâmico da caldeira em Simulink.	102
Figura 22: Estado estacionário (Primeiro grupo de variáveis)	106
Figura 23: Estado estacionário (Segundo grupo de variáveis)	106
Figura 24: Estado estacionário (Terceiro grupo de variáveis)	107
Figura 25: Estado estacionário (Quarto grupo de variáveis)	107
Figura 26: Resposta do modelo a perturbações na entrada de licor negro.	109
Figura 27: Resposta do modelo a perturbações na fração de sólidos secos.	110
Figura 28: Resposta do modelo a perturbações na temperatura de entrada do licor negro.	111
Figura 29: Resposta do modelo a perturbações na temperatura do ar que entra na caldeira.	112
Figura 30: Protocolo de comunicação “FIPA-Contract-Net-Interaction-Protocol”	114
Figura 31: Exemplo de mensagem do tipo CFP enviada pelo agente “ReduçãoAgente” ao “VaporAgente”.	116
Figura 32: Exemplo de mensagem do tipo PROPOSE enviada pelo agente “VaporAgente” ao agente “ReduçãoAgente”.	118
Figura 33: Exemplo de mensagem do tipo ACCEPT_PROPOSAL enviada pelo agente “ReduçãoAgente” ao “VaporAgente”.	120
Figura 34: Exemplo de mensagem do tipo PROPOSE enviada pelo agente “VaporAgente” ao agente “ReduçãoAgente”.	122
Figura 35: Troca de mensagens registradas pelo Agente “Sniffer”	123
Figura 36: Comandos da ferramenta TCP Toolbox para abrir um canal de comunicação com a plataforma de agentes.	126

Figura 37: Mensagem de REQUEST re-encaminhada pelo agente "TCP4000"	127
Figura 38: Resposta das variáveis controladas (%Redução e Produção de Vapor)	129
Figura 39: Sequência de mensagens entre todos os agentes (Agentes de controle e agentes de comunicação)	130
Figura 40: Resposta do sistema no momento da entrada dos agentes. O agentes redução no tempo 1000 e o agente vapor no tempo 1100.	132
Figura 41: Sistema Multi-Agente atuando em caso de perturbação da fração de sólidos na caldeira.	133
Figura 42: Troca de mensagens entre agentes no controle da caldeira com perturbações na fração de sólidos.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições iniciais para validar o estado estacionário.	88
Tabela 2 - Variáveis do processo em estado estacionário	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	Agent Communication Channel
ACL	Agent Communication Language
AMS	Agent Management System
B&W	Babcock & Wilcox
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFP	Call for proposal
DF	Directory Facilitator
DPS	Distributed Problem Solving
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
GUI	Graphical User Interface
GUID	Global Unique Identifier
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JADE	JAVA Agent DEvelopment
KQML	Knowledge Query and Manipulation Language
MAS	Multi Agent Systems
PAI	Parallel Artificial Intelligence
PID	proportional-integral-derivative controller
RMI	Remote Method Invocation
SMA	Sistemas Multi-Agentes
TCP/IP	Transmission Control Protocol

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS GREGAS

σ_L	Tensão superficial, N/m.
μ_L	Viscosidade, Pa-s.
ΔH_P	Entalpia de pirólise, J/kg.
ρ_L	Densidade, kg/m ³ .

SUBSCRITO

H	Hidrogênio
Na_2S	Sulfato de sódio
O	Oxigênio
C	Carbono
Na	Sódio
S	Enxofre
Na_2CO_3	Carbonato de sódio

SOBRESCRITO

bl	Sólidos do licor negro
$blmt$	Sólidos do licor negro provenientes do Tanque de Mistura
$blpr$	Sólidos do licor negro provenientes do Tanque de precipitador
cb	Leito
cm	Carbono reativo
cs	Superfície do Leito
Fl	Leito no chão.
h	Aquecedor do licor.
mt	Tanque de mistura.
pe	Fração do licor preto arrastado na aspersão
sm	smelt
spc	Fração do licor preto que não foi arrastado na aspersão.

w	Leito nas paredes.
1	Zona primária
2	Zona secundária
3	Zona terciária
4	Superaquecedor
5	Boiler
6	Economizador

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral da Tese	17
1.2 Organização do Texto	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Teoria de Agentes e Sistemas Multi-agentes	19
2.1.1 Histórico	19
2.1.2 Conceito de Agentes	20
2.2 Sistemas Multi-Agentes	23
2.3 Comunicação entre Agentes	25
2.3.1 Interação: Linguagens de Comunicação entre Agentes	26
2.4 Coordenação entre Agentes	27
2.5 Desenvolvendo Agentes em um Sistema Multi-Agente (SMA)	28
2.5.1 Fundação de Agentes Físicos Inteligentes FIPA.	28
2.5.1.1 FIPA-ACL	29
2.5.1.2 Protocolos de Interação FIPA	30
2.6 Aplicações em Sistemas Multi-agentes	31
3 CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO QUÍMICA	33
3.1 Histórico do Processo Kraft	33
3.2 Unidade de Recuperação e Utilidades	34
3.3 Descrição da Caldeira	36
3.4 A Influência das Variáveis Operacionais no Desempenho da Caldeira	49
3.4.1 Produção de Vapor	49
3.4.2 Eficiência de Redução	51
4 MODELAGEM DINÂMICA DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO	55
4.1 Histórico	55
4.2 Modelo Implementado	56
4.2.1 Licor Negro	58
4.2.2 Aquecedor do Licor	58
4.2.3 Aspersão e Injetor de Licor	59
4.2.4 Leito (Paredes e Chão)	62
4.2.5 Zona Primária e Secundária	66
4.2.6 Zona Terciária	68
4.2.7 Superaquecedores, Convectores, Economizadores e Balão	69
4.2.8 Tanque de Mistura	73
4.2.9 Precipitador	74
4.2.10 Sistema de Controle Tradicional	75
5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA MULTI-AGENTE	78
5.1 Modelo Dinâmico da Caldeira de Recuperação em Simulink™	78
5.2 Sistema Multi-Agente na Plataforma JAVA™ Agent DEvelopment JADE™	81
5.2.1 JADE	81
5.2.2 Características do JADE	82
5.2.3 O Agente em JADE	85
5.3 Comunicação entre o Modelo Dinâmico em Simulink e o SMA em JADE	85
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	87

6.1 Validação do Simulador da Caldeira em Simulink™	87
6.1.1 Validação do Estado Estacionário	87
6.1.2 Validação da Resposta do Modelo à Perturbações	92
6.1.2.1 Resposta a Perturbações ao Aumento na Entrada de Licor Negro	92
6.1.2.2 Resposta a Perturbações na Fração de Sólidos Secos no Licor	93
6.1.2.3 Resposta ao aumento na temperatura do licor negro	94
6.1.2.4 Resposta ao Aumento na Temperatura do Ar Primário, Secundário e Terciário	95
6.2 Tipos de Agentes Implementados no SMA	96
6.2.1 Agente de Controle	97
6.2.1.1 Mensagens trocadas no processo de negociação	99
6.2.1.2 Comportamento lógico dos agentes	107
6.2.2 Agente de Comunicação	109
6.2.2.1 Comunicação Cliente-Servidor	109
6.3 Resultados da Caldeira Controlada pelo Sistema Multi-Agente	112
6.3.1 Estado Estacionário controlado	112
6.3.2 Perturbações na entrada de Sólidos Secos na Caldeira	117
 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE ESTUDO	 119
7.1 Conclusões	119
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	121
 Referências Bibliográficas	 123
Referências Consultadas	127
APÊNDICE A	130
APÊNDICE B	161
APÊNDICE C	164
APÊNDICE D	168

1 INTRODUÇÃO

Caldeiras de recuperação constituem-se, tanto do ponto de vista do processo quanto do ponto de vista da segurança, em equipamento-chave dentro de uma indústria de celulose. A indisponibilidade da caldeira de recuperação ocasiona a parada geral da fábrica, com prejuízos econômicos de grande monta. Do ponto de vista da segurança, tanto patrimonial quanto das pessoas, a caldeira de recuperação é um equipamento que demanda cuidados acima da média dos equipamentos convencionais.

Variações no processo causam instabilidade na operação da caldeira de recuperação. Esta instabilidade nos parâmetros do processo e o deficiente sistema de controle podem limitar a flexibilidade do operador para controlar situações perigosas. Quando existem estas flutuações nos parâmetros do processo, os operadores fazem ajustes para operar sob o modo mais conservador, diminuindo de forma drástica a eficiência da caldeira. Conseguindo estabilizar a operação da caldeira, torna-se viável controlar as variáveis do processo de forma rigorosa e trabalhar perto dos níveis ótimos em qualquer circunstância. Atualmente, para chegar à estabilidade da caldeira é preciso a intervenção dos operadores. Esta prática é comum porque os sistemas de controle aplicados na caldeira foram projetados para controlar uma variável específica do processo sem pensar no efeito colateral que este controle pode causar na estabilidade global da caldeira. Pensando nesta situação surge a necessidade de um controle que visualize a caldeira como um todo para minimizar a dedicação do controlador global chamado “operador”.

Para chegar a este controle inteligente é preciso analisar os diferentes processos que se sucedem dentro da caldeira e conhecer a relação que estes processos têm entre si. Analisando a caldeira de recuperação nota-se que

existem dois processos bem diferenciados, tanto do ponto de vista químico como físico, a geração de vapor e a redução de inorgânicos. Estes dois processos autônomos que interagem continuamente de forma indireta precisam de uma lógica de controle que os relacione para chegar ao melhor desempenho considerando como principal objetivo a estabilidade e segurança na caldeira e não a produção individual de cada um. Esta é exatamente a definição de um Sistema Multi-Agente (SMA).

Os sistemas multi-agentes tem sido um tópico de pesquisa na informática por muito tempo. Embora haja diversas interpretações do conceito de SMA, no presente trabalho SMA é considerado como um tipo de sistema distribuído formado por módulos de software, ou seja, processos autônomos chamados agentes, coordenados e orientados a objetos.

A aplicação do SMA na automação e controle industrial tem sido estudada previamente, principalmente, no contexto da manufatura discreta. Em muitos casos a motivação destas pesquisas foi a possibilidade de se realçar, particularmente, a adaptação e também o gerenciamento da complexidade na automação. Diversos resultados de aplicações SMA ou de sistemas similares de controle na manufatura discreta têm sido publicados por Marik et al. (2002b), Deen (2003), Bussmann et al. (2004). Também foram publicadas pesquisas voltadas para sistemas de automação em processos contínuos (CHOKSHI; McFARLANE, 2002).

O esforço da pesquisa descrita nesta tese foi motivado por três fatores. Em primeiro lugar, o crescente desenvolvimento de novas tecnologias usadas para projetar e executar sistemas de controle de processos. Em segundo lugar, alcançar estabilidade de produção e segurança operacional na caldeira de recuperação. Finalmente, o crescimento das pesquisas em Sistemas Multi-Agentes.

1.1 Objetivo Geral da Tese

O objetivo desta tese é propor um sistema inteligente distribuído, destinado ao monitoramento da produção, qualidade e o controle de uma caldeira de recuperação, permitindo que cada um dos agentes que compõem esta sociedade atue de forma eficiente obtendo como resultado final uma alta recuperação de compostos inorgânicos, grande eficiência térmica e uma alta produção de vapor vivo.

Para alcançar este objetivo serão necessários diversos objetivos específicos:

1. Desenvolver o modelo dinâmico da caldeira de recuperação onde será testado o SMA.
2. Definir a arquitetura do Sistema Multi-Agente.
3. Desenhar o Sistema Multi-Agente definindo o tipo de mensagem, protocolos de iteração e comportamento de cada um dos agentes.
4. Desenvolver um protótipo funcional do Sistema Multi-Agente baseado nas especificações obtidas na fase de desenho.
5. Integrar o SMA com o sistema de simulação da caldeira.
6. Avaliar a resposta do sistema integrado SMA-Caldeira.

1.2 Organização do Texto

O texto está dividido em seis capítulos, e segue-se uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo:

O capítulo 1 esclarece o objetivo da presente tese e elucida o potencial da tecnologia de sistemas multiagentes na controle de processos. O capítulo de Introdução também menciona, na Caldeira de Recuperação Química, a importância de se manter um sistema estável.

O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica detalhando a teoria de sistemas multiagentes e suas principais características.

O capítulo 3 faz uma revisão dos principais componentes de uma Caldeira de Recuperação, analisando a influência das principais variáveis em relação ao desempenho da Caldeira.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada na elaboração do Sistema Multiagente, especialmente em cada uma das principais áreas de desenvolvimento (criação da plataforma de agentes, elaboração do modelo dinâmico do processo e comunicação entre os agentes é a simulação)

O capítulo 5 traz os resultados obtidos em cada uma das áreas de desenvolvimento mencionadas acima. Neste capítulo também foram realizados testes de avaliação do sistema de controle inteligente sobre a Caldeira.

Finalmente, o capítulo 6 tece conclusões sobre a presente aplicação de sistemas multiagentes em caldeira de reuperação química.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Teoria de Agentes e Sistemas Multi-agentes

2.1.1 Histórico

Até aos anos 80, a investigação em inteligência artificial tratou tradicionalmente de sistemas individuais, tentando replicar nesses sistemas as capacidades específicas associadas à inteligência humana, como é o caso da aprendizagem ou da resolução de problemas. No entanto, nos anos 80 começou a tornar-se claro que os aspetos da interação e distribuição tinham de ser considerados como aspetos básicos da inteligência. Em particular, Marvin Minsky (1985) propôs que a inteligência é o resultado de inúmeros módulos interagindo entre si, cada um resolvendo tarefas primitivas específicas.

Estas idéias ganharam uma abrangência crescente, nomeadamente quando foram integradas com o modelo de objetos interativos, designados atores, como anteriormente proposto por Carl Hewitt (1973). Surgiram, assim, as bases para o que hoje é designado como inteligência artificial distribuída. Esses atores eram caracterizados por um estado interno, operando em paralelo e respondendo a mensagens de outros objetos. A evolução do conceito de ator conduziu ao que hoje é o conceito de agente.

Compreende-se, deste modo, que a noção de agente seja atualmente utilizada nos mais diferentes contextos. O agente pode ser visto em uma perspectiva de um “processo de software, executado concorrentemente, que encapsula algum estado e comunica com outros agentes através de mecanismos de troca de mensagens” (WOOLDRIDGE e JENNINGS, 1995), como acontece no âmbito da

engenharia de software baseada em agentes, ou pode ser visto até como um programa com alguma forma de controle persistente, como acontece em aplicações para a Internet. Este tipo de caracterização corresponde ao que se designa por noção fraca de agente (WOOLDRIDGE e JENNINGS, 1995).

Em contrapartida, a noção forte de agente é característica de áreas como a inteligência artificial, na qual, além das características anteriores, conceitos como conhecimento, crenças, intenções, desejos, obrigações ou emoções, podem ser atribuídos aos agentes (WOOLDRIDGE, 2000) (SCHWEITZER, 2003).

O termo agente é, assim, utilizado em diversas áreas com diferentes significados, não sendo por isso de se estranhar que seja difícil definir a noção de agente de forma consensual (COELHO e PAIVA, 1998). No entanto nesse sentido, existe algum consenso de que, apesar da noção de agente ser necessária, esta deve ser utilizada somente como uma ferramenta para classificar sistemas e não como uma caracterização absoluta do mundo dividido entre agentes e não-agentes (RUSSEL e NORVIG, 2003). É, no entanto, possível identificar algumas características gerais, tipicamente subjacentes à noção de agente, as quais serão abordadas a continuação.

2.1.2 Conceito de Agentes

Definir agentes com um conceito único ou padrão é muito difícil, pois existem várias abordagens e pontos de vista contrastantes de diferentes autores. Além disso, devido às suas mais diversas aplicações uma definição precisa torna-se cada vez mais complicada e variada.

Alguns pesquisadores, como Michael Wooldridge e Nick Jennings (WOOLDRIDGE; JENNINGS, 1995), adotaram duas definições gerais: a noção fraca e a noção forte dos agentes. Na definição de noção fraca dos agentes,

eles conceituam os agentes como sistemas computacionais, sendo hardware ou software, com certas propriedades tais como autonomia, habilidade social, reatividade e pró-atividade. Na noção forte de agentes, mais adotada pelos pesquisadores ligados à área de Inteligência Artificial, o agente possui, além das propriedades acima citadas, noções relacionadas ao comportamento humano tais como o conhecimento, a crença, a intenção e a obrigação.

Em geral, agentes seriam entidades de software autônomas que atuam em determinados ambientes de forma a interagir com o ambiente e com outros agentes, além de produzir ações e percepções sem requerer intervenções humanas constantes. Em abordagem mais aplicada à Inteligência Artificial um agente ideal teria que ser capaz de funcionar continuamente e adquirir experiências e conhecimentos acerca do ambiente com o qual está interagindo. Ou seja, ser capaz de “aprender” e tomar decisões a partir de situações diferentes.

Pode-se enumerar algumas propriedades que são essenciais para uma melhor caracterização de agente. Uma delas é a *autonomia* que o agente inteligente deve ter para tomar decisões e ações importantes para a conclusão de uma tarefa, ou objetivo, sem a necessidade da interferência do ser humano ou de qualquer outra entidade. Ou seja, ser capaz de agir independentemente do seu ambiente através de seus próprios “sensores”, ou com as suas próprias percepções, com o objetivo de realizar alguma tarefa, seja ela externa ou gerada por ele próprio. Ou seja operam sem a intervenção humana e tem algum tipo de controle sobre suas ações e seu estado interno.

Associado à autonomia está a *pró-atividade*, que nada mais é do que a capacidade que o agente deve ter para tomar iniciativas. Eles não respondem simplesmente de acordo com o meio. Têm a capacidade de exibir comportamentos baseados em objetivos.

Reatividade é a capacidade de reagir rapidamente a alterações no ambiente, ou seja, perceber o meio e responder de modo oportuno. Um agente deve ter também *robustez* para ser capaz de tomar decisões baseando-se em informações incompletas ou escassas, lidar com erros e ter uma capacidade de adaptação ou aprendizagem através da experiência.

Para alcançar seus objetivos, agentes devem ter uma *habilidade de comunicação* que nada mais é do que uma capacidade de comunicação com repositórios de informações. É fundamental uma constante troca de informações, seja apenas com um repositório de dados, outro agente ou com o próprio ambiente

O *raciocínio* é talvez o aspecto mais importante que distingue um agente inteligente dos outros agentes. Afirmar que um agente tem raciocínio significa dizer que ele tem a capacidade de analisar e inferir baseando-se no seu conhecimento atual e nas suas experiências. Esse raciocínio pode ser:

- Baseado em regras: onde eles utilizam um conjunto de condições prévias para avaliar as condições no ambiente externo.
- Baseado em conhecimento: onde eles têm à disposição grandes conjuntos de dados sobre cenários anteriores e ações resultantes, dos quais eles deduzem seus movimentos futuros.

Para Wooldridge, como pode ser visto em Weiss (1999), flexibilidade das ações tais como reatividade, pró-atividade e sociabilidade, são suficientes para classificar um agente como inteligente.

Por fim, deve haver uma capacidade de cooperação: agentes inteligentes podem, e devem, trabalhar juntos para mútuo benefício na execução de uma tarefa complexa e ter um comportamento adaptativo, no qual possa examinar o

meio externo e adaptar suas ações para aumentar a probabilidade de ser bem sucedido em suas metas.

Para garantir maior segurança e confiança ao usuário, de que o agente vai representar fielmente seu papel com precisão, é fundamental também um alto grau de confiabilidade por parte do agente. Isso é necessário para que o agente simule e/ou represente da maneira mais próxima possível da realidade.

Contudo, um agente não precisa ter todas essas características ao mesmo tempo. Existem agentes que possuem algumas, outros que possuem todas, o que é certo é que atualmente existe pouca concordância sobre a importância dessas propriedades e se é necessária sua obrigatoriedade para a caracterização de um agente. O consenso é que essas características tornam um agente diferente de um simples programa ou objeto.

2.2 Sistemas Multi-Agentes

Dentro do contexto da Inteligência Artificial Distribuída, Torsun, (1995) classifica a Inteligência Artificial Distribuída em Distributed Problem Solving (DPS), Multi-Agent Systems (MAS) e Parallel Artificial Intelligence (PAI). Resolução Distribuída de Problemas ou DPS decompõe o problema em módulos através de uma abordagem descendente (*top-down*) desenhado especificamente para um problema em particular, onde grande parte do raciocínio sobre a solução é inserida pelo próprio projetista. Inteligência Artificial Paralela ou PAI interessa-se mais por desempenho do que por avanços conceituais, preocupando-se principalmente em desenvolver linguagens e algoritmos de computação paralela. Por último, Sistemas Multi-Agentes ou SMA, caracteriza-se pela existência de agentes que interagem de forma autônoma e que trabalham juntos para resolver um determinado problema ou objetivo.

Em suma, pode-se dizer que sistemas multi-agentes são sistemas constituídos de múltiplos agentes que interagem, ou trabalham, em conjunto de forma à realizar um determinado conjunto de tarefas ou objetivos. Esses objetivos podem ser comuns a todos os agentes ou não. Os agentes dentro de um sistema multi-agente podem ser heterogêneos ou homogêneos, colaborativos ou competitivos, etc. Ou seja, a definição dos tipos de agentes depende da finalidade da aplicação que o sistema multi-agente está inserido.

Atualmente a pesquisa em sistemas multi-agentes está interessada principalmente na coordenação das ações e comportamentos dos agentes, ou seja como eles coordenam seu conhecimento, planos, objetivos e crenças com o objetivo de tomar ações ou resolver problemas.

Segundo Jennings (1998) algumas razões para o crescimento do interesse em pesquisas com sistemas multiagentes são:

- A capacidade de fornecer robustez e eficiência.
- A capacidade de permitir interoperabilidade entre os sistemas legados.
- A capacidade de resolver problemas cujo dado, especialidade ou controle é distribuído.

Apesar de muitas vantagens, ainda segundo o mesmo artigo, os sistemas multi-agentes ainda possuem muitos desafios e dificuldades tanto em relação ao projeto quanto a implementação. Seguem alguns abaixo:

1. Como programar, descrever, decompor e alocar problemas, e sintetizar resultados com um grupo de agentes inteligentes?
2. Como permitir a comunicação e a interação entre agentes? Que linguagens de comunicação e protocolos usar? O que e quando comunicar?

3. Como assegurar que agentes atuem coerentemente tomando decisões ou executando ações?
4. Como permitir que agentes individuais atuem e raciocinem sobre ações, planos e conhecimento sobre outros agentes com a finalidade de coordená-los? Como raciocinar sobre o estado de seus processos coordenados?
5. Como identificar e reconciliar pontos de vistas muito diferentes e intenções conflitantes em uma coleção de agentes que tentam coordenar suas ações?
6. Como equilibrar efetivamente a computação local e a comunicação? Mais genericamente, como gerenciar alocação de recursos limitados?
7. Como evitar, ou minimizar, o comportamento prejudicial do sistema, tal como um comportamento caótico?
8. Como projetar e construir sistemas multiagentes práticos? Como projetar plataformas tecnológicas e metodologias de desenvolvimento para sistemas multiagentes?

Podemos resumir os itens expostos em apenas três, que são os principais desafios que um sistema multi-agente enfrenta. O primeiro diz respeito à *comunicação*. Como ela seria realizada entre os agentes e que tipo de protocolos usar? A segunda seria a *interação*: Como essa interação ocorrerá? Que linguagem os agentes devem usar para interagirem entre si e combinar seus esforços? E por último a *coordenação*: Como garantir essa coordenação entre os agentes para que haja uma coerência na solução do problema ou objetivo que estão tentando resolver?

2.3 Comunicação entre Agentes

A comunicação é fundamental para permitir que haja colaboração, negociação, cooperação, etc. entre entidades independentes. Em sistemas multiagentes, é necessário que a comunicação seja disciplinada para que os objetivos sejam

alcançados efetiva e eficientemente, necessitando assim uma linguagem que possa ser entendida pelos outros agentes presentes no ambiente. Esta comunicação tem, como principais objetivos, a partilha do conhecimento com os outros agentes e a coordenação de atividades entre agentes. Ou seja, ela deve permitir que agentes troquem informações entre si e coordenem suas próprias atividades resultando sempre em um sistema coerente.

2.3.1 Interação: Linguagens de Comunicação entre Agentes

A forma de interação que ocorre entre os agentes é um fator muito importante na integração destes. As linguagens de comunicação e sua expressividade definem a capacidade de comunicação de cada agente. Ela deve ser universal e partilhada por todos os agentes, ser concisa e ter um número limitado de primitivas de comunicação. Como modelo de comunicação de agentes são utilizadas a comunicação humana e a teoria dos atos comunicativos (*Speech Act Theory*) (MENESES, 2001). Esta teoria usa o conceito de performativas para permitir conduzir suas ações. Ricardo Gudwin (GUDWIN, 2003) define certas características desta teoria:

- Derivada da análise linguística da comunicação humana.
- Como em uma linguagem, o comunicador de uma língua não somente efetua uma declaração, mas realiza uma ação.
- Mensagens são ações ou atos comunicativos.

Gudwin (2003) afirma que “os atos comunicativos são interpretados a partir da mensagem do contexto...” e “...nem sempre essa interpretação é óbvia...”. Em outras palavras, significa que esses atos comunicativos são sujeitos à interpretações dúbias que podem ter significados diferentes de acordo com o ponto de vista.

Dificuldades identificadas por Gudwin (2003) são ilustradas pelas seguintes

frases:

- “Saia da minha frente!” (Comando)
- “Por favor, saia da minha frente” (Pedido)
- “Você poderia sair da minha frente?” (Pergunta)
- “Eu gostaria que você saísse da minha frente” (Informação)

Por isso se faz necessário sempre deixar explícito o ato comunicativo relacionado à mensagem na comunicação entre agentes.

2.4 Coordenação entre Agentes

Gerhard Weiss (1999) afirma que “coordenação é uma característica fundamental para um sistema de agentes que executam alguma atividade em um ambiente compartilhado”.

A coordenação está muito relacionada com o compartilhamento de conhecimento entre os agentes, e o seu principal objetivo é coordenar as ações individuais de cada agente para atingir o objetivo final do sistema multi-agente. Além disso, há uma preocupação com a coerência de modo a se discutir como o sistema multi-agente por completo se comporta enquanto está resolvendo um problema. O principal motivo para uma preocupação maior com a coordenação entre agentes é o fato de que um só agente, dentro de um sistema multi-agente, não terá informação ou capacidade suficiente para resolver muitos dos problemas - muitos dos objetivos não podem ser atingidos por agentes agindo isoladamente.

Assim, coordenação seria a capacidade de esses agentes trabalharem em conjunto e combinar seus objetivos de forma a concluírem o objetivo final do sistema. Geralmente, para uma cooperação ser bem sucedida, cada agente deve manter um “modelo” dos outros agentes e também desenvolver um modelo

de interações futuras ou possíveis. As interações futuras podem ser divididas em cooperação e negociação.

Segundo Weiss (1999): “Negociação é a coordenação entre agentes antagônicos ou simplesmente egoístas (*self-interested*).” Ou seja, a negociação está relacionada à coordenação de agentes competitivos. Geralmente são usados protocolos de negociação para determinar as regras de negociação e são definidos os conjuntos de atributos sobre os quais se pretende chegar a um acordo.

Cooperação, como afirma Gerhard Weiss em (1999), é a “...coordenação entre agentes não antagônicos...”. Ou seja, uma coordenação com agentes que não possuem objetivos conflitantes geralmente é chamada de cooperação. Neste caso, agentes cooperativos auxiliam-se mutuamente nem que para isso provoquem custos individuais. O papel da coordenação é agir de forma que conjunto de agentes realize suas tarefas como um “trabalho de equipe” visando sempre o objetivo final do sistema.

2.5 Desenvolvendo Agentes em um Sistema Multi-Agente (SMA)

O ambiente de software onde os agentes vivem, trabalham e se comunicam é chamado de “Plataforma de Agentes”. Todos os aspectos relacionados com a tecnologia de agentes e SMA estão padronizados pela Fundação de Agentes Físicos Inteligentes (FIPA).

2.5.1 Fundação de Agentes Físicos Inteligentes FIPA

Foundation for Intelligent Physical Agents ou simplesmente FIPA, é uma fundação sem fins lucrativos direcionada à produção de padrões para a interoperabilidade de agentes heterogêneos e interativos e sistemas baseados em agentes. FIPA é uma organização membro da Institute of Electrical and

Electronics Engineers (IEEE), a associação profissional mais importante no avanço da tecnologia. IEEE é a autoridade principal em áreas da engenharia como Aeronáutica, Computação, Biomedicina, Telecomunicações, Elétrica, entre outras.

FIPA foi fundada em 1996 em Genebra e foi aceita pela IEEE em Junho de 2006. A sua missão básica é facilitar a interligação de agentes e sistemas multi-agentes entre múltiplos fornecedores de ambientes. A missão oficial é: “A promoção de tecnologia e especificações de interoperabilidade que facilitem a comunicação entre sistemas de agentes inteligentes no contexto comercial e industrial moderno.” (FIPA, 2007). Em suma, interoperabilidade entre agentes autônomos.

Segundo dados encontrados no site oficial (FIPA, 2007), antes da FIPA havia cerca de 60 sistemas proprietários de agentes em competição, sendo que a maioria destes eram sistemas “fechados” e incompatíveis. Fatos tais que atrasaram o desenvolvimento da tecnologia de agentes. Logo, fica claro que a necessidade de padronização torna-se indispensável.

Algumas das linguagens de desenvolvimento de agentes que estão relacionadas com a FIPA são: Agent Development Kit², FIPA-OS, Lightweight Extensible Agent Platform³ (LEAP), ZEUS e JADE. Esta última foi a plataforma escolhida para desenvolver os agentes da caldeira de recuperação.

2.5.1.1 FIPA-ACL

A (FIPA-ACL) é uma linguagem, utilizada no padrão FIPA de comunicação entre agentes, baseada em ações de fala. Sua especificação consiste de um conjunto de tipos de mensagens e descrições dos efeitos das mensagens sobre os agentes que as enviam e sobre os que a recebem. Possui uma semântica definida precisamente com uma linguagem de descrição de semântica.

De acordo com (MENESES 2001), o Knowledge Query and Manipulation Language (KQML) tem sido muito criticada por usar o termo performativo para se referir às primitivas de comunicação. Em FIPA-ACL, essas primitivas são chamadas de ações ou atos comunicativos (*communicative acts*).

Ricardo Gudwin (2003) prevê que no futuro a FIPA-ACL: “deve vir a substituir o KQML, pois resolve a maioria dos problemas criticados por diferentes autores na concepção do KQML.”. E realmente a linguagem FIPA-ACL é atualmente a mais utilizada na comunidade que desenvolve projeto de agentes. Por este motivo a linguagem utilizada para comunicar os agentes nesta tese foi a linguagem no padrão FIPA-ACL.

Na figura 1 vemos uma estrutura de uma mensagem em FIPA – ACL, com as partes que compõem uma mensagem básica.

```
(communicative act
  :sender <valor>
  :receiver <valor>
  :content <valor>
  :language <valor>
  :ontology <valor>
  :conversation-id<valor>
  ...)
```

Figura 1: Formato de uma mensagem FIPA-ACL

2.5.1.2 Protocolos De Interação FIPA

Geralmente existem certos padrões na interação entre os agentes, tais como os tipos e a seqüência das mensagens trocadas. A esses padrões dá-se o nome de protocolos de interação.

A FIPA define protocolos de interação para que um agente requisiite uma tarefa a outro agente; protocolos para licitação, utilizados para selecionar o agente que melhor executa uma tarefa; entre outros.

Em cada protocolo de interação são definidos, entre outras aspectos, os papéis que podem ser desempenhados pelos agentes, os tipos de mensagens que podem ser enviadas e recebidas em cada papel, além da sequência em que essas mensagens são trocadas.

A FIPA padronizou 11 protocolos de interação para diversos tipos de conversações entre agentes. Um dos protocolos mais utilizados é o “Contract Net Interaction Protocol”, protocolo utilizado neste presente trabalho, e o qual será descrito junto com o SMA da Caldeira de Recuperação.

2.6 Aplicações em Sistemas Multi-agentes

Aplicações de agentes podem ser classificadas pelo tipo de agente, pela tecnologia utilizada para implementar os agentes, ou pela área onde foi aplicada, por exemplo:

- Agentes no processo ensino-aprendizagem: utilização de agentes no aprendizado e no processo de treinamento de usuários.
- Agentes na indústria: a grande vantagem da aplicação de agentes na produção industrial é o fato de que muitos dos sistemas que atuam neste propósito são complexos e isolados. O papel dos agentes seria integrá-los e compartilhar informações entre os sistemas.
- Agentes em simulação: agentes podem simular situações dando um grau maior de veracidade. Tanto na área de entretenimento quanto na área de pesquisa tecnológica e militar.
- Agentes em realidade virtual: nessas aplicações o agente atua como um participante que auxilia e monitora certas atividades e usuários,

- assistindo-os ou ajudando-os quando necessário, principalmente em ambientes virtuais muito complexos.
- Agentes na prestação de serviços: nesse contexto os agentes irão agregar valor a certos serviços, gerenciando a informação a fim de satisfazer as necessidades dos clientes. Podemos citar, por exemplo:
 - manutenção e atualização de bases de dados explorando a informação
 - comércio eletrônico, onde agentes procuram preços mais convenientes ou ofertas e produtos com as especificações desejadas pelo usuário;
 - gerência de correio eletrônico e filtrações de mensagens, funcionando como um assistente pessoal;
 - Agentes em redes de computadores: as suas funções nessas aplicações variam muito. Varia desde a definição de melhores rotas, controle de manutenção de equipamentos, gerenciamento de dados até o monitoramento de atividades e gerência da própria rede.

3 CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO QUÍMICA

Neste capítulo descreve-se de forma geral o processo Kraft com a finalidade de entender melhor a importância da Caldeira de Recuperação dentro do processo de celulose. Em seguida apresenta-se a caldeira de recuperação química, a sua operação e suas variáveis de operação mais relevantes.

3.1 Histórico do Processo Kraft

Historicamente, o cozimento alcalino teve início em 1854, através do processo de soda. Em 1884, foi patenteado o processo Kraft que, nada mais é do que uma modificação no processo da soda, utilizado comercialmente, pela primeira vez em 1885 na Suécia, tomando impulso a partir de 1930 e predominando no mercado até os dias atuais. A palavra “Kraft” é de origem sueca e alemã que significa “força” (resistência).

O processo Kraft consiste em atuar sobre a madeira na forma de cavacos com uma combinação dois reagentes químicos: hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), obtendo-se como resultado a dissolução da lignina e a liberação das fibras. As fibras liberadas constituem a “celulose” marrom ou massa marrom.

O processo pode ser exemplificado de maneira simplificada através da seguinte equação:

Madeira (fibras + lignina) + reagentes químicos = “celulose” + lignina solúvel.

Utilizando-se a terminologia de uso corrente na indústria, a equação torna-se:

Madeira + licor branco ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$) = “Celulose” + licor negro

O processo de obtenção de celulose apresenta um subproduto, denominado “licor negro”, o qual contém parte da madeira dissolvida (lignina), combinada com reagentes químicos utilizados no início do processo. Por razões econômicas e ambientais, é absolutamente necessário o reaproveitamento do licor negro num processo denominado Recuperação de Produtos Químicos.

A recuperação consiste em queimar o licor negro previamente concentrado acima 60% de sólidos e enriquecido em sulfato de sódio Na_2SO_4 .

Os fundidos, após a dissolução e um tratamento adequado, transformam-se em licor, contendo reagentes químicos idênticos aos utilizados no início do processo.

O processo Kraft tem como principal vantagem o sistema de recuperação dos produtos químicos associado a ele. Por outro lado, as desvantagens deste processo são: alto custo de implantação, odor dos gases resultantes do processo, baixa alvura após cozimento em relação a outros processos como o sulfito, por exemplo, baixo rendimento (40 a 50%) e alto custo de branqueamento.

Após a lavagem da massa marrom, ocorrem as etapas de pré-branqueamento e branqueamento, onde se faz uso de insumos como oxigênio, ozônio, peróxido de hidrogênio e dióxido de cloro para que possa obter, finalmente, a celulose branqueada.

3.2 Unidade de Recuperação e Utilidades

A fábrica de processo “Kraft” tem duas macro unidades. Veja a Figura 2. A primeira é responsável por se obter a polpa celulósica. A segunda, da qual faz

parte a caldeira de recuperação química, é a de recuperação e utilidade, cujos objetivos são: recuperar e regenerar os agentes químicos para se obter a polpa (Na_2S e NaOH); fornecer água, vapor, energia elétrica e ar comprimido para os processos em geral; e tratar os efluentes.

Figura 2: Unidade de recuperação e de Utilidades do processo “Kraft” de produção de celulose.

O combustível de caldeiras de recuperação química é o licor residual oriundo dos processos de obtenção e de lavagem da polpa celulósica. Este licor contém água, material orgânico (principalmente lignina) e material inorgânico (principalmente sais de sódio). A proporção mássica entre elas e a composição química de cada material são funções da qualidade da madeira e das condições de polpação. Por apresentar, teor considerável de inorgânico, acima de 1/3 do total de sólidos (orgânicos mais inorgânicos), baixo poder calorífico, e percentual mássico de água por volta de 75,0%, não é possível queimar o licor sem antes concentrá-lo acima de 60% de sólidos. A faixa usual em fábricas é entre 65 e 80% e a viscosidade do licor é a restrição para não se operar com um percentual maior.

O objetivo de caldeiras de combustível fóssil é gerar vapor. O principal objetivo de caldeiras de recuperação química é recuperar os inorgânicos do licor. Daí a denominação de caldeira de recuperação química. As outras funções são gerar o vapor, ao aproveitar o calor dos gases de combustão do licor, e reduzir o nível de emissões. Parte da energia do vapor produzido na caldeira abastece as diferentes etapas do processo de celulose e a maior parte é utilizada para gerar energia elétrica, via turbo gerador. A recuperação dos inorgânicos é por meio de bicas, pela parte inferior do equipamento. Os componentes inorgânicos no fundido são basicamente sulfeto de sódio (Na_2S) e carbonato de sódio (Na_2CO_3). O destino destes inorgânicos é o tanque dissolvedor. A regeneração do hidróxido de sódio (NaOH) a partir do carbonato de sódio ocorre na etapa de caustificação. Deste modo, tem-se o fechamento do ciclo do licor. Este ciclo se encerra com a obtenção a partir do licor residual do subproduto das operações de obtenção e lavagem da polpa celulósica, e também dos agentes químicos (Na_2S e NaOH) para a etapa de cozimento dos cavacos de madeira.

3.3 Descrição da Caldeira

O funcionamento da caldeira de recuperação de licor negro é muito complexo. Essa complexidade dá-se devido à sua dupla função de reator químico e gerador de vapor para produção de energia elétrica para outras partes do processo. Vários processos físico-químicos acontecem simultaneamente na caldeira, como:

- injeção e mistura de ar com os gases da caldeira;
- pulverização do licor negro e formação de gotas;
- secagem das gotas de licor;
- decomposição do licor e combustão dos gases de pirólise;

- gaseificação e combustão dos resíduos carbonizados;
- redução dos compostos de enxofre a sulfetos;
- deposição dos fundidos no fundo da caldeira (leito carbonizado).

O equipamento da caldeira de recuperação é dividido em duas partes: a fornalha e os equipamentos para troca térmica entre os gases de combustão e água líquida e vapor, como mostrado na Figura 3. A primeira, localizada na parte inferior da caldeira, é responsável pela combustão da matéria orgânica contida no licor e, a segunda pela produção de vapor superaquecido. O nariz da caldeira é a demarcação entre essas duas partes, conforme pode ser visualizado na Figura 3. Esse nariz serve para proteger o superaquecedor das radiações incidentes da parte inferior e reduzir as taxas de corrosão desse equipamento. Após a caldeira de recuperação, têm-se o precipitador eletrostático e a chaminé.

Figura 3: Representação esquemática de uma caldeira de Recuperação (ADAMS et al., 1997).

A parte inferior da caldeira consiste em uma fornalha vertical, completamente resfriada à água por um arranjo de tubos, no fundo e nas paredes, ligados ao sistema de circulação de água, onde o licor negro é queimado como combustível.

O licor negro proveniente dos evaporadores flui para um tanque de mistura, onde se adicionam e misturam as cinzas provenientes do precipitador eletrostático e onde se faz reposição de químicos ao licor negro, caso seja necessário. A quantidade adicionada de cinzas é igual a todo o conteúdo

proveniente dos precipitadores eletrostáticos, sendo as reposições de compostos inorgânicos feitas conforme as perdas no processo da fábrica.

O licor negro com aproximadamente 65 % de sólidos secos é pulverizado na caldeira através de bicos ejetores, Figura 4. O ângulo do bico aspersor determina a trajetória do licor dentro da caldeira e governa o contato entre o licor e o ar de combustão. São utilizados entre 1 e 16 bicos ejetores, sendo localizados aproximadamente a 5 m do fundo da caldeira. A viscosidade do licor é uma função da composição, temperatura, das condições de operação e também da taxa de cisalhamento. A viscosidade do licor negro aumenta com o aumento da concentração de sólidos e com a diminuição da temperatura. No espalhamento, a viscosidade pode ser controlada, mantendo-se a pressão e temperatura do licor negro dentro dos valores normais das operações de bombeamento e espalhamento. Ao controlar o espalhamento do licor durante mudanças na sua qualidade e na carga (tonelada de sólidos secos queimado por dia) da caldeira, os operadores têm três ferramentas para criar um padrão ótimo de espalhamento: a temperatura e pressão do licor negro, e o ângulo da lança.

Figura 4: Bico ejetor de licor negro na caldeira de recuperação (ADAMS et al., 1997) (Fotos Tacla, 2001).

As gotas que são formadas sofrem os processos de secagem, pirólise, gaseificação, combustão e redução dentro de regiões distintas da caldeira. A taxa na qual esses processos físicos e químicos ocorrem são altamente dependentes do tamanho e da distribuição das gotas formadas pela pulverização. Normalmente as gotas possuem um diâmetro entre 0,5 a 5 mm.

As gotas pequenas possuem uma maior área superficial por unidade de massa de licor e assim uma maior taxa de transferência de calor e massa, sofrendo então, uma rápida secagem e combustão. Porém, essas partículas são facilmente arrastadas pelos gases. Um resultado inevitável é a aceleração da incrustação, um relativo resfriamento dos tubos da caldeira e uma rápida perda de eficiência da troca térmica.

Por outro lado, as gotas grandes podem cair ainda úmidas no leito carbonizado (“char bed”) causando o resfriamento da camada. Este fato resulta em perda de eficiência para a combustão além de risco de explosão por causa do contato entre o fundido a alta temperatura e a água contida no licor (EMPIE *et al*, 1995). Na região de secagem e pirólise, localizada ao redor da pulverização do licor, ocorre a evaporação da água e a pirólise dos compostos orgânicos, lignina, presentes no licor. São formados então, os gases de combustão, H_2 , CO , CH_4 , CO_2 e outros, e sólidos particulados que constituirão o leito carbonizado, mistura de compostos inorgânicos de sódio (Na_2CO_3 , Na_2S , Na_2SO_4 , etc) e carbono fixo. Os produtos voláteis das reações de pirólise são oxidados na região de oxidação, acima da região de secagem e pirólise (ALMEIDA, 2003).

Durante a fase de secagem grande parte da água, ou toda ela, presente nas gotas de licor é evaporada. Durante este estágio as gotas de licor sofrem um pequeno aumento no seu diâmetro e após a secagem, aumentam de tamanho rapidamente. Esse aumento de tamanho deve-se a formação de gases voláteis durante a combustão do licor e afeta as taxas de desvolatilização e queima do carbono. Neste estágio, uma chama amarela brilhante aparece em torno dessa gota, como pode ser visto na Figura 4. Após a liberação dos voláteis o licor contém principalmente carbono e sais de sódio. Em seguida, no leito carbonizado, o carbono é rapidamente queimado na superfície provocando uma diminuição do tamanho da gota. No final da queima do carbono, o enxofre é completamente reduzido restando principalmente Na_2S e Na_2CO_3 (fundidos). Os fumos são liberados no final do estágio de queima do carbono (FREDERICK *et al.*, 1991). Esta sequência de transformações durante a combustão do licor negro pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5: Etapas na combustão do licor negro. (HUPA et al., 1987)

Dois processos importantes, a combustão do carbono e a redução das formas oxidadas do enxofre, acontecem simultaneamente no leito carbonizado, região de redução, como descrito anteriormente. O leito carbonizado é constituído de uma parte quente, com queima ativa, sobre uma superfície fria e inativa. O tamanho e a forma do leito carbonizado são determinados pelo projeto da caldeira, técnica de combustão, entrada de ar e propriedades de combustão do licor negro. A altura do leito é usualmente limitada pelo ar secundário. O material que atinge o leito carbonizado é parcialmente seco, pirolizado e os sólidos do licor queimados. (Ver Figura 6)

Figura 6: Leito carbonizado na parte inferior da caldeira.
(Fonte: Tacla, 2001).

O fundido deixa a caldeira por bicas e cai em um tanque de dissolução, onde é dissolvido com licor branco, formando licor verde, que posteriormente segue para a etapa de caustificação.

Em um processo ideal todos os compostos de enxofre e sódio seriam transformados em sulfeto de sódio (Na_2S) e carbonato de sódio (Na_2CO_3), porém em uma caldeira de recuperação real o enxofre e o sódio são convertidos também em sulfato (Na_2SO_4). Além disso, uma parte substancial do enxofre e do sódio é arrastada pelos gases de combustão para a chaminé da caldeira, principalmente na forma de cinzas e gases contendo enxofre. Esses compostos são a causa de vários problemas, tais como deposição de fuligens nas superfícies de transferência de calor e corrosão (ADAMS et al., 1997).

Em termos cinéticos o desempenho da caldeira de recuperação é quantificado pela eficiência de redução, ou grau de redução, que fornece informações sobre a composição dos fundidos. A eficiência de redução é definida como a relação entre a quantidade de sulfeto de sódio e quantidade total de enxofre.

O ar de combustão entra na caldeira por dutos e janelas de vento conectados à caldeira. O fluxo de ar na caldeira é distribuído normalmente em três níveis, existe uma tendência em se utilizar quatro níveis para adicionar flexibilidade na distribuição de ar. Tipicamente 65 % a 85 % do ar de combustão é introduzido

abaixo dos ejetores de licor negro. As duas principais finalidades dos três estágios são assegurar a combustão completa dentro da fornalha e manter o controle de emissão de gases tóxicos, que são de importância ambiental primária na indústria de papel e celulose.

O ar primário é alimentado na caldeira a uma altura de aproximadamente 1 m acima do assoalho, sendo as entradas de ar menores e mais numerosas do que as dos demais níveis. O ar é inserido por aproximadamente 35 entradas em cada parede da caldeira. Esse ar é utilizado para controlar a forma e a posição do perímetro do leito carbonizado e fornecer oxigênio para a combustão do material carbonizado.

A entrada de ar secundário é geralmente maior e menos numerosa do que a primária, de 4 a 16 entradas para cada parede. O ar secundário é localizado a aproximadamente 2 m acima do assoalho. O ar secundário controla a altura do leito carbonizado e é responsável pela secagem, pela pirólise do licor e conseqüentemente pelo aumento da temperatura na parte inferior da caldeira.

O ar terciário é usualmente localizado acima dos bicos ejetores de licor negro a 8 m do fundo da caldeira (Ver Figura 7). Geralmente a entrada de ar terciário é maior do que as demais e é dividida em apenas duas paredes, entre 3 e 8 entradas em cada parede. O ar terciário é responsável por completar o processo de combustão, promover a mistura final dos gases de combustão, queimar quaisquer gases reduzidos de enxofre e conseqüentemente minimizar as emissões (ADAMS et al., 1997).

Figura 7: Entradas de ar na caldeira..
(Fonte: Tacla, 2001).

A parte superior da caldeira é dividida em economizadores, balões de água e vapor, bancada de tubos (convector), superaquecedores e pode incluir uma cortina de tubos (cortina d'água) (Ver Figura 8). O fluxo de gases gerados na parte inferior da caldeira passa por estes equipamentos seguindo então para o precipitador eletrostático e para a chaminé, sendo então dispersos na atmosfera.

O fluxo convectivo nessa seção da caldeira geralmente envolve fluxo em contracorrente dos gases de combustão com a água, podendo ser co-corrente em algumas partes do superaquecedor (ADAMS et al., 1997).

Figura 8: Parte superior da Caldeira.
(Fonte: Tacla, 2001).

A água inicialmente tratada é alimentada aos economizadores, onde é aquecida até uma temperatura próxima de ebulição, seguindo então para o balão de vapor. Através da bancada de tubos, é conduzida ao balão de água e segue para os feixes tubulares localizados nas paredes da fornalha, onde recebe calor por radiação para formação de vapor saturado, retornando em fluxo ascendente até o balão de vapor. O vapor saturado segue para a cortina de tubos que tem como função principal, proteger o conjunto de superaquecedores das radiações emanadas da fornalha.

Após a cortina de tubos tem-se o conjunto de superaquecedores, onde a temperatura do vapor saturado é aumentada até atingir a temperatura final superaquecida. A absorção de calor nos superaquecedores é fortemente influenciada pela uniformidade das condições dos gases que passam por eles.

Diferenças na uniformidade, velocidade ou temperatura dos gases reduzem a absorção de calor, causando baixa temperatura de saída do vapor e ou excessiva temperatura dos gases na seção de bancada de tubos. Após a passagem do vapor pelo conjunto de superaquecedores, obtém-se um vapor superaquecido com uma temperatura na faixa de 350 a 450°C dependendo da pressão de operação da caldeira, que pode variar de 40 a 65 Kg_f/cm². O vapor gerado alimenta as turbinas geradoras de energia elétrica e equipamentos de troca de calor tais como nas operações de polpação, branqueamento, secagem, entre outras (ALMEIDA, 2003). O desempenho da troca térmica e geração de vapor são medidos pela eficiência térmica, que é a razão entre a energia gasta para produzir o vapor e a energia liberada pela queima total do combustível utilizado, neste caso licor negro.

Os gases de combustão, formados na queima do licor, fluem para a parte superior da caldeira através do uso de exaustores. Os gases da fornalha passam através dos superaquecedores e entram no convector onde passam paralelamente de forma descendente. Os defletores direcionam os gases de volta para cima e para dentro do primeiro economizador. Novamente, os gases descem paralelamente aos tubos. De modo semelhante, um sistema de defletores repete o percurso através do segundo economizador. Estas mudanças de direção do gás facilitam a precipitação de partículas pesadas dentro dos silos coletores antes que os gases deixem a caldeira e entrem nos precipitadores.

Os gases produzidos na parte inferior da caldeira de recuperação geralmente arrastam material particulado para a parte superior. Assim, para impedir a perda de substâncias químicas importantes para o processo e evitar a poluição ambiental, utilizam-se precipitadores eletrostáticos, que são os equipamentos mais adotados para coletar as partículas arrastadas e retornar ao sistema os sais nela contido, principalmente o sulfato de sódio (Ver Figura 9). Os gases seguem então para a chaminé, onde são dispersos.

Figura 9: Precipitadores Eletrostáticos.
(Fonte: Tacla, 2001).

A precipitação eletrostática de partículas ocorre através de um eletrodo de descarga carregado negativamente, situado perto de outro positivo ligado a terra, chamado eletrodo coletor, de forma esférica ou de placa plana. Entre os dois eletrodos, por onde passam os gases arrastando partículas, aspirados por ventilador, está aplicada uma diferença de potencial de 50.000 a 100.000 volts. A precipitação ocorre em três etapas:

- fornecimento de carga negativa às partículas arrastadas pelo gás por meio de íons gasosos ou elétrons;
- transporte das partículas carregadas através do gás para o eletrodo coletor;
- descarga das partículas e remoção do material precipitado.

As partículas dispersas nos gases de combustão podem ser classificadas em três tipos: partículas pesadas (contendo carbono e cinzas), partículas fundidas (formadas na zona de combustão por gotas de licor arrastadas) e partículas

muito pequenas (geradas por condensação de compostos) (SATURNINO, 2003).

Os gases de combustão arrastam as cinzas dos diferentes compostos químicos, formados no processo de queima do licor, que aderem nas superfícies de aquecimento da caldeira. As taxas de transferência de calor vão reduzindo-se gradualmente, afetando a operação da caldeira de vários modos. A eficiência calorífica diminui, a temperatura de saída dos gases de combustão aumenta a carga da caldeira, e muitas outras variáveis ficam desequilibradas. Assim, os sopradores de fuligem operam para manter as taxas corretas de absorção de calor das superfícies aquecidas, mantendo-as limpas. A sopragem de fuligem deve ser feita com a quantidade mínima necessária de vapor, e somente quando necessário. Em alguns casos, um sistema de controle lógico programável guia as seqüências automáticas de sopragem de fuligem.

3.4 A Influência das Variáveis Operacionais no Desempenho da Caldeira

Como já foi mencionado anteriormente, as variáveis do desempenho que quantificam o desempenho da caldeira são: a quantidade de vapor produzido, as emissões atmosféricas, avaliadas pelas quantidades de H_2S e SO_2 presentes nos gases de chaminé e o grau ou eficiência de redução. Destas três variáveis analisaremos duas que estão relacionadas com o comportamento dos agentes. Com o intuito de facilitar a determinação das variáveis operacionais que possuem influência sobre tais variáveis do desempenho, fez-se, neste sub-capítulo, uma revisão bibliográfica sobre cada uma destas variáveis.

3.4.1 Produção de Vapor

A eficiência térmica da caldeira é um dos fatores usado para avaliar o desempenho de tal equipamento. Quanto maior a eficiência térmica, maior é a

quantidade de vapor gerado, que é um dos objetivos da caldeira de recuperação.

A produção de vapor na caldeira depende de vários fatores envolvidos na sua operação. A capacidade da caldeira (quantidade de combustível que a caldeira é capaz de processar), por exemplo, é um parâmetro que determina sua geração. O teor de sólidos secos presente no licor, também determina a geração de vapor, pois a água presente no licor diminui a eficiência térmica da caldeira. O calor liberado na combustão em vez de ser direcionado para geração de vapor e para as reações de redução é consumido na secagem do licor, diminuindo sua eficiência térmica.

De acordo com operadores de caldeiras a pressão do balão de vapor também possui uma influência importante sobre a vazão de vapor. A pressão do balão é controlada pela necessidade de vapor para a fábrica e para a turbina. Todo vapor produzido pelas caldeiras é direcionado para um coletor geral. Quando o coletor geral de vapor necessita de mais vapor, ele retira vapor das caldeiras, que conseqüentemente necessitam de maior quantidade de água de alimentação, o que faz a pressão do balão aumentar.

O menor excesso de ar, a baixa sulfidez do licor e a baixa temperatura dos gases na saída do economizador podem aumentar a taxa de energia destinada à produção de vapor. Quando a fração de ar alimentada na parte inferior da caldeira é menor do que a estequiométrica, somente uma parte do licor é incinerada liberando uma menor quantidade de calor. Porém, valores elevados de ar em excesso, também, reduzem a eficiência térmica da caldeira, diminuindo a geração total de vapor (LEFEBVRE; SANTYR, 1989). O ideal é a caldeira operar com uma quantidade de excesso de ar de aproximadamente 20 %, o que permite uma combustão completa do licor favorecendo uma boa eficiência térmica da caldeira (ADAMS et al., 1997).

3.4.2 Eficiência de Redução

A eficiência de redução dentro de uma caldeira operando adequadamente está próxima de 95 % e fornece uma medida efetiva da redução, ou em outras palavras é um parâmetro que quantifica o tanto de sulfato de sódio que é reduzido a sulfeto de sódio. É desejável atingir o mais alto grau de redução possível, uma vez que o Na_2S é ativo no cozimento enquanto que o sulfato de sódio não o é. A eficiência de redução depende da temperatura no fundo da fornalha (leito), bem como das quantidades adicionadas de ar e sua distribuição.

A redução do sulfato no leito pode ser maximizada pelo ajuste das condições de queima. Uma importante consideração para se obter altos níveis de redução é operar a fornalha em temperaturas mais elevadas e fazer com que a distribuição dos ares seja adequada, permitindo que o excesso de oxigênio seja feito de forma apropriada. Portanto, a vazão de ar total deve ser compatível com a vazão de licor de modo a promover a combustão com eficiência. (TRAN et al., 1986) fizeram um estudo sobre a relação entre a vazão de ar e de sólidos no licor para caldeiras do Canadá e observaram uma tendência à linearidade entre essas vazões.

Normalmente, trabalha-se com excesso de oxigênio no ar para garantir a combustão completa. Um aumento no fluxo de O_2 aumenta a taxa de queima no leito carbonizado, aumentando a temperatura e a taxa de redução do sulfato e carbonato (ADAMS et al., 1997). Porém, quanto ao aspecto cinético, ao aumentar a concentração de oxigênio atinge-se um patamar crítico, porque o carbono possui uma maior tendência de reagir com o oxigênio do ar do que com o oxigênio presente no sulfato de sódio. Portanto, uma quantidade muito elevada de ar diminui a eficiência de redução. Por outro lado, a baixa presença de oxigênio retarda a pirólise do licor, aumentando o nível de acúmulo de carvão no leito, e decrescendo a temperatura do mesmo. O efeito do ar na parte inferior da caldeira sobre a eficiência de redução pode ser observado na Figura 10 (LEFEBVRE; SANTYR, 1989).

Outro mecanismo de queima do carbono é através da redução do Na_2CO_3 pelo carbono, produzindo vapor de sódio, CO e CO_2 . Essa reação é a principal fonte de fumos na caldeira de recuperação. Assim, a combustão do carbono, a redução do sulfato e a geração de fumos são controladas pela estrutura do leito e pela transferência de calor e oxidantes (O_2 , CO_2 e vapor de água) para a superfície do leito através dos jatos de ar (ADAMS et al., 1997).

Figura 10: Efeito do ar da parte inferior da fornalha sobre a eficiência de redução (LEFEBVRE; SANTYR, 1989).

A temperatura do leito afeta a eficiência de redução, devendo estar ao redor do ponto de fusão dos inorgânicos presentes no leito, na faixa de 790-830°C. Temperaturas inferiores a essa faixa no leito diminuem a eficiência de redução, aumentam a produção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e dióxido de enxofre (SO_2), além de promover a instabilidade do leito. Por outro lado temperaturas muito altas aumentam a produção de fumos de sódio, que se transformam em sulfato de sódio (Na_2SO_4) e em carbonato de sódio (Na_2CO_3), presentes nas cinzas. Quanto maior a proporção de carbonato nas cinzas, menor é o ponto de fusão das mesmas e maior o potencial de incrustação e obstrução de passagem de gases nos tubos (LEFEBVRE; SANTYR, 1989).

O formato e a textura do leito são usados como indicadores visuais das temperaturas relativas do leito. Temperaturas excessivamente altas produzirão uma camada de “smelt” com uma chama brilhante na cor branca, enquanto que em temperaturas mais baixas o leito torna-se alto com uma chama menos quente na cor laranja opaco. Os principais fatores que afetam essas temperaturas são: (i) conteúdo de sólidos secos; (ii) valor de aquecimento de sólidos secos; (iii) fluxo de licor negro; (iv) temperatura do ar; (v) distribuição do ar; (vi) quantidade de combustível auxiliar.

As variáveis listadas anteriormente contribuirão para a elevação da temperatura da fornalha devido ao: (i) aumento do conteúdo de sólidos secos; (ii) aumento do valor de aquecimento dos sólidos secos; (iii) aumento do fluxo de licor negro; (iv) aumento da temperatura do ar; (v) mudanças na distribuição de ar. Dependendo da carga real e do combustível disponível, a temperatura da fornalha também pode diminuir devido ao aumento do combustível auxiliar.

Entre essas variáveis, o operador pode controlar apenas algumas:

- fluxo de licor;
- temperatura do ar;
- distribuição do ar;
- quantidade de combustível auxiliar.

Segundo Lefebvre e Santyr (1989), a faixa ótima para promover a redução química e minimizar a emissão de gases é de aproximadamente 980-1150°C na superfície do leito. A Figura 11 mostra o efeito da temperatura do leito sobre a eficiência de redução e emissões.

Figura 11: Efeito da temperatura do leito sobre a eficiência de redução e emissões (LEFEBVRE; SANTYR, 1989).

Hyoty e Ojala (1988) constataram uma elevação na eficiência de redução da caldeira, de 1,0 a 2,0 %, com o aumento da concentração de sólidos no licor alimentado. Isso se deve ao acréscimo na temperatura do leito carbonizado, “char bed”, (de 70°C) e na temperatura do fundido ou “smelt”, (40°C) que implica em um aumento das taxas de redução dos compostos inorgânicos. Observaram-se também, um aumento da porcentagem de Na₂CO₃ nas cinzas com o aumento da porcentagem de sólidos no licor negro de 75 a 80 %. Esse aumento foi observado, também, por Björklund *et al.* (1991) e por Jones e Anderson (1993). Assim, o aumento do teor de carbonato nas cinzas é um bom indicativo do aumento da temperatura no leito carbonizado.

4 MODELAGEM DINÂMICA DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

4.1 Histórico

Galtung e Williams (1971) desenvolveram um dos primeiros modelos de caldeiras de recuperação química. O trabalho deles proporcionou um modelo completo de engenharia de combustão na caldeira de recuperação, que levava em consideração balanços de massa e de energia. O modelo divide o forno em zonas de mistura perfeitas incluindo: Tanque de dissolução de sais, aquecedor de licor negro, bicos ejetores de licor, leito de carbono, zonas de ar (primário, secundário, terciário), superaquecedores, gerador de vapor e economizador. O modelo inclui balanços dinâmicos de massa e de energia para o leito de carbono e para as seções de gás. Uma fraqueza do modelo é o fato de que este assume um valor fixo para a temperatura de smelt saindo da caldeira, ao invés de calcular a temperatura baseado nos princípios básicos. O trabalho deles foi complementado por Karnienny (1979) incluindo o modelo de caldeira de recuperação Babcock e Wilcox (B&W).

Bhada et al. (1972) desenvolveram um modelo de caldeira de recuperação que prediz os níveis de formação de fumaça química e emissão de dióxido de enxofre. O modelo tratou o leito de carbono como uma única zona bem misturada e a composição de smelt foi determinada por considerações de equilíbrio. Merriam (1980) desenvolveu um modelo em estado estacionário mássico e balanços de energia em uma Caldeira de recuperação Kraft para investigar os fatores afetando a redução de sódio e sais sulfúricos no leito de carbono da caldeira de recuperação. O modelo dividiu a caldeira em sete zonas perfeitamente misturadas que levam em conta o leito de carbono e a combustão do licor, mas não incluiu o superaquecedor, gerador de vapor e a seção de economizadores.

Nos últimos anos um grande esforço foi feito para o desenvolvimento de modelos de caldeiras de recuperação baseados em Computational Fluid Dynamics (CFD) para melhorar as operações de recuperação e modelagem de caldeiras. Tais modelos são computacionalmente intensivos na medida em que eles tentam descrever um processo tridimensional através de condições turbulentas com assimetrias geométricas, instabilidade de fluxos e interação de jatos de licor que complicam a dinâmica e a convergência de uma solução numérica. Entretanto, tanto o desenvolvimento de mecanismos de um modelo de caldeiras de recuperação química continua sendo um desafio.

Existem também plataformas de simulação dinâmica, como o software CADSIM Plus, que permitem ao usuário desenhar processos químicos e executar balanços de energia e de massa de forma fácil e eficiente. O CADSIM Plus pode ser utilizado para resolver problemas de gargalos no processo, rastrear problemas na qualidade do processo e implementar estratégias de controle com a finalidade de aumentar a eficiência no processo.

4.2 Modelo Implementado

O modelo implementado está baseado na caldeira de recuperação Babcock e Wilcox (B&W) desenvolvido por Galtung e Williams (1971) e complementado por Karnienny (1979) (Apendice A). Devido à data de desenvolvimento deste modelo, existem muitos estudos que não foram considerados. Os estudos mais relevantes nos últimos anos foram compilados por Adams et al. (1997) no livro “Kraft Recovery Boilers”. Os artigos citados neste livro foram estudados para complementar o modelo de Karnienny e dar forma ao modelo final. A Figura 12 mostra o esquema do diagrama que será utilizado na simulação. Nele estão representadas todas as interações entre as diferentes partes da caldeira. A seguir analisaremos as mais importantes equações de cada módulo da caldeira.

Figura 12: Diagrama do processo utilizado na simulação

4.2.1 Licor Negro

O licor negro proveniente da área de evaporação é considerado como a soma dos seguintes componentes:

- Sólidos de entrada (X_{bls}): Sólidos obtidos a partir da madeira dissolvida e do processo no digestor.
- Mistura de sais ($X_{Na_2SO_4}$): Sulfato de Sódio adicionado no licor.
- Carbonato ($X_{Na_2CO_3}$): Carbonato de sódio adicionado ao licor no precipitador e evaporador.
- Água: A água é removida do evaporador, e parte é adicionada durante o aquecimento do licor negro.

A soma das frações parciais do licor negro de ser igual a 1:

$$X_{bls} + X_{Na_2SO_4} + X_{Na_2CO_3} + X_{blw} = 1 \quad (4.1)$$

Os sólidos de entrada são decompostos nos seguintes componentes: Hidrogênio ($X_H^{(bl)}$), Sulfato de sódio ($X_{Na_2S}^{(bl)}$), Oxigênio ($X_O^{(bl)}$), Carbono ($X_C^{(bl)}$), Sódio ($X_{Na}^{(bl)}$), Enxofre ($X_S^{(bl)}$), sendo:

$$X_H^{(bl)} + X_{Na_2S}^{(bl)} + X_O^{(bl)} + X_C^{(bl)} + X_{Na}^{(bl)} + X_S^{(bl)} = 1 \quad (4.2)$$

4.2.2 Aquecedor do Licor

O aquecedor é utilizado para elevar a temperatura do licor negro. O aquecedor primário encontra-se no tanque de mistura, e o aquecedor secundário, entre o tanque de mistura e os injetores. Do balanço de energia podemos calcular a quantidade necessária de vapor para levar a temperatura do licor ao setpoint.

Balanço de Energia:

$$T_{bl}^{(h)} = \frac{1}{w_{bl}^{(h)} c_{pbl}} (w_{bl}^{(mt)} c_{pbl}) (T_{bl}^{(mt)} - 80) + w_{st}^{(h)} (H_{st}^{(h)} + c_{pw} (T_{st}^{(h)} - 80)) + 80 \quad (4.3)$$

T_{st} é a temperatura de saturação para o aquecedor, e H_{st} é o calor de vaporização na temperatura T_{st} .

$$w_{st}^{(h)} = \frac{1}{H_{st}^{(h)} + c_{pw} (T_{st}^{(h)} - T_{bl}^{(h)})} [w_{bl}^{(mt)} c_{pbl} (T_{bl}^{(h)} - T_{bl}^{(mt)})] \quad (4.4)$$

A capacidade calorífica do licor negro foi calculada utilizando a seguinte equação (ADAMS et al., 1997)

$$Cp_{bl} = (1 - S) Cp_w + (S) Cp_s + Cp_E \quad (4.5)$$

onde a capacidade calorífica dos sólidos secos (Cp_s) depende da temperatura do licor e a capacidade calorífica em excesso (Cp_E) depende da temperatura do licor e da fração de sólidos no licor.

$$Cp_s = 1684 + 4.47 T \quad \pm 8\%, T [C]$$

$$Cp_E = (4930 - 29 T)(1 - S)(S)^{3.2} \quad (4.6)$$

4.2.3 Aspersão e Injetor de Licor

No presente modelo do equipamento de Babcox & Wilcox, o licor entra na caldeira na altura de 34 ft, logo acima do leito de carvão e fundidos, e abaixo dos primeiros bicos de ar secundário. Neste modelo antigo, a aspersão, é feita em bicos oscilantes com pratos que espalham o líquido em uma parte direcionada a parede e outra parte direcionada ao chão do leito. Naturalmente espera-se que a maior parte da água tenha evaporado até atingir os alvos. Para calcular a fração

da aspersão η_1 foi necessário conhecer o diâmetro médio das gotas de licor que saem dos injetores. Para calcular o diâmetro de gotas foi utilizada a seguinte correlação (ADAMS et al., 1997). Está claro que desde o ponto de vista teórico, que o diâmetro médio das gotas de licor saindo dos injetores varia com as propriedades do licor. Analisando a correlação o diâmetro médio é mais sensível ao tamanho do orifício e a velocidade na saída do injetor, ainda que para ambos o expoente é consideravelmente menor que 1.

$$D_{media} = 1.88 \frac{\sigma^{0.236} \mu^{0.099} D_n^{0.653}}{\rho_l^{0.212} V_n^{0.552}} \text{ onde,} \quad (4.7)$$

a tensão superficial é igual a $\sigma = 0.08$ (N/m), a viscosidade do licor (μ) depende da viscosidade da água, da temperatura do licor e da fração de sólidos secos. (ADAMS et al., 1997)

$$\text{Log} \left(\frac{\mu_{bl}}{\mu_w} \right) = \frac{\frac{ST^*}{T}}{0.679 - 0.656 \frac{ST^*}{T}} \quad T^* \text{ (Temperatura de referencia)} \quad (4.8)$$

$$\mu_w = \frac{1}{36.7T - 10090} \text{ para temperaturas de licor ente 333K e 473K.} \quad (4.9)$$

O diâmetro do injetor (D_n) utilizado no modelo foi de 0.023 metros.

A densidade do licor (ρ) depende da temperatura do licor negro e da fração de sólidos presentes no licor. (ADAMS et al., 1997).

$$\frac{\rho_T}{\rho_{25}} = 1 - 3.68 \times 10^{-4} (T - 25) - 1.94 \times 10^{-6} (T - 25)^2 \text{ para } T \text{ [C] onde,} \quad (4.10)$$

$$\rho_{25} = 997 + 649S \quad (4.11)$$

A velocidade do licor (V_n), (ADAMS et al., 1997)

$$V_n = \rho_l A_n C_D \sqrt{\frac{2(P_{RH}^o - P_v)}{\rho_l}} \quad (4.12)$$

onde as constantes consideradas foram:

Área do orifício de saída: $A_n = 0.0004[m^2]$

Coeficiente de descarga dos injetores. $C_d = 0.73$

Pressão na saída do orifício. $P_{RH}^o = 227000 [Pa]$

onde a pressão de vapor em equilíbrio com o licor foi estimada utilizando a equação de Clapeyron. A pressão de vapor depende da temperatura do licor e do ponto elevado de ebulição em [C]. Este último coeficiente depende da fração de sólidos no licor.

$$P_v = 101235 \exp\left\{-4879.3\left[\frac{1}{(T_l + 273)} - \frac{1}{(T_{EBP} + 273)}\right]\right\}$$

$$T_{EBP} = 50 S^{2.74} \quad (4.13)$$

Depois de calcular o diâmetro médio das gotas de licor que entram na fornalha, agora podemos calcular a fração de aspensão ou “*Entrainment*”.

Para calcular esta fração utilizamos a equação de distribuição raiz quadrada-normal. O desvio padrão do diâmetro médio é uma função que depende só do diâmetro médio de gotas com um valor de 20% da raiz quadrada do diâmetro médio. (ADAMS et al., 1997).

$$\eta_1 = \int_{-\infty}^{N_{std}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{N_{std}^2}{2}\right\} dN_{std} \quad , \text{ onde} \quad (4.14)$$

$$N_{std} = \frac{\sqrt{\frac{D_d}{D_{medio}} - 1}}{0.2}$$

é o numero de desvios padrões tomando como referencia o diâmetro da gota. O diâmetro da gota utilizada como o tamanho de gota mínimo

para cair no leito foi: $D_d = 0.0027[m]$, com este diâmetro a fração de licor que não cai em direção ao leito fica entorno de 18%. No modelo foi utilizada a função (normcdf) de Matlab para calcular a integral da equação (4.14).

Portanto a quantidade do licor que é pulverizado e segue a corrente de gases, é dado por:

$$w_{bl}^{(pe)} = w_{bl}^{(sp)} \eta_1 \quad (4.15)$$

4.2.4 Leito (Paredes e Chão)

Hipóteses no Leito:

- A água presente no licor, ao alcançar a superfície do leito, evapora instantaneamente.
- Todo o sódio e enxofre presentes nos sólidos permanecem no leito e são levados juntamente com o smelt.
- O leito é considerado homogêneo (perfeitamente misturado).
- A taxa de reação é proporcional aos produtos da fração mássica do carbono e a um termo de Arrhenius.
- A eficiência na redução do smelt é determinada por um modelo de Bauer e Dorland.
- A deficiência de oxigênio no modelo de Bauer e Dorland é considerada igual ao valor teórico nas zonas primárias e secundárias.
- A temperatura no modelo de Bauer e Dorland é considerada igual a da temperatura superficial da camada do leito.
- A temperatura superficial da camada é determinada através de um balanço de energia para o leito total utilizando-se um pseudo volume.
- A densidade dos leitos é considerada constante.

As reações que ocorrem no leito estão esquematizadas na Figura 13.

Figura 13: Reações que ocorrem no Leito

Resumindo as equações utilizadas para o cálculo das propriedades do leito, são mostrados os cálculos principais: o balanço de energia para o cálculo da temperatura do leito e o método para calcular a eficiência de redução.

Evaporação da água do leito:

$$w_w^{(cs)} = w_{bl}^{(spc)} X_{blw}^{(spc)} \quad (4.16)$$

Balanço diferencial total, assumindo a densidade do leito constante:

$$\frac{d}{dt}(\rho V^{(cb)}) = w_{blts}^{(spc)} - w^{(cm)} \quad (4.17)$$

$$\frac{d}{dt}V^{(cb)} = \frac{1}{\rho}[(w_{blts}^{(spc)}) - w^{(cm)}]$$

onde a velocidade de reação é dada por:

$$w^{(cm)} = K_{cm} X_C^{(cb)} \exp\left(-\frac{\alpha_C}{T_C + 460}\right) \quad (4.18)$$

Oxigênio total requerido para a combustão:

$$w_0^{(1t)} = w_H^{(cm)} \left(\frac{M_O}{2M_H} \right) + w_C^{(cm)} \left(\frac{2M_0}{M_C} \right) \quad (4.19)$$

Disponibilidade de oxigênio no ar primário:

$$w_0^{(1)} = (w_a^{(1)} + w_{ia}^{(1)}) X_0^{(a1)} \quad (4.20)$$

Ar de combustão disponível na zona primária:

$$F^{(1)} = \frac{w_O^{(1)}}{w_O^{(1t)} - w_O^{(cm)}} \quad (4.21)$$

Concentração de oxigênio na zona primária:

$$\Delta = \frac{100(F^{(1)} - 1)C_{O_2}}{K_g^{(1)} + 100(F^{(1)} - 1)} \quad (4.22)$$

A eficiência de redução (η_r) é calculada utilizando o diagrama do modelo de Bauer e Dorland. (Figura 14), onde estão correlacionadas a temperatura do leito, a concentração de O_2 e a eficiência de redução. Para o cálculo da redução do leito (chão) a concentração de O_2 é calculada considerando a entrada de ar primário, para a redução do leito (parede) a concentração depende do ar secundário.

Figura 14: Diagrama para calcular a eficiência de redução na caldeira. Modelo de Bauer e Dorland

Para resolver o balanço de energia e obter a temperatura do leito, devemos calcular as seguintes energias de combustão:

Energia de combustão no leito que reage:

$$\dot{Q}_t^{(c)} = w^{(cm)} \left[X_{bls} H_{bls} - X_S H_S \eta_r - X_H H_{H_2O} \left(\frac{M_{H_2O}}{2M_H} \right) \right] \quad (4.23)$$

Energia de combustão liberada na zona primária e no leito

$$\dot{Q}^{(c1)} = \dot{Q}_t^{(c)} \left(\frac{w_0^{(1)} + w_O^{(cm)}}{w_0^{(1r)}} \right) \quad (4.24)$$

Energia de combustão liberada no leito:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_t \quad n^{(c)} \quad (4.25)$$

Energia de combustão liberada sobre o leito na zona primária:

$$\dot{Q}^{(1)} = \dot{Q}^{(c1)} - \dot{Q} \quad (4.26)$$

Calor proveniente do leito radiado para as paredes:

$$\dot{Q}_b^{(cb)} = AU_r \left((T_c + 460)^4 - (T_b + 460)^4 \right) \quad (4.27)$$

Balanco de Energia no Leito para calcular a temperatura do leito:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} T_c = & \frac{1}{\rho^{(cb)} V_p^{(cb)} \cdot c_p^{(cb)}} \left[\dot{Q}^{(cb)} + w_{bl}^{(spc)} (1 - X_{blw}^{(spc)} c_{pbls} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + \right. \\ & + w_{bl}^{(spc)} X_{blw}^{(spc)} \cdot ((c_{pw} - c_{pww}) (T_{bl}^{(sp)} - 80) - H_{H_2O}) + \\ & - \dot{Q}_b^{(cb)} - w_{sm}^{(cm)} (c_p^{(cb)} (T_{sm} - 80) + H_{sm}^{(cm)}) + \\ & \left. - (w^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) c_{pg}^{(cb)} (T_c - 80) - w^{(cm)} X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)} H_S \eta_r \right] \end{aligned} \quad (4.28)$$

4.2.5 Zona Primária e Secundária

Assume-se que toda a água que entra na caldeira é evaporada nas zonas primárias e secundárias, porém não ocorre combustão nestas zonas. A combustão ocorre apenas na zona terciária. As seguintes equações são válidas tanto na zona primária como secundária. Os balanços dos sólidos e gases estão descritos em seguida separadamente com todos os seus elementos.

Hidrogênio:

$$w_g^{(1)} X_H^{(g1)} = (w_a^{(1)} + w_{ia}^{(1)}) X_H^{(a1)} + w_H^{(cm)} + w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{2M_H}{M_{H_2O}} \right) \cdot r_1 + [w_{bl}^{(pe)} X_{bls}^{(sp)} X_H^{(blce)}] \cdot r_1$$

(4.29)

Oxigênio:

$$w_g^{(1)} \cdot X_O^{(g1)} = (w_a^{(1)} + w_{ia}^{(1)}) X_O^{(a1)} + w_O^{(cm)} + w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{M_O}{M_{H_2O}} \right) \cdot r_1 +$$

$$+ w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} X_O^{(blmt)} + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \cdot \left(\frac{4M_O}{M_{Na_2SO_4}} \right) + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{3M_O}{M_{Na_2CO_3}} \right) \right] \cdot r_1 \quad (4.30)$$

Enxofre:

$$w_g^{(1)} X_S^{(g1)} = w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} \left(X_S^{(blmt)} + X_{Na_2S}^{(blmt)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2S}} \right) \right) + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2SO_4}} \right) \right] \cdot r_1 \quad (4.31)$$

Carbono:

$$w_g^{(1)} X_C^{(g1)} = w_C^{(cm)} + w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} X_C^{(blmt)} + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \cdot \left(\frac{M_C}{M_{Na_2CO_3}} \right) \right] \cdot r_1 \quad (4.32)$$

$$\text{Sódio: } w_g^{(1)} X_{Na}^{(g1)} = w_{bl}^{(pe)} \cdot X_{Na}^{(sp)} \cdot r_1 \quad (4.33)$$

Nitrogênio:

$$w_g^{(1)} X_N^{(1)} = (w_a^{(1)} + w_{ia}^{(1)}) X_N^{(a1)} + [w_{bl}^{(pe)} X_{bls}^{(sp)} X_{in}^{(blmt)}] \cdot r_1 \quad (4.34)$$

Portanto a vazão de gases que irão da zona primária para a zona secundária:

$$w_g^{(1)} = w_g^{(1)} X_H^{(g1)} + w_g^{(1)} X_O^{(g1)} + w_g^{(1)} X_S^{(g1)} + w_g^{(1)} X_C^{(g1)} + w_g^{(1)} \cdot X_{Na}^{(g1)} + w_g^{(1)} X_N^{(g1)} \quad (4.35)$$

4.2.6 Zona Terciária

Na zona Terciária ocorre a formação do carbonato de sódio, sendo que se assume que o mesmo encontra-se todo na forma de cinzas. As cinzas irão cair no economizador e a partir disso serão recirculados até o tanque de mistura. O particulado chegará ao precipitador através do gás de conduto.

Hipóteses na Zona Terciária:

- A combustão ocorre na zona terciária.
- As condições na zona terciária determinam a composição final dos gases de combustão e do particulado.
- A formação do dióxido de enxofre, sulfeto de hidrogênio e monóxido de carbono é determinada principalmente pela quantidade de oxigênio em excesso e pela turbulência durante a injeção do ar de combustão na zona terciária.
- O carbono disponível no início do processo formará o dióxido de carbono.
- O hidrogênio presente formará a água.
- O nitrogênio passará por esta zona sem sofrer modificações.
- O oxigênio contribuirá para a formação do gás oxigênio.

A seguir, encontram-se o balanço de energia para o cálculo da temperatura do gás que entra nos superaquecedores.

Balanço de energia dos gases:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_g V_g c_{p_g} T_g) = \dot{Q}_g + w_g^{(2)} c_{pg}^{(2)} (T_g^{(2)} - 80) + w_a \cdot c_{pa} (T - 80) + \\ + w_{ia} \cdot c_{pa} (T_{ia} - 80) - \dot{Q}_b - w_g \cdot c_{pg} (T_g - 80) \end{aligned} \quad (4.36)$$

Temperatura do gás:

$$T_g^{(3)} = \frac{1}{A_b^{(g3)} U_{rl}^{(g3)} + w_g^{(3)} c_{pg}^{(3)}} [\dot{Q}_g^{(3)} + w_g^{(2)} c_{pg}^{(2)} (T_g^{(2)} - 80) + w_a^{(3)} c_{pa}^{(3)} (T_a - 80) + w_{ia}^{(3)} c_{pa}^{(3)} (T_{ia}^{(3)} - 80) + A_b^{(g3)} U_{rl}^{(g3)} (T_b - 80)] + 80 \quad (4.37)$$

4.2.7 Superaquecedores, Convector, Economizadores e Balão

As etapas dos superaquecedores, convector e economizadores tem o mesmo comportamento físico, elas são todas etapas de troca de calor. A única diferença é que para os superaquecedores a troca de calor é feita entre o gás que sai da fornalha e o vapor, e no caso do convector e economizadores é feita entre o gás que sai dos superaquecedores e a água que entra pelos economizadores.

As equações são as seguintes:

- Calor do gás recebido pelos tubos de metal.

$$Q_{gas-metal} = K_{gas-metal} A_{metal} (T_{gas} - T_{metal}) \quad (4.38)$$

- Calor transmitido pelo metal para o vapor ou água dentro dos tubos dos trocadores de calor.

$$Q_{metal-vapor(agua)} = K_{metal-vapor(agua)} A_{metal} (T_{metal} - T_{vapor(agua)}) \quad (4.39)$$

- Temperatura do gás na saída da etapa de troca de calor.

$$T_{gas\ saida} = T_{gas\ entrada} - \left(\frac{Q_{gas-metal}}{m_{gas} C_{p\ gas}} \right) \quad (4.40)$$

- Temperatura do vapor na saída da etapa de troca de calor.

$$T_{vapor(agua)\ saida} = \left(\frac{Q_{metal-vapor(agua)}}{m_{vapor(agua)} C_{p\ vapor(agua)}} \right) + T_{vapor(agua)\ entrada} \quad (4.41)$$

- Temperatura do metal.

$$\frac{dT_{metal}}{dt} = \frac{Q_{gas-metal} - Q_{metal-vapor(agua)}}{m_{metal} C_{p\ metal}} \quad (4.42)$$

Na Figura 15 podemos visualizar as equações no modelo em simulink. Nesta figura as equações representam a troca de calor no superaquecedor secundário.

Figura 15: Representação o fluxo do sistema água-vapor dentro dos trocadores de calor incluindo o balão.

Figura 16: Sistema de produção de vapor na parte alta da caldeira.

O balão é um sistema em equilíbrio líquido-vapor. Para simular o comportamento do balão foi utilizado o modelo dinâmico não-linear de Astrom (1999). Este modelo descreve de forma detalhada o comportamento complicado de um balão incluindo o nível do balão. As variáveis de estado deste modelo são:

- Pressão do vapor (p)
- Volume total de água (V_{wt})
- Qualidade do vapor que sai do líquido no balão (α_r)
- Volume do vapor que está abaixo da linha do líquido no balão (V_{sd})

As derivadas no tempo das quatro variáveis de estado estão representadas nas seguintes equações:

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_f - q_s \quad (4.43)$$

$$e_{21} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22} \frac{dp}{dt} = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (4.44)$$

$$e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc} \quad (4.45)$$

$$e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^o - V_{sd}) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f \quad (4.46)$$

onde

$$h_c = h_s - h_w$$

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

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

$$e_{21} = V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{32} = \left(\rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r h_c \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) (1 - \bar{\alpha}_v) V_r + \left((1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \bar{\alpha}_v V_r$$

$$+ (\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_r) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}$$

$$e_{33} = +((1 - \alpha_r) \rho_s + \alpha_r \rho_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}$$

$$e_{42} = V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right)$$

$$+ \alpha_r (1 - \beta) V_r \left(\bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (1 - \bar{\alpha}_v) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_s - \rho_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right)$$

$$e_{43} = \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p}$$

$$e_{43} = \rho_s$$

Para calcular as propriedades termodinâmicas foram adicionadas ao modelo as tabelas de propriedades para o equilíbrio líquido-vapor que seguem a formulação da IAPWS-97. As propriedades foram calculadas utilizando como parâmetro a pressão de saturação do sistema.

4.2.8 Tanque de Mistura

Neste tanque são misturados, além de cinzas do precipitador, os sais de reposição. Os balanços de massa, na maior parte, são expressos com acúmulo em estado dinâmico, por equações diferenciais ordinárias.

Fração de sulfato de sódio no tanque de mistura:

$$\frac{d}{dt}(\rho_{bl} \cdot V_{bl} \cdot X_{Na_2SO_4}) = w_{sc} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4 fa}^{(g_6)} + (w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4 p}^{(g_6)} \cdot K_{pe}) - w_{bl} \cdot X_{Na_2SO_4}$$

(4.2.8.1)

O volume do tanque de mistura é constante, portanto:

$$\frac{w_{bl}}{\rho_{bl}} = \frac{w_{bl}^{(mi)}}{\rho_{bl}^{(mi)}} = V_{bl} \quad (4.47)$$

Balanço de massa do licor:

$$w_{bl} = \frac{\rho_{bl}}{\rho_{bl}^{(mi)}} \cdot w_{bl}^{(mi)} \quad (4.48)$$

A equação (4.2.8.1) pode ser escrita como sendo:

$$\frac{d}{dt}(\rho_{bl} \cdot V_{bl} \cdot X_{Na_2SO_4}) = V_{bl} \left(\rho_{bl} \cdot \frac{d}{dt} X_{Na_2SO_4} + X_{Na_2SO_4} \frac{d}{dt} \rho_{bl} \right) \quad (4.49)$$

Balanço de massa total no tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_{bl} \cdot V_{bl}) = & w_{bl}^{(mi)} + w_g^{(6)} \cdot [X_{Na_2SO_4fa}^{(g_6)} + X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} \cdot K_{pe}] + \\ & + w_g^{(6)} [X_{Na_2CO_3fa}^{(g_6)} + X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)} \cdot K_{pe}] + w_{sc} - w_{bl} \end{aligned} \quad (4.50)$$

Fração de sólidos no licor dentro do tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_{bls}^{(mt)} = & \frac{1}{\rho_{bl}^{(mt)} V_{bl}^{(mt)}} [w_{bl}^{(mi)} \cdot (X_{bls}^{(mi)} - X_{bls}^{(mt)}) + \\ & - (w_g^{(6)} (X_{Na_2SO_4fa}^{(mt)} + X_{Na_2SO_4p}^{(mt)} \cdot K_{pe} + X_{Na_2CO_3fa}^{(mt)} + X_{Na_2CO_3p}^{(mt)} \cdot K_{pe}) + w_{sc}^{(mt)}) \cdot X_{bls}^{(mt)}] \end{aligned} \quad (4.51)$$

Água:

$$X_{blw}^{(mt)} = 1 - X_{Na_2SO_4}^{(mt)} - X_{Na_2CO_3}^{(mt)} - X_{bls}^{(mt)} \quad (4.52)$$

Por simplicidade, assume-se que a temperatura da saída do tanque é igual à temperatura do licor que entra.

$$T_{mt} = T_{bl} \quad (4.53)$$

4.2.9 Precipitador

Os gases provenientes do economizador vão diretamente para o precipitador. O particulado fica retido no precipitador e em seguida é encaminhado para o tanque de mistura.

O cálculo de vazões no precipitador assume uma relação de eficiência, que deve ser de 95 a 99%, dada por:

$$K_{pe} = 1 - \exp \left[- \frac{K_{1pe}}{w_g^{(6)} \cdot (1 - X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} - X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)})} \right] \quad (4.54)$$

onde K_{pe} é o parâmetro do precipitador

Os balanços de massa são expressos em estado estacionário, ou seja, por equações algébricas. Sulfato de sódio como particulado que sai do precipitador na corrente de gás é calculado por:

$$w_g^{(pr)} X_{Na_2SO_4p}^{(gpr)} = (1 - K_{pe}) \cdot w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} \quad (4.55)$$

Carbonato de sódio como particulado que sai do precipitador na corrente de gás é calculado por:

$$w_g^{(pr)} X_{Na_2CO_3p}^{(gpr)} = (1 - K_{pe}) \cdot w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)} \quad (4.56)$$

Balanco total de gás:

$$w_g^{(pr)} = w_g^{(6)} \left[1 - K_{pe} \left(X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} + X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)} \right) \right] \quad (4.57)$$

A temperatura dos gases é considerada constante:

$$T^{(pr)} = T^{(6)} \quad (4.58)$$

4.2.10 Sistema de Controle Tradicional

Foi implementado um sistema de controle PID em três regiões da caldeira. Este tipo de controle tenta manter o máximo de eficiência e segurança na operação da caldeira, mas nem sempre consegue desempenhar seu objetivo. Razão pela qual o objetivo principal desta tese não é substituir o controle antigo, mas sim

criar uma camada a mais de controle para garantir um sistema estável sem riscos de parada, e o mais importante um sistema sem riscos para os operadores.

O primeiro controle PID foi implementado para controlar a pressão do balão. Este PID recebe a medição da pressão, compara com o set-point estabelecido e manipula a entrada de água nos economizadores. (Figura 17)

Figura 17: Sistema de controle da pressão no balão

Os outros dois controles PIDs estão relacionados entre si. Eles têm como objetivo manipular as entradas de ar na caldeira. O primeiro deles manipula a

entrada de ar primário e secundário para amortecer qualquer variação na entrada de sólidos secos na caldeira. O segundo manipula o ar terciário pelo exaustor para controlar as emissões pela chaminé. O controle aplicado é proporcional à entrada de sólidos e a entalpia do licor seco. (Figura 18)

Figura 18: Sistemas de controle de emissões da caldeira.

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA MULTI-AGENTE

Este capítulo mostra a metodologia utilizada na construção do sistema multi-agente na caldeira de recuperação. O sistema desenvolvido é composto por três componentes:

1. Modelo Dinâmico da caldeira de recuperação em Simulink™.
2. Sistema multi-agente na plataforma JAVA™ Agent DEvelopment JADE™.
3. Comunicação entre o modelo dinâmico em Simulink é o SMA em JADE.

Os próximos sub-capítulos mostram os detalhes da implementação de cada um dos componentes do sistema multi-agente na Caldeira de Recuperação.

5.1 Modelo Dinâmico da Caldeira de Recuperação em Simulink™

O modelo matemático apresentado no capítulo 4 foi implementado no software de simulação Simulink™ utilizando as ferramentas de cálculo do software Matlab™. A figura 19 mostra o modelo dinâmico da caldeira em simulink.

As etapas da caldeira dos modelos são as seguintes:

1. Precipitador.
2. Tanque de Mistura.
3. Aquecedor do licor.
4. Injetores de licor.
5. Cálculo da aspensão do licor na entrada da caldeira.
6. Cálculo da quantidade de licor que é direcionado para cada um dos leitos. (Parede e chão).
7. Redução no leito-Parede.
8. Redução no leito-chão.

9. Cálculo global da eficiência de redução na caldeira e quantidade de fundido que sai.
10. Zona primária.
11. Zona Secundária.
12. Zona Terciária.
13. Dinâmica do balão
14. Superaquecedores
15. Convector
16. Economizadores.
17. Controle PID da pressão no balão.
18. Controle PID das emissões na saída da chaminé.
19. Comunicação do modelo da caldeira com o sistema multi-agente (Redução).
20. Comunicação do modelo da caldeira com o sistema multi-agente (Vapor).

Figura 19: Modelo dinâmico da caldeira em simulink.

5.2 Sistema Multi-Agente na Plataforma JAVA™ Agent DEvelopment JADE™

O sistema multi-agente foi implementado usando a plataforma JAVA™ Agent DEvelopment (JADE™), plataforma desenvolvida em JAVA™ alinhada a linguagem e aos protocolos de comunicação entre agentes da FIPA (Capítulo)

5.2.1 JADE

JADE™ (Java Agent DEvelopment framework) é um ambiente para desenvolvimento de aplicações baseado em agentes conforme as especificações da Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) para interoperabilidade entre sistemas multi-agentes totalmente implementado em Java. Foi desenvolvido e suportado pelo (CSELT) da Universidade de Parma na Itália. O principal objetivo do Jade é simplificar e facilitar o desenvolvimento de sistemas multi-agentes garantindo um padrão de interoperabilidade entre os mesmos através de um abrangente conjunto de agentes de serviços de sistema.

Estes agentes de serviços de sistema tanto facilitam quanto possibilitam a comunicação entre agentes, de acordo com as especificações da FIPA: serviço de nomes (naming service) e páginas amarelas (yellow-page service), transporte de mensagens, serviços de codificação e decodificação de mensagens e uma biblioteca de protocolos de interação (padrão FIPA) pronta para ser usada. Toda sua comunicação entre agentes é feita via troca de mensagens. Além disso, lida com todos os aspectos que não fazem parte do agente em si e que são independentes das aplicações tais como transporte de mensagens, codificação e interpretação de mensagens e ciclo de vida dos agentes. Ele pode ser considerado como um “middle-ware” de agentes que implementa um framework de desenvolvimento e uma plataforma de agentes. Em outras palavras, uma plataforma de agentes em complacência com a FIPA e um pacote, leia-se bibliotecas, para desenvolvimento de agentes em Java.

De acordo com Bellifemine et al. (2003), o Jade foi escrito em Java devido a características particulares da linguagem, como por exemplo, a programação orientada a objetos em ambientes distribuídos e heterogêneos. Foram desenvolvidos tanto pacotes Java com funcionalidades prontas para uso, quanto interfaces abstratas para se adaptarem de acordo com a funcionalidade da aplicação de agentes.

5.2.2 Características do JADE

Seguem abaixo algumas características que o Jade oferece para a programação de sistemas multi-agentes:

Plataforma distribuída de agentes - JADE pode ser dividida em vários “hosts” ou máquinas (desde que eles possam ser conectados via RMI). Apenas uma aplicação Java e uma Java Virtual Machine é executada em cada host. Os agentes são implementados como threads Java e inseridos dentro de repositórios de agentes chamados de containeres (Agent Containers) que provêm todo o suporte para a execução do agente.

- Graphical User Interface (GUI) – Interface visual que gerencia vários agentes e containeres de agentes inclusive remotamente. (Figura 20)

Figura 20: Graphical User Interface (GUI)

- Ferramentas de Debugging - ferramentas que ajudam o desenvolvimento e depuração de aplicações multi-agentes baseadas em JADE.
- Suporte a execução de múltiplas, paralelas e concorrentes atividades de agentes - através dos modelos de comportamentos (Behaviours).
- Ambiente de agentes complacentes a FIPA – No qual incluem o sistema gerenciador de agentes (Agent Management System - AMS), o diretório facilitador (Directory Facilitator - DF) e o canal de comunicação dos agentes (Agent Communication Channel - ACC). Todos esses três componentes são automaticamente carregados quando o ambiente é iniciado.
- Transporte de mensagens – Transporte de mensagens no formato FIPA- (ACL) dentro da mesma plataforma de agentes.
- Biblioteca de protocolos FIPA - Para interação entre agentes JADE dispõe de uma biblioteca de protocolos prontos para serem usados.

- Automação de registros - Registro e cancelamento automático de agentes com o (AMS) fazendo com que o desenvolvedor não se preocupe com isso.
- Serviços de nomes (Naming Service) em conformidade aos padrões FIPA: na inicialização dos agentes, estes obtêm seus Globally Unique Identifier (GUID) da plataforma que são identificadores únicos em todo o ambiente.
- Integração - Mecanismo que permite que aplicações externas carreguem agentes autônomos JADE.

Além das características acima citadas, que por si só já facilitam muito o desenvolvimento de sistemas multi-agentes, o Jade possui também algumas ferramentas muito úteis que simplificam a administração da plataforma de agentes e o desenvolvimento de aplicações.

Em relação à FIPA, o JADE diminui para o programador muitas das especificações da FIPA, como:

- Não há a necessidade de implementar a plataforma de agentes: o sistema gerenciador de agentes (AMS), o diretório facilitador (DF) e o canal de comunicação dos agentes (ACC) são carregados na inicialização do ambiente.
- Não há a necessidade de implementar um gerenciamento de agentes: um agente é registrado na plataforma no seu próprio construtor, recebendo nome e endereço, sem falar na classe Agent que oferece acessos simplificados a serviços no DF.
- Não há necessidade de implementar transporte de mensagens e parsing (“analisar gramatical” das mensagens): isto é automaticamente feito pelo ambiente na troca de mensagens.

5.2.3 O Agente em JADE

A FIPA nada especifica sobre as estruturas internas dos agentes, fato que foi uma escolha explícita em conformidade com a opinião de que a interoperabilidade pode ser garantida apenas especificando os comportamentos externos dos agentes (Ex: ACL, protocolos, linguagens de conteúdo, etc.) (FIPA, 2007). Para o Jade, um agente é autônomo e independente do processo, tem uma identidade e requer comunicação com outros agentes, seja ela por colaboração ou por competição, para executar totalmente seus objetivos (JADE, 2007).

Em outras palavras, pode-se concluir que o Jade é absolutamente neutro no que diz respeito à definição de um agente. Ou seja, ele não limita ou especifica que tipo de agente pode ser construído pela plataforma.

5.3 Comunicação entre o Modelo Dinâmico em Simulink e o SMA em JADE

A comunicação entre a plataforma de agentes JADE™ e o software de simulação Simulink™ foi desenvolvida utilizando o protocolo (TCP/IP). O TCP/IP é o protocolo de rede mais usado atualmente. O TCP especifica o formato dos pacotes de dados e de reconhecimentos que dois computadores trocam para realizar uma transferência confiável, assim como os procedimentos que os computadores usam para assegurar que os dados cheguem corretamente. Podemos imaginar uma comunicação TCP como um “duto” entre dois computadores ligados a duas portas. Os dados fluem numa direção qualquer pelo duto. Uma conexão exige endereços nas duas extremidades da conexão e uma porta de comunicação. Na terminologia do TCP/IP, há um soquete em cada lado da conexão.

Para ter uma comunicação via TCP/IP necessitamos de um “Cliente” e de um “Servidor”. O Servidor é o extremo da comunicação que inicia a comunicação utilizando uma porta da rede como entrada. O “Cliente” procura esta porta e se conecta ao “Servidor”.

Por ser uma plataforma mais flexível para programar, o “Servidor” foi desenvolvido em JAVA™, e o “Cliente” foi configurado do lado do Simulador da Caldeira utilizando a ferramenta “TCP/UDP/IP Toolbox” desenvolvida por Peter Rydesater (2006) (Figura 21)

Figura 21: Arquitetura de comunicação entre o SMA em JADE e o modelo dinâmico da caldeira em Simulink.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Validação do Simulador da Caldeira em Simulink™

Dividiu-se a validação do modelo da caldeira de recuperação química em duas partes: a primeira parte avaliou o modelo comparando as variáveis em estado estacionário do simulador com os dados obtidos pelo modelo original.

A segunda avaliou a resposta do modelo, perturbando diferentes condições de operação, comparando com a resposta lógica de uma caldeira real.

6.1.1 Validação do Estado Estacionário

Para que o processo de validação do modelo tenha credibilidade, foi mantida a maioria das condições iniciais do modelo original. Tem-se a lista de variáveis na tabela 1. A única diferença entre os dois modelos está na concentração dos sólidos secos. No modelo Simulink não foi considerada a presença de inertes no licor negro.

Tabela 1 - Condições iniciais para validar o estado estacionário

Ar	Unidades	Modelo Original	Modelo Simulink
Temperatura do ar (Ambiente)	C	26.67	26.67
Umidade relativa	%	60.00	60.00
Pressão barométrica	Pa	101352.00	101325.00
Oxigênio no ar seco	%	23.15	23.00
Nitrogênio no ar seco	%	76.85	77.00
Temperatura de referência para os balanços de energia	C	26.67	26.67
Temperatura do ar de combustão	C	134.44	134.44
Licor Negro			
Sólidos secos	%	63.00	63.00
Na ₂ SO ₄	%	0.00	0.00
Na ₂ CO ₃	%	0.00	0.00
Água	%	37.00	37.00
Temperatura do licor na entrada do tanque de mistura	C	93.33	93.33
Temperatura do licor na entrada dos injetores	C	104.44	104.44
Na ₂ SO ₄ na entrada do tanque de mistura	Ton/d	23.11	23.11
Sólidos Secos	Unidades		
Na	%	19.50	19.50
C	%	37.00	37.00
H	%	3.50	3.50
S	%	5.90	5.90
O	%	33.30	33.30
Inertes	%	0.80	0.00
Na ₂ S	%	0.00	0.08
Entrada de sólidos secos no tanque de mistura	Ton/d	1102.50	1102.50
Geração de vapor	Unidades		
Temperatura da água (entrada economizador)	C	137.77	137.77
Pressão do balão	Mpa	3.66	3.66

A tabela 2 mostra os valores obtidos no estado estacionário no modelo Simulink. Estes valores foram comparados com os do modelo original e foi calculado o desvio percentual em cada uma das variáveis e também o desvio global.

Tabela 2 - Variáveis do processo em estado estacionário

Variáveis	Unidades	Modelo Original	Modelo Simulink	% Desvio
Temperatura do gás na saída (Economizador)	C	212.70	245.20	15.28
Temperatura da água (saída economizador)	C	221.11	252.50	14.20
Temperatura do vapor (saída do Superaquecedor)	C	379.44	470.20	23.92
Temperatura no balão	C	245.00	245.10	0.04
Concentração de CO ₂ no gás de saída	Ton/Tonss	1.24	1.22	1.44
Concentração de H ₂ S no gás de saída	ppm	4.00	5.45	36.25
Eficiência redução	%	84.00	90.05	7.20
Vazão de vapor	Ton/d	4402.00	2552.00	42.03
Produção total de fundido	Ton/d	477.39	447.30	6.30
Vazão de gás	Ton/d	6982.72	6068.00	13.10
			Desvio médio	15.98

Analisando os resultados, a variável que teve um desvio maior foi a vazão de vapor. O desvio da vazão foi de 42.03%. A diferença era esperada devido ao fato do novo modelo de geração de vapor ter sido atualizado adicionando-se uma nova dinâmica no balão, a qual no modelo original, foi desprezada. Quando a dinâmica do balão não é considerada, o nível calculado do balão é menor. Isto se deve porque não é considerada a quantidade de vapor que está presente na fase líquida do equilíbrio em forma de bolhas. Como no modelo Simulink este fenômeno é considerado, a quantidade necessária de água requerida cai para diminuir o nível e manter-lo constante.

Analisando o resto das variáveis podemos concluir que o modelo Simulink apresenta valores aceitáveis com um desvio médio aproximado de 16% nas variáveis selecionadas. Veja o resultado gráfico do estado estacionário das variáveis do processo mais significativo nas figuras 23, 24 e 25

Figura 22: Estado estacionário (Primeiro grupo de variáveis)

Figura 23: Estado estacionário (Segundo grupo de variáveis)

Figura 24: Estado estacionário (Terceiro grupo de variáveis)

Figura 25: Estado estacionário (Quarto grupo de variáveis)

6.1.2 Validação da Resposta do Modelo à Perturbações

Para validar a resposta do modelo foram feitas simulações perturbando o sistema, alterando diversas variáveis críticas da caldeira. As variáveis escolhidas com perturbações foram as seguintes:

- Entrada de licor negro.
- Porcentagem de sólidos secos no licor negro.
- Temperatura do licor negro na entrada da caldeira.
- Temperatura no ar primário, secundário e terciário.

6.1.2.1 Resposta a Perturbações ao Aumento na Entrada de Licor Negro

Foram simuladas perturbações na entrada de licor negro no tanque de mistura (Ver figura 26). Com o aumento da entrada de licor a resposta lógica esperada seria o esfriamento do leito devido ao excesso de carbono caindo no leito. Como a vazão de ar primário aumenta acompanhando a quantidade de sólidos secos que entram na caldeira, sistema de controle Capítulo 4.2.10, o efeito no leito não será tão marcante, mas ainda assim a redução da caldeira cai, por mais que a temperatura do leito aumente. Como a redução cai, o aumento na saída de fundido não aumenta na mesma proporção que a entrada de licor. A temperatura do leito aumenta porque o ar primário aumenta. O aumento do gás na saída do economizador é esperado e também o aumento nas emissões de sais de sulfato na chaminé.

O ponto positivo é o aumento na produção e na temperatura do vapor devido ao aumento na quantidade de material combustível dentro da fornalha. O efeito ao diminuir a entrada de licor é exatamente o oposto. A redução aumenta e a produção de vapor cai.

Figura 26: Resposta do modelo a perturbações na entrada de licor negro.

6.1.2.2 Resposta a Perturbações na Fração de Sólidos Secos no Licor

A perturbação que mais influencia no desempenho da caldeira é a fração de sólidos secos. O comportamento esperado para o aumento desta variável é um aumento de sólidos combustíveis no leito, causando aumento na redução (Figura 27). Com o aumento dos sólidos no licor, aumenta a viscosidade do licor majorando também o diâmetro médio de gotas do licor que entram na fornalha. Isto diminui a quantidade de licor que é arrastado pelos gases na fornalha. Outra consequência é o aumento na temperatura dos gases que sobem pela caldeira, aumentando a produção de vapor para manter a pressão do balão constante.

Figura 27: Resposta do modelo a perturbações na fração de sólidos secos.

6.1.2.3 Resposta ao aumento na temperatura do licor negro

Outra perturbação simulada foi a variação na temperatura do licor. Esta perturbação afeta de forma imediata a diminuição do tamanho das gotas que entram na fornalha, aumentando a quantidade de licor que é arrastado pelos gases que sobem na fornalha. Aumentando a fração de “entrainment” cresce a quantidade de material combustível na zona terciária, incrementando a taxa de combustão, diminuindo a concentração de oxigênio na zona terciária e tendo como resultado um aumento na formação de CO, SO₂ e H₂S.

Ao mesmo tempo em que a temperatura do licor aumenta, menos água alcançará o leito e menos calor é requerido para evaporação, trazendo como consequência um

aumento na temperatura do leito, liberando mais combustível. Este fato favorece a combustão, mas não necessariamente favorece a eficiência da redução. Analisando a Figura 14 do capítulo 4 podemos confirmar que para temperaturas do leito superiores a 2061°F, um aumento na temperatura mantendo a mesma quantidade de ar diminui a eficiência. Na simulação feita para validar o efeito da temperatura do licor, a temperatura do leito supera esta faixa crítica, por isso temos uma queda na redução.

Figura 28: Resposta do modelo a perturbações na temperatura de entrada do licor negro.

6.1.2.4 Resposta ao Aumento na Temperatura do Ar Primário, Secundário e Terciário

Neste modelo da caldeira a variação na temperatura do ar que entra na caldeira é uma variável importante no controle da eficiência de redução. Aumentando a temperatura do ar primário e secundário, cresce a vazão e a temperatura dos gases que sobem pela fornalha. Analisando os gráficos da resposta se pode perceber o

efeito da temperatura do ar ao aumentando a vazão de ar terciário, o qual tem uma influencia indireta sobre a eficiência de redução.

Figura 29: Resposta do modelo a perturbações na temperatura do ar que entra na caldeira.

6.2 Tipos de Agentes Implementados no SMA

O sistema multiagente da caldeira de recuperação está composto por dois agentes para cada variável a ser monitorada. O agente de controle é o agente de comunicação. O agente de controle reconfigura o sistema quando a variável que ele monitora entra em falha. O agente de comunicação faz a ponte entre o sistema de controle e a simulação (Simulink™).

Os possíveis cenários de controle são apresentados baseados na interação entre os agentes. A principal iteração do sistema é a negociação entre os agentes. Esta negociação será detalhada juntamente com a estratégia para alcançar a

reconfiguração do sistema. No final deste subcapítulo será dado um exemplo real de negociação.

6.2.1 Agente de Controle

Este tipo de agente é a base do MAS da caldeira. Foram desenvolvidos dois agentes de controle:

1. Agente Redução
2. Agente Vapor

Cada agente cuida do desempenho de sua variável. O “Agente Redução” monitora a porcentagem de redução da caldeira, e o “Agente Vapor” monitora a produção de vapor da caldeira.

O principal objetivo do agente de controle é informar aos agentes vizinhos da falha na variável que ele monitora.

Os agentes que receberam esta mensagem respondem indicando qual são as possíveis ações de controle. O agente que responde sabe que se esta ação for aceita ele pode compensar o possível efeito que eventualmente venha a causar sobre a variável que ele monitora, mas isto não é obrigatório. Quando o agente decide qual das opções que recebeu é a melhor, responde a todos os agentes alertando da próxima perturbação no sistema.

Foram analisados diferentes tipos de protocolos FIPA e o protocolo de comunicação escolhido para este tipo de agente foi o protocolo “FIPA-Contract-Net-Interaction-Protocol” .

Figura 30: Protocolo de comunicação “FIPA-Contract-Net-Interaction-Protocol”

No protocolo Contract-net interaction protocol, um agente (Iniciador) deseja que alguma ação seja tomada por um ou mais agentes (Participantes) e estabelece as preferências da negociação. Para cada chamada de um agente (CPF, Call for proposal) os participantes podem enviar uma proposta (PROPOSE) ou podem simplesmente negar (REFUSE) o pedido de ajuda. Depois a negociação continua com os participantes que enviaram uma proposta. Quando o iniciador recebe as propostas, estas são avaliadas. A melhor das propostas ganha e o agente participante recebe uma mensagem de aceitação (ACCEPT-PROPOSAL), os

participantes que tiveram suas propostas descartadas recebem uma mensagem de rejeição (REJECT-PROPOSAL). Depois o participante se compromete a efetivar a proposta e envia uma mensagem ao iniciador, fechando o processo de negociação.

6.2.1.1 Mensagens trocadas no processo de negociação

A FIPA estabelece um conjunto de mensagens pré-estabelecidas para o protocolo Contract Net Interaction Protocol. A estrutura de cada mensagem é a apresentada junto com as mensagens do processo de negociação utilizado no MAS da caldeira de recuperação.

Mensagem ACL do tipo CPF: Esta mensagem é enviada pelo agente iniciador para controlar a variável que ele monitora. Para enviar esta mensagem e iniciar uma negociação entre agentes, o agente tem que receber uma mensagem do tipo REQUEST. Esta mensagem é enviada pelos agentes de comunicação quando uma falha é detectada no processo (Ver figura 31). Qualquer um dos agentes (Redução ou Vapor) pode enviar este tipo de mensagem. O conteúdo da mensagem CFP informa o status de cada uma das variáveis que interessam ao sistema multiagentes. As variáveis que são enviadas no conteúdo da mensagem CFP são as seguintes:

- Porcentagem de redução
- Produção de vapor
- Temperatura do licor
- Temperatura do Ar primário.
- Vazão de licor na entrada da caldeira

A estrutura da mensagem CFP é a seguinte:

(cfp

:sender Agente de Controle_Iniciador

:receiver Agente de Controle_Participante

:content (%redução,Produção de vapor,Temperatura do licor,Temperatura do AR,
Vazão de licor na entrada da caldeira)

```

:protocol FIPA-Contract-Net
:language fipa-sl
)

```

The screenshot shows a window titled "ACL Message" with two tabs: "ACLMessage" and "Envelope". The "ACLMessage" tab is active. The message details are as follows:

- Sender:** ioAgente@song04:1099/JADE (with a "View" button)
- Receivers:** VaporAgente@song04:1099/JADE
- Reply-to:** (empty text field)
- Communicative act:** cfp (selected in a dropdown menu)
- Content:** 88.0111 3174.2449 104.444 134.44 1750 (text area with a scrollbar)
- Language:** (empty text field)
- Encoding:** (empty text field)
- Ontology:** (empty text field)
- Protocol:** fipa-contract-net (selected in a dropdown menu)
- Conversation-id:** C31603964_1182946282127
- In-reply-to:** (empty text field)
- Reply-with:** R1182946282127_0
- Reply-by:** (empty text field with a "View" button)
- User Properties:** (empty text field)

An "OK" button is located at the bottom right of the dialog.

Figura 31: Exemplo de mensagem do tipo CFP enviada pelo agente “ReduçãoAgente” ao “VaporAgente”.

Mensagem ACL do tipo REFUSE: Esta mensagem é enviada pelos agentes participantes quando não conseguem enviar uma proposta. No SMA da caldeira os dois agentes são obrigados a responder cada CFP que for enviado a eles. A estrutura da mensagem REFUSE é a seguinte:

```

(refuse
:sender Agente de Controle_Participante

```

```

:receiver Agente de Controle_ Iniciador
:protocol FIPA-Contract-Net
:language fipa-sl
)

```

Mensagem ACL do tipo PROPOSE: Estas mensagens contém a proposta enviada pelo agente “Participante” o agente envia dentro do mesmo conteúdo desta mensagem várias propostas. Em outras palavras, cada agente consegue manipular mais de uma variável. O conteúdo depende do agente. Se for o “AgenteVapor” a proposta contém o novo setpoint para a “Temperatura do Licor” é a “Temperatura do Ar”. Se o agente que tiver enviando a proposta for a “Agente Redução” o conteúdo da mensagem é o setpoint da “Entrada do Licor”. A estrutura da mensagem PROPOSE é a seguinte:

```

(propose
:sender Agente de Controle_Participante
:receiver Agente de Controle_ Iniciador
:content (SP Temperatura do licor, SP Temperatura do Ar) ou (SP Entrada do licor)
:protocol FIPA-Contract-Net
:language fipa-sl
)

```

A Figura 32 mostra uma proposta enviada pelo agente “VaporAgente” ao agente “ReduçãoAgente” contendo duas opções. O primeiro valor corresponde à variável “Temperatura do licor” é o segundo à “Temperatura do Ar”.

The screenshot shows a window titled "ACL Message" with a close button in the top right corner. Inside the window, there are two tabs: "ACLMessage" (selected) and "Envelope". The "ACLMessage" tab contains the following fields:

- Sender:** A text field with the value "brAgente@song04:1099/JADE" and a "View" button to its left.
- Receivers:** A text field with the value "ReducaoAgente@song04:1099/JADE" and a scroll bar below it.
- Reply-to:** An empty text field.
- Communicative act:** A dropdown menu with the value "propose" selected.
- Content:** A text area containing the value "92.9035182444447 146.32389848888886" and a scroll bar to its right.
- Language:** An empty text field.
- Encoding:** An empty text field.
- Ontology:** An empty text field.
- Protocol:** A dropdown menu with the value "fipa-contract-net" selected.
- Conversation-id:** A text field with the value "C31603964_1182946282127".
- In-reply-to:** A text field with the value "R1182946282127_0".
- Reply-with:** A text field with the value "@song04:1099/JADE1182946282174".
- Reply-by:** A text field with a "View" button to its left.
- User Properties:** An empty text field.

At the bottom of the window is an "OK" button.

Figura 32: Exemplo de mensagem do tipo PROPOSE enviada pelo agente “VaporAgente” ao agente “ReduçãoAgente”.

Mensagem ACL do tipo REJECT PROPOSAL e ACCEPT PROPOSAL: O agente iniciador avalia a proposta. Se a proposta não for selecionada, o agente envia a seguinte mensagem.

```
(reject_proposal
:sender Agente de Controle_Iniciador
:receiver Agente de Controle_Participante
:protocol FIPA-Contract-Net
:language fipa-sl
)
```

Se o agente aceitar a proposta, transmite a seguinte mensagem ao participante.

```
(accept_proposal
:sender Agente de Controle_Iniciador
:receiver Agente de Controle_Participante
:content (valor da proposta 1 aceita, NO) ou (NO, valor da proposta 2 aceita)
:protocol FIPA-Contract-Net
:language fipa-sl
)
```

No sistema multi-agente da caldeira o agente iniciador não rejeita propostas do único participante, ele é obrigado a escolher uma das opções que estão dentro do conteúdo da mensagem PROPOSE. Se o sistema tiver mais de dois agentes este critério no protocolo tem que ser considerado. A figura 33 mostra um exemplo da mensagem ACCEPT_PROPOSAL enviada pelo agente “ReduçãoAgente” ao “VaporAgente”.

The screenshot shows a window titled "ACL Message" with a close button in the top right corner. Inside the window, there are two tabs: "ACLMessage" (selected) and "Envelope". The "ACLMessage" tab contains the following fields:

- Sender:** A text field with the value "ioAgente@song04:1099/JADE" and a "View" button to its left.
- Receivers:** A text field with the value "VaporAgente@song04:1099/JADE".
- Reply-to:** An empty text field.
- Communicative act:** A dropdown menu with the selected value "accept-proposal".
- Content:** A large text area containing the text "NO 146.32389848888886".
- Language:** An empty text field.
- Encoding:** An empty text field.
- Ontology:** An empty text field.
- Protocol:** A dropdown menu with the selected value "fipa-contract-net".
- Conversation-id:** A text field with the value "C31603964_1182946282127".
- In-reply-to:** A text field with the value "@song04:1099/JADE1182946282174".
- Reply-with:** A text field with the value "R1182946282237_0".
- Reply-by:** A text field with a "View" button to its left.
- User Properties:** An empty text field.

At the bottom of the window is an "OK" button.

Figura 33: Exemplo de mensagem do tipo ACCEPT_PROPOSAL enviada pelo agente “ReduçãoAgente” ao “VaporAgente”.

Mensagem ACL do tipo FAILURE: No SMA da caldeira o agente que realiza a ação é o mesmo que iniciou a negociação. Por esta razão não existe a possibilidade do agente participante falhar na execução da ação aceita pelo iniciador.

Mensagem ACL do tipo INFORM: O participante que recebeu a mensagem com a sua proposta aceita deve enviar uma mensagem ao iniciador para informar que pode executar o controle da proposta aceita e que pode dar por finalizada a negociação. O agente participante só envia o valor da proposta aceita no campo “Content” ou conteúdo da mensagem. Para que o agente iniciador reconheça qual das variáveis esse valor representa, o agente participante escreve dentro do campo “Ontology” o

nome da variável (TAR para Temperatura do AR e TLICOR para Temperatura do licor). Esta mensagem tem a seguinte estrutura:

```
(inform
:sender Agente de Controle_Participante
:receiver Agente de Controle_Iniciador
:content (valor da proposta aceita)
:Ontology (TAR ou TICOR)
:protocol FIPA-Contract-Net
:language fipa-sl
)
```

A figura 34 mostra uma mensagem do tipo INFORM enviada pelo agente “VaporAgente” ao agente “ReduçãoAgente”.

Figura 34: Exemplo de mensagem do tipo PROPOSE enviada pelo agente “VaporAgente” ao agente “ReduçãoAgente”.

Uma troca de mensagem com sucesso pode ser analisada na Figura 35. A plataforma JADE de agentes tem um agente, chamado de “sniffer”, que rastreia todas as trocas de mensagens entre os agentes. Neste exemplo quem inicia a negociação utilizando o protocolo “FIPA-Contract-Net-Interaction-Protocol” é o agente “ReduçãoAgente”. Ele monta uma mensagem CFP que será enviada ao agente “VaporAgente” com o conteúdo da mensagem enviada pelo agente “TCP4000”. O agente “VaporAgente” recebe os valores das cinco variáveis e devolve duas propostas de setpoint, uma com uma possível temperatura do licor e uma outra com a temperatura do ar. O agente “ReduçãoAgente” avalia as propostas e aceita uma das duas. O agente “VaporAgente” recebe a mensagem (accept_proposal) a variável aceita pronta para ser enviada à simulação, mas antes

ele tem informa ao agente “ReduçãoAgente” que pode fechar a chamado finalizando o protocolo de comunicação. Uma vez fechada a comunicação o agente “ReduçãoAgente” envia uma mensagem ao agente “TCP4000” devolvendo os valores que serão escritos no processo. Estas variáveis são a “Temperatura do Ar” a “Entrada do Licor” e a “Temperatura do Licor” que são as únicas variáveis que podem ser modificadas através de uma negociação entre os agentes. No caso em que uma destas variáveis não tenha sido alterada pelos agentes o valor que retorna ao modelo, é o mesmo que chegou na mensagem original.

Figura 35: Troca de mensagens registradas pelo Agente “Sniffer”

6.2.1.2 Comportamento lógico dos agentes

Para avaliar as propostas recebidas pelos agentes foi adicionado um comportamento lógico para considerar a melhor solução possível na hora de receber as propostas.

Depois de ter analisado a resposta a diferentes perturbações foi possível entender o comportamento dinâmico da caldeira e a influência das três variáveis que os agentes manipulam. Na análise concluímos que ao aumentar a temperatura do licor, a eficiência de redução diminui, e que este aumento não teve um impacto considerável na produção de vapor. Ao aumentar a temperatura do ar o efeito foi contrario, a eficiência de redução aumentou e também não foi considerada uma interferência na produção de vapor. Estas variações foram ponderadas para que os agentes tenham uma noção do peso que cada uma das variáveis tem sobre os indicadores de produção da caldeira. Para um aumento de 1% na temperatura do licor a redução caiu 0.6% e para um aumento de 1% na temperatura do ar 0.25%. Agora, analisando a diminuição das temperaturas, os pesos nas respostas foram: para uma queda de 1% na temperatura do licor a eficiência na redução aumentou em 0.71% e para uma queda de 1% na temperatura do ar a redução aumento em 0.2%. Esta informação é útil ao agente “VaporAgente” que faz a proposta ao pedido do agente “ReduçãoAgente”.

O agente “ReduçãoAgente” precisa de uma referência de como avaliar uma situação quando o sistema tiver uma falha na produção de vapor. O resultado da análise da resposta do sistema a perturbações na entrada de licor preto apontam uma forte influência não só na geração de vapor mas também na eficiência de redução. Um aumento de 1% na entrada de licor aumenta em 40 ton/d a produção de vapor e diminui a eficiência em 0.2%. Uma queda de 1% na entrada de licor diminui também em 40 ton/d.

Outro raciocínio lógico do agente “ReduçãoAgente” é acionado quando o agente recebe a mensagem PROPOSE. Ele tem que escolher qual das duas propostas está dentro dos limites preestabelecidos para obter melhor desempenho na caldeira. Para a temperatura do licor a proposta tem que estar entre [100-125]C e para a temperatura do ar os limites são [125-200]C (ADAMS et al., 1997)

6.2.2 Agente de Comunicação

A principal função do agente de comunicação é a de transmitir os valores do processo quando for preciso a intervenção dos agentes. O agente de comunicação que informa ao agente “Redução Agente” é o agente “TCP4000”. O Agente encarregado de informar o “Vapor Agente” é o agente “TCP4001”. Estes agentes utilizam uma tecnologia de comunicação no protocolo TCP para se comunicar com a plataforma de simulação (Simulink™).

6.2.2.1 Comunicação Cliente-Servidor

Servidor

As portas utilizadas na comunicação entre as duas plataformas foram as portas 4000 e 4001. O agente servidor que é o responsável por passar as informações de falhas para o “Redução Agente” é o agente “TCP4000”. Este agente é um agente soquete que abre uma comunicação pela porta 4000 e aceita qualquer cliente que tente uma comunicação. O Agente encarregado de informar o “Vapor Agente” é o agente “TCP4001”. Uma outra função é devolver ao simulador a ação que os agentes escolheram para solventar a situação de falha. Uma vez que ele envia uma mensagem de “REQUEST” ao agente de controle, ele fica no aguardo de uma resposta “INFORM” com a ação de controle.

Cliente

O “Cliente” foi configurado do lado do Simulador da Caldeira utilizando a ferramenta “TCP/UDP/IP Toolbox” desenvolvida por Peter Rydesater (2006). Esta ferramenta não faz parte da ferramenta MATLAB, foi uma “toolbox” que precisou ser compilada para ter uma serie de comandos que comunicam via TCP/IP.

O comando utilizado para abrir uma comunicação com qualquer servidor utilizando uma porta especifica é o seguinte:

```
con1=pnet('tcpconnect','hostname',port);
```

onde o parametro “hostname” é o endereço IP da máquina onde está o servidor e o parametro “port” é a porta de comunicação que o Servidor utiliza para disponibilizar os seus dados. Antes de iniciar o sistema multi-agente é preciso primeiro adicionar os agentes de comunicação em JADE para depois através do TCP toolbox criar uma conexão Cliente-Servidor. A figura 36 mostra as linhas de programação utilizadas para comunicar com os agentes de comunicação TCP4000 e TCP4001.

```

1  %-----Conexão com a porta 4000 utilizada pelo agente "reducao" que
2  %-----recebe a falha na qualidade da redução-----
3  - global con1
4  - port1=4000;
5  - if(ischar(port1)), port1=str2num(port1); end
6  - con1=pnet('tcpconnect','localhost',port1);
7  - if(con1==-1), error('Não foi possível comunicar com a porta especificada.');
```

Figura 36: Comandos da ferramenta TCP Toolbox para abrir um canal de comunicação com a plataforma de agentes.

Depois de ter feito a conexão TCP com os agentes de comunicação o próximo passo foi adicionar um modulo de envio de mensagens entre as variáveis da caldeira a serem monitoradas e os agentes servidores. O comando da ferramenta TCP utilizado para enviar mensagens foi também o comando “pnet”.

```
pnet(con1,'printf',ACLMSG,'noblock');
```

onde o parâmetro ACLMSG é o texto com a mensagem a ser enviada. Dentro do programa de envio de mensagens existe uma condição para solicitar a ajuda dos agentes. Para o agente “ReduçãoAgente” o critério de falha é uma valor de eficiência de redução abaixo de 90%. Para o agente “AgenteVapor” o limite baixo de produção é de 2700 ton/d. Por exemplo, a seguinte mensagem foi enviada pelo agente “ReduçãoAgente” quando a redução caiu para 88.0138%.

```
(REQUEST :receiver (set ( agent-identifier
:nameReducaoAgente@song04:1099/JADE ) )
:content "88.0138 3174.2518 104.44 134.44 1750" )
```

Esta mensagem foi a mesma da Figura 31 já convertida em uma mensagem CFP pelo agente “ReduçãoAgente”. Só que antes de chegar nas mãos do agente de controle esta mensagem teve que passar pelo agente de comunicação, neste caso pelo agente “TCP4000”. Esta mensagem foi enviada pelo comando “pnet” como tipo “REQUEST” e foi retransmitida também como tipo “REQUEST” pelo agente “TCP4000”, (ver Figura 37). No apêndice A estão as funções em Matlab que fazem a ponte entre os agentes de comunicação é a simulação dinâmica.

The screenshot shows a window titled "ACL Message" with a close button in the top right corner. It has two tabs: "ACLMessage" (selected) and "Envelope". The "ACLMessage" tab contains the following fields:

- Sender:** tcp4000@song04:1099/JADE (with a "View" button next to it)
- Receivers:** ReducaoAgente@song04:1099/JAD (with a scroll bar)
- Reply-to:** (empty text box)
- Communicative act:** request (dropdown menu)
- Content:** 88.0111 3174.2449 104.444 134.44 1750 (with a scroll bar)
- Language:** (empty text box)
- Encoding:** (empty text box)
- Ontology:** (empty text box)
- Protocol:** Null (dropdown menu)
- Conversation-id:** (empty text box)
- In-reply-to:** noValue (text box)
- Reply-with:** onnection-Thread-13.1182946282081 (text box)
- Reply-by:** (empty text box with a "View" button next to it)
- User Properties:** (empty text box)

An "OK" button is located at the bottom center of the dialog.

Figura 37: Mensagem de REQUEST re-encaminhada pelo agente “TCP4000”

Para fechar o ciclo de comunicação o agente de comunicação envia a ação de controle dentro de uma mensagem do tipo "INFORM". Esta mensagem chega no simulink e é lida por um outro modulo (Função "ControlAgrupado" do Apendice A), agora é um modulo para receber mensagens e traduzir essa informação em ação. O comando utilizado é o seguinte:

```
str = pnet(con1,'read',[tamanho],'view','nblock');
```

Segue é um exemplo das mensagens "INFORM" que são enviadas pelos agente de comunicação. O parametro "content" encaminha os valores das tres variaveis manipuladas do sistema de controle multi-agente.

```
(INFORM
:sender ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE :addresses
(sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Reducao )
:receiver (set ( agent-identifier :name tcp4000@song04:1099/JADE :addresses
(sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.SocketProxyAgent ) )
:content "134.44 1750 101.2131753422223"
:reply-with tcp4000@song04:1099/JADE1182959198550 :in-reply-to
tcp4000.tcp4000-ClientConnection-Thread-10.1182959198315 )
```

6.3 Resultados da Caldeira Controlada pelo Sistema Multi-Agente

Para validar o controle inteligente feito pelo Sistema Multi-agente foram realizadas as seguintes bateladas de testes:

- Teste para alcançar o estado estacionário com as novas restrições ditadas pelos agentes de controle.
- Resposta do controle à perturbações na entrada de sólidos secos.

6.3.1 Estado Estacionário controlado.

O resultado esperado é o controle efetivo para manter os níveis de produção da caldeira perto dos limites estabelecidos. Os limites de controle monitorados pelos agentes de controle foram os seguintes.

- Para a produção de vapor o nível mínimo de produção foi de 2700[Ton/d].
- Para a eficiência de redução a restrição mínima foi de 90%.

Para níveis abaixo dos valores mencionados, o status do sistema entra em falha e os agentes são acionados para levar o sistema de volta ao normal. Para comparar com a resposta do sistema foram mantidas as mesmas condições iniciais.

Foi considerado um tempo inicial na simulação antes de colocar os agentes para monitorar suas variáveis. Este tempo garante que o sistema estará no estado estacionário original antes de estabelecer o primeiro contato com os agentes. Este tempo de espera dos agentes foi de 1000 segundos para o agente “ReduçãoAgente” e de 1100 segundos para o agente “VaporAgente”. Os resultados deste teste podem ser vistos nos gráficos de resposta ao controle multi-agente.

Figura 38: Resposta das variáveis controladas (%Redução e Produção de Vapor)

A seguir encontra-se a sequência de negociações entre os agentes para alcançar o estado estacionário nos valores estabelecidos como limites de operação. Um total

de 36 mensagens foi enviado para chegar ao novo estado estacionário. O agente “sniffer” mostra esta sequência (Figura 39)

Figura 39: Sequência de mensagens entre todos os agentes (Agentes de controle e agentes de comunicação)

- Os primeiros 1000 segundos não tiveram monitoramento dos agentes para permitir que o sistema chegasse ao estado estacionário (%Redução = 88.0137 e Vapor=2536.03).
- Exatamente no momento que o agente “ReduçãoAgente” entra no sistema, é detectada uma redução abaixo de 90% e é enviada uma mensagem de REQUEST para o agente “TCP4000”.
- O Agente “TCP4000” encaminha esta mensagem encapsulada em uma outra mensagem “REQUEST” para o agente de controle “ReduçãoAgente”.
- O Agente “ReduçãoAgente” monta uma mensagem do tipo CFP para iniciar uma negociação com o agente “VaporAgente”.
- Depois de negociar chega-se à conclusão de que a melhor estratégia é diminuir a temperatura do licor para “101.21301288000001”
- Este valor é enviado junto com as outras duas variáveis que não foram alteradas. O formato do conteúdo tem as variáveis na seguinte sequência “Temperatura do ar , Entrada de licor, Temperatura do licor”. Esta mensagem envia os valores “134.44 1750 101.21301288000001” para a plataforma de simulação onde cada um destes valores é escrito nas variáveis manipuladas do sistema de controle multi-agente.
- A resposta imediata é o aumento na redução para um valor acima de 90%.
- Depois de passados 100 segundos o agente “VaporAgente” entra no sistema, e recebe uma mensagem indicando que a produção de vapor tem um valor abaixo do limite “2700 ton/d”. A figura 40 mostra com detalhes a entrada dos agentes ao sistema.

Figura 40: Resposta do sistema no momento da entrada dos agentes. O agente redução no tempo 1000 e o agente vapor no tempo 1100.

- O agente “VaporAgente” abre uma comunicação utilizando o protocolo “FIPA-Contract-Net-Interaction-Protocol” enviando uma mensagem do tipo CFP.
- O agente envia uma proposta com o aumento da entrada do licor preto, a qual é aceita e encaminhada para a plataforma de simulação. Entrada do licor = “1841.8064”.
- Como o aumento de licor diminui a redução, o agente “ReduçãoAgente” recebe uma notificação a qual é processada para atuar no processo. O valor de redução que ativou a falha foi uma redução de “89.2736”. Novamente o melhor controle foi diminuir a temperatura do licor para “100.06933808355556”
- O agente da redução agiu de forma rápida regressando o valor da redução para um valor perto do limite.

- A produção de vapor com uma dinâmica mais lenta do que a da redução, característica específica deste modelo, de forma devagar foi chegando no valor limite. No tempo 1400 a produção sai do alarme e entra em status OK.

A sequência das mensagens no formato FIPA-ACL estão no apêndice B.

6.3.2 Perturbações na entrada de Sólidos Secos na Caldeira.

Depois de ter comprovado que o controle elevar as variáveis acima dos limites preestabelecidos, foi testada a perturbação de uma das variáveis mais instáveis e decisivas no desempenho do sistema, a fração de sólidos secos do licor negro. A figura 41 mostra o comportamento do Sistema Multi-Agente ao perturbar a fração de sólidos secos no licor que entra na caldeira

Figura 41: Sistema Multi-Agente atuando em caso de perturbação da fração de sólidos na caldeira.

No momento que os agentes entraram no sistema cada um teve uma atuação no controle da caldeira. A diminuição na temperatura do licor e o aumento na entrada

de licor preto fizeram com que as variáveis monitoradas permanecessem num nível aceitável pelos agentes. Diferente dos testes no estado estacionário, a fração de sólidos secos aumentou ajudando ainda mais a manter a caldeira fora de uma situação de falha. Depois de a caldeira ter alcançado uma boa pelo aumento dos sólidos secos, no tempo 4000 houve uma queda na fração de sólidos. Esta diminuição não foi suficiente para ativar o serviço dos agentes. No total foram 12 mensagens trocadas pelos agentes (Figura 42).

Figura 42: Troca de mensagens entre agentes no controle da caldeira com perturbações na fração de sólidos.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE ESTUDO

7.1 Conclusões

Este trabalho de tese permitiu estudar e desenvolver uma metodologia completa para entender como trabalha um sistemas Multi-Agentes. Foram respondidas várias perguntas relacionadas à esta tecnologia, sendo a principal delas o questionamento sobre se era possível desenvolver agentes para controlar um processo contínuo, como o da Caldeira de Recuperação. Pela rapidez da resposta conseguimos ter uma ação de controle que acompanha a dinâmica do processo em tempo real, característica esta muito importante dos processos contínuos mas que as vezes dificulta uma ação de controle eficaz.

Para chegar nesta conclusão a tese passou por várias etapas até chegar no Sistema Multi-Agente. Primeiro foi necessário desenvolver um modelo dinâmico da Caldeira de Recuperação Química. Este modelo foi construído em Simulink™ utilizando um estudo que através de balanços de massa e energia consegue prever a dinâmica da caldeira. Por ser um modelo antigo, foi preciso adicionar em diferentes etapas novas dinâmicas do processo que enriquecem de detalhes o comportamento da caldeira. Para validar o modelo foi comparada a resposta a diferentes condições de operação com os dados do modelo original. As variáveis escolhidas para validar o modelo foram as variáveis que posteriormente o sistema multi-agente monitoraria. Por isso o resultado da validação foi importante na construção do comportamento dos agentes frente a diversas situações de falhas. Como resultado obteve-se, nas variáveis escolhidas, o desvio de 15.8% entre o modelo original e o modelo em Simulink. Esta diferença deve-se em grande parte as diferenças no modelo de geração de vapor, onde foi adicionado um modelo que descreve com muita precisão o comportamento do balão.

Outra etapa na metodologia foi o desenvolvimento dos agentes. Por ser uma pesquisa totalmente nova na Engenharia Química, não era muito claro o caminho a seguir e qual era a direção correta a ser tomada para o entendimento da tecnologia. Até que a partir do ano de 2006 uma Fundação de pesquisa que promove tecnologia de agentes chamada FIPA se destacou frente a outras instituições. Na comunidade de pesquisa de agentes existem diferentes focos de desenvolvimento para os quais o incentivo da iniciativa privada é primordial o sucesso destes desenvolvimentos. Um dos mais importantes destes focos de desenvolvimento fica na Itália, onde um grupo da Telecom desenvolveu uma plataforma de agentes baseada no padrão FIPA de agentes. Esta interface de desenvolvimento chamada JADE, viabilizou o uso da tecnologia para áreas de pesquisa onde existem limitações naturais no entendimento de sistemas e linguagem computacionais. Depois de ter criado os agentes de controle em JADE concluímos que esta foi uma ferramenta que minimizou a barreira no entendimento da tecnologia de agentes, onde o programador focaliza a verdadeira utilidade de um sistema multi-agente, que é a interação e relacionamento entre eles.

Por último foi configurada a comunicação entre a plataforma de agentes e o simulador da caldeira, utilizando o protocolo de comunicação TCP. Este método de comunicação foi rápido e confiável. Em todos os testes que foram feitos nunca houve uma mensagem perdida no caminho. A ferramenta TCP utilizada no Simulink também mostrou um desempenho ideal para processos contínuos. Podemos concluir que este protocolo de comunicação TCP ajudou na confiabilidade e robustez do Sistema Multi-agentes.

Convém utilizar aqui várias avaliações de Jennings e Bussmann (2003), adaptadas para a realidade do presente trabalho. Em primeiro lugar, para demonstrar eficácia da abordagem de controle por sistemas de multiagentes, poderia pensar que o melhor argumento é mostrar quantitativamente que os resultados serão melhores do que em um projeto convencional de controle. Entretanto, tais dados simplesmente não são disponíveis na maioria dos casos, pois métodos convencionais trabalham com conceitos diferentes. Dado este fato, deve-se entender que é mais eficaz uma justificativa qualitativa do porquê a abordagem multi-agente é mais adequado a engenharia de controle dos sistemas complexos. Tornando mais claro o argumento,

sob a perspectiva de sistemas de controle, esta perspectiva de sistema multi-agente tem mais similaridades com o modo de trabalho em sistemas multi-hierárquicos em controle distribuído, onde pode-se minimizar as falhas de um sistema de hierarquia de controle através da distribuição de sistema de decisão em partes inteligentes, isto é, na prática, se aproxima mais da análise do modo de trabalho do ser humano como operador de planta.

Os conceitos e a linguagem de multiagentes é ainda árdua e desconhecida para Engenharia Química, e por este motivo é natural esperar resistência ao seu uso. Entretanto existem algumas motivações pragmáticas para que esta técnica possa ser adotada largamente no futuro. A primeira é que a visão fornecida pelo sistema multi-agente para sistemas complexos é uma linguagem mais natural e adequada para caracterizar diversos tipos de problemas. A segunda razão é que o uso de sistemas multiagentes não exige nenhuma ruptura em plataformas de hardware ou de software, pois ela é de natureza evolucionária e incremental. Em outras palavras, o ambiente de softwares e web de tecnologia de informação já os utilizam largamente, e este uso está migrando para aplicações práticas em sistemas de manufatura, que pode rever as arquiteturas de FMS (sistemas flexíveis de manufatura). Com a sua consolidação, as aplicações em indústrias de processos contínuos ocorrerá mais cedo ou mais tarde. Este mesmo cenário ocorreu em tempos antigos com controle lógico-programáveis (PLC) e com controle digital por computador (DCS).

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Voltando especificamente à presente aplicação na caldeira de recuperação química, sugere-se a adição de mais um agente para monitorar outras variáveis tais como a temperatura na saída dos economizadores ou as emissões que saem da caldeira. Este agente ajudaria a entender o comportamento autônomo e de competição que os agentes têm por natureza.

Além disso, sugere-se desenvolver um outro sistema Multi-Agente para monitorar o nível de tanques interligados, problema típico de ensino na área de controle

avançado de sistemas. O modelo em Simulink da dinâmica dos tanques foi desenvolvido nesta tese como protótipo de teste, mas não chegou a se implementar um controle inteligente. Uma vez testado o sistema multi-agente dos tanques seria de grande aporte à montagem de uma planta piloto onde a plataforma de agentes comunicaria com instrumentação de medidores de nível via TCP. Seria um exemplo ilustrativo que ajudaria na divulgação e aceitação de um novo paradigma na área de controle de processos químicos.

Os sistemas de software irão evoluir aceleradamente, exatamente como atravessamos por diversas propostas de protocolos de comunicação e de linguagens de multiagentes durante o desenvolvimento do presente trabalho. Portanto, espera-se que as aplicações na indústria química acompanhem esta evolução.

Referências Bibliográficas

ADAMS, T.N.; FREDERICK, W.J.; GRACE, T.M.; HUPA, et al. **Kraft recovery boilers**. New York: Tappi Press, 1997. 381p.

ALMEIDA, G.M.; PARK, S.W.; CARDOSO, M. **Variables seletion for neural networks identification for Kraft recovery boilers**. In: 2nd IFAC Workshop on Advanced Fuzzy/Neural Control 2004 (AFNC04). Finlândia, 2004. p. 91-96,

ASTROM, K. J.; BELL, R. D. Drum boiler dynamics. **Automatica**, 2000, 36, p.363-378.

BELLIFEMINE, F.; CAIRE, G.; TRUCCO, T. ; RIMASSA G. **JADE Programmer's Guide**. 2003. Disponível:
<http://sharon.cselt.it/projects/jade/doc/programmersguide.pdf>

BHADA, R.K; LANGE H.B.; MARKANT H.B. **Air pollution from kraft recovery units – the effect of operational variables..** In TAPPI Environment Conference, Houston, TX, May 1972, p.14-17.

BJÖRKLUND, H.; WARNQVIST, B.; PETTERSSON, B. Inside a kraft recovery boiler: combustion of high-sulphidity black liquor at high dry solids..**Pulp and Paper Canada**, 1991, v.92 n.8 p.44-46.

BUSSMANN, S.; JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. 2004. **Multiagent systems for manufaturing control: a design methodology**, Springer.

CHOKSHI, N. N.; McFARLANE, D. C. Rationales for holonic applications in chemical process industry. In: Marik, V., Stepankova, O., Krautwurmova, H., Luck, M. (eds.). **Multi-Agent Systems and Applications II**, Springer, Germany, 2002. p. 323-335.

COELHO, H.; PAIVA, A. **A mente e o mundo lá fora**: uma introdução à inteligência artificial distribuída. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa / Instituto Superior Técnico1998.

DEEN, S. (ed.). Agent-based manufacturing, **Advances in the Holonic Approach**. Springer. 2003.

EMPIE, H.J.; LIEN, S.J.; YANG, W.; ADAMS, T.N. Spraying characteristic of commercial black liquor nozzles. **Tappi J.** 1995, v.78 n.1 p.121.

FREDERICK, W.J.; NOOPILA, T.; HUPA M. Combustion behavior of black liquor at high solids firing. **Tappi J.** 1991. v.74 n.12. p. 163-170.

GALTUNG, F.L.; WILLIAMS, T.J. **Mathematical model and digital computer based advanced control system for a kraft mill CE type recovery unit**. Technical Report 43, Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, Schools of Engineering, Purdue University, West Lafayette, 1971, IN 47907.

GUDWIN, R.R. **Introdução à teoria de agentes**. DCA-FEEC-UNICAMP. <http://www.dca.fee.unicamp.br/~gudwin/courses/IA009/>, 2003.

HEWITT, C. **A universal modular ACTOR formalism for AI**. Proceedings of the 3rd International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1973. p. 235-245.

HUPA, M.; SOLIN, P.; HYOTY, P. Combustion behaviour of black liquor droplets J. **Pulp Paper Sci.**, 1987, v.13 n.2: p. 67-72.

HYOTY, P.A.; OJALA, S.T. High-solids black liquor combustion. **Tappi J.**, 1988. v.71 n.1 p. 108-111.

JENNINGS, N. R. An agent-based approach for building complex software systems. **Communications of the ACM**, 2001., v.44 n.4 p. 35-41.

JENNINGS, N. R.; BUSSMANN, S. Agent-based control systems. Agent-based control systems. **IEEE Control Systems** (2003) v.23, n.3, pp. 61-74

JONES, A.K.; ANDERSON, M.J. High solids firing at Arkansas kraft. **Pulp and Paper Canada**, 1993. v.94 n.6 p. 177-180.

KARNIENNY, M.G.; URONEN, P.; WILLIAMS, T.J. **A Mathematical model of the babcock and wilcox black liquor recovery furnace**. Technical Report 97, Purdue Laboratory for Applied Industrial Control, Purdue University, West Lafayette, 1979.

LEFEBVRE, B.E.; SANTYR, G.M. Effect of operating variables on kraft chemical recovery boiler performance..**Pulp and Paper Canada**, 1989. v.90 n.12 p. 446-451.

MARIK, V.; STEPANKOVA, O.; KRAUTWURMOVA, H.; LUCK, M. (eds.).. **Multi-Agent systems and applications II**. Springer, Germany, 2002b.

MENESES, E. X. 2001. **Jornada de atualização em inteligência artificial – integração de agentes de informação**. 2001. <http://www.ime.usp.br/~eudenia/jaia/>

MERRIAM, R.L.; RICHARDSON, D.L.; GRACE, T.M.; TAYLOR, M.L. Model studies of kraft recovery furnaces. **AIChE Symp**. 1980. Ser., v.76 n.200 p. 99–112.

MINSKY, M. **The society of mind**. Simon & Schuster. 1985.

RUSSEL, S., NORVIG, P. **Artificial intelligence: A Modern Approach**. Prentice Hall, 2003.

RYDESATER, P. MATLAB Central File Exchange. \TCP/UDP/IP Toolbox 2.0.5." (2006) [Online].

Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=345&objectType=file>

SATURNINO, M.D. **Redução dos teores dos íons cloreto e potássio na unidade de recuperação do licor negro das indústrias de papel e celulose**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2003.

SCHWEITZER, F. **Brownian agents and active particles: Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences**. Springer, 2003.

TORSUN, I.S. Foundations of Intelligent Knowledge-based systems. London: Academic Press, 1995.

TRAN, H.N.; ELLIOTT, M.; BARHAM, D.; REEVE, D.W. **Recovery boiler operation and plugging in Canada. 1990. Pulp and Paper Canadá**, 87(7): 58-64, 1986. In: PINTO, J.M.; PARK, S.W.; NEVES, J.M. *Caldeira de Recuperação- Parte I- Análise da Operação*. Trabalho apresentado no 23º Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP,

WEISS, Gerhard. **Multiagent Systems. A Modern approach to distributed artificial intelligence**. MIT Press, 1999.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. Intelligent agents: theory and practice. **The Knowledge Engineering Review**. 1995., v.10, n.2, p. 115-152.

WOOLDRIDGE, M. Michael Intelligent Agents. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**, The MIT Press, 1999.

WOOLDRIDGE, M. **Reasoning about rational agents**. MIT Press. 2000.

Referências Consultadas

ANDRITZ A. G. Disponível em <<http://www.andritz.com/>>. Acesso em: 31 Mai. 2005.

BAKER, A. JAFMAS – **A java-based agent framework for multiagent systems**. Development and Implementation. Cincinnati: Department of Electrical & Computer Engineering and Computer Science University of Cincinnati, 1997. Tese (Doutorado)

BARTO, A.G.; SUTTON, R.S.; ANDERSON, C.W. Neuronlike elements that can solve difficult learning control problems. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, 1993. n.13, p. 834-846.

BERTSEKAS, D. P. **Dynamic Programming**: Deterministic and Stochastic Models. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1987.

BORDADO J.C.M.; GOMES, J.F.P. **Atmospheric emissions of Kraft pulp mills**. Chemical Engineering and Processing, 2002. vol. 41, p. 667-671.

BRATMAN, M.E. **What is intention?** In P.R. Cohen, J. Morgan, and M.E. Pollack, editors. Intentions in Communication. MIT Press, Cambridge, Mass. 1990. p. 15--31.

BROOKS, Rodney A. A robust layered control system for a mobile robot. **IEEE Journal of Robotics and Automation** 1986.

CATRO, J., KOLP, M., MYLOPOULOS, J. **Towards requirements-driven information systems engineering**: the tropos project. Université Catholique de Louvain, Institut d'administration et de gestion, 2002. Working paper 31/02.

GIGERENZER, G. **Adaptive thinking**. Oxford University Press, 2000.

GIGERENZER, G.; SELTEN, R. (Eds.) **Bounded rationality**: the adaptive toolbox. MIT Press, 1999.

HUHNS, M. N.; STEPHENS, L. M. **Multiagent systems and societies of agents**, In:

Weiss, G. (ed.) Multiagent Systems. MIT Press 1999, p. 79-120.

INSELBERG, A.; DIMSDALE, B. **Parallel coordinates** - a tool for visualizing multidimensional geometry. In: Proceedings of the First IEEE Conference on Visualization, 1990. p. 361-378,

JENNINGS, N. R. On agent-based software engineering, **Artificial Intelligence**, No. 117, 2000. pp. 277-296.

JENNINGS, N. R.; WOOLDRIDGE, M. **Agent-oriented software engineering, proceedings of the 9th European workshop on modelling autonomous agents in a multi-agent world: multi-agent system engineering (MAAMAW-99)** 2000..

KAEBLING, L. P.; LITTMAN, M. L.; MOORE, A. W. **Reinforcement learning: a survey**. Journal of Artificial Intelligence Research, 1996. v. 4, p. 237-285.

Tacla, Celso., **Caldeiras de recuperação**, In: Curso de Especialização em Celulose e Papel (USP), 62p., 2002. (CDROM)

LABROU, Y., T. FININ, T., PENG, Y. Agent communication languages: the current landscape, **IEEE Intelligent Systems**, 1999. v.14, n.2, p. 45-52.

LUCK, M.; ASHRI, R.; D'IVERNIO, M. **Agent-based software development**, Artech House, Inc 2004.

MICHAEL N.; Huhns, Larry M. Stephens. **Agents on the web: exploiting expertise through knowledge networks**. IEEE Internet Computing, 1999. 3(6): p. 89-90

MITCHELLI, T. **Machine learning**. New York. McGraw Hill, 1997.

PARUNAK, H. V. D. **“Go to the Ant”**: Engineering Principles from Natural Multi-Agent Systems, Annals of Operations Research, 1997. Vol. 75, p. 69-101.

PFEIFER, R., SCHEIER, C. **Understanding intelligence**. MIT Press, 1999.

RUSSEL, S. **Rationality and intelligence**. In Wooldridge M., Rao, A. (Eds.), Foundations of Rational Agency. Kluwer Academic Publishers, 1999..

SIAN SS, **Adaptation based on cooperative learning in multi-agent systems**, in Y. Demazeau and JP Müller (eds.) Decentralized AI 2, Elsevier, 1991. p. 257-272

SIMON, H. Motivational and emotional controls of cognition. **Psychological Review**, 1967. n.74,p. 29-39.

SIMON. , H.. **The sciences of the artificial**. MIT Press, 1981.

VAKKILAINEN, E.; VEHEMAAN-KREULA, J.; VESALA, R.; VILPPONEN, A.; USITALO, P. **Chemical recovery**, Chapter 11, In: Chemical pulping, Book 6, Paper Making Science and Technology, 2000.

VisuLab 4.0. Zurich: Institute of Computational Science, ETH Zurich. Copyright © 2005. Disponível em <<http://www.inf.ethz.ch/personal/hinterbe/Visulab/>>. Acesso em: 31 Fev. 2005.

WATKINS, C.J.C.H. **Learning from delayed rewards**. Tese (doutorado)- University of Cambridge, 1989.

WEISS, G. Agent orientation in software engineering. **Knowledge Engineering Review**, 2002. Vol. 16, No. 4, p. 349-373.

WOOLDRIDGE, M.; CIANCARINI, P. **Agent-oriented software engineering: the state of the art**, In: Ciancarini, P., Wooldridge, M. 2001, (eds.) **Agent-Oriented Software Engineering**, Springer-Verlag.

WOOLDRIDGE, M. **An introduction to multi-agent systems**. John Wiley & Sons, 2002.

ZAMBERLAM, A.; GIRAFFA, L.; **Modelagem de agentes utilizando a arquitetura BDI**. Technical Reports Series, Faculdade de Informática – PUCRS, 2001.

APÊNDICE A

Modelo Matemático da Caldeira de Recuperação

APÊNDICE A

Modelo Matemático da Caldeira de recuperação

Modelo matemático realizado em 1977 por Babcock e Wilcox. Este modelo foi uma adaptação do modelo matemático da unidade de recuperação de energia realizado por Galtung. Parte deste modelo foi considerado como base na elaboração do simulador da caldeira em Simulink utilizado nesta tese. (Capítulo 4)

A.1 Licor Negro

O licor negro proveniente da área de evaporação é considerado como a soma dos seguintes componentes:

- Sólidos de entrada (X_{bls}): Sólidos obtidos a partir da madeira dissolvida e do processo no digestor.
- Mistura de sais ($X_{Na_2SO_4}$): Sulfato de Sódio adicionado no licor.
- Carbonato ($X_{Na_2CO_3}$): Carbonato de sódio adicionado ao licor no precipitador e evaporador.
- Água: A água é removida do evaporador, e parte é adicionada durante o aquecimento do licor preto.

A soma das frações parciais do licor preto de ser igual a 1:

$$X_{bls} + X_{Na_2SO_4} + X_{Na_2CO_3} + X_{blw} = 1 \quad (A.1.1)$$

Os sólidos de entrada são decompostos nos seguintes componentes: Hidrogênio ($X_H^{(bl)}$), Sulfato de sódio ($X_{Na_2S}^{(bl)}$), Oxigênio ($X_O^{(bl)}$), Carbono ($X_C^{(bl)}$), Sódio ($X_{Na}^{(bl)}$), Enxofre ($X_S^{(bl)}$), sendo:

$$X_H^{(bl)} + X_{Na_2S}^{(bl)} + X_O^{(bl)} + X_C^{(bl)} + X_{Na}^{(bl)} + X_S^{(bl)} = 1 \quad (A.1.2)$$

Tabela 1 – Licor negro de entrada que vai para o tanque de mistura

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(bl)}$	3216,0	lb/hr	Vazão de H no licor negro
$w_O^{(bl)}$	30602,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro
$w_S^{(bl)}$	5422,0	lb/hr	Vazão de S no licor negro
$w_C^{(bl)}$	34002,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro
$w_{Na}^{(bl)}$	17920,0	lb/hr	Vazão de Na no licor negro
$w_{Na_2S}^{(bl)}$	441,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S no licor negro
$w_{H_2O}^{(bl)}$	53944,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no licor negro
$w_{total}^{(bl)}$	145842,0	lb/hr	Vazão de total de licor negro

$\dot{Q}_{sens}^{(bl)}$	9,56E6	BTU/lb	Calor sensível do licor negro
-------------------------	--------	--------	-------------------------------

A.2. Sais de Sulfato

Os sais de reposição são considerados todos como sulfato de sódio:

Tabela 2 – Sais de Sulfato

variável	valor	unidade	descrição
$w_{Na_2SO_4,fa}$	1926,0	lb/hr	Vazão dos sais de reposição (sais de sulfato)
$X_{Na_2SO_4,fa}$	1,0		Teor de sulfato de sódio nos sais de reposição.

A.3. Vapor na Alimentação

No presente processo ainda se aquece o licor preto com injeção direta de vapor:

Tabela 3 – Vapor de Aquecimento

variável	valor	unidade	descrição
w_{st}	1663,0	lb/hr	Vazão do vapor de aquecimento direto do licor negro
w_{total}	1663,0	lb/hr	Vazão total.

A.4. Água de Alimentação

A água do processo, deionizada, entra no economizador com os seguintes valores:

Tabela 4 – Água de alimentação da caldeira

variável	valor	unidade	descrição
w_{H_2O}	373673,0	lb/hr	Vazão da água de alimentação da caldeira
w_{total}	373673,0	lb/hr	Vazão total de água.
$\dot{Q}_{sens}^{(w)}$	93,11E6	BTU/hr	Calor sensível.

A.5. Ar de Combustão

Fig.05: Entradas de ar de combustão, Licor, e saída de fundidos

Tabela 5 - Ar de Combustão

variável	valor	unidade	descrição
$w_O^{(1)}$	41133,0	lb/hr	Vazão de O no ar primário.
$w_N^{(1)}$	137707,0	lb/hr	Vazão de N no ar primário.
$w_{H_2O}^{(1)}$	2371,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no ar primário.
$w_{total}^{(1)}$	181211,0	lb/hr	Vazão de total do ar primário.
$\bullet$ $Q_{sens}^{(1)}$	7,99E6	BTU/hr	Calor sensível.
$w_O^{(2)}$	27438,0	lb/hr	Vazão de O no ar secundário.
$w_N^{(2)}$	91887,0	lb/hr	Vazão de N no ar secundário.
$w_{H_2O}^{(2)}$	1587,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no ar secundário.
$w_{total}^{(2)}$	120912,0	lb/hr	Vazão de total do ar secundário.
$\bullet$ $Q_{sens}^{(2)}$	5,44E6	BTU/hr	Calor sensível.
$w_O^{(3)}$	38239,0	lb/hr	Vazão de O no ar secundário.
$w_N^{(3)}$	128047,0	lb/hr	Vazão de N no ar secundário.
$w_{H_2O}^{(3)}$	2211,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no ar secundário.
$w_{total}^{(3)}$	168497,0	lb/hr	Vazão de total do ar secundário.
$\bullet$ $Q_{sens}^{(3)}$	7,77E6	BTU/hr	Calor sensível.

A.6. Aquecedor do licor:

O aquecedor é utilizado para elevar a temperatura do licor preto. O aquecedor primário encontra-se no tanque de mistura, e o aquecedor secundário, entre o tanque de mistura e o pulverizador. Entretanto o balanço será em apenas uma etapa. Também se assume como válidas as equações algébricas de balanços estacionários.

$$\text{Balanço de massa total: } w_{bl}^{(h)} = w_{bl}^{(mt)} + w_{st}^{(h)} \quad (\text{A.6.1})$$

$$\text{Água: } w_{bl}^{(h)} X_{blw}^{(h)} = w_{bl}^{(mt)} X_{blw}^{(mt)} + w_{st}^{(h)} \quad (\text{A.6.2})$$

$$\text{Sólidos: } w_{bl}^{(h)} X_{bls}^{(h)} = w_{bl}^{(mt)} X_{bls}^{(mt)} \quad (\text{A.6.3})$$

$$\text{Sulfato de sódio: } w_{bl}^{(h)} X_{Na_2SO_4}^{(h)} = w_{bl}^{(mt)} X_{Na_2SO_4}^{(mt)} \quad (\text{A.6.4})$$

$$\text{Carbonato de sódio: } X_{Na_2CO_3}^{(h)} = 1 - X_{blw}^{(h)} - X_{bls}^{(h)} - X_{Na_2SO_4}^{(h)} \quad (\text{A.6.5})$$

Balanço de Energia:

$$T_{bl}^{(h)} = \frac{1}{w_{bl}^{(h)} (X_{blw}^{(h)} c_{pw} + (1 - X_{blw}^{(h)}) c_{pbls})} [w_{bl}^{(mt)} (X_{blw}^{(mt)} c_{pw} + (1 - X_{blw}^{(mt)}) c_{pbls}) (T_{bl}^{(mt)} - 80) + w_{st}^{(h)} (H_{st}^{(h)} + c_{pw} (T_{st}^{(h)} - 80))] + 80 \quad (A.6.6)$$

T_{st} é a temperatura de saturação para o aquecedor, e H_{st} é o calor de vaporização na temperatura T_{st} . Resolvendo-se a equação acima, temos:

$$w_{st}^{(h)} = \frac{1}{H_{st}^{(h)} + c_{pw} (T_{st}^{(h)} - T_{bl}^{(h)})} [w_{bl}^{(mt)} (X_{blw}^{(mt)} c_{pw} + (1 - X_{blw}^{(mt)}) c_{pbls}) (T_{bl}^{(h)} - T_{bl}^{(mt)})] \quad (A.6.7)$$

Tabela 6 – Aquecedor

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(h)}$	3216,0	lb/hr	Vazão de H no licor negro no aquecedor
$w_O^{(h)}$	30602,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro no aquecedor
$w_S^{(h)}$	5422,0	lb/hr	Vazão de S no licor negro no aquecedor
$w_C^{(h)}$	34002,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro no aquecedor
$w_{Na}^{(h)}$	17920,0	lb/hr	Vazão de Na no licor negro no aquecedor
$w_{Na_2S}^{(h)}$	441,0	lb/hr	Vazão de Na_2S no licor negro no aquecedor
$w_{Na_2SO_4pa}^{(h)}$	4851,0	lb/hr	Vazão de Na_2SO_4 na forma de partículas no aquecedor
$w_{Na_2SO_4fa}^{(h)}$	2184,0	lb/hr	Vazão de Na_2SO_4 na forma de cinzas no aquecedor
$w_{Na_2CO_3fa}^{(h)}$	5827,0	lb/hr	Vazão de Na_2CO_3 na forma de cinzas no aquecedor
$w_{H_2O}^{(h)}$	55607,0	lb/hr	Vazão de H_2O no aquecedor
$w_{total}^{(h)}$	160367,0	lb/hr	Vazão de total no aquecedor
$\dot{Q}_{sens}^{(h)}$	11,89E6	BTU/hr	Calor sensível.

3.7. Pulverizador e Injetor de Licor:

No presente modelo do equipamento de Babcox & Wilcox, o licor entra na caldeira na altura de 34 ft, logo acima do leito de carvão e fundidos, e abaixo dos primeiros bicos de ar secundário. Neste modelo antigo, a pulverização em spray (diferente de spray de secadores), é feita em bicos oscilantes com pratos que espalham o líquido em uma parte direcionado a parede e outra parte direcionada ao

chão do leite. Naturalmente espera-se que a maior parte da água tenha se evaporado até atingir os alvos. A fórmula para a razão de pulverização é dada por:

$$\eta_1 = C_1 \sqrt{P} \frac{T_{bl}^{(h)}}{T_R^{(h)}} \cdot \frac{X_S^{(h)}}{X_{SR}^{(h)}} \frac{1}{D_P} \quad (\text{A.7.1})$$

Portanto a quantidade do licor que é pulverizado e segue a corrente de gases, é dado por:

$$w_{bl}^{(pe)} = w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} \eta_1 \quad (\text{A.7.2})$$

Os balanços materiais dos componentes elementares relativos ainda apenas ao licor que entra na corrente de gás fornecem as frações mássicas de hidrogênio, oxigênio, enxofre, carbono e sódio:

$$X_H^{(pe)} = X_{bls}^{(sp)} X_H^{(blmt)} + X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{2M_H}{M_{H_2O}} \right) \quad (\text{A.7.3})$$

$$X_O^{(pe)} = X_{bls}^{(sp)} X_O^{(blmt)} + X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{M_O}{M_{H_2O}} \right) + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \left(\frac{4M_O}{M_{Na_2SO_4}} \right) + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{3M_O}{M_{Na_2CO_3}} \right) \quad (\text{A.7.4})$$

$$X_S^{(pe)} = X_{bls}^{(sp)} \left[X_S^{(blmt)} + X_{Na_2S}^{(blmt)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2S}} \right) \right] + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2SO_4}} \right) \quad (\text{A.7.5})$$

$$X_C^{(pe)} = X_{bls}^{(sp)} X_C^{(blmt)} + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{M_C}{M_{Na_2CO_3}} \right) \quad (\text{A.7.6})$$

$$X_{Na}^{(pe)} = 1 - X_H^{(pe)} - X_O^{(pe)} - X_S^{(pe)} - X_C^{(pe)} \quad (\text{A.7.7})$$

Tabela 7 – Pulverizador e Injetor de Licor

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(pe)}$	1579,0	lb/hr	Vazão de H pulverizada no chão do leite
	1045,0	lb/hr	Vazão de H pulverizada nas paredes do leite
$w_O^{(pe)}$	15022,0	lb/hr	Vazão de O pulverizada no chão do leite
	9948,0	lb/hr	Vazão de O pulverizada nas paredes do leite
$w_S^{(pe)}$	2571,0	lb/hr	Vazão de S pulverizada no chão do leite
	1703,0	lb/hr	Vazão de S pulverizada nas paredes do leite
$w_C^{(pe)}$	16692,0	lb/hr	Vazão de C pulverizada no chão do leite
	11054,0	lb/hr	Vazão de C pulverizada nas paredes do leite
$w_{Na}^{(pe)}$	8671,0	lb/hr	Vazão de Na pulverizada no chão do leite
	5742,0	lb/hr	Vazão de Na pulverizada nas paredes do leite

$w_{Na_2S}^{(pe)}$	216,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S pulverizada no chão do leito
	143,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S pulverizada nas paredes do leito
$w_{Na_2SO_4,fa}^{(pe)}$	3453,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas que é pulverizada para o chão do leito
	2287,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas que é pulverizada para as paredes do leito
$w_{Na_2CO_3,fa}^{(pe)}$	2860,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas que é pulverizada para o chão do leito
	1894,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas que é pulverizada para as paredes do leito
$w_{H_2O}^{(pe)}$	27298,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O pulverizada no chão do leito
	18077,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O pulverizada nas paredes do leito
$w_{total}^{(pe)}$	78725,0	lb/hr	Vazão total pulverizada no chão do leito
	51893,0	lb/hr	Vazão total pulverizada nas paredes do leito
$\dot{Q}_{sens}^{(pe)}$	5,83E6	BTU/hr	Calor sensível para o chão do leito
	3,89E6	BTU/hr	Calor sensível para as paredes do leito

A.8. Leito (Paredes e Chão):

O licor que não se nebuliza e segue pela corrente de gases, irá se deslocar para as paredes do leito ($r_2 = 0.4$), ou para o chão do leito ($r_1 = 0.6$).

O balanço de licor total é dado por:

$$w_{bl}^{(spc)} = \left(w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} - w_{bl}^{(pe)} \right) r \quad (A.8.1)$$

Os balanços materiais dos componentes separadamente são dados por:

$$\text{Água: } w_w^{(spc)} = \left(w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} - w_{bl}^{(pe)} \right) X_{blw}^{(sp)} \cdot r \quad (A.8.2)$$

$$\text{Sólidos: } w_{bls}^{(spc)} = \left(w_{bl}^{(sp)} X_{bls}^{(sp)} \right) r \quad (A.8.3)$$

$$\text{Sais de Sulfato: } w_{Na_2SO_4}^{(spc)} = \left(w_{bl}^{(sp)} X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \right) r \quad (A.8.4)$$

$$\text{Carbonato: } w_{Na_2CO_3}^{(spc)} = \left(w_{bl}^{(sp)} X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \right) r \quad (A.8.5)$$

$$\text{Sólidos Totais: } w_{blts}^{(spc)} = w_{bls}^{(spc)} + w_{Na_2SO_4}^{(spc)} + w_{Na_2CO_3}^{(spc)} \quad (A.8.6)$$

$$\text{Hidrogênio: } w_H = w_{bls} \cdot X_H^{(blmt)} \quad (A.8.7)$$

$$\text{Carbono puro: } w_C^{(spc)} = w_{bls}^{(spc)} X_C^{(blmt)} \quad (A.8.8)$$

Carbono na forma de carbonato: $w_{C(Na_2CO_3)} = w_{Na_2CO_3} \cdot \left(\frac{M_C}{M_{Na_2CO_3}} \right)$ (A.8.9)

Enxofre puro: $w_S^{(spc)} = w_{bls}^{(spc)} \left[X_S^{(blmt)} + X_{Na_2S}^{(blmt)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2S}} \right) \right]$ (A.8.10)

Enxofre na forma de Na_2SO_4 : $w_{S(Na_2SO_4)}^{(spc)} = w_{Na_2SO_4}^{(spc)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2SO_4}} \right)$ (A.8.11)

Sódio:

$$w_{Na}^{(spc)} = w_{bls}^{(spc)} \left[X_{Na}^{(blmt)} + X_{Na_2S}^{(blmt)} \left(\frac{2M_{Na}}{M_{Na_2S}} \right) \right] + w_{Na_2SO_4}^{(spc)} \left(\frac{2M_{Na}}{M_{Na_2SO_4}} \right) + w_{Na_2CO_3}^{(spc)} \left(\frac{2M_{Na}}{M_{Na_2CO_3}} \right)$$
 (A.8.12)

Oxigênio:

$$w_O^{(spc)} = w_{bls}^{(spc)} - w_H^{(spc)} - w_C^{(spc)} - w_{C(Na_2CO_3)}^{(spc)} - w_S^{(spc)} - w_{S(Na_2SO_4)}^{(spc)} - w_{Na}^{(spc)}$$
 (A.8.13)

Hipóteses no Leito:

1. A água presente no licor, ao alcançar a superfície do leito, evapora instantaneamente.
2. Todo o sódio e enxofre presentes nos sólidos permanecem no leito e são levados juntamente com o smelt.
3. O leito é considerado homogêneo (perfeitamente misturado).
4. A taxa de reação é proporcional aos produtos da fração mássica do carbono e à um termo de Arrhenius.
5. A eficiência na redução do smelt é determinada por um modelo de Bauer e Dorland.
6. A deficiência de oxigênio no modelo de Bauer e Dorland é considerada igual ao valor teórico nas zonas primárias e secundárias.
7. A temperatura no modelo de Bauer e Dorland é considerada igual a da temperatura superficial da camada do leito.
8. A temperatura superficial da camada é determinada através de um balanço de energia para o leito total utilizando-se um pseudovolume.
9. A densidade da maioria dos leitos é considerada constante.

Seguindo com os balanços materiais, temos:

Evaporação da água do leito:

$$w_w^{(cs)} = w_{bl}^{(spc)} X_{blw}^{(spc)}$$
 (A.8.14)

Balço diferencial total, assumindo a densidade do leito constante:

$$\frac{d}{dt}(\rho V^{(cb)}) = w_{blts}^{(spc)} - w^{(cm)} \quad (A.8.15)$$

$$\frac{d}{dt}V^{(cb)} = \frac{1}{\rho} \left[(w_{blts}^{(spc)}) - w^{(cm)} \right] \quad (A.8.16)$$

onde a velocidade de reação é dada por:

$$w^{(cm)} = K_{cm} X_C^{(cb)} \exp \left(-\frac{\alpha_C}{T_C + 460} \right) \quad (A.8.17)$$

Balços Diferenciais Parciais:

Carbono:

$$\frac{d}{dt}X_C^{(cb)} = \frac{1}{\rho^{(cb)}V^{(cb)}} (w_C^{(spc)} - w_{blts}^{(spc)} \cdot X_C^{(cb)}) \quad (A.8.18)$$

Carbono na forma de Carbonato:

$$\frac{d}{dt}X_{C(Na_2CO_3)}^{(cb)} = \frac{1}{\rho^{(cb)}V^{(cb)}} (w_{C(Na_2CO_3)}^{(spc)} - w_{blts}^{(spc)} \cdot X_{C(Na_2CO_3)}^{(cb)}) \quad (A.8.19)$$

Sódio:

$$\frac{d}{dt}X_{Na}^{(cb)} = \frac{1}{\rho^{(cb)}V^{(cb)}} (w_{Na}^{(spc)} - w_{blts}^{(spc)} \cdot X_{Na}^{(cb)}) \quad (A.8.20)$$

Hidrogênio:

$$\frac{d}{dt}X_H^{(cb)} = \frac{1}{\rho^{(cb)}V^{(cb)}} (w_H^{(spc)} - w_{blts}^{(spc)} \cdot X_H^{(cb)}) \quad (A.8.21)$$

Enxofre:

$$\frac{d}{dt}X_S^{(cb)} = \frac{1}{\rho^{(cb)}V^{(cb)}} (w_S^{(spc)} - w_{blts}^{(spc)} \cdot X_S^{(cb)}) \quad (A.8.22)$$

Enxofre na forma de sal:

$$\frac{d}{dt}X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)} = \frac{1}{\rho^{(cb)}V^{(cb)}} (w_{S(Na_2SO_4)}^{(spc)} - w_{blts}^{(spc)} \cdot X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)}) \quad (A.8.23)$$

Oxigênio:

$$X_O^{(cb)} = 1 - X_C^{(cb)} - X_H^{(cb)} - X_S^{(cb)} - X_{Na}^{(cb)} - X_{C(Na_2CO_3)}^{(cb)} - X_{C(Na_2CO_3)}^{(cb)} \quad (A.8.24)$$

Sólidos:

$$X_{bls}^{(cb)} = 1 - X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)} \left(\frac{M_{Na_2SO_4}}{M_S} \right) - X_{C(Na_2CO_3)}^{(cb)} \left(\frac{M_{Na_2CO_3}}{M_C} \right) \quad (A.8.25)$$

Carbono para a combustão:

$$w_C^{(cm)} = w^{(cm)} (X_C + X_{C(Na_2CO_3)}^{(cb)}) - w_{sm}^{(cm)} X_C^{(sm)} \quad (A.8.26)$$

Hidrogênio para a combustão:

$$w_H^{(cm)} = w^{(cm)} X_H^{(cb)} \quad (A.8.27)$$

Oxigênio para a combustão:

$$w_O^{(cm)} = w^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)} - w_C^{(cm)} - w_H^{(cm)} \quad (A.8.28)$$

Balances do Smelt por componente:

$$\text{Sódio: } w_{sm}^{(cm)} \cdot X_{Na}^{(sm)} = w^{(cm)} \cdot X_{Na}^{(cb)} \quad (A.8.29)$$

$$\text{Enxofre: } w_{sm}^{(cm)} \cdot X_S^{(sm)} = w^{(cm)} \cdot (X_S^{(cb)} + X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)}) \quad (A.8.30)$$

Carbono:

$$w_{sm}^{(cm)} \cdot X_C^{(sm)} = w^{(cm)} \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \left[X_{Na}^{(cb)} - 2 \cdot (X_S^{(cb)} + X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)}) \cdot \left(\frac{M_{Na}}{M_S} \right) \cdot \left(\frac{M_C}{M_{Na}} \right) \right] \quad (A.8.31)$$

$$\text{Oxigênio: } w_{sm}^{(cm)} \cdot X_O^{(sm)} = w^{(cm)} \cdot 4 \left[(1 - \eta_r^{(sm)}) (X_S^{(cb)} + X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)}) \cdot \left(\frac{M_O}{M_S} \right) \right] + 3 \cdot (w_{sm}^{(cm)} \cdot X_C^{(sm)}) \cdot \left(\frac{M_O}{M_C} \right) \quad (A.8.32)$$

Balço final do Smelt:

$$w_{sm}^{(cm)} = w_{sm}^{(cm)} \cdot X_{Na}^{(sm)} + w_{sm}^{(cm)} \cdot X_S^{(sm)} + w_{sm}^{(cm)} \cdot X_C^{(sm)} + w_{sm}^{(cm)} \cdot X_O^{(sm)} \quad (A.8.33)$$

Taxa de Reação:

$$\eta_r = \frac{n^\circ \text{ moles } Na_2S}{n^\circ \text{ moles } Na_2S + n^\circ \text{ moles } Na_2SO_4} = \frac{X_{Na_2S}^{(sm)} \cdot M_{Na_2SO_4}}{X_{Na_2S}^{(cm)} \cdot M_{Na_2SO_4} + X_{Na_2SO_4}^{(sm)} \cdot M_{Na_2S}} \quad (A.8.34)$$

Composição do Smelt:

$$\text{Sulfeto de Sódio: } X_{Na_2S}^{(sm)} = \frac{w_{sm}^{(cm)}}{w_{sm}^{(cm)}} (X_S^{(cb)} + X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)}) \eta_r \left(\frac{M_{Na_2S}}{M_S} \right) \quad (A.8.35)$$

Sais de sulfato:

$$X_{Na_2SO_4}^{(sm)} = \frac{w^{(cm)}}{w_{sm}^{(cm)}} (X_S^{(cb)} + X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)}) (1 - \eta_r) \left(\frac{M_{Na_2SO_4}}{M_S} \right) \quad (A.8.36)$$

Carbonato: $X_{Na_2CO_3}^{(sm)} = 1 - X_{Na_2S}^{(sm)} - X_{Na_2SO_4}^{(sm)}$ (A.8.37)

Oxigênio total requerido para a combustão:

$$w_0^{(lr)} = w_H^{(cm)} \left(\frac{M_O}{2M_H} \right) + w_C^{(cm)} \left(\frac{2M_O}{M_C} \right) \quad (A.8.38)$$

Disponibilidade de oxigênio no ar primário:

$$w_0^{(l)} = (w_a^{(l)} + w_{ia}^{(l)}) X_0^{(al)} \quad (A.8.39)$$

Ar de combustão disponível na zona primária:

$$F^{(l)} = \frac{w_O^{(l)}}{w_O^{(lr)} - w_O^{(cm)}} \quad (A.8.40)$$

Concentração de oxigênio na zona primária:

$$\Delta = \frac{100(F^{(l)} - 1)C_{O_2}}{K_g^{(l)} + 100(F^{(l)} - 1)} \quad (A.8.41)$$

Energia de combustão no leito que reage:

$$\dot{Q}_t^{(c)} = w^{(cm)} \left[X_{bls} H_{bls} - X_S H_S \eta_r - X_H H_{H_2O} \left(\frac{M_{H_2O}}{2M_H} \right) \right] \quad (A.8.42)$$

Energia de combustão liberada na zona primária e no leito

$$\dot{Q}^{(cl)} = \dot{Q}_t^{(c)} \left(\frac{w_0^{(l)} + w_O^{(cm)}}{w_0^{(lr)}} \right) \quad (A.8.43)$$

Energia de combustão liberada no leito:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_t^{(cl)} n^{(c)} \quad (A.8.44)$$

Energia de combustão liberada sobre o leito na zona primária:

$$\dot{Q}^{(l)} = \dot{Q}^{(cl)} - \dot{Q} \quad (A.8.45)$$

Calor proveniente do leito radiado para as paredes:

$$\dot{Q}_b^{(cb)} = AU_r \left((T_C + 460)^4 - (T_b + 460)^4 \right) \quad (A.8.46)$$

Balanco de Energia no Leito:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}(\rho^{(cb)} V^{(cb)} c_p^{(cb)} T_C) = \dot{Q}^{(cb)} + w_{bl}^{(spc)} (X_{bl}^{(spc)} c_{pw} + (1 - X_{blw}^{(spc)}) c_{pbls}) \\
(T_{bl}^{(sp)} - 80) - w_{bl}^{(spc)} X_{blw}^{(spc)} (c_{Pwv} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + H_{H_2O}) + \\
- \dot{Q}_b^{(cb)} - w_{sm}^{(cm)} (c_p^{(cb)} (T_{sm} - 80) + H_{sm}^{(cm)}) + \\
- (w_{bl}^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) c_{pg}^{(cb)} (T_C - 80) - w^{(cm)} X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)} H_S \eta_r
\end{aligned} \tag{A.8.47}$$

simplificando o balanço acima o suficiente para capturar a dinâmica da temperatura e ao mesmo tempo não se comprometer com as complexidades da mudança do leito, tem-se:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} T_C = \frac{1}{\rho^{(cb)} V_p^{(cb)} c_p^{(cb)}} [\dot{Q}^{(cb)} + w_{bl}^{(spc)} (1 - X_{blw}^{(spc)}) c_{pbls} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + \\
+ w_{bl}^{(spc)} X_{blw}^{(spc)} ((c_{pw} - c_{pww}) (T_{bl}^{(sp)} - 80) - H_{H_2O}) + \\
- \dot{Q}_b^{(cb)} - w_{sm}^{(cm)} (c_p^{(cb)} (T_{sm} - 80) + H_{sm}^{(cm)}) + \\
- (w_{bl}^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) c_{pg}^{(cb)} (T_C - 80) - w^{(cm)} X_{S(Na_2SO_4)}^{(cb)} H_S \eta_r]
\end{aligned} \tag{A.8.48}$$

A saída dos fundidos é representada por:

Total de Smelt liberada para a parede e para o chão do leito:

$$w_{sm}^{(cm)} = w_{sm}^{(cmF1)} + w_{sm}^{(cmw)} \tag{A.8.49}$$

onde F1 = chão do leito

w = paredes do leito

$$\text{Taxa de reação: } w^{(cm)} = w^{(cmF1)} + w^{(cmw)} \tag{A.8.50}$$

Tabelas 8 - Leito (Chão e paredes)

A. Paredes:

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(cb)}$	1047,0	lb/hr	Vazão de H que segue para a zona secundária
$w_O^{(cb)}$	6911,0	lb/hr	Vazão de O que segue para a zona secundária
$w_C^{(cb)}$	10225,0	lb/hr	Vazão de C que segue para a zona secundária
$w_{Na_2S}^{(cb)}$	3228,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S para a formação do smelt
$w_{Na_2SO_4 fa}^{(cb)}$	3283,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas para a formação do smelt
$w_{Na_2CO_3 fa}^{(cb)}$	9206,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas para a formação do smelt
$w_{H_2O}^{(cb)}$	18077,0	lb/hr	Vazão de água que segue para a zona secundária

$w_{total}^{(cb)}$	36260,0	lb/hr	Vazão total que segue para a zona secundária
	15714,0	lb/hr	Vazão total que sai da parede do leito e segue para o smelt
$\dot{Q}_{sens}^{(cb)}$	8,35E6	BTU/hr	Calor sensível transferido para o smelt
$\dot{Q}_{transf}^{(cb)}$	65,6E6	BTU/hr	Calor transferido da parede do leito para o efervescor

B. Chão

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(cb)}$	1579,0	lb/hr	Vazão de H que segue para a zona primária
$w_O^{(cb)}$	10436,0	lb/hr	Vazão de O que segue para a zona primária
$w_C^{(cb)}$	15441,0	lb/hr	Vazão de C que segue para a zona primária
$w_{Na_2S}^{(cb)}$	4875,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S para a formação do smelt
$w_{Na_2SO_4,fa}^{(cb)}$	4957,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas para a formação do smelt
$w_{Na_2CO_3,fa}^{(cb)}$	13902,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas para a formação do smelt
$w_{H_2O}^{(cb)}$	27298,0	lb/hr	Vazão de água que segue para a zona primária
$w_{total}^{(cb)}$	54754,0	lb/hr	Vazão total que segue para a zona primária
	23734,0	lb/hr	Vazão total que sai da parede do leito e segue para o smelt
$\dot{Q}_{transf}^{(cb)}$	66,02E6	BTU/hr	Calor transferido do chão do leito para o efervescor
$\dot{Q}_{sens}^{(cb)}$	812,61E6	BTU/hr	Calor sensível transferido para o smelt

A.9. Zona Primária:

Assume-se que toda a água que entra na caldeira é evaporada nas zonas primárias e secundárias, porém não ocorre a combustão nestas zonas. A combustão ocorre apenas na zona terciária. Os balanços dos sólidos e gases estão descritos em seguida separadamente com todos os seus elementos:

Hidrogênio:

$$w_g^{(l)} X_H^{(g1)} = (w_a^{(l)} + w_{ia}^{(l)}) X_H^{(a1)} + w_H^{(cm)} + w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{2M_H}{M_{H_2O}} \right) .f_1 + [w_{bl}^{(pe)} X_{bls}^{(sp)} X_H^{(blce)}] .f_1 \quad (A.9.1)$$

Oxigênio:

$$\begin{aligned}
w_g^{(1)} \cdot X_O^{(g1)} &= (w_a^{(1)} + w_{ia}^{(1)}) X_O^{(a1)} + w_O^{(cm)} + w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{M_O}{M_{H_2O}} \right) \cdot r_1 + \\
&+ w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} X_O^{(blmt)} + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \cdot \left(\frac{4M_O}{M_{Na_2SO_4}} \right) + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{3M_O}{M_{Na_2CO_3}} \right) \right] \cdot r_1
\end{aligned} \tag{A.9.2}$$

Enxofre:

$$w_g^{(1)} X_S^{(g1)} = w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} \left(X_S^{(blmt)} + X_{Na_2S}^{(blmt)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2S}} \right) \right) + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2SO_4}} \right) \right] \cdot r_1 \tag{A.9.3}$$

Carbono:

$$w_g^{(1)} X_C^{(g1)} = w_C^{(cm)} + w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} X_C^{(blmt)} + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{M_C}{M_{Na_2CO_3}} \right) \right] \cdot r_1 \tag{A.9.4}$$

$$\text{Sódio: } w_g^{(1)} X_{Na}^{(g1)} = w_{bl}^{(pe)} \cdot X_{Na}^{(sp)} \cdot r_1 \tag{A.9.5}$$

Nitrogênio:

$$w_g^{(1)} X_N^{(1)} = (w_a^{(1)} + w_{ia}^{(1)}) X_N^{(a1)} + [w_{bl}^{(pe)} X_{bls}^{(sp)} X_{in}^{(blmt)}] \cdot r_1 \tag{A.9.6}$$

Portanto a vazão de gases que irão de zona primária para a zona secundária:

$$w_g^{(1)} = w_g^{(1)} X_H^{(g1)} + w_g^{(1)} X_O^{(g1)} + w_g^{(1)} X_S^{(g1)} + w_g^{(1)} X_C^{(g1)} + w_g^{(1)} \cdot X_{Na}^{(g1)} + w_g^{(1)} X_N^{(g1)} \tag{A.9.7}$$

A energia radiante transferida pela parede para os gases é dada por:

$$\dot{Q}_b^{g1} = A_b^{(g1)} U_r^{(g1)} ((T_g^{(1)} + 460)^4 - (T_b + 460)^4) \tag{A.9.8}$$

A partir do balanço de energia, temos que:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} (\rho_g \cdot V_g \cdot c_{Pg} \cdot T_g) &= w_a c_{pa} (T_a - 80) + w_{ia} c_{pa} (T_{ia} - 80) + \\
&+ w_{bl}^{(pe)} \left(c_{pbl}^{(sp)} (T_{bl}^{(sp)} - 80) - X_{blw}^{(sp)} H_{H_2O}^{(cb)} \right) r_1 + \\
&+ w_w^{(cs)} c_{pww} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + (w^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) c_{pg}^{(cb)} (T_C - 80) + \\
&+ \dot{Q} - \dot{Q}_b - w_g c_{pg} (T_g - 80)
\end{aligned} \tag{A.9.9}$$

Com isso, podemos chegar a seguinte equação:

$$\dot{Q}_b = A_b U_{rl} (T_g - T_b) \tag{A.9.10}$$

$$U_{rl} = U_r \frac{(T_g + 460)^4 - (T_b + 460)^4}{T_g - T_b} \quad (\text{A.9.11})$$

A partir deste balanço, sabendo-se de que a dinâmica dos gases é suficientemente rápida, podemos assumir a equação algébrica:

$$\begin{aligned} T_g^{(1)} = & \frac{1}{A_b^{(g1)} U_{rl}^{(g1)} + w_g^{(1)} \cdot c_{pg}^{(1)}} [w_a^{(1)} \cdot c_{pa}^{(1)} (T_a^{(1)} - 80) + w_{ia}^{(1)} \cdot c_{pa}^{(1)} (T_{ia}^{(1)} - 80) + \\ & + w_{bl}^{(pe)} (c_{pbl}^{(sp)} (T_{bl}^{(sp)} - 80) - X_{blw}^{(sp)} \cdot H_{H_2O}^{(cb)}) \cdot r_1 + \\ & + w_w^{(cs)} \cdot c_{pww} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + (w^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) \cdot c_{pg}^{(cb)} (T_C - 80) + \\ & + \dot{Q}^{(1)} + A_b^{(g1)} U_{rl}^{(g1)} (T_b - 80)] + 80 \end{aligned} \quad (\text{A.9.12})$$

Tabela 9 – Zona Primária

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(1)}$	1935,0	lb/hr	Vazão de H no licor negro na zona primária
$w_O^{(1)}$	51569,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro na zona primária
$w_S^{(1)}$	580,0	lb/hr	Vazão de S no licor negro na zona primária
$w_C^{(1)}$	18828,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro na zona primária
$w_{Na}^{(1)}$	1955,0	lb/hr	Vazão de Na no licor negro na zona primária
$w_{Na_2S}^{(1)}$	49,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S no licor negro na zona primária
$w_{Na_2SO_4fa}^{(1)}$	779,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas na zona primária
$w_{Na_2CO_3fa}^{(1)}$	645,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas na zona primária
$w_N^{(1)}$	138068,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro na zona primária
$w_{H_2O}^{(1)}$	50035,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O na zona primária
$w_{total}^{(1)}$	253722,0	lb/hr	Vazão de total na zona primária
$\dot{Q}_{sens}^{(1)}$	131,33E6	BTU/hr	Calor sensível na zona primária
$\dot{Q}_{transf}^{(1)}$	1,43E6	BTU/hr	Calor transferido da zona primária para o efervescor

3.10. Zona Secundária:

Os balanços materiais dos sólidos e gases foram separados por elementos:

Hidrogênio:

$$w_g^{(2)} X_H^{(g2)} = (w_a^{(2)} + w_{ia}^{(2)}) X_H^{(a2)} + w_H^{(cm)} + w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{2M_H}{M_{H_2O}} \right) r_2 +$$

$$+ w_{bl}^{(pe)} X_{bls}^{(sp)} X_H^{(blce)} r_2 + w_g^{(1)} X_H^{(g1)} \quad (A.10.1)$$

Oxigênio:

$$w_g^{(2)} X_O^{(g2)} = (w_a^{(2)} + w_{ia}^{(2)}) X_O^{(a2)} + w_O^{(cm)} + w_{bl}^{(sp)} N^{(sp)} X_{blw}^{(sp)} \left(\frac{M_O}{M_{H_2O}} \right) r_2 +$$

$$+ w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} X_O^{(blmt)} + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \left(\frac{4M_O}{M_{Na_2SO_4}} \right) + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{3M_O}{M_{Na_2CO_3}} \right) \right] r_2 +$$

$$+ w_g^{(1)} X_O^{(g1)} \quad (A.10.2)$$

Enxofre:

$$w_g^{(2)} X_S^{(g2)} = w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} \left(X_S^{(blmt)} + X_{Na_2S}^{(sp)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2S}} \right) \right) + X_{Na_2SO_4}^{(sp)} \left(\frac{M_S}{M_{Na_2SO_4}} \right) \right] r_2 + w_g^{(1)} X_S^{(g1)} \quad (A.10.3)$$

Carbono:

$$w_g^{(2)} X_C^{(g2)} = w_C^{(cm)} + w_{bl}^{(pe)} \left[X_{bls}^{(sp)} X_C^{(blmt)} + X_{Na_2CO_3}^{(sp)} \left(\frac{M_C}{M_{Na_2CO_3}} \right) \right] r_2 + w_g^{(1)} X_C^{(g1)} \quad (A.10.4)$$

Sódio:

$$w_g^{(2)} X_{Na}^{(g2)} = w_{bl}^{(pe)} X_{Na}^{(sp)} r_2 + w_g^{(1)} X_{Na}^{(g1)} \quad (A.10.5)$$

Nitrogênio:

$$w_g^{(2)} X_N^{(g2)} = (w_a^{(2)} + w_{ia}^{(2)}) X_N^{(a2)} + [w_{bl}^{(pe)} X_{bs}^{(sp)} X_{in}^{(blmt)}] r_2 + w_g^{(1)} X_N^{(g1)} \quad (A.10.6)$$

Balanço Total na Zona Terciária:

$$w_g^{(2)} = w_g^{(2)} X_H^{(g2)} + w_g^{(2)} X_O^{(g2)} + w_g^{(2)} X_S^{(g2)} + w_g^{(2)} X_C^{(g2)} + w_g^{(2)} X_{Na}^{(g2)} + w_g^{(2)} X_N^{(g2)} \quad (A.10.7)$$

Calor irradiado para a parede proveniente dos gases quentes:

$$\dot{Q}_b^{g2} = A_b^{(g2)} U_r^{(g2)} ((T_g^{(2)} + 460)^4 - (T_b + 460)^4) \quad (A.10.8)$$

Balanço de Energia:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}(\rho_g \cdot V_g \cdot c_{pg} \cdot T_g) = & w_a \cdot c_{pa} (T_a - 80) + w_{ia} \cdot c_{pa} (T_{ia} - 80) + \\
& + w_{bl}^{(pe)} \left(c_{pbl}^{(sp)} (T_{bl}^{(sp)} - 80) - X_{blw}^{(sp)} H_{H_2O}^{(cb)} \right) r_2 + \\
& + w_w^{(cs)} c_{pww} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + (w^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) \cdot c_{pg}^{(cb)} (T_C - 80) + \\
& + \dot{Q} - \dot{Q}_b - w_g \cdot c_{pg} (T_g - 80) + w_g^{(1)} \cdot c_{pg}^{(1)} (T_g^{(1)} - 80)
\end{aligned} \tag{A.10.9}$$

Com isso, podemos escrever:

$$\dot{Q}_b = A_b \cdot U_{rl} \cdot (T_g - T_b) \tag{A.10.10}$$

$$U_{rl} = U_r \frac{(T_g + 460)^4 - (T_b + 460)^4}{T_g - T_b} \tag{A.10.11}$$

Temperatura do gás:

$$\begin{aligned}
T_g^{(2)} = & \frac{1}{A_b^{(2)} U_{rl}^{(2)} + w_g^{(2)} \cdot c_{pg}^{(2)}} [w_a^{(2)} \cdot c_{pa}^{(2)} (T_a^{(2)} - 80) + w_{ia}^{(2)} \cdot c_{pa}^{(2)} (T_{ia}^{(2)} - 80) + \\
& + w_{bl}^{(pe)} (c_{pbl}^{(sp)} (T_{bl}^{(sp)} - 80) - X_{blw}^{(sp)} \cdot H_{H_2O}^{(cb)}) \cdot r_2 + \\
& + w_w^{(cs)} \cdot c_{pww} (T_{bl}^{(sp)} - 80) + (w^{(cm)} - w_{sm}^{(cm)}) \cdot c_{pg}^{(cb)} (T_C - 80) + \\
& + w_g^{(1)} \cdot c_{pg}^{(1)} (T_g^{(1)} - 80) + \dot{Q}^{(2)} + A_b^{(g2)} U_{rl}^{(g2)} (T_b - 80)] + 80
\end{aligned} \tag{A.10.12}$$

Tabela 10 – Zona Secundária

Variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(2)}$	3216,0	lb/hr	Vazão de H no licor negro na zona secundária
$w_O^{(2)}$	85918,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro na zona secundária
$w_S^{(2)}$	964,0	lb/hr	Vazão de S no licor negro na zona secundária
$w_C^{(2)}$	31922,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro na zona secundária
$w_{Na}^{(2)}$	3297,0	lb/hr	Vazão de Na no licor negro na zona secundária
$w_{Na_2S}^{(2)}$	81,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S no licor negro na zona secundária
$w_{Na_2SO_4fa}^{(2)}$	1294,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas na zona secundária
$w_{Na_2CO_3fa}^{(2)}$	1072,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas na zona secundária
$w_N^{(2)}$	229994,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro na zona secundária
$w_{H_2O}^{(2)}$	83198,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O na zona secundária
$w_{total}^{(2)}$	416460,0	lb/hr	Vazão de total na zona secundária

$\dot{Q}_{sens}^{(2)}$	219,31E6	BTU/hr	Calor sensível na zona secundária
$\dot{Q}_{transf}^{(2)}$	4.83E6	BTU/hr	Calor transferido da zona secundária para o efervescor

A.11. Zona Terciária:

Na zona Terciária ocorre a formação do carbonato de sódio, sendo que assume-se que o mesmo encontra-se todo na forma de cinzas. As cinzas irão cair no economizador e a partir disso serão recirculados até o tanque de mistura. O particulado chegará no precipitador através do gás de conduto.

Hipóteses na Zona Terciária:

1. A combustão ocorre na zona terciária.
2. As condições na zona terciária determinam a composição final dos gases de combustão e do particulado.
3. A formação do dióxido de enxofre, sulfeto de hidrogênio e monóxido de carbono é determinada principalmente pela quantidade de oxigênio em excesso e pela turbulência durante a injeção do ar de combustão na zona terciária.
4. O carbono disponível no início do processo formará o dióxido de carbono.
5. O hidrogênio presente formará a água.
6. O nitrogênio passará por esta zona sem sofrer modificações.
7. O oxigênio contribuirá para a formação do gás oxigênio.

A seguir, encontram-se os balanços das reações que ocorrem nesta zona:

Dióxido de Enxofre:

$$w_g^{(3)} X_{SO_2}^{(g3)} = K_{SO_2}^{(g3)} w_g^{(2)} X_S^{(g2)} \cdot \exp(-\alpha_{SO_2} \delta - \beta_{SO_2} X_{O_2}^{(dg3)}) \quad (A.11.1)$$

Sulfeto de Hidrogênio:

$$w_g^{(3)} X_{H_2S}^{(g3)} = K_{H_2S}^{(g3)} w_g^{(2)} X_S^{(g2)} \exp(-\alpha_{H_2S} \delta - \beta_{SO_2} X_{O_2}^{(dg3)}) \quad (A.11.2)$$

Monóxido de Carbono:

$$w_g^{(3)} X_{CO}^{(g3)} = K_{CO}^{(g3)} w_g^{(2)} X_C^{(g2)} \cdot \exp(-\alpha_{CO} \delta - \beta_{CO} X_{O_2}^{(dg3)}) \quad (A.11.3)$$

sendo que δ corresponde a função de turbulência que pode ser escrita como sendo:

$$\delta = \rho_a (v_a)^2 \quad (A.11.4)$$

Balanço de massa para o Ar Terciário:

$$w_a = v_a \cdot A_{p0} \cdot \rho_a \cdot 3,600 \quad (A.11.5)$$

Substituindo-se a equação (A.11.5) na equação (A.11.4), temos que:

$$\delta = \frac{1}{\rho_a^{(3)}} \left(\frac{w_a^{(3)}}{A_{p0} \cdot 3,600} \right)^2 \quad (\text{A.11.6})$$

Total de sais formados:

$$w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4}^{(g3)} = \left[w_g^{(2)} \cdot X_S^{(2)} - w_g^{(3)} X_{SO_2}^{(g3)} \left[\frac{M_S}{M_{SO_2}} \right] - w_g^{(3)} X_{H_2S}^{(g3)} \left[\frac{M_S}{M_{H_2S}} \right] \right] \left[\frac{M_{Na_2SO_4}}{M_S} \right] \quad (\text{A.11.7})$$

Sais na forma de cinza:

$$w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4 \cdot fa}^{(g3)} = w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4}^{(g3)} \cdot H_{fa}^1 \quad (\text{A.11.8})$$

Sais na forma de partículas

$$w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4 \cdot p}^{(g3)} = w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4 \cdot fa}^{(g3)} \quad (\text{A.11.9})$$

Total de Carbonato de Sódio formado:

$$w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3}^{(g3)} = \left[w_g^{(2)} \cdot X_{Na}^{(2)} - w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4}^{(g3)} \left[\frac{2M_{Na}}{M_{Na_2SO_4}} \right] \right] \left[\frac{M_{Na_2CO_3}}{2 \cdot M_{Na}} \right] \quad (\text{A.11.10})$$

Carbonato de Sódio na forma de cinzas:

$$w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3 \cdot fa}^{(g3)} = w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3}^{(g3)} H_{fa}^2 \quad (\text{A.11.11})$$

Carbonato de Sódio na forma de partículas:

$$w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3 \cdot p}^{(g3)} = w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3 \cdot fa}^{(g3)} \quad (\text{A.11.12})$$

Dióxido de Carbono:

$$w_g^{(3)} X_{CO_2}^{(g3)} = \left[w_g^{(2)} X_C^{(2)} - w_g^{(3)} X_{CO}^{(g3)} \left[\frac{M_C}{M_{CO}} \right] - \left(w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3 \cdot p}^{(g3)} + w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3 \cdot fa}^{(g3)} \right) \left[\frac{M_C}{M_{Na_2CO_3}} \right] \right] \left[\frac{M_{CO_2}}{M_C} \right] \quad (\text{A.11.13})$$

Água:

$$w_g^{(3)} X_{H_2O}^{(g3)} = \left[w_g^{(2)} \cdot X_H^{(2)} + (w_a^{(3)} + w_{ia}^{(3)}) \cdot X_H^{(a3)} - w_g^{(3)} X_{H_2S}^{(g3)} \left(\frac{2M_H}{M_{H_2S}} \right) \right] \left(\frac{M_{H_2O}}{2M_H} \right) \quad (\text{A.11.14})$$

$$\text{Nitrogênio: } w_g^{(3)} X_{N_2}^{(g3)} = w_g^{(2)} \cdot X_N^{(g2)} + (w_a^{(3)} + w_{ia}^{(3)}) \cdot X_N^{(a3)} \quad (\text{A.11.15})$$

Oxigênio:

$$\begin{aligned}
w_g^{(3)} X_{O_2}^{(g3)} &= w_g^{(2)} + w_a^{(3)} + w_{ia}^{(3)} - w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4.p}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3.p}^{(g3)} + \\
&- w_g^{(3)} X_{Na_2SO_4.fa}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{Na_2CO_3.fa}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{SO_2}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{H_2S}^{(g3)} + \\
&- w_g^{(3)} X_{CO}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{CO_2}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{H_2O}^{(g3)} - w_g^{(3)} X_{N_2}^{(g3)}
\end{aligned} \tag{A.11.16}$$

$$\text{Balanço Total no Superaquecedor: } w_g^{(3)} = w_g^{(2)} + w_a^{(3)} + w_{ia}^{(3)} \tag{A.11.17}$$

Fração de oxigênio no gás seco:

$$X_{O_2}^{(dg3)} = \frac{w_g^{(3)} X_{O_2}^{(g3)}}{w_g^{(3)} (1 - X_{H_2O}^{(g3)} - X_{Na_2CO_3.fa}^{(g3)} - X_{Na_2SO_4.fa}^{(g3)} - X_{Na_2SO_4.p}^{(g3)} - X_{Na_2CO_3.p}^{(g3)})} \tag{A.11.18}$$

Balanço de Energia:

Energia de Combustão disponível na zona terciária:

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_g^{(3)} &= \dot{Q}_t^{(c_1)} + \dot{Q}_t^{(c_2)} - \dot{Q}_t^{(c_1)} - \dot{Q}_t^{(c_2)} + w_{bl}^{(pe)} X_{bls}^{(sp)} \left(H_{bls} - X_H^{(bls)} H_{H_2O}^{(cb)} \left(\frac{M_{H_2O}}{2M_H} \right) \right) + \\
&- w_g^{(3)} X_{CO}^{(g3)} H_{CO} - w_g^{(3)} X_{H_2S}^{(g3)} H_{H_2S}
\end{aligned} \tag{A.11.19}$$

Calor irradiado para a água a partir dos gases quentes:

$$\dot{Q}_b^{(g3)} = A_b^{(g3)} U_r^{(g3)} ((T_g^{(3)} + 460)^4 - (T_b + 460)^4) \tag{A.11.20}$$

Balanço de energia dos gases:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} (\rho_g V_g c_{pg} T_g) &= \dot{Q}_g + w_g^{(2)} c_{pg}^{(2)} (T_g^{(2)} - 80) + w_a c_{pa} (T - 80) + \\
&+ w_{ia} c_{pa} (T_{ia} - 80) - \dot{Q}_b - w_g c_{pg} (T_g - 80)
\end{aligned} \tag{A.11.21}$$

A equação (A.11.20) também pode ser escrita como sendo:

$$\dot{Q}_b = A_b U_{rl} (T_g - T_b) \tag{A.11.22}$$

$$U_{rl} = U_r \frac{(T_g + 460)^4 - (T_b + 460)^4}{T_g - T_b} \tag{A.11.23}$$

Temperatura do gás:

$$\begin{aligned}
T_g^{(3)} &= \frac{1}{A_b^{(g3)} U_{rl}^{(g3)} + w_g^{(3)} c_{pg}^{(3)}} [\dot{Q}_g^{(3)} + w_g^{(2)} c_{pg}^{(2)} (T_g^{(2)} - 80) \\
&+ w_a^{(3)} c_{pa}^{(3)} (T_a - 80) + w_{ia}^{(3)} c_{pa}^{(3)} (T_{ia} - 80) + A_b^{(g3)} U_{rl}^{(g3)} (T_b - 80)] + 80
\end{aligned} \tag{A.11.24}$$

Tabela 11 – Zona Terciária

variável	valor	unidade	descrição
----------	-------	---------	-----------

$w_O^{(3)}$	17065,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro na zona terciária
$w_{Na_2SO_4 pa}^{(3)}$	4900,0	lb/hr	Vazão de Na_2SO_4 na forma de partículas na zona terciária
$w_{Na_2SO_4 fa}^{(3)}$	258,0	lb/hr	Vazão de Na_2SO_4 na forma de cinzas na zona terciária
$w_{Na_2CO_3 fa}^{(3)}$	5827,0	lb/hr	Vazão de Na_2CO_3 na forma de cinzas na zona terciária
$w_{SO_2}^{(3)}$	257,3	lb/hr	Vazão de SO_2 na zona terciária
$w_{H_2S}^{(3)}$	2,75	lb/hr	Vazão de H_2S na zona terciária
$w_{CO}^{(3)}$	753,6	lb/hr	Vazão de CO na zona terciária
$w_{CO_2}^{(3)}$	113494,0	lb/hr	Vazão de CO_2 na zona terciária
$w_N^{(3)}$	358176,0	lb/hr	Vazão de N na zona terciária
$w_{H_2O}^{(3)}$	90737,0	lb/hr	Vazão de H_2O na zona terciária
$w_{total}^{(3)}$	591467,0	lb/hr	Vazão total na zona terciária
$\dot{Q}_{sens}^{(3)}$	314,51E6	BTU/hr	Calor sensível na zona terciária
$\dot{Q}_{transf}^{(3)}$	35,50E6	BTU/hr	Calor transferido da zona terciária para o efervescor

A.12. Superaquecedor:

Na zona de superaquecimento o calor é transferido para as paredes da fornalha e para as grelhas através da radiação, e para o banco de tubos do aquecedor por convecção.

Hipóteses no superaquecedor:

1. A temperatura do vapor no superaquecedor é constante.
2. A dinâmica do gás e a temperatura dos tubos do superaquecedor são omitidas para simplificar o modelo.
3. O vapor proveniente do superaquecedor é submetido a uma alta pressão. Esta pressão pode ser considerada constante.

A seguir, encontram-se os balanços materiais e de energia dos compostos envolvidos nas reações:

Balanço material para água no gás de combustão:

$$w_g^{(4)} X_{H_2O}^{(g4)} = w_g^{(3)} \cdot X_{H_2O}^{(g3)} + w_{sb}^{(4)} \quad (A.12.1)$$

$$\text{Balanço total do gás de combustão: } w_g^{(4)} = w_g^{(3)} + w_{sb}^{(4)} \quad (A.12.2)$$

Para o restante dos gases e partículas: $w_g^{(4)} X_i^{(g4)} = w_g^{(3)} \cdot X_i^{(g3)}$ (A.12.3)

Balço do vapor no superaquecedor: $w_{st}^{(4)} = w_{st}^{(5)} + w_{dw}^{(4)} - w_{sbt}^{(4)}$ (A.12.4)

Total de vapor fundido: $w_{sbt}^{(4)} = w_{sb}^{(4)} + w_{sb}^{(5)} + w_{sb}^{(6)}$ (A.12.5)

Calor irradiado a partir dos gases quentes:

$$\dot{Q}_b^{(g4)} = A_b^{(g4)} U_r^{(g4)} ((T_g^{(4)} + 460)^4 - (T_b + 460)^4) \quad (A.12.6)$$

A equação (A.12.6) pode ser escrita como sendo:

$$\dot{Q}_b = A_b U_{rl} (T_g - T_b) \quad (A.12.7)$$

$$U_{rl} = U_r \frac{(T_g + 460)^4 - (T_b + 460)^4}{T_g - T_b} \quad (A.12.8)$$

Temperatura do gás:

$$T_g^{(4)} = \frac{1}{A_b^{(g4)} U_{rl}^{(g4)} + U_c^{(g4)} A_{sh} + w_g^{(4)} c_{pg}^{(4)}} [w_g^{(3)} \cdot c_{pg}^{(3)} (T_g^{(3)} - 80) + A_b^{(g4)} U_{rl}^{(g4)} (T_b - 80) + A_{sh} U_c^{(g4)} (T_{st}^{(4)} - 80) + w_{sb}^{(4)} H_{sb}] + 80 \quad (A.12.9)$$

Balço de Água no superaquecedor:

$$w_{dw}^{(4)} = \frac{1}{H_{st}^{(4)} - H_w^{(5)}} \left[\dot{Q}_{sh} - w_{st}^{(5)} \cdot (H_{st}^{(4)} - H_{st}^{(5)}) \right] \quad (A.12.10)$$

$$\dot{Q}_{sh}^{(g4)} = A_{sh} U_c^{(g4)} (T_g^{(4)} - T_{st}^{(4)}) \quad (A.12.11)$$

Fig.07: Funcionamento de um Superaquecedor

Tabela 12 – Superaquecedor

variável	valor	unidade	Descrição
$w_O^{(4)}$	17065,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro no superaquecedor
$w_{Na_2SO_4pa}^{(4)}$	4900,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de partículas no superaquecedor
$w_{Na_2SO_4fa}^{(4)}$	258,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas no superaquecedor
$w_{Na_2CO_3fa}^{(4)}$	5827,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas no superaquecedor
$w_{SO_2}^{(4)}$	257,3	lb/hr	Vazão de SO ₂ no superaquecedor
$w_{H_2S}^{(4)}$	2,75	lb/hr	Vazão de H ₂ S no superaquecedor

$w_{CO}^{(4)}$	753,6	lb/hr	Vazão de CO no superaquecedor
$w_{CO_2}^{(4)}$	113494,0	lb/hr	Vazão de CO ₂ no superaquecedor
$w_N^{(4)}$	358176,0	lb/hr	Vazão de N no superaquecedor
$w_{H_2O}^{(4)}$	90737,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no superaquecedor
	366673,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O da zona de superaquecimento que sai na forma de vapor.
$w_{total}^{(4)}$	591467,0	lb/hr	Vazão total no superaquecedor
	366673,0	lb/hr	Vazão total dos componentes que deixam o superaquecedor na forma de vapor.
$\dot{Q}_{sens}^{(4)}$	220,43E6	BTU/hr	Calor sensível no superaquecedor que é transferido para o efervescor
	500,80E6	BTU/hr	Calor sensível do superaquecedor que é transferido para o vapor.

A.13. Efervescor:

Hipóteses no Balão:

1. A temperatura da água e do vapor nos tubos do efervescor são constantes e iguais a de saturação.
2. A perda de calor é constante.

Balanço material para água no gás de combustão:

$$w_g^{(5)} X_{H_2O}^{(g5)} = w_g^{(4)} \cdot X_{H_2O}^{(g4)} + w_{sb}^{(5)} \quad (A.13.1)$$

Balanço total do gás de combustão:

$$w_g^{(5)} = w_g^{(4)} + w_{sb}^{(5)} \quad (A.13.2)$$

Calor irradiado a partir dos gases quentes:

$$\dot{Q}_b^{(g5)} = A_b^{(g5)} U_C^{(g5)} (T_g^{(5)} - T_b) \quad (A.13.3)$$

A Temperatura T_b é considerada constante.

Balanço Total para a água fervendo:

$$\dot{Q}_{bt} = \dot{Q}_b^{(g5)} + \dot{Q}_b^{(g4)} + \dot{Q}_b^{(g3)} + \dot{Q}_b^{(g2)} + \dot{Q}_b^{(g1)} + \dot{Q}_b^{(cb)w} + \dot{Q}_b^{(cb)F1} \quad (A.13.4)$$

Temperatura do gás:

$$T_g^{(5)} = \frac{1}{A_b^{(g5)} U_C^{(g5)} + w_g^{(5)} c_{pg}^{(5)}} \left[w_g^{(4)} \cdot c_{pg}^{(4)} (T_g^{(4)} - 80) + A_b^{(g5)} U_C^{(g5)} (T_b - 80) + w_{sb}^{(5)} H_{sb} \right] + 80$$

(A.13.5)

Produção de Vapor:

$$w_{st}^{(5)} = \frac{1}{H_{st}^{(5)} - H_w^{(6)}} \left[\dot{Q}_{bt} - \dot{Q}_l - (w_{bd}^{(5)} + w_{dw}^{(4)})(H_w^{(5)} - H_w^{(6)}) \right] \quad (\text{A.13.6})$$

$$w_{st}^{(5)} = \frac{\dot{Q}_{bt} - \dot{Q}_l - w_{bd}^{(5)}(H_w^{(5)} - H_w^{(6)}) - \dot{Q}_{sh}^{(g4)} \cdot \frac{H_w^{(5)} - H_w^{(6)}}{H_{st}^{(4)} - H_w^{(5)}}}{H_{st}^{(5)} - H_w^{(6)} - \frac{(H_{st}^{(4)} - H_{st}^{(5)})(H_w^{(5)} - H_w^{(6)})}{H_{st}^{(4)} - H_w^{(5)}}} \quad (\text{A.13.7})$$

Tabela 13 – Efervedor

variável	valor	unidade	descrição
$w_O^{(5)}$	17065,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro no efervedor que segue para o economizador
$w_{Na_2SO_4pa}^{(5)}$	4900,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de partículas no efervedor que segue para o economizador
$w_{Na_2SO_4fa}^{(5)}$	258,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas no efervedor que segue para o economizador
$w_{Na_2CO_3fa}^{(5)}$	5827,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas no efervedor que segue para o economizador
$w_{SO_2}^{(5)}$	257,3	lb/hr	Vazão de SO ₂ no efervedor que segue para o economizador
$w_{H_2S}^{(5)}$	2,75	lb/hr	Vazão de H ₂ S no efervedor que segue para o economizador
$w_{CO}^{(5)}$	753,6	lb/hr	Vazão de CO no efervedor que segue para o economizador
$w_{CO_2}^{(5)}$	113494,0	lb/hr	Vazão de CO ₂ no efervedor que segue para o economizador
$w_N^{(5)}$	358176,0	lb/hr	Vazão de N no efervedor que segue para o economizador
$w_{H_2O}^{(5)}$	90737,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no efervedor que segue para o economizador
	7000,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no efervedor que é desperdiçada
	366673,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no efervedor que segue para o superaquecedor
$w_{total}^{(5)}$	7000,0	lb/hr	Vazão total no efervedor que é desperdiçada
	366673,0	lb/hr	Vazão total no efervedor que segue para o superaquecedor

	591467,0	lb/hr	Vazão total no efervador que segue para o economizador
$\bullet$	1,87E6	BTU/hr	Calor sensível perdido
$Q_{sens}^{(5)}$	441,36E6	BTU/hr	Calor sensível para o superaquecedor
	115,11E6	BTU/hr	Calor sensível do efervador que é transferido pro economizador.
$\bullet$	16,49E6	BTU/hr	Calor transferido
$Q_{transf}^{(5)}$			

A.14. Economizador:

No economizador o calor é transferido dos gases de combustão para o banco de tubos do economizador.

Hipóteses no economizador:

1. A temperatura do gás é omitida.
2. A temperatura dos tubos do economizador é igual a da água.
3. Os efeitos causados pela separação de cinzas nos balanços de energia serão ignorados
4. O economizador é considerado uma unidade única não ocorrendo divergências dentro do mesmo.

Balanços Materiais:

$$w_g^{(6)} X_{Na_2SO_4p}^{(g6)} = w_g^{(5)} \cdot X_{Na_2SO_4p}^{(g5)} \quad (A.14.1)$$

$$w_g^{(6)} X_{Na_2CO_3p}^{(g6)} = w_g^{(5)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(g5)} \quad (A.14.2)$$

$$w_g^{(6)} X_{Na_2SO_4fa}^{(g6)} = w_g^{(5)} \cdot X_{Na_2SO_4fa}^{(g5)} \quad (A.14.3)$$

$$w_g^{(6)} X_{Na_2CO_3fa}^{(g6)} = w_g^{(5)} \cdot X_{Na_2CO_3fa}^{(g5)} \quad (A.14.4)$$

Balanço material para água no gás de combustão:

$$w_g^{(6)} X_{H_2O}^{(g6)} = w_g^{(5)} \cdot X_{H_2O}^{(g5)} + w_{sb}^{(6)} \quad (A.14.5)$$

Balanço total do gás de combustão:

$$w_g^{(6)} = w_g^{(5)} + w_{sb}^{(6)} - w_g^{(6)} X_{Na_2SO_4fa}^{(g6)} - w_g^{(6)} X_{Na_2CO_3fa}^{(g6)} \quad (A.14.6)$$

Balanço total de água através do economizador:

$$w_w^{(6)} = w_{st}^{(5)} + w_{bd}^{(5)} + w_{dw}^{(5)} \quad (\text{A.14.7})$$

Calor irradiado a partir dos gases:

$$\dot{Q}_{ec}^{(6)} = A_{ec}^{(6)} U_C^{(6)} (T_g^{(6)} - T_w^{(6)}) \quad (\text{A.14.8})$$

Temperatura do gás:

$$T_g^{(6)} = \frac{1}{A_{ec} U_C + w_g c_{pg}} \left[w_g^{(5)} c_{pg}^{(5)} (T_g^{(5)} - 80) + A_{ec}^{(g6)} U_C^{(g6)} (T_w^{(6)} - 80) + w_{sb}^{(6)} H_{sb} \right] + 80 \quad (\text{A.14.9})$$

Temperatura da água no Economizador:

$$\frac{d}{dt} T_w^{(6)} = \frac{1}{m_{ec}^{(6)} c_{pec}^{(6)} + m_w^{(6)} c_{pw}^{(6)}} \left[\dot{Q}_{ec}^{(6)} + w_w^{(6)} H_{wi}^{(6)} \right] - w_w^{(6)} \left[H_{wi}^{(6)} + c_{pw}^{(6)} (T_w^{(6)} - T_{wi}^{(6)}) \right] \quad (\text{A.14.10})$$

Entalpia da Água na caldeira:

$$H_w^{(6)} = H_{wi}^{(6)} + c_{pw}^{(6)} (T_w^{(6)} - T_{wi}^{(6)}) \quad (\text{A.14.11})$$

Tabela 14 – Economizador

variável	valor	unidade	descrição
$w_O^{(6)}$	17065,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro no economizador que segue para o precipitador
$w_{Na_2SO_4 pa}^{(6)}$	4900,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de partículas no economizador que segue para o precipitador
$w_{Na_2SO_4 fa}^{(6)}$	258,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas no economizador que segue para o tanque de mistura
$w_{Na_2CO_3 fa}^{(6)}$	5827,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas no economizador que segue para o tanque de mistura
$w_{SO_2}^{(6)}$	257,3	lb/hr	Vazão de SO ₂ no economizador que segue para o precipitador
$w_{H_2S}^{(6)}$	2,75	lb/hr	Vazão de H ₂ S no economizador que segue para o precipitador
$w_{CO}^{(6)}$	753,6	lb/hr	Vazão de CO no economizador que segue para o precipitador
$w_{CO_2}^{(6)}$	113494,0	lb/hr	Vazão de CO ₂ no economizador que segue para o precipitador
$w_N^{(6)}$	358176,0	lb/hr	Vazão de N no economizador que segue para o precipitador
$w_{H_2O}^{(6)}$	373673,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O do economizador que segue para o efervescor
	90737,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no economizador que segue

$w_{total}^{(6)}$	373673,0	lb/hr	para o precipitador
	6085,0	lb/hr	Vazão total dos componentes que deixam o economizador e seguem para o efervorador.
	591467,0	lb/hr	Vazão total no economizador que segue para o tanque de mistura.
$Q_{sens}^{(6)}$	152,38E6	BTU/hr	Vazão total dos componentes que deixam o economizador e seguem para o precipitador
	54,84E6	BTU/hr	Calor sensível do economizador que é transferido para o efervorador
			Calor sensível do economizador que é transferido para o precipitador

3.15. Tanque de Mistura:

Neste tanque é misturado, além de cinzas do precipitador, os sais de reposição. Os balanços de massa, na maior parte, são expressas com acúmulo em estado dinâmico, por equações diferenciais ordinárias.

Fração de sulfato de sódio no tanque de mistura:

$$\frac{d}{dt}(\rho_{bl} \cdot V_{bl} \cdot X_{Na_2SO_4}) = w_{sc} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4fa}^{(g_6)} + \left(w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} \cdot K_{pe} \right) - w_{bl} \cdot X_{Na_2SO_4} \quad (A.15.1)$$

O volume do tanque de mistura é constante, portanto:

$$\frac{w_{bl}}{\rho_{bl}} = \frac{w_{bl}^{(mi)}}{\rho_{bl}^{(mi)}} = V_{bl} \quad (A.15.2)$$

Balanço de massa do licor:

$$w_{bl} = \frac{\rho_{bl}}{\rho_{bl}^{(mi)}} \cdot w_{bl}^{(mi)} \quad (A.15.3)$$

A equação (A.15.1) pode ser escrita como sendo:

$$\frac{d}{dt}(\rho_{bl} \cdot V_{bl} \cdot X_{Na_2SO_4}) = V_{bl} \left(\rho_{bl} \cdot \frac{d}{dt} X_{Na_2SO_4} + X_{Na_2SO_4} \frac{d}{dt} \rho_{bl} \right) \quad (A.15.4)$$

Balanço de massa total no tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_{bl} \cdot V_{bl}) &= w_{bl}^{(mi)} + w_g^{(6)} \cdot \left[X_{Na_2SO_4fa}^{(g_6)} + X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} \cdot K_{pe} \right] + \\ &+ w_g^{(6)} \left[X_{Na_2CO_3fa}^{(g_6)} + X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)} \cdot K_{pe} \right] + w_{sc} - w_{bl} \end{aligned} \quad (A.15.5)$$

Fração de sal no tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_{Na_2SO_4}^{(mt)} = \frac{1}{\rho_{bl}^{(mt)} V_{bl}^{(mt)}} & \left[\left(w_{sc}^{(mt)} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4fa}^{(g6)} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4p}^{(mt)} \cdot K_{pe} \right) \right. \\ & \cdot (1 - X_{Na_2SO_4}^{(mt)}) - (w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3fa}^{(mt)} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(mt)} \cdot K_{pe}) \cdot X_{Na_2SO_4}^{(mt)} + \\ & \left. - w_{bl}^{(mi)} \cdot X_{Na_2SO_4}^{(mt)} \right] \end{aligned} \quad (A.15.6)$$

Densidade do licor no tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \rho_{bl}^{(mt)} = \frac{1}{V_{bl}^{(mt)}} & \left[w_{bl}^{(mi)} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{bl}^{(mt)}}{\rho_{bl}^{(mi)}} \right) + w_g^{(6)} \cdot \left(X_{Na_2SO_4fa}^{(g6)} + X_{Na_2SO_4p}^{(g6)} \cdot K_{pe} \right) + \right. \\ & \left. + w_g^{(6)} \cdot \left(X_{Na_2CO_3fa}^{(mt)} + X_{Na_2CO_3p}^{(mt)} \cdot K_{pe} \right) + w_{sc}^{(mt)} \right] \end{aligned} \quad (A.15.7)$$

$$\rho_{mt} = 0,06242796 \left(997 + 649 X_{ts}^{(mt)} \right) \left[1 - 3,69 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T_{mt} - 32}{1,8} - 25 \right) - 1,94 \cdot 10^{-6} \left(\frac{T_{mt} - 32}{1,8} - 25 \right)^2 \right] \quad (A.15.8)$$

onde 0,06242796 é fator de conversão de unidades.

Carbonato:

$$\frac{d}{dt} \left(\rho_{bl}^{(mt)} V_{bl}^{(mt)} X_{Na_2CO_3}^{(mt)} \right) = w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3fa}^{(g6)} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(g6)} \cdot K_{pe} - w_{bl}^{(mt)} X_{Na_2CO_3}^{(mt)} \quad (A.15.9)$$

Fração de Carbonato no tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_{Na_2CO_3}^{(mt)} = \frac{1}{V_{bl}^{(mt)} \rho_{bl}^{(mt)}} & \left[\left(w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3fa}^{(g6)} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(mt)} \cdot K_{pe} \right) \cdot (1 - X_{Na_2CO_3}^{(mt)}) + \right. \\ & \left. - \left(w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3fa}^{(g6)} + w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(g6)} \cdot K_{pe} + w_{sc}^{(mt)} \right) X_{Na_2CO_3}^{(mt)} - w_{bl}^{(mi)} \cdot X_{Na_2CO_3}^{(mt)} \right] \end{aligned} \quad (A.15.10)$$

$$\text{Sólidos: } \frac{d}{dt} \left(\rho_{bl} \cdot V_{bl} \cdot X_{bls} \right) = w_{bl}^{(mi)} \cdot X_{bls}^{(mi)} - w_{bl} \cdot X_{bls} \quad (A.15.11)$$

Fração de sólidos no licor dentro do tanque de mistura:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X_{bls}^{(mt)} = \frac{1}{\rho_{bl}^{(mt)} V_{bl}^{(mt)}} & \left[w_{bl}^{(mi)} \cdot \left(X_{bls}^{(mi)} - X_{bls}^{(mt)} \right) + \right. \\ & \left. - \left(w_g^{(6)} \left(X_{Na_2SO_4fa}^{(mt)} + X_{Na_2SO_4p}^{(mt)} \cdot K_{pe} + X_{Na_2CO_3fa}^{(mt)} + X_{Na_2CO_3p}^{(mt)} \cdot K_{pe} \right) + w_{sc}^{(mt)} \right) X_{bls}^{(mt)} \right] \end{aligned} \quad (A.15.12)$$

Água:

$$X_{blw}^{(mt)} = 1 - X_{Na_2SO_4}^{(mt)} - X_{Na_2CO_3}^{(mt)} - X_{bls}^{(mt)} \quad (A.15.13)$$

Por simplicidade, assume-se que a temperatura da saída do tanque é igual a temperatura do licor que entra.

$$T_{mt} = T_{bl} \quad (A.15.14)$$

Tabela 15 – Tanque de Mistura

variável	valor	unidade	descrição
$w_H^{(mt)}$	3216,0	lb/hr	Vazão de H no licor negro no tanque de mistura
$w_O^{(mt)}$	30602,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro no tanque de mistura
$w_S^{(mt)}$	5422,0	lb/hr	Vazão de S no licor negro no tanque de mistura
$w_C^{(mt)}$	34002,0	lb/hr	Vazão de C no licor negro no tanque de mistura
$w_{Na}^{(mt)}$	17920,0	lb/hr	Vazão de Na no licor negro no tanque de mistura
$w_{Na_2S}^{(mt)}$	441,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ S no licor negro no tanque de mistura
$w_{Na_2SO_4pa}^{(mt)}$	4851,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de partículas no tanque de mistura
$w_{Na_2SO_4fa}^{(mt)}$	2184,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de cinzas no tanque de mistura
$w_{Na_2CO_3fa}^{(mt)}$	5827,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ CO ₃ na forma de cinzas no tanque de mistura
$w_{H_2O}^{(mt)}$	53944,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no tanque de mistura
$w_{total}^{(mt)}$	158704,0	lb/hr	Vazão de total no tanque de mistura
$\dot{Q}_{sens}^{(mt)}$	9,999E6	BTU/hr	Calor sensível transferido para o aquecedor

3.16. Precipitador:

Os gases provenientes do economizador vão diretamente para o precipitador. O particulado fica retido no precipitador e em seguida é encaminhado para o tanque de mistura.

O cálculo de vazões no precipitador assume uma relação de eficiência, que deve ser de 95 a 99%, dada por:

$$K_{pe} = 1 - \exp \left[- \frac{K_{1pe}}{w_g^{(6)} \cdot (1 - X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} - X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)})} \right] \quad (A.16.1)$$

onde K_{pe} é o parâmetro do precipitador

Os balanços de massa são expressos em estado estacionário, ou seja, por equações algébricas. Sulfato de sódio como particulado que sai do precipitador na corrente de gás é calculado por:

$$w_g^{(pr)} X_{Na_2SO_4p}^{(gpr)} = (1 - K_{pe}) \cdot w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} \quad (A.16.2)$$

Carbonato de sódio como particulado que sai do precipitador na corrente de gás é calculado por:

$$w_g^{(pr)} X_{Na_2CO_3p}^{(gpr)} = (1 - K_{pe}) \cdot w_g^{(6)} \cdot X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)} \quad (A.16.3)$$

Os balanços por componentes de gases que saem do precipitador, são dados sob a forma de frações mássicas:

$$\text{Dióxido de Enxofre: } w_g^{(pr)} X_{SO_2}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{SO_2}^{(g_6)} \quad (A.16.4)$$

$$\text{Sulfeto de Hidrogênio: } w_g^{(pr)} X_{H_2S}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{H_2S}^{(g_6)} \quad (A.16.5)$$

$$\text{Monóxido de Carbono: } w_g^{(pr)} X_{CO}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{CO}^{(g_6)} \quad (A.16.6)$$

$$\text{Dióxido de Carbono: } w_g^{(pr)} X_{CO_2}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{CO_2}^{(g_6)} \quad (A.16.7)$$

$$\text{Água: } w_g^{(pr)} X_{H_2O}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{H_2O}^{(g_6)} \quad (A.16.8)$$

$$\text{Nitrogênio: } w_g^{(pr)} X_{N_2}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{N_2}^{(g_6)} \quad (A.16.9)$$

$$\text{Oxigênio: } w_g^{(pr)} X_{O_2}^{(gpr)} = w_g^{(6)} \cdot X_{O_2}^{(g_6)} \quad (A.16.10)$$

Balanço total de gás:

$$w_g^{(pr)} = w_g^{(6)} \left[1 - K_{pe} \left(X_{Na_2SO_4p}^{(g_6)} + X_{Na_2CO_3p}^{(g_6)} \right) \right] \quad (A.16.11)$$

A temperatura dos gases é considerada constante:

$$T^{(pr)} = T^{(6)} \quad (A.16.12)$$

Tabela 16 – Precipitador

variável	valor	unidade	descrição
$w_O^{(pr)}$	17065,0	lb/hr	Vazão de O no licor negro no precipitador
$w_{Na_2SO_4pa}^{(pr)}$	49,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de partículas no precipitador que vai para o gás de conduto
	4851,0	lb/hr	Vazão de Na ₂ SO ₄ na forma de partículas no precipitador que segue para o tanque de mistura
$w_{SO_2}^{(pr)}$	257,3	lb/hr	Vazão de SO ₂ no precipitador
$w_{CO}^{(pr)}$	753,6	lb/hr	Vazão de CO no precipitador
$w_{CO_2}^{(pr)}$	113494,0	lb/hr	Vazão de CO ₂ no precipitador
$w_N^{(pr)}$	358176,0	lb/hr	Vazão de N no precipitador
$w_{H_2O}^{(pr)}$	90737,0	lb/hr	Vazão de H ₂ O no precipitador
$w_{total}^{(pr)}$	580532,0	lb/hr	Vazão total dos componentes do precipitador que forma o gás de conduto
	4851,0	lb/hr	Vazão total dos componentes do precipitador que segue para o tanque de mistura
$\dot{Q}_{sens}^{(pr)}$	54,84E6	BTU/hr	Calor sensível do precipitador

APÊNDICE B

**Exemplo de mensagens trocadas pelos agentes de controle e comunicação
nos testes do capítulo 6.3.1**

APÊNDICE B

Sequencia de mensagens trocadas pelos agentes na primeira negociação, feita pelos agentes de controles, no teste do estado estacionario do sistema controlado.

```
(REQUEST
  :sender ( agent-identifier :name tcp4000@song04:1099/JADE :addresses
(sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.SocketProxyAgent )
  :receiver (set ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE )
)
  :content "88.0137 2537.6299 104.44 134.44 1750"
  :reply-with tcp4000.tcp4000-ClientConnection-Thread-11.1183045995640
  :in-reply-to noValue )

(CFP
  :sender ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Reducao )
  :receiver (set ( agent-identifier :name VaporAgente@song04:1099/JADE ) )
  :content "88.0137 2537.6299 104.44 134.44 1750"
  :reply-with R1183045995796_0 :protocol fipa-contract-net
  :conversation-id C30147129_1183045995796 )

(PROPOSE
  :sender ( agent-identifier :name VaporAgente@song04:1099/JADE :addresses
(sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Vapor )
  :receiver (set ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Reducao ) )
  :content "101.21301288000001 146.60507227999997"
  :reply-with ReducaoAgente@song04:1099/JADE1183045995828 :in-reply-to
R1183045995796_0 :protocol fipa-contract-net
  :conversation-id C30147129_1183045995796 )

(ACCEPT-PROPOSAL
  :sender ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Reducao )
  :receiver (set ( agent-identifier :name VaporAgente@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Vapor ) )
  :content "101.21301288000001 NO"
  :reply-with R1183045995921_0 :in-reply-to
ReducaoAgente@song04:1099/JADE1183045995828 :protocol fipa-contract-net
  :conversation-id C30147129_1183045995796 )

(INFORM
  :sender ( agent-identifier :name VaporAgente@song04:1099/JADE :addresses
(sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Vapor )
  :receiver (set ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Reducao ) )
  :content "101.21301288000001"
```

```

:reply-with ReducaoAgente@song04:1099/JADE1183045996000 :in-reply-to
R1183045995921_0 :ontology TLICOR :protocol fipa-contract-net
:conversation-id C30147129_1183045995796 )

```

```

(INFORM
:sender ( agent-identifier :name ReducaoAgente@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.Reducao )
:receiver (set ( agent-identifier :name tcp4000@song04:1099/JADE
:addresses (sequence http://192.168.0.90:7778/acc ) :X-JADE-agent-classname
SocketProxyAgent.SocketProxyAgent ) )
:content "134.44 1750 101.21301288000001"
:reply-with tcp4000@song04:1099/JADE1183045996031 :in-reply-to
tcp4000.tcp4000-ClientConnection-Thread-11.1183045995640 )

```

APÊNDICE C

Funções de TCP em MATLAB

APÊNDICE C

Funções TCP em MATLAB

A função “vapor” em matlab monitora a variavel “vazao_vapor”, Em caso de falha é enviada uma mensagem ao agente de comunicação através da ferramenta “TCP TOOLBOX”. No conteúdo desta mensagem do tipo “REQUEST” são enviados os valores das cinco variaveis utilizadas pelo sistema multiagentes na avaliação da falha.

```
function [saida] =
vapor(RTN,porcentagem,vazao_vapor,tlicor,tar,entlicor,tempo)
global con2
if (tempo > 1100)
    if (vazao_vapor > 2700)
        saida = 0;
        RTN = 0;
    end;
    if (vazao_vapor <= 2700) && (RTN == 0)
        spstring1 = num2str(porcentagem);
        spstring2 = num2str(vazao_vapor);
        spstring3 = num2str(tlicor);
        spstring4 = num2str(tar);
        spstring5 = num2str(entlicor);
        concaten1 = [spstring1 blanks(1) spstring2 blanks(1) spstring3
blanks(1) spstring4 blanks(1) spstring5];
        msg = '(REQUEST :receiver (set ( agent-identifier :name
VaporAgente@song04:1099/JADE ) ) :content "';
        ACLMSG = [msg,concaten1,'" )']
        pnet(con2,'printf',ACLMSG,'nblock');
        saida = 1;
        RTN = 1;
    end;
    if (vazao_vapor <= 2700) && (RTN ~= 0)
        saida = 1;
        RTN = 1;
    end;
else
    saida = 0;
    RTN = 0;
end;
```

A função “redução” monitora a eficiencia de redução e envia uma mensagem para o agente de comunicação com os valores das variaveis do processo.

```

function [saida] =
reducao(RTN,porcentagem,vazao_vapor,tlicor,tar,entlicor,tempo)
global con1
if (tempo > 1000)
    if (porcentagem > 90)
        saida = 0;
        RTN = 0;
    end;
    if (porcentagem <= 90.00) && (RTN == 0)
        spstring1 = num2str(porcentagem);
        spstring2 = num2str(vazao_vapor);
        spstring3 = num2str(tlicor);
        spstring4 = num2str(tar);
        spstring5 = num2str(entlicor);
        concatena = [spstring1 blanks(1) spstring2 blanks(1) spstring3
blanks(1) spstring4 blanks(1) spstring5];
        msg = '(REQUEST :receiver (set ( agent-identifier :name
ReducaoAgente@song04:1099/JADE ) ) :content "';
        ACLMSG = [msg,concatena,'" )']
        pnet(con1,'printf',ACLMSG,'nblock');
        saida = 1;
        RTN = 1;
    end;
    if (porcentagem <= 90.00) && (RTN ~= 0)
        saida = 1;
        RTN = 1;
    end;
else
    saida = 0;
    RTN = 0;
end;

```

A função “ControlAgrupado” recebe as mensagens com os valores das variáveis que serão atuadas no processo para controlar uma falha. Esta função recebe mensagens de qualquer agente de comunicação.

```

function [RETURN] = ControlAgrupado(var1,var2,var3)
global con2
global con1
str = pnet(con2,'read',[1 368],'view','nblock');
str1 = pnet(con1,'read',[1 372],'view','nblock');
if (strcmp(str, '') == 0)
    i = 373;
    achou = 0;
    apagou = 0;
    while achou == 0
        str = pnet(con2,'read',[1 i],'view','nblock');
        pos = findstr(str, '');
        if size(pos) == [1 1]
            i = i+1;
        else
            achou = 1;
            [token,remain] = strtok(str,'');
            [token,remain] = strtok(remain,'');
            RETURN = strread(token);
            RETURNSTRING = num2str(RETURN);
        end
    end
end

```

```

        if (strcmp(RETURNSTRING, '9999') || strcmp(RETURNSTRING,
'8888'))
            RETURN = [var1 var2 var3];
        end

        parenthesis = findstr(str, '(');
        while apagou == 0
            str = pnet(con2, 'read', [1 i], 'view', 'nblock');
            parenthesis = findstr(str, '(');
            if size(parenthesis) == [1 5]
                i = i+1;
            else
                apagou = 1;
                str = pnet(con2, 'read', [1 i], 'nblock')
            end
        end
    end
end
elseif(strcmp(str1, '') == 0)
    i = 373;
    achou = 0;
    apagou = 0;
    while achou == 0
        str1 = pnet(con1, 'read', [1 i], 'view', 'nblock');
        pos = findstr(str1, '"');
        if size(pos) == [1 1]
            i = i+1;
        else
            achou = 1;
            [token, remain] = strtok(str1, '"');
            [token, remain] = strtok(remain, '"');
            RETURN = strread(token);
            RETURNSTRING = num2str(RETURN);
            if (strcmp(RETURNSTRING, '9999') ||
strcmp(RETURNSTRING, '8888'))
                RETURN = [var1 var2 var3];

            end
            parenthesis = findstr(str1, '(');
            while apagou == 0
                str1 = pnet(con1, 'read', [1 i], 'view', 'nblock');
                parenthesis = findstr(str1, '(');
                if size(parenthesis) == [1 5]
                    i = i+1;
                else
                    apagou = 1;
                    str1 = pnet(con1, 'read', [1 i], 'nblock')
                end
            end
        end
    end
end
else
    RETURN = [var1 var2 var3];
end

```


APÊNDICE D

**Programas em JAVA dos agentes de controle “AgenteRedução” e
“AgenteVapor”**

```

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Reducao.java at 6/29/07 4:02 AM

/**
 * *****
 * JADE - Java Agent DEvelopment Framework is a framework to develop
 * multi-agent systems in compliance with the FIPA specifications.
 * Copyright (C) 2000 CSELT S.p.A.
 *
 * *Agente de controle Redução desenvolvido por Ivan Herrera 2007.
 *
 * *Este agente "Redução" tem dois "Behaviours" principais.
 * *O primeiro é o "ContractNetInitiator" e o segundo é o
 * *"ContractNetResponder". Por cada mensagem recebido do
 * *agente TCP4000 ele inicia uma negociação com o agente
 * *"Vapor" para controlar as perturbações do sistema.
 * *Tambem ele é capaz de receber uma proposta do agente "vapor"
 * *e cooperar ataundo como um agente receptor.
 * *****
 */

package SocketProxyAgent;

import jade.core.Agent;
import jade.core.AID;
import jade.lang.acl.ACLMessage;
import jade.proto.ContractNetInitiator;
import jade.proto.ContractNetResponder;
import jade.domain.FIPANames;
import jade.core.behaviours.CyclicBehaviour;
import jade.lang.acl.MessageTemplate;
import jade.domain.FIPAAgentManagement.NotUnderstoodException;
import jade.domain.FIPAAgentManagement.RefuseException;
import jade.domain.FIPAAgentManagement.FailureException;

import java.util.Date;
import java.util.Vector;
import java.util.Enumeration;
import java.io.*;
import java.util.*;

import jade.lang.acl.*;
import jade.core.behaviours.SimpleBehaviour;
import jade.util.Logger;

public class Reducao extends Agent {
    private int nResponders;
    private MessageTemplate templatel = MessageTemplate.MatchPerformative(ACLMessage.
REQUEST);

    protected void setup() {

```

Page 1

```

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Reducao.java at 6/29/07 4:02 AM

// Read names of responders as arguments
//String myName = getLocalName();
final Object[] args = getArguments();
if (args != null && args.length > 0) {
    nResponders = args.length;
    System.out.println("Tentando enviar esta mensagem para o agente "+args[0]+".");

    addBehaviour(new CyclicBehaviour(this) {
        public void action() {

            final ACLMessage msg = myAgent.receive(templatel);
            if (msg != null) {
                System.out.println("Mensagem (" +msg+" )");
                System.out.println("Recevida uma mensagem

REQUEST do agente "+msg.getSender().getName());

                // Fill the CFP message
                ACLMessage ajuda = new ACLMessage(ACLMessage.

CFP);

                ajuda.setContent(msg.getContent());
                ajuda.setProtocol(FIPANames.

InteractionProtocol.FIPA_CONTRACT_NET);

                [i, AID.ISLOCALNAME));

                for (int i = 0; i < args.length; ++i) {
                    ajuda.addReceiver(new AID((String) args

                )
                System.out.println("REPLY "+ajuda);

                addBehaviour(new ContractNetInitiator(myAgent,

ajuda) {

                    protected void handlePropose(ACLMessage

propose, Vector v) {

                        System.out.println("Agent

"+propose.getSender().getName()+" proposed "+propose.getContent());
                        }

                        protected void handleRefuse(ACLMessage

refuse) {

                            System.out.println("Agent

"+refuse.getSender().getName()+" refused");

                            ACLMessage reply = msg.

createReply();

                            reply.setPerformative(ACLMessage.

INFORM);

                            reply.setContent("9999");

```

Page 2

Printing C:\IHerrera\NB_Projets\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Reducao.java at 6/29/07 4:02 AM

```
        System.out.println("REPLY
"+reply);
    }
    myAgent.send(reply);
}
protected void handleFailure(ACLMessage
    if (failure.getSender().equals
        // FAILURE notification
        // does not exist
        System.out.println
    }
    else {
        System.out.println("Agent
    }
    // Immediate failure --> we will
    ACLMessage reply = msg.
    reply.setPerformative(ACLMessage.
    reply.setContent("8888");
    System.out.println("REPLY
    myAgent.send(reply);
    nResponders--;
}
protected void handleAllResponses(Vector
    if (responses.size() <
        // Some responder didn't
        System.out.println
    ("Timeout expired: missing "+(nResponders - responses.size())+" responses");
    }
    // Evaluate proposals.
    int bestProposal = -1;
    AID bestProposer = null;
    ACLMessage accept = null;
    Enumeration e = responses.
elements();
```

Page 3

Printing C:\IHerrera\NB_Projets\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Reducao.java at 6/29/07 4:02 AM

```
        while (e.hasMoreElements()) {
            ACLMessage msg =
                if (msg.getPerformative()
                    StringTokenizer st =
                        int i = 0;
                        Double templicor =
                            Double tempar = 0.00;
                            while (st.
                                i = i+1;
                                if (i ==
                                    String
                                } else {
                                    String
                                    tempar
                                }
                            }
                            ACLMessage reply =
                                reply.
                                acceptances.
                                //int proposal =
                                if (templicor > 0)
                                    accept =
                                        String
                                        String
                    (ACLMessage) e.nextElement();
                == ACLMessage.PROPOSE) {
                new StringTokenizer(msg.getContent());
                0.00;
                hasMoreTokens()) {
                1) {
                TLICOR = st.nextToken();
                templicor = Double.parseDouble(TLICOR);
                TAR = st.nextToken();
                = Double.parseDouble(TAR);
                msg.createReply();
                setPerformative(ACLMessage.REJECT_PROPOSAL);
                addElement(reply);
                Integer.parseInt(msg.getContent());
                {
                //bestProposal = proposal;
                bestProposer = msg.getSender();
                reply;
                propostaaceita;
```

Page 4

```

noaceita;

(((templicor)<=125.00) && ((templicor)>=100)) {

    propostaaaceita = Double.toString(templicor);

    "NO";

    zero = " ";

    propostafinal = propostaaaceita+zero+noaceita;

    setContent(propostafinal);

    if

        noaceita =

        String

        String

        accept.

    }

    else{

        noaceita =

        String

        String

        accept.

    }

}

}

}

// Accept the proposal of the best

proposer

    if (accept != null) {

        System.out.println

        ("Accepting proposal "+bestProposal+" from responder "+bestProposer.getName());

        accept.setPerformative

        (ACLMessage.ACCEPT_PROPOSAL);

    }

}

protected void handleInform(ACLMessage

    StringTokenizer st = new

    int i = 0;

    String zero=" ";

    String RED=" ";

    String VAZ=" ";

    String TLICOR=" ";

```

```

String TAR=" ";

String ELICOR=" ";

while (st.hasMoreTokens()) {

    i = i+1;

    if (i == 1) {

        RED = st.

    }

    } else if (i == 2) {

        VAZ = st.

    }

    } else if (i == 3) {

        TLICOR = st.

    }

    } else if (i == 4) {

        TAR = st.

    }

    } else {

        ELICOR = st.

    }

}

}

if (inform.getOntology()=="TAR"){

    System.out.println("Agent

    "+inform.getSender().getName()+" successfully performed the requested action TAR");

    ACLMessage reply = msg.

    reply.setPerformative(ACLMessage.

    reply.setContent(inform.

    System.out.println("REPLY

    myAgent.send(reply);

}

else{

    System.out.println("Agent "+inform.

    getSender().getName()+" successfully performed the requested action TLICOR");

    ACLMessage reply = msg.

    reply.setPerformative(ACLMessage.

    reply.setContent

    System.out.println("REPLY

    myAgent.send(reply);

createReply();

INFORM);

(TAR+zero+ELICOR+zero+inform.getContent());

"+reply);

```

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Reducao.java at 6/29/07 4:02 AM

```
    }
    }
    } );
    }
    else {
        //block();
    }
}

} );
MessageTemplate template2 = MessageTemplate.and(
MessageTemplate.MatchProtocol(FIPANames.InteractionProtocol.

MessageTemplate.MatchPerformative(ACLMessage.CFP) );
addBehaviour(new ContractNetResponder(this, template2) {
protected ACLMessage handleCfp(ACLMessage cfp) throws
NotUnderstoodException, RefuseException {
    StringTokenizer st = new StringTokenizer(cfp.getContent());
    int i = 0;
    Double reducao = 0.00;
    Double vazao = 0.00;
    Double templicor = 0.00;
    Double tempar = 0.00;
    Double entlicor= 0.00;

    while (st.hasMoreTokens()) {
        i = i+1;
        if (i == 1) {
            String RED = st.nextToken();
            reducao = Double.parseDouble(RED);
        } else if (i == 2) {
            String VAZ = st.nextToken();
            vazao = Double.parseDouble(VAZ);
        } else if (i == 3) {
            String TLICOR = st.nextToken();
            templicor = Double.parseDouble(TLICOR);
        } else if (i == 4) {
            String TAR = st.nextToken();
            tempar = Double.parseDouble(TAR);
        } else {
            String ELICOR = st.nextToken();
            entlicor = Double.parseDouble(ELICOR);
        }
    }
    double diferenca = 2700-vazao;
    double EntLC = entlicor+(diferencia*0.032*entlicor)/100;

    System.out.println("Agent "+getLocalName()+" :
Propondo: Entrada do licor:"+EntLC);
```

Page 7

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Reducao.java at 6/29/07 4:02 AM

```
        ACLMessage propose = cfp.createReply();
        propose.setPerformative(ACLMessage.PROPOSE);
        String proposta;
        String zero = " ";
        proposta = Double.toString(EntLC);
        propose.setContent(proposta);
        return propose;
    }

    protected ACLMessage handleAcceptProposal(ACLMessage cfp, ACLMessage
propose,ACLMessage accept) throws FailureException {
        System.out.println("Agent "+getLocalName()+" : Proposal
accepted");

        System.out.println("Agent "+getLocalName()+" : Action
successfully performed");

        ACLMessage inform = accept.createReply();
        inform.setPerformative(ACLMessage.INFORM);
        inform.setContent(accept.getContent());
        return inform;
    }

    protected void handleRejectProposal(ACLMessage cfp, ACLMessage
propose, ACLMessage reject) {
        System.out.println("Agent "+getLocalName()+" : Proposal
rejected");

        } );
    }
    else {
        System.out.println("No responder specified.");
    }
}
}
```

Page 8

```

Printing C:\Iherrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

/**
 * *****
 * JADE - Java Agent Development Framework is a framework to develop
 * multi-agent systems in compliance with the FIPA specifications.
 * Copyright (C) 2000 CSELT S.p.A.
 *
 * *Agente de controle Vapor desenvolvido por Ivan Herrera 2007.
 *
 * Este agente "Vapor" tem dois "Behaviours" principais.
 * O primeiro é o "ContractNetInitiator" e o segundo é o
 * "ContractNetResponder". Por cada mensagem recebido do
 * agente TCP4000 ele inicia uma negociação com o agente
 * "Vapor" para controlar as perturbações do sistema.
 * Também ele é capaz de receber uma proposta do agente "vapor"
 * e cooperar atuando como um agente receptor.
 * *****
 */

package SocketProxyAgent;

import jade.core.Agent;
import jade.core.AID;
import jade.lang.acl.ACLMessage;
import jade.proto.ContractNetInitiator;
import jade.proto.ContractNetResponder;
import jade.domain.FIPANames;
import jade.core.behaviours.CyclicBehaviour;
import jade.lang.acl.MessageTemplate;
import jade.domain.FIPAAgentManagement.NotUnderstoodException;
import jade.domain.FIPAAgentManagement.RefuseException;
import jade.domain.FIPAAgentManagement.FailureException;
import java.util.Date;
import java.util.Vector;
import java.util.Enumeration;
import java.io.*;
import java.util.*;
import jade.lang.acl.*;
import jade.core.behaviours.SimpleBehaviour;
import jade.util.Logger;

public class Vapor extends Agent {
    private int nResponders;
    private MessageTemplate template1 = MessageTemplate.MatchPerformative(ACLMessage.REQUEST);

    protected void setup() {
        // Read names of responders as arguments
        //String myName = getLocalName();

```

Page 1

```

Printing C:\Iherrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

final Object[] args = getArguments();
if (args != null && args.length > 0) {
    nResponders = args.length;
    System.out.println("Tentando enviar esta mensagem para o agente "+args[0]+".");

    addBehaviour(new CyclicBehaviour(this) {
        public void action() {

            final ACLMessage msg = myAgent.receive(template1);
            if (msg != null) {
                System.out.println("Mensagem (" +msg+"");
                System.out.println("Recevida uma mensagem

REQUEST do agente "+msg.getSender().getName());

                // Fill the CFP message
                ACLMessage ajuda = new ACLMessage(ACLMessage.CFP);

                ajuda.setContent(msg.getContent());
                ajuda.setProtocol(FIPANames.

InteractionProtocol.FIPA_CONTRACT_NET);

                [i], AID.ISLOCALNAME));

                ajuda {

                    protected void handlePropose(ACLMessage

propose, Vector v) {

                        System.out.println("Agent

"+propose.getSender().getName()+" proposed "+propose.getContent());

                    }

                    protected void handleRefuse(ACLMessage

refuse) {

                        System.out.println("Agent

"+refuse.getSender().getName()+" refused");

                        ACLMessage reply = msg.

createReply();

                        reply.setPerformative(ACLMessage.

INFORM);

                        reply.setContent("9999");
                        System.out.println("REPLY

"+reply);

```

Page 2

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

```
        myAgent.send(reply);
    }

    protected void handleFailure(ACLMessage
                                failure) {
        (myAgent.getAMS()) {
            from the JADE runtime: the receiver

            ("Responder does not exist");

            "+failure.getSender().getName()+" failed");

            not receive a response from this agent

            createReply();

            INFORM);

            "+reply);

            responses, Vector acceptances) {

            nResponders) {

                reply within the specified timeout

                ("Timeout expired: missing "+(nResponders - responses.size())+" responses");

                elements();

                (ACLMessage) e.nextElement();
```

Page 3

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

```
        if (msg.getPerformative()
            == ACLMessage.PROPOSE) {
            msg.createReply();

            setPerformative(ACLMessage.REJECT_PROPOSAL);

            addElement(reply);

            Double.parseDouble(msg.getContent());

            bestProposal) {

            bestProposal = proposal;

            bestProposer = msg.getSender();

            reply;

            setContent(msg.getContent());

            proposer

            ("Accepting proposal "+bestProposal+" from responder "+bestProposer.getName());

            (ACLMessage.ACCEPT_PROPOSAL);

            inform) {

                StringTokenizer(msg.getContent());

                StringTokenizer st = new

                int i = 0;
                String zero=" ";
                String RED=" ";
                String VAZ=" ";
                String TLICOR=" ";
                String TAR=" ";
                String ELICOR=" ";
                while (st.hasMoreTokens()) {
                    i = i+1;
                    if (i == 1) {
                        RED = st.
```

Page 4

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

```

nextToken();

nextToken();

nextToken();

nextToken();

nextToken();

} else if (i == 2) {
    VAZ = st.

} else if (i == 3) {
    TLICOR = st.

} else if (i == 4) {
    TAR = st.

} else {
    ELICOR = st.

}

System.out.println("Agent
"+inform.getSender().getName()+" successfully performed the requested action ELICOR");
ACLMessage reply = msg;

createReply();

reply.setPerformative(ACLMessage.INFORM);

INFORM;

reply.setContent(TAR+zero+TLICOR);

getContent()+zero+TLICOR);

System.out.println("REPLY
"+reply);

myAgent.send(reply);

}

});

else {
//block();

}

}

});

MessageTemplate template2 = MessageTemplate.and(
MessageTemplate.MatchProtocol(FIPANames.InteractionProtocol.FIPA_CONTRACT_NET),

MessageTemplate.MatchPerformative(ACLMessage.CFP));
addBehaviour(new ContractNetResponder(this, template2) {
protected ACLMessage handleCfp(ACLMessage cfp) throws
NotUnderstoodException, RefuseException {
StringTokenizer st = new StringTokenizer(cfp.getContent());
int i = 0;
Double reducao = 0.00;
Double vazao = 0.00;
Double templicor = 0.00;

```

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

```

        Double tempar = 0.00;
        Double entlicor= 0.00;
        while (st.hasMoreTokens()) {
            i = i+1;

            if (i == 1) {
                String RED = st.nextToken();
                reducao = Double.parseDouble(RED);
            } else if (i == 2) {
                String VAZ = st.nextToken();
                vazao = Double.parseDouble(VAZ);
            } else if (i == 3) {
                String TLICOR = st.nextToken();
                templicor = Double.parseDouble(TLICOR);
            } else if (i == 4) {
                String TAR = st.nextToken();
                tempar = Double.parseDouble(TAR);
            } else {
                String ELICOR = st.nextToken();
                entlicor = Double.parseDouble(ELICOR);
            }
        }
        double por cento = (100-(reducao*100)/90);
        System.out.println("por cento: "+por cento);
        double TempLC = templicor*(1-(por cento*1.4)/100);
        double TempAR = tempar*(1+(por cento*4.1)/100);
        double vazteste = vazao*(1-por cento*4.1*0.82*0.024);

        System.out.println("Agent "+getLocalName()+"::
Propondo: Temp do Licor:"+TempLC+",ou Temp do Ar)"+TempAR);
        ACLMessage propose = cfp.createReply();
        propose.setPerformative(ACLMessage.PROPOSE);
        String proposal;
        String proposta2;
        String opcao;
        String zero = " ";
        proposal = Double.toString(TempLC);
        proposta2 = Double.toString(TempAR);
        opcao = Double.toString(vazteste);
        String proposta = proposal+zero+proposta2;
        propose.setContent(proposta);
        propose.setEncoding(opcao);
        return propose;
    }

    protected ACLMessage handleAcceptProposal(ACLMessage cfp, ACLMessage
propose,ACLMessage accept) throws FailureException {
        System.out.println("Agent "+getLocalName()+":: Proposal
accepted");
    }
}

```


Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM

```
        System.out.println("Agent "+getLocalName()+" : Action
successfully performed");

        ACLMessage inform = accept.createReply();
        inform.setPerformative(ACLMessage.INFORM);
        StringTokenizer st = new StringTokenizer(accept.
getContent());

        int i = 0;
        Double templicor = 0.00;
        Double tempar = 0.00;
        String TLICOR = "";
        String TAR = "";
        String t = "NO";
        while (st.hasMoreTokens()) {
            i = i+1;
            if (i == 1) {
                TLICOR = st.nextToken();
            } else {
                TAR = st.nextToken();
            }

            if (TLICOR.equals(t)) {
                inform.setContent(TAR);
                inform.setOntology("TAR");
            }
            else{
                inform.setContent(TLICOR);
                inform.setOntology
                ("TLICOR");
            }

            return inform;
        }

        protected void handleRejectProposal(ACLMessage cfp, ACLMessage
propose, ACLMessage reject) {
            System.out.println("Agent "+getLocalName()+" : Proposal
rejected");
        }
    } );
}
else {
    System.out.println("No responder specified.");
}
}
}
```

Printing C:\IHerrera\NB_Projects\JADEMATLAB\src\SocketProxyAgent\Vapor.java at 6/29/07 4:00 AM