GIANCARLO CITTADINO

Otimização da malha de cogeração de energia em usina de açúcar e álcool

São Paulo

2017

GIANCARLO CITTADINO

Otimização da malha de cogeração de energia em usina de açúcar e álcool

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de
Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Fuad Kassab Junior

São Paulo
2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo na publicação

Cittadino, Giancarlo

Otimização da malha de cogeração de energia em usina de açúcar e álcool / G. Cittadino -- versão corr. -- São Paulo, 2017.

125 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1.COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 2.INSTRUMENTAÇÃO DE SISTEMAS 3.BAGAÇOS 4.CANA-DE-AÇÚCAR 5.CONTROLE (TEORIA DE SISTEMAS E CONTROLE) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça de fazer este trabalho. Obrigado por nos momentos mais difíceis me ajudar a entender a razão das coisas e me dar forças para concluir o trabalho.

Aos meus pais, Antonio Cittadino e Arlete Tumenas Cittadino, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida, sem o qual não conseguiria concluir mais essa etapa da minha vida. Amo muito vocês!

Ao meu orientador professor dr. Fuad Kassab Junior, por ter aceitado me orientar neste trabalho. Sem o senhor não seria possível concluir esta etapa. MUITÍSSIMO obrigado por toda a disposição e paciência em me ajudar com os problemas apresentados.

A minha família, que esteve ao meu lado incentivando e dando forças nos momentos difíceis.

A Escola Politécnica da USP pelas disciplinas ministradas e apoio durante o curso.

A todos os meus colegas e diretores da Promon Engenharia que me incentivaram a iniciar este desafio e me apoiaram durante o período que estive na empresa.

A usina, por ter me cedido gentilmente os dados para a realização do trabalho.

Ao mestre Ary Franco Junior, por ter compartilhado parte do seu conhecimento e material para me auxiliar na dissertação.

Ao meu amigo Maurício Kenji Arakaki, pelas horas dedicadas em me auxiliar com todo o seu conhecimento no mercado sucroalcooleiro.

Aos professores Tatiana Bertini e Hélio Camargo Corona, em todas as inúmeras revisões do texto.

Ao dr. Lucas Vinicius Sansana Pabis, por todo incentivo e conhecimento sobre estrutura e metodologia da dissertação. Sem a sua participação, estaria ainda na primeira página deste trabalho.

A minha amada namorada Marina de Melo Mendes, que me apoiou e suportou minhas chatices e restrições durante o período de desenvolvimento do trabalho. Obrigado Gatinha!

A todos os meus amigos e conhecidos, que me apoiaram de alguma maneira nessa caminhada através de incentivos, carinhos e risadas durante esses anos.

RESUMO

A matriz elétrica brasileira é baseada em energias renováveis e principalmente, na energia hidráulica. Frente a algumas crises que o país viveu, faz-se necessário encontrar fontes alternativas de produção de energia elétrica que possam auxiliar a principal fonte energética, principalmente no período de estiagem.

A biomassa é uma alternativa viável de combustível para a produção de eletricidade através de centrais de geração e cogeração de energia. Dentre as alternativas para a produção de eletricidade, temos as usinas de açúcar e álcool, que possuem um grande potencial de produção energética, que pode ser otimizado através do melhor aproveitamento da queima de bagaço. Esta dissertação estuda todos os elementos de cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras, com ênfase no bagaço e na caldeira, propondo uma alternativa para aperfeiçoar a eficiência da queima do bagaço. Esta proposição é por meio da utilização de medidores de vazão e umidade do bagaço, aliado a um controlador lógico que atue sobre as entradas da cogeração de energia, para aumentar a eficiência da malha e diminuir o desperdício das variáveis de entrada.

Todas as proposições são simuladas com dados de uma usina de açúcar e álcool, para que seja possível validar o modelo, e comprovar os ganhos provenientes da utilização do controlador. Através deste controlador, verificou-se que a usina queima mais bagaço que o necessário, diminuindo o rendimento da caldeira e perturbando o restante do processo.

Palavras-chave: Cogeração de energia elétrica, Instrumentação, Controle, Umidade, Bagaço de cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The Brazilian electrical energy matrix is based on renewable energies mainly on hydroelectric energy. As the country has experienced some energy crisis, it is necessary to find alternative sources of electric energy production that can help to keep the offer of the main energy source, especially during the dry season.

Biomass is a viable alternative fuel for the production of electricity, through generation power plants and cogeneration power plants. Among electricity production alternatives, we have the sugar and alcohol plants, which have a great energy production potential that which can be optimized through the best use of bagasse burning. This dissertation will study all the elements of energy cogeneration in sugarcane plants, by emphasizing bagasse and boiler, proposing an alternative to improve bagasse burning efficiency. This proposition will be proven through the use of flow meters and bagasse moisture, together with a logic controller that acts on the inputs of the energy cogeneration, which increase the efficiency of the mesh and reduce the wastage of the input variables.

All propositions will be simulated with data from a sugar and alcohol mill, so that it is possible to validate the model, and to prove the gains from using the controller. Through this controller, it was verified that the plant burns more bagasse than necessary, reducing the efficiency of the boiler and disturbing the rest of the process.

Keywords: Electric Power Cogeneration, Instrumentation, Control, Humidity, Sugarcane Bagasse.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
COGEN	Associação da Indústria de Cogeração de Energia
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CQNUMC	Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FLC	Controlador Lógico Fuzzy
FUE	Fator de Utilização de Energia
GPC	Controlador Preditivo Generalizado
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>International Panel of Climate Change</i>
LIT	Linear Invariante no Tempo
LMI	Desigualdades Matriciais Lineares
LQG	<i>Linear Quadratic Gaussian</i>
LTR	<i>Loop Transfer Recovery</i>
MCR	<i>Maximum Continuous Rating</i>
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Medida Provisória
NBR	Norma Brasileira
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Adjust</i>
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PID	(Controle) Proporcional Integral Derivativo
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
UNICA	União da indústria de cana-de-açúcar
UTE	Usinas Termo Elétricas

NOMECLATURA

Variável	Descrição	Unidade
C_p	calor específico do metal	J/(Kg°C)
h_f	entalpia específica da água de alimentação	J/Kg
h_s	entalpia específica do vapor	J/Kg
h_w	entalpia específica da água	J/Kg
m_t	massa total do sistema	Kg
p	pressão dentro do tubulão	Pa
Q	quantidade de calor da fornalha	W
q_f	vazão de água na entrada da caldeira	Kg/s
q_s	vazão de vapor na saída da caldeira	Kg/s
T_m	temperatura do metal	°C
V_{st}	volume total de vapor do sistema	m ³
V_t	volume total do sistema	m ³
V_{wt}	volume total de água do sistema	m ³
ρ_s	densidade específica do vapor	Kg/m ³
ρ_w	densidade específica do água	Kg/m ³
A_{dc}	área do tubo de descida	m ²
A_t	área da seção transversal do tubo	m ²
g	Gravidade	m/s ²
h_c	entalpia específica da condensação	J/Kg
h_m	entalpia específica da mistura água vapor	J/Kg
k	coeficiente de atrito	-
m_r	massa total de metal do tubo de subida	Kg
q_m	vazão mássica da mistura água vapor	Kg/s
q_r	vazão mássica do tubo de subida	Kg/s
q_{dc}	vazão mássica do tubo de descida	Kg/s
T_s	temperatura do vapor	°C
V_r	Volume total do tudo de subida	m ³
V_t	volume do tubo	m ³
z	comprimento do tubo	m
α_m	fração mássica de vapor	-
α_r	qualidade do vapor (título)	-

α_v	fração volumétrica de vapor	-
ξ	comprimento normalizado do tubo	-
ρ_m	massa específica da mistura água vapor	Kg/m ³
L_r	comprimento do tubo de subida	m
L_{dc}	comprimento do tubo de descida	m
τ	constante de tempo	s
PCI	calor disponível no bagaço	MJ/kg
q_b	vazão de bagaço	Kg/s
η_{ca}	rendimento da caldeira	-

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1	Oferta interna de energia elétrica por fonte ¹	14
Figura 1.2	Projeção da participação de tipos de energia na matriz energética brasileira, durante os próximos anos, para fontes renováveis, fontes nucleares e para UTE ²	15
Figura 1.3	Usina de açúcar e álcool ⁶	17
Figura 1.4	Representação da cogeração de energia simplificada	18
Figura 3.1	Ciclo de Carnot representado no diagrama de Temperatura (T) x Entalpia (S) ^{12,16}	33
Figura 3.2	Ciclo de Rankine: Temperatura (T) x Entalpia (S) ^{12,16,18}	35
Figura 3.3	Ciclo de Rankine: Fluxograma de operação ¹²	35
Figura 3.4	Faixa das usinas de cana-de-açúcar em operação no Brasil ²⁵	38
Figura 3.5	Pilha de bagaço de usina de cana-de-açúcar ³⁵	41
Figura 3.6	Percentual e potencial futuro da cogeração no total de produção de energia de cada país ²⁶	41
Figura 3.7	Fluxograma típico da cogeração de energia ⁴⁸	49
Figura 3.8	Desaerador ⁴⁸	50
Figura 3.9	Fluxos de água e vapor do desaerador ⁴⁷	51
Figura 3.10	Caldeira aquatubular utilizada em usinas de açúcar e álcool ⁵¹	53
Figura 3.11	Principais componentes da caldeira ⁴⁹	54
Figura 3.12	Conjunto da turbina ⁵²	55
Figura 3.13	Gerador ⁴⁹	58
Figura 3.14	Representação de posição de instalação dos instrumentos	59
Figura 3.15	Elemento sensor de umidade ⁵⁴	59
Figura 3.16	Transmissor de umidade ⁵⁴	60
Figura 3.17	Transmissor de vazão ⁵⁵	61
Figura 4.1	Representação esquemática da caldeira	62
Figura 4.2	Representação do tubulão de vapor ¹⁵	67
Figura 4.3	Faixa de operação da umidade do bagaço	77
Figura 5.1	Região de factibilidade, utilizando a faixa $10000 \leq km$, $kx \leq 50000$, para $\beta=0,01$	81
Figura 6.1	Representação da caldeira	83
Figura 6.2	Saída e Entradas de variáveis da malha de controle	86
Figura 6.3	Comparação da variável pressão	87
Figura 6.4	Comparação da variável nível	87
Figura 6.5	Comparação da variável volume total de água	88
Figura 6.6	Comparação da variável qualidade do vapor	89
Figura 6.7	Comparação da variável volume de vapor no tubulão	89
Figura 6.8	Comparação das vazões nos riser e downcomers	90
Figura 6.9	Comparação da vazão de condensação e da fração volumétrica	90

Figura 6.10	Comparação da vazão de condensação e da fração volumétrica	91
Figura 6.11	Variáveis de entrada e saída utilizadas pela usina	92
Figura 6.12	Variáveis de estado e vazões nos tubos auxiliares	93
Figura 6.13	Variáveis de apoio sob atuação do controle	94
Figura 6.14	Novas variáveis de entrada, em conjunto com as entradas reais do processo	94
Figura 6.15	Entrada real (tracejada) e entrada sugerida pelo controlador (contínua) para o fornecimento de água	95
Figura 6.16	Entrada real (tracejada) e entrada sugerida pelo controlador (contínua) para o fornecimento de calor	95
Figura 6.17	Entradas, saída e novas entradas conforme solicitação de vapor	96
Figura 6.18	Variáveis de estado e vazões dos tubos conforme solicitação de vapor	98
Figura 6.19	Entradas, saída e novas entradas conforme solicitação de vapor	99
Figura 6.20	Degrau no fornecimento de calor	100
Figura 6.21	Nova entrada de água com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada)	101
Figura 6.22	Nova entrada de calor com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada)	101
Figura 6.23	Nova entrada de vazão de bagaço com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada)	102
Figura 6.24	Variáveis de estado com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada)	103
Figura 6.25	Variáveis auxiliares com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada)	103
Figura 6.26	Representação do turbogerador	104
Figura B.1	Gráfico da temperatura em função da pressão	123
Figura B.2	Gráfico da densidade específica da água em função da pressão	123
Figura B.3	Gráfico da densidade específica do vapor em função da pressão	124
Figura B.4	Gráfico da entalpia específica da água em função da pressão	124
Figura B.5	Gráfico da entalpia específica do vapor em função da pressão	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Localização espacial da energia elétrica excedente disponível para a venda por sub-região brasileira ⁸	19
Tabela 2.1	Potencial energético do País em 2011 ²⁹	30
Tabela 2.2	Composição básica da cana-de-açúcar ³¹	31
Tabela 2.3	Energia contida na cana-de-açúcar ³¹	31
Tabela 2.4	Composição do bagaço ³²	33
Tabela 2.5	Poder calorífico do bagaço ³⁶	34
Tabela 2.6	Projeção da demanda de bagaço ²	35
Tabela 4.1	Parâmetros do sistema	63
Tabela 4.2	Variáveis da mistura vapor e água dos tubos	64
Tabela 4.3	Variáveis do balanço cinético	66
Tabela 4.4	Variáveis da modelagem do vapor no tubulão	68
Tabela 4.5	Valores de PCI do bagaço com relação a umidade	76
Tabela 6.1	Dados construtivos e operacionais	84
Tabela 6.2	Equações da entalpia, temperatura e densidade do vapor	85
Tabela 6.3	Condições iniciais	85
Tabela 6.4	Condições da Cogeração de energia	105
Tabela B.1	Variáveis do vapor em função da pressão ⁴³	122

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	14
1.2	OBJETIVO	19
1.3	JUSTIFICATIVA	20
1.4	RELEVÂNCIA DA PESQUISA	21
1.5	QUESTÃO CENTRAL E HIPÓTESE	21
1.6	METODOLOGIA	22
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	COGERAÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	24
2.2	MODELOS E CONTROLES PARA COGERAÇÃO	28
3	FUNDAMENTAÇÃO	33
3.1	CICLOS TERMICOS DE POTÊNCIA	33
3.2	BIOMASSA	36
3.3	BAGAÇO E PALHA DE CANA DE AÇUCAR.....	40
3.4	DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO	46
3.4.1	Histórico da cogeração	46
3.4.2	Equipamentos da cogeração de usinas de álcool	49
3.4.2.1	Desaerador	50
3.4.2.2	Caldeiras	52
3.4.2.3	Turbinas a vapor e condensador	55
3.4.2.4	Classificação das turbinas a vapor	56
3.4.2.5	Geradores elétricos	57
3.5	INSTRUMENTOS DE ANÁLISE DO BAGAÇO.....	58
3.5.1	Medição de umidade	59
3.5.2	Medição de vazão	60
4	MODELAGEM DO SISTEMA.....	62
4.1	MODELAGEM DA CALDEIRA.....	62
4.1.1	Modelagem da mistura vapor e água nos tubos.....	65
4.1.2	Vazão de circulação	67
4.1.3	Modelagem de vapor e água no tubulão.....	68
4.2	MODELO NÃO LINEAR.....	70
4.3	EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO	72
4.4	MODELO LINEAR	73
4.5	MELHORIA NO MODELO PARA UTILIZAÇÃO EM USINAS	76
5	CONTROLE	78
5.1	MODELO LINEARIZADO	78
5.2	CONTROLADOR	80
5.3	SISTEMA CONTROLADO	82
6	SIMULAÇÃO COM OS DADOS DA PLANTA.....	83
6.1	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	86
6.2	CONTROLE SOBRE A DEMANDA DE VAPOR DA USINA	91
6.3	SIMULAÇÃO DE ALTERAÇÃO DA SAÍDA DO VAPOR.....	96
6.4	COMPARAÇÃO ENTRE CONTROLADORES	99

6.5	PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	104
7	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS.....	109
	APÊNDICE A – CONTROLADOR	116
A.1	PONTO DE OPERAÇÃO.....	116
A.2	SISTEMAS LINEARES COM INCERTEZAS POLITÓPICAS	118
A.3	ESTABILIDADE DO SISTEMA	119
A.4	TAXA DE DECAIMENTO.....	120
A.5	RESTRIÇÕES DA MATRIZ DE GANHO DO CONTROLADOR	121
	APÊNDICE B – VARIÁVEIS DE ENTALPIA E DENSIDADE.....	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O Balanço Energético Nacional 2016 (BEN 2016), do Ministério de Minas e Energia (MME), apresenta um resumo da oferta de energia no Brasil. Neste estudo, é possível verificar o decréscimo de produção de energia no ano de 2015, atingindo o montante de 570TWh. De acordo com o relatório citado, é possível verificar que a maior fonte de energia produzida no país é proveniente das hidroelétricas (64,0%), seguido pelo gás natural (12,8%) e pela energia produzida através da biomassa (8,0%), conforme a Figura 1.1. Se considerarmos as fontes de energia disponíveis, é possível afirmar que a matriz energética brasileira baseia-se, fundamentalmente, em fontes renováveis, que correspondem a 75,5% da oferta interna de fontes de energia¹.

Figura 1.1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte¹.

Na projeção para os próximos anos, a matriz energética brasileira continuará baseada em energias renováveis, o que contribuirá para o desenvolvimento

sustentável do país e ajudará a reduzir as taxas de emissão de carbono², evitando a utilização de energias provenientes do petróleo. A Figura 1.2, indica a projeção referente a participação das fontes de energia: renováveis, usinas termo elétricas (UTE) e usinas nucleares até 2023.

Figura 1.2 - Projeção da participação de tipos de energia na matriz energética brasileira, durante os próximos anos, para fontes renováveis, fontes nucleares e para UTE².

Outro fator que contribui para optar-se por energias renováveis, é que a utilização de derivados do petróleo, para fins energéticos, é apontada como a principal causa do aumento da concentração de gases poluentes na atmosfera, que por sua vez provoca impactos generalizados nas mudanças climáticas do planeta. Para atender as demandas do *International Panel of Climate Change* (IPCC) e também do protocolo de Kyoto, o governo brasileiro lançou seu próprio Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), para todo o território nacional. Esse conjunto de medidas, baseado no artigo 12 do protocolo de Kyoto, estabelece as premissas para o desenvolvimento sustentável no Brasil, bem como a colaboração brasileira na mitigação da mudança global do clima³. Dentre estas premissas, está a utilização de energias renováveis em detrimento da utilização de combustíveis de origem fóssil e demais combustíveis com alto potencial poluente.

Outro programa nacional que mostra a tendência no investimento em fontes renováveis é o Brasil Maior. Este programa indica que o Brasil deve investir em inovação, dentre esses investimentos, em eficiência energética de fontes alternativas, como por exemplo a energia proveniente da biomassa.

A definição sobre a biomassa apresentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) considera apenas o ponto de vista energético: “qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica [...]”⁴.

Uma forma de produzir energia através da biomassa utilizada no Brasil é a partir da utilização do bagaço da cana-de-açúcar. Embora esta forma apresente um grande potencial energético, ainda é pouco utilizada em nosso País⁵.

A biomassa proveniente da cana-de-açúcar é consumida na produção de açúcar e de etanol quase na sua totalidade. De acordo com dados do BEN, em 2015, aproximadamente 58% dos 138 milhões de toneladas de bagaço consumidas para fins energéticos são provenientes da produção de açúcar, sendo que o restante foi obtido após a produção de etanol¹. A perspectiva é de uma alteração do cenário atual, com relação à utilização da cana-de-açúcar para a produção da biomassa, pois o mercado de açúcar não tende a crescer tanto quanto o mercado de combustíveis renováveis, em ascensão, de acordo com o plano decenal de expansão de energia de 2023 (PDE 2023)².

A cogeração de energia é definida como o processo de produção combinada de energia elétrica e térmica, destinando-se ambas ao consumo próprio e/ou de terceiros⁴.

As usinas de cana-de-açúcar, por exemplo, utilizam-se da cogeração através da queima de biomassa proveniente do bagaço da cana, para constituir uma fonte renovável de energia elétrica. Através dessa fonte é possível atender a demanda interna de consumo da usina, e disponibilizar o excedente da energia elétrica gerada para compor a expansão da oferta de geração no Brasil. Porém não são todas as usinas que são beneficiadas pelos programas governamentais descritos nesse capítulo. A Figura 1.3 mostra um croqui de usina, com a indicação dos principais equipamentos e saídas da mesma.

Figura 1.3 – Usina de açúcar e álcool⁶.

Após a retirada do caldo da cana-de-açúcar, o bagaço é encaminhado através de esteiras para servir como matéria prima para a produção de vapor. O bagaço serve como combustível para as caldeiras de alta pressão que também são alimentadas por água desmineralizada e condensado procedentes do desaerador. Esse vapor da saída da caldeira tem a característica de ser de alta pressão e superaquecido, e é então encaminhado para as turbinas. As turbinas, que podem ser de condensação ou contrapressão, são conectadas a um gerador para realizar a produção de energia elétrica. Na saída dessas turbinas temos o condensado, que retorna para o desaerador, e o vapor de escape (baixa pressão) para atender as necessidades do processo da usina. Todo esse ciclo é representado na Figura 1.4.

Figura 1.4 - Representação da cogeração de energia simplificada⁷.

É possível estimar que a energia elétrica proveniente da queima da biomassa de cana-de-açúcar poderá atingir o patamar de 7,7 GWh até 2023, considerando o total aproveitamento da cogeração, sendo que 1,4 GWh já foi contratado através de leilões de energia elétrica, com o início de fornecimento até 2018². O grande potencial desse tipo de fonte de energia está localizado principalmente nos estados de SP, GO, MG, MS e PR, próximo a importantes centros consumidores de energia elétrica, o que facilita a transmissão e distribuição da mesma^{2,8}.

Parece evidente que o potencial energético pode ser aumentado se forem utilizadas técnicas de otimização de processos. A operação das usinas ainda é realizada de forma manual, cujos operadores, estão sujeitos à alteração de

desempenho. Ainda não são utilizados algoritmos de controle que busquem aumentar a eficiência da planta e a operem de maneira a propor sempre a condição ideal do processo. A Tabela 1.1 representa o aumento do excedente regional que seria disponibilizado, se todas as usinas passassem a gerar energia elétrica com a mesma produtividade das usinas líderes de eficiência, no ano de 2010⁹:

Tabela 1.1 - Localização espacial da energia elétrica excedente disponível para a venda por sub-região brasileira⁹.

Região	Total da geração vendida na safra por região (MWh)	Total da energia elétrica que poderia estar disponível para venda na safra por região (MWh)	Excedente de energia não vendida na safra por região (MWh)	Crescimento possível no total da energia disponível para venda (%)
Estado de São Paulo	5.196.719,7	16.807.344,0	11.610.624,3	223,4%
Região Centro-Sul (Exceto São Paulo)	1.748.722,8	6.251.829,4	4.503.106,6	257,5%
Região Norte-Nordeste	372.349,5	1.685.413,0	1.313.063,5	352,6%
Brasil	7.317.792,0	24.744.586,4	17.426.794,4	238,1%

Segundo estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) realizado com os dados do ano de 2014, que considera apenas o potencial das usinas com alta eficiência energética, seria possível uma geração de 64 TWh adicionais à produção do ano estudado¹⁰.

O panorama geral apresentado mostra que existe um potencial de produção de energia elétrica a ser explorado, desafios ambientais, e ações governamentais que podem ser utilizados para implementar melhorias no mercado produtor de eletricidade através de cogeração de energia elétrica em usinas. Esses fatores constituem a motivação para a elaboração desta dissertação.

1.2 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é comprovar a possibilidade de aumento no rendimento da malha de cogeração de energia elétrica em uma usina de açúcar e álcool, a partir da implantação de instrumentos para a medição das propriedades do bagaço, particularmente a vazão e umidade, proporcionando uma regulação correta

na entrada do mesmo e com isso, prover um ganho de quantidade de kWh gerados para a mesma quantidade de matéria prima (bagaço/palha) inserida no processo ou redução no consumo da mesma.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em um mundo cada vez mais voltado à sustentabilidade, a utilização de fontes de energia renováveis torna-se essencial. Existem diversos métodos em uso para o aproveitamento deste esse potencial energético. Entre eles a queima do bagaço de cana-de-açúcar em usinas sucroalcooleiras para a geração de energia elétrica, subproduto que não tinha aproveitamento em larga escala e se transformava em um problema para a sua alocação dentro das usinas.

Expondo o assunto de forma mais geral, a cogeração de energia oferece diversas vantagens tanto para as usinas sucroalcooleiras, quanto para o meio ambiente. É possível enumerar alguns desses pontos positivos: a) geração de energia elétrica durante o período de estiagem no ano, período nos qual a quantidade de energia elétrica gerada pelas hidroelétricas é menor; b) substituição da fonte de energia elétrica frente às termelétricas; c) fornecimento de energia elétrica de forma descentralizada e espalhada no interior do Brasil; d) é relativamente menos agressora ao meio ambiente; e) emprega mão de obra na zona rural. f) O insumo é renovável e extingue com um antigo problema das usinas que era a pilha de bagaço; g) utiliza combustível e equipamentos locais.

Segundo Dantas⁵, as usinas do interior paulista possuem um grande potencial de produção de energia elétrica, fato que, do ponto de vista econômico, o investimento realizado para implantar a cogeração será amortizado, em média, cinco anos após o investimento realizado. Cardoso¹¹, comprova a eficiência de se utilizar o bagaço de cana-de-açúcar para a geração de energia elétrica e possível venda da mesma. Prieto¹² realiza uma análise termoeconômica do sistema de cogeração e faz sugestões para melhoras no processo, através da troca e melhor aproveitamento dos equipamentos mecânicos implantados no processo. E Paro¹³ desenvolve uma metodologia *Plan-Do-Check-Adjust* (PDCA) para aumentar o rendimento da

cogeração de energia, apresentando resultados concretos para o aumento do rendimento.

Franco Jr.¹⁴ faz o modelamento e a análise da malha de geração de vapor na caldeira, utilizando a teoria de Astrom & Bell¹⁵. Aplicou um controlador por meio do método de Desigualdades Matriciais Lineares, no entanto não considerou como o comportamento do bagaço pode influenciar a eficiência da cogeração de energia.

O presente trabalho pretende realizar uma melhora no modelamento da cogeração, por intermédio do desmembramento da variável de entrada quantidade de calor. Isto será realizado com a inclusão de instrumentos para monitoração da vazão e umidade do bagaço na entrada da caldeira. Com estas medições, será possível considerar a real quantidade de combustível injetado no processo. Pois a influência da qualidade desse combustível, não é considerada nos trabalhos publicados.

Espera-se que esta dissertação contribua para iniciar o desenvolvimento do tema dentre os especialistas de controle, e traga para as usinas uma solução para aumentar a eficiência da cogeração através de algoritmos matemáticos ou controladores de processo dedicados a toda a malha de cogeração de usinas.

1.4 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A relevância dessa pesquisa está em evidenciar que uma melhor análise da variável de entrada da cogeração de energia, através da medição da umidade e vazão do bagaço, melhora a eficiência da produção de energia elétrica em usinas de açúcar e álcool.

1.5 QUESTÃO CENTRAL E HIPÓTESE

A questão central a ser desenvolvida neste trabalho é como aumentar a eficiência da malha de cogeração de energia elétrica em uma usina de açúcar e álcool.

A demanda de vapor para o processo é mandatória no ajuste da malha de cogeração, porém é possível diminuir a quantidade de bagaço inserida para a queima

na caldeira? Ou é possível gerar mais vapor para utilizá-lo na geração de energia elétrica aproveitando todo o potencial de energia disponibilizada pela alimentação do bagaço?

Para responder a essas questões, será realizado um estudo de como a implantação de instrumentação auxiliar para medição da qualidade do bagaço aliada a implantação de um controle mais eficiente na caldeira, podem chegar a essa proposição.

1.6 METODOLOGIA

Através de uma identificação da principal malha da cogeração de energia: a caldeira, que foi previamente apresentada em Oliveira Jr¹⁶ e Franco Jr¹⁴, o trabalho visa otimizar o rendimento da produção de energia elétrica. Esse aumento será obtido através da melhor instrumentação na entrada de bagaço, consequentemente gerando uma melhor observação do comportamento do processo e utilizando os dados provenientes dos instrumentos para diminuir o desperdício de matéria prima da planta.

O trabalho propõe, a utilização da medição de vazão e umidade de bagaço na entrada “Q” do modelo, com o intuito de melhorar a eficiência da malha de vapor da caldeira.

Será realizada uma comparação do processo encontrado em uma usina a ser estudada, contra uma simulação, do mesmo processo, controlado e instrumentado da maneira descrita.

O software de apoio para o desenvolvimento do controle e comprovação de resultados é o Matlab® 2013.

Toda a simulação foi realizada com dados reais de um processo sucroalcooleiro.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos. O primeiro capítulo demonstra a relevância, justificativa e metodologia de trabalho.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre o tema, apresentando os componentes que serão estudados por esta dissertação.

A revisão bibliográfica é apresentada no terceiro capítulo buscando o material desenvolvido para o tema de otimização de cogeração em usinas e os controles e modelos do processo de cogeração. A pesquisa contém elementos que foram apresentados em teses de mestrado e doutorado, *papers* apresentados em congressos e artigos escritos em revistas especializadas nas áreas de açúcar e álcool e também de controle.

No quarto capítulo é apresentado o modelo matemático a ser utilizado como base para a planta.

No quinto capítulo é desenvolvido o controlador, baseado em uma teoria de controle, que unifica os processos e inclui a medição de umidade e vazão do bagaço nos cálculos.

Todas as validações, testes e simulações computacionais são encontrados no capítulo 6.

O último capítulo traz as conclusões e possibilidades para trabalhos futuros nessa área de estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 COGERAÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

O bagaço sai normalmente das moendas com umidade de 48% a 52%, e é transportado até as caldeiras através de esteiras, que alimentam os dosadores de bagaço. A alimentação da caldeira normalmente é do tipo *spreader-stoker*, que consiste em uma alimentação de bagaço e ar, através de um ventilador, possibilitando a maior queima do bagaço em suspensão, que permite uma resposta mais rápida às possíveis variações de cargas. Por fim, as grelhas garantem a queima do restante do bagaço¹⁷.

O uso de pré-aquecedores de ar e do economizador da caldeira, permite uma melhor eficiência do sistema, aproveitando o calor gerado pelos gases da saída da fornalha. O pré-aquecedor é responsável por aquecer o ar de combustão e o economizador fornece energia térmica para elevar a temperatura da água de alimentação. Os sopradores de fuligens são montados em pontos estratégicos da caldeira, para melhorar a eficiência total do feixe tubular, evitando a permanência de fuligens entre os tubos do feixe tubular. O lavador de gases na saída da fornalha permite que o gás da chaminé seja limpo, evitando que particulados sejam jogados para a atmosfera¹⁷.

Após a saída do vapor da caldeira o mesmo é transportado através de tubulações termicamente isoladas até as turbinas. Essas máquinas transformarão a energia contida no vapor em energia mecânica para os geradores elétricos, e também fornecerão vapor de baixa pressão para o processo de acordo com as necessidades da usina.

O gerador elétrico, que fica acoplado junto à turbina, transforma a energia mecânica recebida em energia elétrica para uso da própria usina, e quando existe excedente, vende-se essa energia excedente para o mercado.

Os trabalhos citados nesse item apresentam temas relacionados a otimização da eficiência energética no mercado sucroalcooleiro. Os trabalhos tratam, na sua maioria, de melhorias pontuais no processo, e não especificamente no algoritmo de

controle utilizado para a malha de vapor, responsável pela geração de energia da usina.

No Brasil temos um cenário de autossuficiência energética das usinas de cana-de-açúcar, o que contribui para manter os custos de produção relativamente baixos, sendo possível um incremento de receita através da venda de energia elétrica decorrente da cogeração de energia. A importância da biomassa na matriz energética nacional se dá pela produção através de uma fonte renovável e limpa, e também devido a safra das usinas ser coincidente com o período de estiagem na região brasileira onde está concentrada a maior parte das hidrelétricas do País. A eletricidade que pode ser fornecida neste período, tem potencial para auxiliar na preservação dos níveis dos reservatórios de água, atuando assim de forma a complementar a oferta de energia ao Sistema Interligado Nacional¹⁸.

Para Escobar¹⁹ a utilização do bagaço como combustível de caldeiras no setor sucroalcooleiro ocorre há muito tempo, mas foram necessárias as crises energéticas no País, para que se iniciasse o uso desse combustível como fonte de energia cogeração de energia, e deixasse de ser tratado apenas como resíduo industrial.

Segundo Gallinari²⁰, a cogeração de energia no setor sucroalcooleiro não é um fato novo. Porém, nem sempre a eficiência foi prioridade, mas sim a necessidade. Ou seja, a preocupação sempre foi de produzir a energia necessária para abastecer a demanda energética da usina e não maximizar o aproveitamento do bagaço para geração de energia elétrica. Nos dias atuais, uma usina que exporta excedente de energia tem como característica equipamentos de tecnologia com eficiência elevada, uma produção que possui uma quantidade suficiente de bagaço para gerar excedente de energia durante todo o ano, concessão dos órgãos responsáveis para realizar a exportação de energia, além do contratado com a concessionária. Entretanto não há registros no trabalho que a eficiência dos equipamentos seja otimizada para toda a capacidade de geração de energia da planta.

A mudança de mentalidade dos responsáveis pelas usinas aconteceu a partir do racionamento de energia em 2001, quando o Estado implementou novas regras no mercado de energia elétrica. A partir dessa mudança, o setor começou a investir na modernização de seus equipamentos, com o intuito de torná-los mais eficientes e, com isso, participar dos leilões de energia, em programas de incentivos como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), ou concorrer com as demais fontes no mercado livre²¹.

Rodrigues²² realiza uma análise da evolução tecnológica no setor sucroalcooleiro, em quatro cenários diferentes, apenas modificando a instalação típica do sistema de vapor das usinas. No primeiro caso, é utilizado um sistema simples e convencional, com caldeira de baixa pressão e turbinas de simples estágio, os demais casos mostram um alto nível de modernização, utilizando caldeiras de alta eficiência térmica, turbina de extração e condensação e realizadas algumas melhorias na usina, na área de vapor de processo. O último caso mostra que a otimização realizada nessas usinas pode gerar um aumento de rendimento na ordem de 62% na geração de vapor e 55% na exportação de energia para a rede elétrica, em comparação as mesmas máquinas (caldeira e turbina) de alta eficiência. Porém o trabalho não relata nenhuma intervenção no algoritmo de controle de vapor das usinas, sendo os operadores da planta responsáveis pela supervisão do processo.

Ensinas²³ propõe um método de integração térmica para a produção da usina de cana-de-açúcar, buscando obter uma redução da demanda das utilidades do processo. Aplicou-se um procedimento de otimização termo econômica, para a avaliação de diminuição de custos, proporcionando aumentos na produção de excedentes de eletricidade e/ou bagaço de cana, além de reduzir a demanda de água da usina. Os índices apresentados nessa dissertação assemelham-se com os apresentados por Horlock²⁴.

Já Pellegrini²⁵ desenvolveu uma comparação que demonstra os ganhos ambientais, além da análise de energia gerada contra o capital investido para implantação e gasto durante a operação. No trabalho, são encontradas informações sobre a eficiência energética de plantas tradicionais, e aquelas operadas a biomassa. São apresentadas melhorias nas configurações da cogeração, como por exemplo, a utilização de vapor supercrítico e sistemas de gaseificação da biomassa com ciclos combinados.

Paro¹³ desenvolveu uma metodologia de gestão continuada da eficiência energética, baseada no ciclo de melhoria contínua (PDCA), de centrais de cogeração nas usinas de cana-de-açúcar. A tese apresenta um estudo de caso com duas centrais de energia semelhantes, sendo que em uma delas foi aplicada a técnica do PDCA e na outra não, demonstrando a eficiência da metodologia aplicada na cogeração.

A CONAB⁹ apresentou um estudo com a análise de desempenho da safra de 2009-2010 que mostra o enorme potencial de produção de energia elétrica

desperdiçado pelas usinas sucroalcooleiras, se comparadas com aquelas que possuem os melhores aproveitamentos de produtividade. As perdas foram descritas no Capítulo 1 (Tabela 1.1) e mostram que a produção de energia através do bagaço pode aumentar em até 238%. Esse percentual não leva em consideração o aumento de produção que ocorrerá caso sejam implementados algoritmos de controle mais eficientes, com ajustes adequados para os diversos pontos de operação do sistema de vapor.

Já Miozzo Neto²⁶ realizou uma análise preliminar sobre confiabilidade e disponibilidade do setor sucroalcooleiro, sugerindo um *benchmarking* para padronização de índices de qualidade das variáveis e medições do processo, a serem utilizados como parâmetros de eficiência energética da cogeração em usinas de açúcar e álcool. O autor realizou essa análise de disponibilidade da unidade de cogeração através de um software sugerindo que é possível aumentar em 8% a disponibilidade média anual das usinas estudadas, apenas considerando o período da safra. Sendo que esse aumento de disponibilidade de energia pode significar um aumento de 38% na receita da usina.

Barbeli²⁷ cita que a crise hídrica vivida no Brasil, faz com que se busquem alternativas para a produção de energia com o intuito de se evitar um racionamento de energia no país, isto posto é necessário que se busque outras formas de produção de energia, dentre elas a cogeração de energia elétrica. Como conclusão, é indicado que se utilize os combustíveis de forma mais eficiente, principalmente a biomassa, que é encontrada de forma abundante no País. Fato que reforça a justificativa desse trabalho, que busca otimização na produção de energia elétrica proveniente de biomassa.

Oliveira, S.²⁸ avalia o potencial energético do bagaço de cana para gerar eletricidade via estudo de amostras provenientes de usinas do Mato Grosso do Sul. Neste estudo foram verificadas as características de: umidade, cinzas, combustibilidade, PCI, PCS e termogravimetria do bagaço, correlacionando-as com as condições e propriedades dos equipamentos e métodos utilizados no processo. A autora conclui que todos os termos estudados influenciam na produção de energia elétrica e devem ser considerados na análise de eficiência dos equipamentos da mesma.

A União da indústria de cana-de-açúcar (UNICA)²⁹ indica que temos 175 usinas exportando energia elétrica para a rede. Outro fator relevante é que o percentual de

geração de energia elétrica através de cana-de-açúcar já posiciona o Brasil acima da média mundial (13,2%) no uso de energias limpas e renováveis. A bioeletricidade é gerada próxima aos centros consumidores de energia elétrica, reduzindo as perdas do sistema elétrico e a necessidade de investimentos em transmissão de energia. O potencial de produção de eletricidade a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar é estimado em 20,8 GW médios até 2023, ou seja, isso equivale a mais de 4 usinas de Belo Monte em produção de energia.

Por fim, o site novacana.com.br³⁰ informa que os processos de cogeração estão sendo otimizados, pois as novas necessidades de consumo de energia da usina com a destilaria autônoma precisam ser compensadas. Um dos principais fatores dessa otimização é o emprego de novos equipamentos na cogeração tendo destaque as turbinas multiestágio, e a atualização das caldeiras. Outro fator que vem proporcionando ganhos na eficiência é a instalação de motores elétricos nas moendas, fator que irá proporcionar um menor consumo de vapor de 21 bar. O site ainda apresenta um software comercial para auxiliar os usineiros a verificar a eficiência dos seus sistemas, e ainda simular uma alteração no processo para chegar aos novos níveis requeridos.

2.2 MODELOS E CONTROLES PARA COGERAÇÃO

Os trabalhos citados nesta seção apresentam temas relacionados com o controle de estações de cogeração de energia nos mais diversos setores da indústria. Não foram encontrados muitos trabalhos específicos da área sucroalcooleira, porém é possível extrapolar esses modelos, realizando algumas adaptações, para a finalidade desta dissertação.

Uma válvula automática com um ajuste errado do seu controlador pode dosar mais insumos que o necessário ao processo, aumentando o desperdício do produto. Existe uma questão central com relação ao tema: será que o sistema de controle relativo a esta válvula está configurado corretamente? A empresa integradora que configurou os instrumentos, utilizou as técnicas de controle corretas para obter uma resposta ótima do sistema? A grande maioria das respostas a esses questionamento é "não"¹⁴.

O controle mais usual da produção de vapor de uma caldeira é chamado de: “Controle de Nível a Três Elementos”, entretanto ele não é o mais eficiente. Esse controle é realizado através de controladores Proporcionais Integrais Derivativos (PID), e uma lógica de soma e subtração, envolvendo as seguintes variáveis, a) nível da água do tubulão de vapor, b) vazão de vapor para consumo e c) vazão da água de alimentação. A metodologia de ajustes para cada um dos PID é realizada normalmente através do método de tentativa e erro, porém não existe a certeza de que o ponto de operação do sistema, definido quando a vazão mássica de água de alimentação da caldeira e a vazão mássica de vapor produzido são iguais, corresponda ao ponto de maior eficiência da malha de controle de vapor. Outro fator que deve ser levado em consideração é que o PID é ajustado para trabalhar em um único ponto de operação da usina, porém ocorrem muitas mudanças na operação que demandam uma quantidade diferente de vapor produzido e conseqüentemente o PID não está ajustado para controlar esses outros pontos de operação¹⁷.

Astrom & Bell¹⁵ desenvolveram o modelo não linear de uma caldeira mais utilizado nos dias atuais. O modelo descreve a dinâmica de todos os elementos da caldeira, retratando-os de forma simples mas fiel à realidade. O modelo foi testado durante um longo período operacional, representando de maneira eficaz o conjunto de equipamentos.

Já Abdenmour³¹ propõe um sistema através da lógica fuzzy que contém um controlador projetado através da técnica *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) com *Loop Transfer Recovery* (LTR), para melhorar o desempenho da caldeira, quando ocorrerem distúrbios de carga (aumentando ou diminuindo a vazão de vapor produzido). O foco do trabalho é diminuir a oscilação do sistema com a perspectiva de preservar os equipamentos nele contido, principalmente visando à turbina, contudo a conclusão é que o controle aplicado não minimiza as variações causadas por esse tipo de distúrbio. Pelo contrário, o desempenho pode ser melhorado utilizando-se outro método de controle, a ser estudado.

Em Xu, Li e Cai³² existe uma proposta de utilizar um Controlador Preditivo Generalizado (CPG) em cascata, para o controle do nível de água do tubulão de caldeira. O trabalho propõe um controlador para manter o nível de forma constante, e compensa os distúrbios oriundos da entrada de água e do vapor no sistema. Foram utilizados modelos de nível do tubulão, e, por meio de simulações, conclui-se que o

controlador proposto é melhor do que um simples controlador tipo PID em cascata com um ajuste bem realizado.

Marques³³ desenvolveu um modelo não linear de uma caldeira aquatubular utilizando dados coletados na Refinaria Isaac Sabba da Petrobrás, localizada na cidade de Manaus-AM. O modelo obtido foi validado através da simulação de dados reais, e foi possível verificar que esse modelo descreve os processos de expansão e de contração, muito comuns nesse tipo de caldeira, e que prejudicam o controle de nível do tubulão. As simulações foram através do modelo de Astrom & Bell¹⁵ sendo de fundamental importância para a definição dos parâmetros do modelo. Considerando variações na carga da caldeira, o autor observou que o método de ajuste pelo Algoritmo Genético apresenta um melhor desempenho em relação aos outros três tipos de ajustes estudados pelo autor (métodos da oscilação limite, curva de reação Ziegler-Nichols e Cohen e Coon), resultando em menor oscilação e um menor tempo de assentamento a resposta do processo.

Valle e Dieck-Assad³⁴ comparam e discutem o desempenho de um sistema de vapor da caldeira quando o sistema é aprimorado pelos blocos da lógica fuzzy contra um sistema tradicional que utiliza PID. O modelo simplifica o processo da planta em escala real, para uma planta em pequena escala, baseado na primeira lei da termodinâmica. O comando para o controlador vem do Controlador Lógico Fuzzy (FLC) ao invés de vir do PID, com o intuito de melhorar o desempenho. Todas as simulações foram realizadas através do software Matlab. A conclusão do trabalho foi que, no modelo proposto, se utiliza um número menor de variáveis, e que se obtém um resultado com eficiência de até 7% a cima do tradicional.

Em Swarnakar, Marquez e Chen³⁵ é elaborado um algoritmo para a interconexão da caldeira com o turbogerador. Foram desenvolvidos observadores e retroalimentadores para cada um dos subsistemas que o modelo interliga, através da técnica de desigualdades matriciais lineares (LMIs), para garantir a estabilização robusta da interconexão. Os autores concluem que a formulação proposta, ultrapassa a barreira da instabilidade, o que garante que o sistema pode ser implementado de forma satisfatória no processo em questão. Entretanto o *paper* não cita melhorias com a finalidade de aumentar a produtividade do vapor para a geração de mais energia elétrica.

Oliveira Jr.¹⁶ representa os modelos matemáticos dos principais componentes que constituem o circuito de vapor de uma termelétrica para desenvolvimento de

simulações dinâmicas. O autor fez uma simulação para os seguintes modelos: caldeira, superaquecedores, fornalha, turbina e turbogerador. Cada um dos modelos apresentados, teve os seus resultados comentados, e o autor direciona o leitor sobre a utilização futura deles.

Moradi e Bakhtiari-Nejad³⁶ apresentam um modelo de caldeira Linear Invariante no Tempo (LIT), o qual tem como entradas a vazão do combustível e da água de alimentação. Devido à inacessibilidade de algumas variáveis de estado do modelo proposto, foi construído um observador com base no modelo de Luenberger para obter-se um estado estimado. Um algoritmo ótimo é desenvolvido para encontrar polos do sistema observador, que garantem também o desempenho robusto do mesmo.

Iacob e Andreescu³⁷ desenvolvem um sistema de controle para a caldeira em cascata de três elementos: nível de água do tubulão, fluxo de vapor e entrada de água contra um controle de elemento único da malha de nível de água do tubulão para atenuar o efeito de expansão e de contração da caldeira usando como base o modelo não linear de Astrom & Bell¹⁵ para uma termelétrica de produção de 16 MW. Os autores utilizaram a previsibilidade através de um modelo gráfico de interface para o usuário através do software Labview. O controle foi implementado na planta de Timisoara na Romênia e tiveram resultados satisfatórios.

Já Morato, Mendes Bertol, Cembranel, Alba e Rico³⁸ apresentam um artigo com a modelagem de uma planta híbrida de geração de energia, considerando a produção de energia através da cogeração de energia, aproveitamento de biogás e também através da energia solar e eólica. A modelagem proposta pelos autores é baseada na metodologia dos Energy Hubs, que permite integrar diferentes tipos de energia em um mesmo modelo, e tem como objetivo facilitar o futuro controle do sistema da malha em questão. Os resultados obtidos nas simulações demonstram uma operação satisfatória da usina utilizada para o estudo, podendo gerar um ganho de até 123 MWh com relação aos sistemas utilizados hoje.

Por fim, Franco Jr.¹⁴ apresentou um modelo para a malha de vapor de uma caldeira de usina de açúcar e álcool, com a finalidade de acabar com o ajuste pelo método de tentativa e erro que é realizado no setor. O controlador foi escrito como um modelo fuzzy, com o projeto baseado em LMIs para garantir a estabilidade do sistema, a restrição das entradas e o tempo de estabilização do sistema. O autor concluiu que

o sistema funciona de forma eficaz para diversas condições de operação do sistema, restringindo o consumo de água e calor.

Em nenhum dos trabalhos citados, foi verificada a influência das características do bagaço nos resultados obtidos. A medição da vazão do bagaço da cana e também o seu nível de umidade, conforme descrito na sessão anterior, influência nos resultados de eficiência do projeto, visto que não é considerado o PCI do combustível que serve de alimentação da caldeira, e também não se sabe o quanto de combustível entra efetivamente na caldeira.

3 FUNDAMENTAÇÃO

3.1 CICLOS TERMICOS DE POTÊNCIA

Carnot descreveu uma máquina térmica hipotética ideal quando operada por um ciclo com algumas condições pré-determinadas, respeitando-se as leis da Termodinâmica. Nesse ciclo de determinação do trabalho (W), o fluido é comprimido em um processo adiabático reversível até atingir uma temperatura elevada dentro do reservatório (T_b). Após essa etapa, inicia-se a transferência isotérmica reversível de calor (Q_b) do reservatório para o ciclo. Posteriormente, o fluido é expandido em uma turbina para realizar o processo adiabático reversível, voltando a temperatura ao patamar inicial (T_a). Inicia-se a rejeição de temperatura isotérmica de calor (Q_a), do ciclo para o reservatório de temperatura baixa. Com isso, é possível obter a máxima energia do ciclo através do trabalho gerado no processo adiabático reversível de expansão do fluido^{13, 24}. Essa descrição tem melhor representação na Figura 3.1:

Figura 3.1 - Ciclo de Carnot representado no diagrama de Temperatura (T) x Entalpia (S)^{13, 24}.

É possível utilizar a 2ª lei da termodinâmica para maximizar a eficiência descrita no ciclo de Carnot²⁴, conforme equação 3.1:

$$\eta_{th} = \frac{W}{Q_b} = \frac{T_b - T_a}{T_b} \quad (3.1)$$

Onde:

η_{th} = Eficiência térmica do ciclo de Carnot

T_b = Temperatura do reservatório de alta temperatura

T_a = Temperatura do reservatório de baixa temperatura

As temperaturas da fonte de calor e rejeição do calor estão diretamente conectadas à máxima eficiência térmica de um ciclo termodinâmico. É válido ressaltar que as condições de Carnot são teóricas e, portanto, temos diferenças para obtenção das reais condições da cogeração.

Outro ciclo utilizado para a descrição dos sistemas de cogeração é o ciclo de Rankine, pois ele é ideal para as unidades de vapor que são operadas de forma simples. O ciclo é baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente conforme demonstrado nas Figuras 3.2 e 3.3. Este ciclo inicia-se com o bombeamento de condensado para a caldeira (1-2), que realiza a transferência de energia térmica resultante da combustão, através de uma caldeira que o transforma em vapor e fica com uma temperatura superaquecida e pressão constante (2-3'). Esse vapor é expandido em uma turbina que pode acionar uma carga mecânica ou um gerador elétrico. Na saída da turbina temos um vapor que atende às condições do processo, como fonte de calor útil para o mesmo (3'-4'). O ciclo é completo quando o vapor fornece energia para o processo e retorna para a caldeira, através de uma bomba em forma de condensado (4'-1)^{12,39,40}.

Figura 3.2 - Ciclo de Rankine: Temperatura (T) x Entalpia (S)^{13, 24, 40}.

Figura 3.3 - Ciclo de Rankine: Fluxograma de operação¹².

Embora tenha a eficiência menor que o ciclo de Carnot, o ciclo de Rankine é ideal para a operação da cogeração de energia, pois existem equipamentos que são de uso comercial que podem ser aplicados no processo para esse ciclo. Esse fato é comprovado na operação da bomba apenas com condensado, e também quando o vapor superaquecido trabalha com pressão constante, ao invés de um ciclo bifásico nas bombas e temperatura constante no vapor superaquecido, que compõem os fundamentos de Carnot.

A equação 3.2 representa a primeira fórmula para cálculo efetivo para eficiência global da cogeração^{13, 24}:

$$FUE = \frac{W+Qu}{F} \quad (3.2)$$

Onde:

FUE = Fator de Utilização de Energia

W = Trabalho útil

Qu = Calor útil

F = Energia cedida pela fonte

No que diz respeito à configuração de geração de calor e potência, a cogeração de energia elétrica apresenta dois ciclos diferentes: *bottoming* e *topping*. Os ciclos de *bottoming* realizam a recuperação direta do calor residual, que é liberado para a atmosfera, para a produção de vapor e energia elétrica ou mecânica. Ou seja, a prioridade da energia fica com o processo, sendo que o calor que seria descartado é utilizado na turbina. No tipo *topping* os gases de combustão que estão na sua temperatura mais elevada são inicialmente usados para a produção de energia mecânica ou elétrica, sendo que o calor rejeitado fica disponível para a utilização no processo. Como o processo *topping* é mais eficiente que o *bottoming*, sua utilização em unidades de cogeração é mais usual^{27, 41}.

3.2 BIOMASSA

O conceito de biomassa definido do ponto de vista energético, segundo a Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), compreende todo o recurso renovável de matéria orgânica, que pode ser utilizada para a produção de energia. Esse conceito é muito semelhante ao utilizado pela ANEEL, apresentado na introdução desta dissertação.

A biomassa pode ser classificada como uma forma indireta de energia solar, pois, através da fotossíntese, essa energia é convertida em energia química e armazenada na forma de matéria orgânica, quando a mesma é de origem vegetal⁴².

Através dessas definições é possível afirmar que existe uma quantidade de aproximadamente dois trilhões de toneladas de biomassa no planeta Terra, o que significa uma quantidade de 400 toneladas per capita⁴³.

De acordo com Lora e Teixeira⁴⁴, podemos categorizar a biomassa em duas categorias: a biomassa tradicional, que é a encontrada na natureza de forma abundante como: carvão vegetal, lenha, resíduos vegetais e animais além de palha; e a biomassa moderna que é proveniente dos resíduos de utilização industrial como: bagaço de cana, madeira, culturas energéticas e resíduos urbanos.

A biomassa fornece cerca de 14% do consumo de energia primária de todo o mundo. Esse percentual não é exato, devido à dificuldade de contabilização dos quantitativos de biomassa, não obstante ao fato que parte do seu uso não é de natureza comercial, ou seja, não apresenta registros confiáveis. O aproveitamento dessa biomassa pode se dar de forma direta realizando a sua queima através de caldeiras, fornos, etc. Trata-se de um combustível abundante, proveniente de fontes renováveis e de baixo valor econômico, apesar de possuir uma baixa eficiência energética em relação a outros combustíveis⁴³.

As vantagens de se utilizar biomassa no Brasil são: aumento da empregabilidade decorrente da produção de energia renovável; geração de empregos na área rural; diminuição da chuva ácida, um dos efeitos colaterais da utilização de combustíveis derivados do petróleo; diminuição do efeito estufa decorrente da menor emissão de dióxido de carbono (CO₂) e também a melhora do regime hídrico e do ambiente atmosférico⁴⁵.

Existem diversas técnicas para a obtenção de energia através da biomassa, para cada uma delas há uma tecnologia própria, que dará origem a um determinado derivado para a conclusão do processo de transformação da biomassa. As principais técnicas são: gaseificação; pirólise ou carbonização; a combustão direta; digestão anaeróbica; fermentação e transesterificação¹⁶.

O Mapa representado na Figura 3.4 mostra a concentração de produção de etanol nos estados brasileiros, no qual podemos observar a grande concentração na região centro-sul e nordeste do Brasil.

Figura 3.4 – Faixa das usinas de cana-de-açúcar em operação no Brasil⁴⁶.

Pode-se considerar a biomassa como um agente que contribui para a diminuição do aquecimento global. Essa classificação sustenta-se no fato da biomassa ser uma fonte indireta de energia solar, necessária para se realizar a fotossíntese. Esse processo biológico é responsável por manter vivas as espécies vegetais e armazenar energia, que se converterá em outras formas, ou em outros produtos energéticos. Outro fator importante é que a fotossíntese capta o CO₂ da atmosfera e o transforma em O₂, processo vital para a manutenção do ecossistema em que vivemos¹⁶.

A *International Energy Agency* (IEA)⁴⁷ menciona que a utilização de biomassa como fonte de energia é uma opção renovável que possibilita a obtenção de créditos de carbono, ao evitar a utilização de combustíveis fósseis.

O protocolo de Kyoto, através do seu artigo 12 criou o MDL, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, para que os países sejam capazes de atingir o

desenvolvimento sustentável e contribuam para os objetivos globais da Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (CQNUMC). Os projetos para obtenção de energia através da biomassa podem obter os Certificados de Reduções de Emissões (RCE), ou mais conhecidos como créditos de Carbono⁴⁸.

Segundo Lora⁴⁹ os projetos de MDL nas usinas paulistas consistem na troca da tecnologia antiga utilizada em diversas usinas, por equipamentos mais modernos com uma eficiência maior, para a geração de energia elétrica a partir da biomassa, sendo nesse caso o bagaço de cana.

A produção de energia elétrica em grande escala está relacionada com a biomassa agrícola e a utilização de técnicas mais eficientes de geração de energia, podendo resultar em um desempenho econômico aprimorado. Essa biomassa é fruto dos subprodutos das principais matérias primas utilizadas, como por exemplo: sabugo, colmo, folha e palha do milho; bagaço, palha e vinhoto da cana-de-açúcar; e resíduos de campo e palha decorrentes da soja e do arroz. Sendo que todas elas geram energia elétrica através da combustão direta que produz o calor através de fogões, fornos e caldeiras que conseqüentemente geram o vapor¹⁶.

Segundo o *Survey of Energy Resources*⁵⁰, do World Energy Council, o Brasil possui um potencial muito grande a ser explorado no que diz respeito à produção de energia elétrica, etanol e biodiesel através da biomassa, vista a diferença da capacidade instalada e a atual geração no Brasil, conforme demonstrado na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Potencial energético do País em 2011⁵⁰.

	MW	TJ
Capacidade instalada de produção de Energia Elétrica	1.178.869	4.244
Geração de Energia Elétrica		25.913
Capacidade instalada de produção de Etanol		572.477
Produção de Etanol		358.025
Capacidade instalada de produção de Biodiesel		21.366
Produção de Biodiesel		78.710

Na próxima seção será detalhado o objeto de estudo dessa dissertação a biomassa proveniente da cana-de-açúcar.

3.3 BAGAÇO E PALHA DE CANA DE AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é a matéria prima para a produção de açúcar e álcool, que por sua vez gera o resíduo chamado bagaço. Ela pertence ao gênero *Saccharum*, sendo um híbrido multiespecífico de espécies do gênero e recebe a designação de *Saccharum officinarum*^{10, 51}.

Cerca de um terço da energia solar absorvida pela cana-de-açúcar é absorvida e fixada como açúcar e o restante dessa energia corresponde à fibra vegetal, que é composta de celulose, hemicelulose e lignina, constituindo o bagaço e a palha⁵².

A cana-de-açúcar possui um ciclo médio de 4 anos entre plantio e renovação da área plantada, sendo considerada uma cultura semiperene²⁸.

Sua composição básica é apresentada através da Tabela 3.2 e a sua representação energética, contendo produção, energia gerada e percentual de subprodutos, por área, na Tabela 3.3 subsequente.

Tabela 3.2 - Composição básica da cana-de-açúcar⁵¹.

Componente	Teor (% massa)
Sólidos totais	24 a 27
Sólidos solúveis	10 a 16
Fibras (base seca)	11 a 16
Água	73 a 76

Tabela 3.3 - Energia contida na cana-de-açúcar⁵¹.

	Cana de açúcar
Produção (t / ha.ano)	70
Fibras % cana	14,0
Palha % cana	14,0
POL % cana	14,5
Total de fibras (t / ha.ano)	19,3
Energia primária (GJ/ ha.ano)	520

Introduzida no Brasil no início do século XVI, a cana-de-açúcar é utilizada quase que integralmente para a geração de energia térmica, elétrica, açúcar e combustíveis líquidos⁵. Impulsionado por novas tecnologias, o setor canavieiro ganhou grande destaque nas últimas décadas, a partir de 2003 o Brasil transformou-se no maior laboratório de produção de biocombustíveis do mundo⁵³.

Os processos para a separação do caldo da cana e do bagaço são: “Moagem” ou “Difusão”. Na Moagem, a extração é feita por pressão mecânica dos rolos compressores da moenda sobre a cana-de-açúcar, disposta de uma maneira a formar um colchão. Entre as moendas, é realizada a adição de água para que seja possível a retirada de toda a sacarose da biomassa restante. Na Difusão há um processo de deslocamento da cana desintegrada por um fluxo de água na direção contrária a ela, com o intuito de que a sacarose adsorvida nas fibras da cana seja diluída e retirada por lavagem ou lixiviação⁵⁴.

Figura 3.5: Pilha de bagaço de usina de cana-de-açúcar⁵⁵.

Para cada tonelada de cana moída na produção de etanol são obtidos cerca de 730 kg de caldo de cana, sem considerar a água envolvida no processo, aproximadamente 250 kg de bagaço da cana e o restante do processo é considerado como palha e biogás^{1, 56}. A Figura 3.5 representa uma pilha de bagaço de cana.

O bagaço de cana-de-açúcar é um composto fibroso provenientes do talo da planta, cujos principais componentes químicos são: 50% celulose e 30% de pentoses⁵⁷. Essa composição pode variar em função de diversos fatores, dentre eles,

o tipo de solo, o tipo de cana e também o tipo de colheita. As propriedades físico-químicas e químicas do bagaço são descritas na Tabela 3.4²⁸.

Tabela 3.4 – Composição do bagaço²⁸.

Composição química média	
Carbono	39,7 - 49%
Oxigênio	40 - 46%
Hidrogênio	5,5 - 7,4%
Nitrogênio e Cinzas	0 - 0,3%
Propriedades físicas-químicas	
Umidade	50%
Fibra	46%
Brix	2%
Impurezas	2%

O bagaço de cana-de-açúcar possui características próprias para a produção comercial de xilose, glicose, outros açúcares, etanol de segunda geração bem como combustível de caldeira para a produção de vapor e energia elétrica⁵⁷.

Para a produção de energia elétrica, é necessário um estudo do potencial calorífico do bagaço. O Poder Calorífico é a quantidade de combustão que 1 kg do combustível utilizado produz, sendo que esse poder calorífico pode ser dividido em duas classificações o Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI)⁵³.

Segundo o Guia da ANEEL⁴, a média do PCI proveniente do bagaço da cana é de 7,53 MJ/kg, mas pode variar de acordo com as condições de umidade, como demonstrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Poder calorífico do bagaço e da palha⁵⁶.

Insumo	Teor de umidade (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Bagaço	50	7,53
Bagaço	15	13,70
Pontas e folhas	50	7,54
Pontas e folhas	20	12,56
Pontas e folhas	15	13,70

O PCI, que fornece uma ideia mais precisa do calor obtenível, deve ser adotado como referência através da seguinte formula:

$$PCI = PCS - 600 \cdot E_{pv} \quad (3.3)$$

Onde o E_{pv} = peso do valor de água presente nos gases provenientes da combustão de 1 kg do combustível selecionado⁵³.

Como referência de mercado, o PCS utilizado para o bagaço é de 4600 kcal/kg, pois há um baixo nível de variação dos diversos bagaços de canas provenientes de todas as espécies da cana-de-açúcar utilizadas no Brasil⁵³.

Outras características importantes da utilização do bagaço como combustível nas usinas são: energia útil contida no vapor gerado de 4,79 MJ/kg; produção de vapor de 1,9 kg de vapor/ kg de bagaço; PCI no bagaço úmido de 7,53 MJ/kg; PCI após a secagem de 13,70 MJ/kg^{53, 56}.

Em 1987 a usina São Francisco, localizada em Sertãozinho-SP, deu início à produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana, sendo a pioneira em utilizar esse tipo de tecnologia⁵⁸. Porém até o início dos anos 2000, o bagaço era considerado para a maioria das usinas como resíduo e não como uma importante fonte de energia, pois quase não havia geração de excedente de energia para comercialização externa proveniente da baixa eficiência das caldeiras utilizadas⁵¹.

Com a intensificação da implantação do conceito de sustentabilidade, crises do setor energético brasileiro, melhoria nas tecnologias dos equipamentos e materiais de tubulação, necessidade de geração descentralizada, melhoria dos processos das

usinas e possibilidade de retorno financeiro para as usinas, o bagaço de cana-de-açúcar começou a ser tratado de uma maneira diferente e utilizado como matéria prima para a criação de energia elétrica para venda no mercado de energia do Brasil, sendo que a cogeração representa mais de 15% no faturamento médio das usinas atualmente⁵⁸.

De uma tonelada de bagaço é possível gerar mais de 300kWh de energia elétrica, a produção da mesma quantidade de palha pode chegar a 500 kWh. Através desses dados, pode-se afirmar que um hectare de cana pode abastecer oito residências durante um ano, considerando o consumo médio das residências de 154kWh⁴⁵.

A demanda de bagaço de cana tem crescido em torno de 3,3% anualmente e, segundo o PDE2023, se comportará de acordo com a Tabela 3.6:

Tabela 3.6 - Projeção da demanda de bagaço².

Ano	Setor Industrial	Setor Energético	Total
	mil toneladas		
2014	81.271	55.614	136.885
2018	87.261	75.101	162.362
2023	95.094	94.910	190.004
Período	Variação no período (mil ton)		
2013-2023	15.396	36.096	51.492

O bagaço é uma energia renovável com uma participação superior a 74% na matriz energética brasileira em relação a outras biomassas, e com um custo de produção favorável em relação a outras fontes de energia. Em 2008, existia uma projeção que é possível agregar 4000 MW de energia na malha de energia nacional com as instalações atuais das usinas, sendo que a quantidade pode ser aumentada para mais 9000 MW caso as produções sejam modernizadas, sendo que esse potencial permanece latente e como uma promessa de que possa transformar-se em uma alternativa para a matriz energética do Brasil⁵⁹.

Outro órgão que comprova a falta de eficiência na produção de energia elétrica através de bagaço de cana, com números mais atuais que os mostrados por Siloni⁵⁹, é a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). A instituição desenvolveu um

estudo da safra 2009/2010, que mostra a quantidade de energia elétrica que poderia ter sido gerada através do bagaço disponível naquele período. Esse estudo mostrou que, se as usinas menos eficientes utilizassem os níveis de produção das usinas líderes de rendimento, dentro da classificação proposta pelos mesmos, seria possível um aumento de produção na ordem de 238%, conforme informado na Tabela 1.1.

Os números relativos ao ano de 2014, indicam que a produção de energia elétrica proveniente do bagaço de cana foi de 20,8 GWh, representando 4% do consumo total do País naquele ano²⁹.

O período de safra e plantio de cana-de-açúcar varia de ano para ano, porém é concentrado nos meses de abril a novembro, entretanto devido ao acúmulo do bagaço de safras anteriores é possível manter a malha de cogeração de energia funcionando nos demais meses do ano. É importante ressaltar que o período da safra é o mesmo em que os reservatórios hídricos permanecem com seus níveis mais baixos^{29, 60}.

O bagaço produzido durante a safra e não utilizado na cogeração de energia é armazenado na pilha de bagaço. Essa pilha ocupa uma grande área da usina com aproximadamente de 300 m de extensão, 100 m de largura e 40 m de altura para aproximadamente 100.000 toneladas de bagaço estocadas⁶¹. Quando armazenado a pilha de bagaço pode se incendiar devido ao açúcar residual aliado a umidade e ação microbiana, que estimulam uma fermentação exotérmica⁵⁶, causando transtornos para a operação da usina.

Para evitar que isso ocorra, é utilizada a técnica de enfardamento que é quando é formada uma grande pilha de bagaço. As empilhadeiras de operação acomodam o bagaço de maneira que forme uma pilha cúbica ou piramidal, onde o bagaço externo fica mais seco, se deteriora e protege o bagaço interno desta pilha. Esse processo de enfardamento e empilhamento causa perda estimada de 15% de combustível da caldeira⁵⁶.

3.4 DEFINIÇÃO DE COGERAÇÃO

Existem diversas formas de conceituar cogeração. Uma das melhores formas que se aplica para a área sucroalcooleira, e conseqüentemente para esse trabalho é elaborada pela Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN).

“Cogeração de energia é um processo simultâneo e sequenciado no qual é realizada a transformação de energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia⁶.”

Também é possível conceituar cogeração através da língua inglesa, *Combined Heat and Power* (CHP), sendo possível classificá-la como uma alternativa de engenharia, aplicável para algumas indústrias, que possibilita a produção de energia na própria planta⁴⁵.

Outro conceito que merece a citação é o de Moran e Shapiro⁶² no qual definem cogeração de energia como um método que produz sequencialmente potência (energia mecânica e/ou elétrica) e transferência de calor (forma térmica), cujo o principal uso é a produção de vapor.

Para completar, a ANEEL assim define:

Cogeração: processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária [...]⁴.

3.4.1 Histórico da cogeração

Existem algumas ilustrações datadas do século XVI que mostram que o conceito básico de cogeração é muito antigo. Essas ilustrações mostram aplicações de elevadores mecânicos que eram movidos através de gases quentes provenientes de combustão⁹.

O conceito de cogeração descrito neste trabalho pode ser verificado desde o início do século XX, como descrevem Gomazako e Oliveira⁶³, uma vez que havia necessidade de se obter uma independência energética para as usinas de açúcar e álcool devido às crises sistêmicas que passaram a ocorrer no sistema energético brasileiro.

No Brasil, a tecnologia de cogeração iniciou-se com o plano governamental da década de 40, sendo que esse método chegou a ser muito utilizado por diversas indústrias, que adaptaram modelos tecnológicos de baixa eficiência, com preferência no emprego de energia proveniente de combustíveis fósseis como o petróleo, carvão e gás natural⁶⁴. Devido a esse conceito, as caldeiras foram desvalorizadas, comparadas a incineradores com ineficiência tecnológica⁴.

Entretanto, a partir da década de 80, a cogeração passou a ser reconhecida como uma fonte de energia alternativa devido ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis⁴⁴. Nos anos 90, verificou-se um decréscimo percentual da contribuição das hidroelétricas na matriz energética brasileira em função da dificuldade para a obtenção das licenças ambientais. Para suprir o aumento do consumo de energia, implantou-se o sistema de geração termelétrica, e algumas plantas de cogeração de energia¹³. Esse movimento ocorreu principalmente após o ano de 1993, com o decreto 915, que autorizou a formação de consórcios para geração de energia elétrica⁵⁸. Esses não foram os únicos fatores que contribuíram para a popularização da cogeração de energia, é necessário ressaltar: o desenvolvimento tecnológico das turbinas e motores; a maior disponibilidade de gás natural em diversos países; a necessidade de conversão energética de forma sustentável; e a perda de interesse pela construção de usinas nucleares; todos estes aspectos devem ser levados em consideração⁴⁵.

Nos últimos anos, a cogeração de energia vem sendo implantada na maior parte dos grupos industriais como: petroquímicas, produtores de cimento, siderúrgicas, mineradoras, usinas de açúcar e álcool, papelerias e de fertilizantes. E também nos grupos do setor terciário como shopping centers, hotéis, hospitais e edifícios comerciais⁵³.

A IEA⁴⁷ desenvolveu um relatório no ano de 2008 (ainda sem revisões) mostrando o percentual da cogeração no total de produção de energia de cada país. Esse estudo faz parte do trabalho de alterações climáticas e energia limpa com foco específico em cogeração de energia. Nesse relatório é possível verificar a projeção

do potencial da participação de energias limpas nos anos de 2015 e 2030 para todos os países listados.

Figura 3.6 - Percentual e potencial futuro da cogeração no total de produção de energia de cada país⁴⁷.

Com base na Figura 3.6 é possível verificar que todos os países têm a tendência em adotar maior utilização de plantas de cogeração de energia nas suas matrizes energéticas. Porém verifica-se que o Brasil possui uma baixa contribuição de cogeração, visto que a geração no País ainda é predominantemente a partir das usinas hidroelétricas, e a projeção é que este cenário continue, entretanto com um percentual menor²⁶.

No ano de 2015 o congresso brasileiro aprovou a medida provisória MP688/2015 que permite a manutenção do desconto na tarifa de uso do sistema de distribuição para agentes que que injetem acima de 30 MW. Isso incentivará novas outorgas de cogeração de energia à base de biomassa, principalmente as provenientes das usinas de açúcar e álcool, que operaram nessa faixa. Outra medida de incentivo às cogerações de energia de usinas é a criação do produto térmico nos leilões de energia que separam a energia da biomassa da fonte eólica, aumentando a competitividade²⁹.

3.4.2 Equipamentos da cogeração de usinas de álcool

Conforme ilustrado na Figura 1.4, os principais equipamentos da cogeração de energia são: o Desaerador, Caldeira, Turbina e Gerador de energia elétrica. Estes equipamentos estão tipicamente alocados conforme esquema representado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Fluxograma típico da cogeração de energia⁶⁵.

A bomba de alimentação da caldeira, é o equipamento que matem a pressão no sistema e responsável por bombear o fluído para a caldeira. Os demais equipamentos serão descritos nas próximas subseções.

3.4.2.1 Desaerador

O desaerador, Figura 3.8, é um vaso de pressão cuja função primária é remover gases não condensáveis (oxigênio e dióxido de carbono livre) da água de *make-up* utilizada para alimentar as caldeiras e o retorno de condensado. A remoção desses gases serve para proteger tubulações, bombas, caldeiras e as linhas de retorno de condensado. Esses equipamentos estão disponíveis em tamanhos de 4.000 a 180.000 Kg/h de capacidade, de acordo com as necessidades da instalação⁶⁶.

Figura 3.8 - Desaerador¹⁷.

O princípio de funcionamento é baseado em dois fluxos de produtos: água e vapor. No fluxo de água, que entra fria no pré-des aerador ou domo, válvulas tipo spray direcionam o fluxo de água formando um "chuveiro", através da ventilação da água em seu interior, na seção de pré-aquecimento. Nessa etapa a maior parte dos gases corrosivos já foi removida antes que a água atinja a superfície de aço da bacia receptora. Esta água quente, e parcialmente desaerada, passa da seção de

aquecimento para a seção de vapor ou *scrubber*, onde a desaeração é concluída através do vapor livre de oxigênio que entra em contato com a água⁶⁶.

O fluxo de vapor, é introduzido uniformemente através de uma válvula de controle dentro do desaerador. Ao entrar no desaerador o vapor colide em alta velocidade com a água que, já aquecida, entra na seção proveniente do pré-aquecimento. Nessa etapa o vapor mistura-se com a água, e através dessa ação são removidos, mecanicamente, os traços remanescentes de gases não condensáveis da água pré-aquecida. Após esse processo, o vapor separa a água desaerada da seção de limpeza, e passa para dentro da seção de pré-aquecimento, continuando o seu ciclo. Por fim, o vapor é condensado no condensador de contato direto interno, e é expurgado, carregando para a atmosfera os gases não condensáveis. O condensador interno é uma seção dentro do compartimento das válvulas spray, onde os gases não condensáveis são separados e concentrados antes de serem descartados para a atmosfera⁶⁶. A Figura 3.9 retrata os fluxos citados.

Figura 3.9 - Fluxos de água e vapor do desaerador⁶⁶.

3.4.2.2 Caldeiras

As caldeiras são equipamentos desenvolvidos para realizar a produção de vapor através da alimentação da água desmineralizada e condensado, com baixa presença de oxigênio e da queima de combustíveis³⁹.

Os dois tipos clássicos de caldeira são as “Flamotubulares”, onde os gases quentes circulam em tubos e o fluido a aquecer circula externamente aos tubos; e as “Aquatubulares”, que funcionam de forma reversa às flamotubulares, onde os gases quentes circulam por fora dos tubos e o fluido por dentro.

As caldeiras flamotubulares são utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor (até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar). O modelo horizontal desse tipo de caldeira é constituído de um vazo de pressão cilíndrico, contendo dois tampos, que são fixados à fornalha e os tubos, uma fornalha, dois passes para gases, além de uma câmara de reversão⁶⁷.

Os modelos aquatubulares, Figura 3.10, são os modelos para grandes capacidades chegando à produção de vapor de até 700 ton/h, e altas pressões (com mais de 200 bar)⁶⁸. Esse tipo de caldeira possui dois tipos de leito, o fixo e o fluidizado. Neste modelo, a produção de vapor é realizada dentro de tubos que interligam dois reservatórios cilíndricos conhecidos como tubulões superior e inferior. No tubulão superior, ocorre a separação da fase líquida do vapor. Já no inferior ocorre a decantação e posterior purga dos sólidos em suspensão encontrados. São utilizados tubos curvados, para interligar os balões da caldeira, possibilitando que o projeto seja fechado⁶⁷.

A caldeira possui rendimento médio de 85% na conversão do potencial energético fornecido pelo combustível de operação⁶⁸.

Figura 3.10 – Caldeira aquatubular utilizada em usinas de açúcar e álcool⁶⁹.

Os principais componentes básicos encontrados em todos os tipos de caldeiras são descritos nos itens abaixo e demonstrados na Figura 3.11:

- a) O cinzeiro é o local onde se depositam as cinzas ou restos de combustível não incinerado;
- b) A fornalha é a região onde o calor é gerado, ela pode ser encontrada com grelha ou queimadores de óleo ou gás;
- c) A seção de irradiação são as paredes/laterais da câmara de combustão com o revestimento interno de tubos de água;
- d) A seção de convecção é o feixe de tubos de água, que recebe o calor por convecção forçada; podendo possuir uma ou mais passagens de gases;
- e) O superaquecedor é o trocador de calor que aquece o vapor saturado para transformá-lo em vapor superaquecido;
- f) O economizador é o trocador de calor que aproveita o calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira, aquece a água de alimentação gerando um ganho de eficiência;
- g) O pré aquecedor de ar é o trocador de calor que aquece o ar de combustão, esse trocador realiza troca de energia com os gases de exaustão da caldeira;

h) O exaustor faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia suficiente para sobrepor as perdas de carga ocorridas, devido à circulação dos gases internos;

i) A chaminé é o local que lança os gases de combustão ao meio ambiente, a uma altura que permite a dispersão dos mesmos⁶⁷;

Figura 3.11 - Principais componentes da caldeira⁶⁷.

O parâmetro *Maximum Continuous Rating* (MCR) é um parâmetro amplamente utilizado pelos fabricantes para indicar a capacidade que a caldeira possui capacidade de produzir e fornecer vapor de forma contínua, mesmo sob qualquer tipo de perda ou efeitos indesejados (por exemplo sobrecarga, escorrimento ou sobreaquecimento). A faixa de operação de uma caldeira é em torno de 70% a 110% da sua capacidade nominal de produção. As operações abaixo de 70% não atingirão os parâmetros desejados do vapor (pressão e temperatura) e a operação acima de 110% geram riscos de sobrecarga do equipamento⁶⁸.

3.4.2.3 Turbinas a vapor e condensador

São máquinas rotativas que convertem a energia térmica do vapor (entalpia) em energia mecânica de eixo para acionamentos, conforme Figura 3.12. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, para um ciclo térmico, somente parte da energia contida no vapor inserido na máquina pode ser convertido em trabalho, o restante da energia continua no vapor ou condensado que é encontrado na saída da turbina. Inicialmente a energia do vapor é transformada em energia cinética, pois o vapor escoar através de pequenos orifícios, denominados expansores, aumentando a sua velocidade, e conseqüentemente diminuindo a sua entalpia, pressão e temperatura. Na segunda parte do processo, a energia cinética é transformada em trabalho mecânico através do princípio da ação e reação, no qual a força do vapor irá mover o expansor⁴³.

Figura 3.12 – Conjunto da turbina⁷⁰.

Os principais componentes e conjuntos da turbina são:

a) Rotor, é fabricado em peça única, forjada em aço de cromo e molibdênio, que opera em altas rotações, proporcionando maior resistência e confiabilidade mecânica a turbina. As palhetas possuem geometrias e fixações controladas para

garantir o desempenho e amortecimento de vibrações. As palhetas são fresadas a partir de aço inox e para um perfil com aerodinâmica definida.

b) As carcaças são fundidas em aço-liga, suportam alta pressão e altas temperaturas, com uma parede que restringe a incidência de alta pressão e temperatura a uma área pequena da máquina, resultando em elasticidade termomecânica e aumentando a vida útil da máquina, têm construção modular, que permite execução com extração controlada;

c) As Válvulas de Regulagem são acionamentos independentes, integradas à carcaça superior, com divisões internas, para garantir melhor distribuição do vapor e controle das cargas parciais, além de permitir ajustes, atuando como proteção adicional contra sobre velocidade⁷⁰.

3.4.2.4 Classificação das turbinas a vapor

Existem alguns critérios nos quais as turbinas podem ser classificadas:

a) Direção do movimento do vapor em relação ao rotor:

- Turbinas a vapor axiais: são as turbinas que o vapor se move dentro do rotor em direção paralela ao eixo, esse modelo é o mais usual;

- Turbinas a vapor radiais: são aquelas nas quais o vapor se desloca em sentido perpendicular ao eixo;

- Turbinas a vapor tangenciais: são as máquinas em que o vapor se desloca tangencialmente ao rotor;

b) Forma de o vapor atuar no rotor:

- Turbinas a vapor de reação: quando o vapor se expande em toda a máquina e também no rotor, ou seja, a pressão de vapor na entrada do rotor é maior que na saída;

- Turbinas a vapor de ação: São aquelas nas quais a pressão é a mesma dos dois lados do rotor, pois o vapor se expande somente nos elementos fixos e não nos elementos móveis;

- Turbinas a vapor mistas: quando a turbina possui um trecho sendo de ação e outro trecho de reação;

c) Condição do vapor de saída ou escape:

- Turbinas a vapor de escape livre: o vapor sai diretamente para a atmosfera, ou seja, a pressão de escape é igual à pressão atmosférica;

- Turbinas a vapor de condensador: na saída da máquina existe um condensador no qual o vapor se condensa, a pressão de escape do vapor é inferior a pressão atmosférica;

- Turbinas a vapor de contrapressão: turbina que possui a pressão de escape do vapor superior a pressão atmosférica, o vapor de escape é conduzido ao processo para uso posterior;

- Turbinas a vapor combinadas: nas quais uma parte do vapor é retirada da turbina antes de sua utilização total na máquina, esse vapor é direcionado ao processo, o restante do vapor mantém o fluxo e tem a sua saída na atmosfera ou no condensador;

d) Turbinas a vapor de vapor de escape: é a turbina que utiliza a energia contida no vapor de escape de uma de outra máquina térmica⁴³.

3.4.2.5 Geradores elétricos

O nome gerador elétrico sugere um conceito equivocado, pois a energia não é gerada e sim transformada. Os dois tipos mais básicos de geradores elétricos: o que transforma energia proveniente da queima de combustíveis em energia elétrica, e o tipo pilha que transforma a energia química em elétrica.

Os geradores, Figura 3.13, relativos às usinas de açúcar e álcool são acoplados a turbina transformando a energia da rotação das palhetas em energia elétrica, sendo que as suas principais características são: potência até 150.000 kVA, tensão de saída até 13.800 V, rotação de 3600 a 1800 rpm e grau de proteção da carcaça de IP23 a IP65W⁷¹.

Figura 3.13 – Gerador elétrico⁷¹.

3.5 INSTRUMENTOS DE ANÁLISE DO BAGAÇO

O presente trabalho apresentará instrumentos que servem de base para que a malha seja melhor observada, e, conseqüentemente, que as medições possam ser utilizadas como novos parâmetros de entrada para o modelo descrito no capítulo 4. O intuito da instalação dessa instrumentação no processo, é que sejam medidas a vazão e a umidade presentes no bagaço, em conjunto as demais variáveis da planta. Com os valores dessas variáveis será possível obter o valor relativo à entrada de calor no sistema para que seja possível queimar apenas o bagaço necessário para as condições do processo, ou aumentar a quantidade de vapor superaquecido gerado pela caldeira.

Esses instrumentos devem ser instalados na esteira de entrada de bagaço que alimenta a caldeira, de acordo com as proposições de cada fornecedor, além de serem interligados ao controlador da planta, conforme Figura 3.14. Os instrumentos indicarão qualquer alteração na quantidade e qualidade de bagaço que entra na caldeira, fatores que afetam diretamente a produção de vapor e, conseqüentemente, a vazão de bagaço a ser utilizado pelo processo.

Figura 3.14 – Representação de posição de instalação dos instrumentos.

3.5.1 Medição de umidade

O instrumento proposto para medir a umidade, aplica um campo eletromagnético ao bagaço e analisa as perturbações provocadas, correlacionando-as ao teor de umidade do produto. Esta tecnologia aplica um campo com frequência de 5Hz no produto para realizar a leitura, e torna-se possível medir, não somente, a umidade superficial do material, mas também a umidade interna do produto, seguindo a norma NBR14929 ⁷².

Figura 3.15 – Elemento sensor de umidade⁷².

Figura 3.16 – Transmissor de umidade⁷².

O sensor, Figura 3.15, é instalado diretamente no processo, em contato com o bagaço, para verificar as oscilações de umidade. Este é conectado a um transmissor, Figura 3.16, que recebe as informações, as processa, e as envia para o sistema supervisor da planta através de um sinal analógico de 4-20 mA⁷².

3.5.2 Medição de vazão

Já o medidor de vazão, Figura 3.17, através de um scanner que varre continuamente o conteúdo da esteira o perfil do material transportado é registrado e enviado ao transmissor do instrumento que envia a informação da vazão para o sistema supervisor⁷³.

Figura 3.17 – Transmissor de vazão⁷³.

Esse instrumento é instalado sobre a correia transportadora que envia o bagaço para a caldeira⁷³.

Existem dois métodos indiretos de medição de vazão do bagaço, sendo um através da variação da corrente elétrica da esteira e o outro através de uma balança na esteira. Para a medição proveniente da variação de corrente elétrica, é necessário ter o conhecimento das dimensões e capacidades do motor, da correia e do processo, para fazer uma correlação entre as variáveis. Com a vazão média determinada, se associa essa vazão à corrente elétrica do motor e se mede proporcionalmente o valor. Esse método não garante que o valor medido é correto, porém serve de referência para os cálculos.

O outro método é relacionado ao peso do bagaço. Através de seu peso médio e sua densidade, é possível determinar a vazão de bagaço que está sendo fornecida para a caldeira. Neste método, não é possível considerar o efeito da variação da densidade do bagaço, de acordo com a sua umidade, sem a utilização do medidor de umidade de bagaço.

Ambos os instrumentos possuem condições específicas de instalação para o seu correto funcionamento, de acordo com cada fornecedor. Essas condições não serão tratadas nesta dissertação.

4 MODELAGEM DO SISTEMA

A representação dos elementos da cogeração de energia através de modelos matemáticos possibilita a simulação do comportamento do processo de forma dinâmica, além de poder verificar a estabilidade e projetar o melhor sistema de controle para tal aplicação¹⁶. O principal elemento a ser modelado dentro da cogeração é a caldeira. O modelo de uma caldeira, contendo a vazão descrita em duas fases, líquida e gasosa, é complexo e requer a utilização de equações diferenciais parciais⁷⁴. Para atender a tal complexidade, na presente dissertação optou-se pela utilização do modelo de Astrom e Bell¹⁵, que é um modelo amplamente utilizado para a realização de trabalhos que demonstram a simulação de centrais de cogeração de energia, obtendo sucesso nos seus experimentos.

4.1 MODELAGEM DA CALDEIRA

O tipo de caldeira a ser utilizada no modelo é a aquatubular, contendo tubulão de vapor e circulação natural entre os demais elementos da mesma. O desempenho geral da cogeração é dependente do desempenho da caldeira, visto que existem efeitos dinâmicos de contrações não lineares do comportamento da água e do vapor no sistema, sendo a pressão de vapor e o nível do tubulão as variáveis que possuem maior relevância no controle a ser aplicado na caldeira¹⁶.

A Figura 4.1 mostra o esquema básico de uma caldeira para a geração de vapor da cogeração de energia elétrica. Esse sistema apresenta a dinâmica do vapor dentro do tubulão da caldeira.

Figura 4.1 – Representação esquemática da caldeira.

A água, que é pré aquecida no desaerador, entra no tubulão (*drum*) a uma vazão (q_f). O calor fornecido pela queima do bagaço (Q) faz com que a água se transforme em vapor e saia da caldeira em direção a turbina com uma vazão (q_s). A água não evaporada desce por tubos a uma vazão (q_{dc}) em direção ao local com maior fonte de calor da caldeira, o que permite o seu aquecimento e a subida da mesma, se transformando em vapor, a uma vazão (q_r), sendo que esses tubos são conhecidos como *downcomer*, os de descida, e os de subida como *riser*. As demais variáveis representativas mostradas na figura são o nível do tubulão (l), que é medido a partir da parte inferior do tubulão até a superfície da água, a pressão (p) que é constante dentro do vaso, e segue as recomendações do fabricante do equipamento, e a temperatura dos elementos do sistema, como a temperatura do metal (T_m), que transcreve a temperatura das paredes da caldeira. Com relação ao nível (l), existe uma dificuldade na sua medição, devido as bolhas decorrentes da mudança de estado da água.

Conforme representação da Figura 4.1, podemos demonstrar o balanço relativo ao sistema mássico da caldeira¹⁵:

$$\frac{d}{dt}[\rho_s V_{st} + \rho_w V_{wt}] = q_f - q_s \quad (4.1)$$

O balanço energético:

$$\frac{d}{dt}[\rho_s h_s V_{st} + \rho_w h_w V_{wt} - p V_t + m_t C_p T_m] = Q + q_f h_f - q_s h_s \quad (4.2)$$

E ao volume total do tubulão (V_t) sendo o mesmo representado através do volume de vapor (V_{st}) e o volume de água (V_{wt}):

$$V_t = V_{st} + V_{wt} \quad (4.3)$$

Os parâmetros do sistema estão representados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Parâmetros do sistema.

Variável	Descrição	Unidade
C_p	calor específico do metal	J/(Kg°C)
h_f	entalpia específica da água de alimentação	J/Kg
h_s	entalpia específica do vapor	J/Kg
h_w	entalpia específica da água	J/Kg
m_t	massa total do sistema	Kg
P	pressão dentro do tubulão	Pa
Q	quantidade de calor da fornalha	W
q_f	vazão de água na entrada da caldeira	Kg/s
q_s	vazão de vapor na saída da caldeira	Kg/s
T_m	temperatura do metal	°C
V_{st}	volume total de vapor do sistema	m ³
V_t	volume total do sistema	m ³
V_{wt}	volume total de água do sistema	m ³
ρ_s	densidade específica do vapor	Kg/m ³
ρ_w	densidade específica da água	Kg/m ³

4.1.1 Modelagem da mistura vapor e água nos tubos

Para essa modelagem é necessário considerar um tubo vertical por onde a água começa a evaporar, ao receber um fluxo de calor, e termina o percurso no tubulão de vapor. Sabe-se que em regime permanente, não há variação de massa ou volume em relação ao tempo, com isso temos as seguintes variáveis descritas na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Variáveis da mistura vapor e água dos tubos.

Variável	Descrição	Unidade
A_{dc}	área do tubo de descida	m^2
A_t	área da seção transversal do tubo	m^2
g	gravidade	m/s^2
h_c	entalpia da condensação	J/Kg
h_m	entalpia específica da mistura água vapor	J/Kg
k	coeficiente de atrito	-
m_r	massa total de metal do tubo de subida	Kg
q_m	vazão mássica da mistura água vapor	Kg/s
q_r	vazão mássica do tubo de subida	Kg/s
q_{dc}	vazão mássica do tubo de descida	Kg/s
T_s	temperatura do vapor	$^{\circ}C$
V_r	Volume total do tubo de subida	m^3
V_t	volume do tubo	m^3
z	comprimento do tubo	m
α_m	fração mássica de vapor	-
α_r	qualidade do vapor	-
α_v	fração volumétrica de vapor	-
ξ	comprimento normalizado do tubo	-
ρ_m	massa específica da mistura água vapor	Kg/m^3

E as equações são¹⁵:

$$\alpha_m = \frac{Q A_t}{q_m h_c V_t} z, \quad (4.4)$$

$$h_c = h_s - h_w, \quad (4.5)$$

$$\alpha_m(\xi) = \alpha_r \xi \quad 0 \leq \xi \leq 1. \quad (4.6)$$

A fração volumétrica (α_v), e a fração mássica (α_m) de vapor são matematicamente relacionadas na seguinte equação:

$$\alpha_v = f(\alpha_m) = \frac{\rho_w \alpha_m}{\rho_s + (\rho_w - \rho_s) \alpha_m}. \quad (4.7)$$

Para realizar a modelagem do nível de água do tubulão é necessário saber a fração volumétrica média de vapor (α_v), contida nos *risers* através da equação:

$$\bar{\alpha}_v = \int_0^1 \alpha_v(\xi) d\xi = \frac{1}{\alpha_r} \int_0^{\alpha_r} f(\xi) d\xi = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_s} \left(1 - \frac{\rho_s}{(\rho_w - \rho_s) \alpha_r} \ln \left(1 + \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} \alpha_r \right) \right). \quad (4.8)$$

É necessário assumir, a título de simplificação, que a distribuição da fração mássica ao longo dos *risers* seja linear, considerando que a Equação 4.8 também seja válida para as condições dinâmicas. Com isso, o balanço de massa do tubo de subida deve ser:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r) = q_{dc} - q_r. \quad (4.9)$$

Onde (q_r) a vazão mássica relativa a saída dos tubos de subida, (q_{dc}) a vazão dos tubos de descida e (V_r) o volume total do tubo de subida. O balanço de energia é dado por:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w (1 - \bar{\alpha}_v) V_r - p V_r + m_r C_p T_s) = Q + q_{dc} h_w - q_r (\alpha_r h_c + h_w). \quad (4.10)$$

Sendo possível considerar que (T_s) é igual a (T_m) devido a ambos estarem em contato um com o outro.

4.1.2 Vazão de circulação

Considerando que a caldeira possui uma circulação natural, devido as diferenças de densidade nos tubos de subida e descida, a Tabela 4.3 mostras as variáveis descritas nessa seção

Tabela 4.3 – Variáveis do balanço cinético.

Variável	Descrição	Unidade
L_r	comprimento do tubo de subida	m
L_{dc}	comprimento do tubo de descida	m
τ	constante de tempo	s

E o balanço cinético do sistema é:

$$(L_r + L_{dc}) \frac{dq_{dc}}{dt} = (\rho_w - \rho_s) \bar{\alpha}_v V_r g - \frac{k}{2} \frac{q_{dc}^2}{\rho_w A_{dc}} \quad (4.11)$$

Sendo (L_r) e (L_{dc}) os comprimentos dos tubos, (A_{dc}) a área e (k) um coeficiente de atrito adimensional. A constante de tempo (τ) :

$$\tau = \frac{(L_r + L_{dc}) \rho_w A_{dc}}{k q_{dc}} \quad (4.12)$$

Realizando uma comparação dos valores obtidos na expressão 4.12, quando aplicados valores reais de plantas, temos um valor muito pequeno com a constante de tempo de uma caldeira, relação mais de dez vezes maior com relação a simulação, com isso podemos considerar uma condição de regime permanente $(\frac{dq_{dc}}{dt}=0)$:

$$q_{dc} = \sqrt{\frac{2\rho_w A_{dc}(\rho_w - \rho_s)g \bar{\alpha}_v V_r}{k}} \quad (4.13)$$

E através da Equação 4.9, podemos considerar que a vazão mássica de saída dos tubos pode ser calculada:

$$q_r = q_{dc} - V_r \left(\bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \left(1 - \bar{\alpha}_v \right) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_w - \rho_s) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right) \frac{dp}{dt} + (\rho_w - \rho_s) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial a_r} \frac{da_r}{dt} \quad (4.14)$$

4.1.3 Modelagem de vapor e água no tubulão

A circulação de água e vapor no tubulão é complexa, existem várias fontes e formas para realizar a entrada e saída desses elementos. A Figura 4.2 auxilia a representar essa situação e a Tabela 4.4 descreve as suas variáveis.

Figura 4.2 - Representação do tubulão de vapor¹⁶.

Tabela 4.4 – Variáveis da modelagem do vapor no tubulão.

Variável	Descrição	Unidade
l	nível do tubulão	m
l_s	nível de vapor no tubulão	m
l_w	nível de água no tubulão	m
m_d	massa do tubulão	Kg
q_{cd}	vazão de condensação do vapor	Kg/s
q_{sd}	vazão de vapor que evapora da superfície líquida	Kg/s
T_d	tempo de residência do vapor na caldeira	s
V_{dc}	volume total dos downcomers	m ³
V_{sd}	volume de vapor abaixo do nível	m ³
V_{wd}	volume de água abaixo do nível	m ³
β	parâmetro empírico	-

Os mecanismos básicos desse processo são a separação da água e do vapor, além da condensação do vapor¹⁶. O nível do tubulão (l) contém uma mistura de água e vapor, e o balanço de massa que descreve esse sistema é:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_{sd}) = \alpha_r q_r - q_{sd} - q_{cd}, \quad (4.15)$$

$$q_{cd} = \frac{h_w - h_f}{h_c} q_f + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{dh_s}{dt} + \rho_w V_{wd} \frac{dh_w}{dt} - (V_{sd} + V_{wd}) \frac{dp}{dt} + m_d C_p \frac{dT_s}{dt} \right), \quad (4.16)$$

$$q_{sd} = \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \alpha_r \beta (q_{dc} - q_r). \quad (4.17)$$

Sendo que o volume de água (V_{wd}) e o volume de vapor (V_{sd}) são considerados abaixo do nível de fluido do tubulão, (A_d) é a área de superfície do líquido, (q_{sd}) a vazão de vapor que evapora da superfície líquida, (q_{dc}) a vazão de condensação do vapor, (T_d) o tempo de residência do vapor na caldeira, (m_d) a massa do tubulão e (V_{sd}^0) o volume de vapor no tubulão, quando hipoteticamente não houver condensação no local, além de (β) ser um parâmetro empírico.

No tubulão, podemos calcular o seu volume de água a partir do seguinte equacionamento:

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - \left(1 - \bar{\alpha}_v\right) V_r. \quad (4.18)$$

Considerando (V_{dc}) o volume total dos *downcomers*, o comportamento linear do tubulão pode ser descrito quando o mesmo encontra-se no nível normal de operação:

$$l = \frac{V_{wd} + V_{sd}}{A_d} = l_w + l_s. \quad (4.19)$$

Sendo (l_w) o nível de água, e (l_s) o nível de vapor misturado a água líquida do tubulão.

4.2 MODELO NÃO LINEAR

O modelo descrito por Astrom e Bell é de quarta ordem e não linear. Na descrição desse modelo temos as seguintes variáveis de estado: pressão do tubulão (p), volume total de água (V_{wt}), a qualidade do vapor (título) no riser de saída (α_r) e o volume de vapor abaixo do nível de água (V_{sd}). A entrada contém as seguintes informações: a vazão de água de alimentação (q_f) e o calor fornecido pela fornalha (Q). Sendo possível sumariá-lo, utilizando as equações descritas nas seções 4.1 a 4.3:

$$x(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]' = [V_{wt} \ p \ \alpha_r \ V_{sd}]' \quad (4.20)$$

$$u(t) = [u_1 \ u_2]' = [q_f \ Q]' \quad (4.21)$$

$$e_{11} \frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12} \frac{dp}{dt} = q_r - q_s,$$

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

$$e_{32} \frac{dp}{dt} + e_{33} \frac{d\alpha_r}{dt} = Q - \alpha_r h_c q_{dc},$$

$$e_{42} \frac{dp}{dt} + e_{43} \frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44} \frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\rho_s}{T_d} \left(V_{sd}^0 - V_{sd} \right) + \frac{h_f - h_w}{h_c} q_f. \quad (4.22)$$

Como $h_c = h_s - h_w$ temos os seguintes parâmetros de projeto:

$$e_{11} = \rho_w - \rho_s, \quad (4.23)$$

$$e_{12} = V_{wt} \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p}, \quad (4.24)$$

$$e_{21} = \rho_w h_w - \rho_s h_s, \quad (4.25)$$

$$e_{22} = V_{wt} \left(h_w \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} \right) + V_{st} \left(h_s \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) - V_t + m_t C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}, \quad (4.26)$$

$$e_{32} = \left(\left(\rho_w \frac{\partial h_w}{\partial p} - \alpha_r \right) h_c \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) \left(1 - \bar{\alpha}_v \right) V_r + \left((1 - \alpha_r) h_c \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s \frac{\partial h_s}{\partial p} \right) \bar{\alpha}_v V_r + ((\rho_s + ((\rho_w - \rho_s) \alpha_r)) h_c) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} - V_r + m_r C_p \frac{\partial t_s}{\partial p}, \quad (4.27)$$

$$e_{33} = ((1 - \alpha_r) \rho_s + \alpha_r \rho_w) h_c V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}, \quad (4.28)$$

$$e_{42} = V_{sd} \frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c} \left(\rho_s V_{sd} \frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_w V_{wd} \frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{wd} + m_d C_p \frac{\partial t_s}{\partial p} \right) + \alpha_r (1 + \beta) V_r \left(\bar{\alpha}_v \frac{\partial \rho_s}{\partial p} \left(1 - \bar{\alpha}_v \right) \frac{\partial \rho_w}{\partial p} + (\rho_s - \rho_w) \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} \right), \quad (4.29)$$

$$e_{43} = \alpha_r (1 + \beta) (\rho_s - \rho_w) V_r \frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}, \quad (4.30)$$

$$e_{44} = \rho_s, \quad (4.31)$$

Sendo possível escrever a função relacionando entradas e saídas da seguinte maneira:

$$E(x(t)) \dot{x}(t) = F(x(t), u(t)), \quad (4.32)$$

$$E(x(t)) = \begin{bmatrix} e_{11}e_{12} & 0 & 0 \\ e_{21}e_{22} & 0 & 0 \\ 0 & e_{23}e_{33} & 0 \\ 0 & e_{24}e_{34}e_{44} \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

$$F(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} q_f - q_s \\ Q + q_f h_f - q_s h_s \\ Q - \alpha_r h_c q_{dc} \\ \frac{\rho_s}{T_d} (V_{sd}^0 - V_{sd}) + \frac{(h_f - h_w)}{h_c} q_f \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

É válido ressaltar que as derivadas parciais que envolvem pressão dependem de valores relativos às tabelas de propriedades do vapor e da água. A fração de volume do vapor (α_v) é dada pela Equação 4.8, o volume de água dentro do tubulão (V_{wd}) pela Equação 4.18, o nível pela Equação 4.19 e a vazão mássica (q_{dc}) pela Equação 4.13. Através dessas equações temos a simplificação:

$$\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p} = \frac{1}{(\rho_w - \rho_s)^2} \left(\rho_w \frac{\partial \rho_s}{\partial p} - \rho_s \frac{\partial \rho_w}{\partial p} \right) \left(1 + \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{1}{1 + \eta} - \frac{\rho_s + \rho_w}{\eta \rho_s} \ln(1 + \eta) \right), \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r} = \frac{\rho_w}{\rho_s \eta} \left(\frac{1}{\eta} \ln(1 + \eta) - \frac{1}{1 + \eta} \right). \quad (4.36)$$

Sendo:

$$\eta = \alpha_r \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s}. \quad (4.37)$$

4.3 EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO

A dinâmica de operação da caldeira é apresentada nesta sessão, através das equações que mostram o estado estacionário do processo, ou seja, é necessário

considerar que a caldeira já esteja dentro do seu ponto ideal de operação. Impondo que as derivadas sejam nulas temos:

$$\begin{aligned}
 q_f &= q_s, \\
 Q &= q_s h_s - q_f h_f, \\
 Q &= q_{dc} \alpha_r h_c, \\
 V_{sd} &= V_{sd}^0 - \frac{T_d (h_w - h_f)}{\rho_s h_c} q_f.
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

O valor da vazão de saída de vapor (q_s) é o ponto inicial para determinar os demais valores das outras variáveis, e (q_{dc}) é obtido pela Equação 4.13.

Da maneira descrita, o valor de (Q), potência do fornecimento de calor, é relativo à quantidade de calor que o sistema absorveu no seu ponto de equilíbrio. Para que seja verificada a potência de calor instantânea é necessário um desmembramento da variável em questão. Essa problemática será tratada na seção 4.5, apresentando-se uma nova forma de cálculo para minimizar o possível erro no cálculo de (Q) e potencializar o uso do combustível.

4.4 MODELO LINEAR

Aplicando os conceitos da teoria de sistemas lineares, é possível realizar a análise das características dinâmicas do sistema não linear, dentro de uma faixa de operação previamente conhecida. O método de linearização do sistema que será utilizado será o de expansão por série de Taylor, ou também conhecido como Jacobiano¹⁶.

Considerando-se vetores constantes, $x_e \in \mathbb{R}^n$ e $u_e \in \mathbb{R}^{m \times n}$, para o ponto de operação desejado. Com isso, temos:

$$\delta x = x - x_e, \tag{4.39}$$

$$\delta u = u - u_e, \tag{4.40}$$

$$\delta \dot{x}(t) = A \delta x(t) + B \delta u(t) + B_d \delta q_s. \tag{4.41}$$

Sendo:

$$A = E_e^{-1} J_A, \quad (4.42)$$

$$B = E_e^{-1} J_B, \quad (4.43)$$

$$B_d = E_e^{-1} J_{B_d}. \quad (4.44)$$

A variável E_e representa a matriz E calculada no ponto de operação desejado e o (δq_s) é o delta de vazão de vapor de saída em relação ao ponto de operação, mas não é uma entrada para o sistema de controle. Devido a essa característica, a variável não pode ser considerada entrada do sistema, porém, em função de sua importância, deve ser considerada na simulação do sistema.

Calculando o Jacobiano no ponto de equilíbrio, temos:

$$J_A = \frac{\partial F}{\partial X} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}}, \quad (4.45)$$

$$J_B = \frac{\partial F}{\partial U} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_4}{\partial u_1} & \frac{\partial f_4}{\partial u_2} \end{bmatrix} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}}, \quad (4.46)$$

$$J_{Bd} = \frac{\partial F}{\partial q_s} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_s} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_s} \\ \frac{\partial f_3}{\partial q_s} \\ \frac{\partial f_4}{\partial q_s} \end{bmatrix} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} . \quad (4.47)$$

Após as realizações das operações matemáticas temos:

$$J_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q_{dc} h_c & 0 \\ & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & & -\frac{\rho_s}{T_d} \\ & & 0 & \\ 0 & 0 & & \end{bmatrix} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} , \quad (4.49)$$

$$J_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ h_f & 1 \\ 0 & \cdot \\ \frac{h_f - h_w}{h_c} & 0 \end{bmatrix} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} , \quad (4.50)$$

$$J_{Bd} = \begin{bmatrix} -1 \\ -h_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Big|_{x=\bar{X} \text{ e } U=\bar{U}} . \quad (4.51)$$

Através do modelo linearizado será possível realizar o projeto para o processo e comprovar o funcionamento do mesmo.

4.5 MELHORIA NO MODELO PARA UTILIZAÇÃO EM USINAS

Conforme descrito nas equações de equilíbrio da seção 4.3, a obtenção do valor de (Q), potência fornecida ao sistema, é decorrente do balanço de energia. Outra forma de medição dessa variável de entrada da malha é através da implementação de uma instrumentação que não é usual em usinas, composta por medição da vazão e da umidade do bagaço, conforme descrito na seção 3.5.

Em usinas de açúcar e álcool, é usual utilizar o valor da entrada (Q) via um valor fixo do PCI do bagaço e com uma medida estimada para a sua vazão, ou seja, através dos instrumentos propostos, as condições de entrada do processo teriam medição *online*, o que proporcionaria melhor ajuste do algoritmo de Astrom & Bell¹⁵ e uma melhoria na eficiência do processo.

Com a medição dessas variáveis é possível realizar uma adequação no modelo para usinas desmembrando a entrada (Q) em duas novas variáveis, dependentes uma da outra, conforme equação:

$$Q = PCI * q_b * \eta_{ca}. \quad (4.52)$$

Considera-se a nova variável (q_b) como proveniente do medidor de vazão de bagaço, a variável PCI, através de uma correlação proporcional à umidade encontrada no bagaço, medida através do medidor de umidade e do rendimento da caldeira (η_{ca}). Os valores do PCI respeitam a Equação 3.3, e usualmente operam conforme os valores descritos na Tabela 4.5⁷.

Tabela 4.5 – Valores de PCI do bagaço com relação a umidade.

Insumo	Teor de umidade (%)	Poder calorífico (Mj/kg)
Bagaço	52	7,14
Bagaço	51	7,35
Bagaço	50	7,53
Bagaço	49	7,71
Bagaço	48	7,89

Esta é a faixa de valores de umidade de bagaço relativas a operação normal das usinas sucroalcooleiras. Valores fora da faixa são considerados anormais, e devem ter ação da manutenção sobre os equipamentos que fornecem o bagaço. Fatores externos também podem influenciar na operação, como chuva e excesso de calor.

No sistema supervisor e para o controlador, será utilizada uma faixa de valores de PCI do bagaço maior do que a apresentada na Tabela 4.5. Pois com todos estes valores, será possível permitir a operação da planta com o bagaço em qualquer faixa de umidade. Os valores do PCI estão apresentados conforme Figura 4.3.

Figura 4.3 - Faixa de operação da umidade do bagaço.

5 CONTROLE

Este capítulo aplica um método de controle na malha, com o intuito de aumentar a eficiência de operação da caldeira e trazer uma economia de bagaço. Os resultados esperados são produzir mais quantidade de energia elétrica e aumentar os ganhos da cogeração de energia elétrica ou a redução do consumo de combustíveis da caldeira, bem como uma operação com menos variação das entradas da malha de controle, e consequente menor oscilação do processo.

Esse controle foi demonstrado na dissertação de Franco Junior¹⁴ e apresentado no Apêndice A, e será ajustado e testado através de dados reais de uma usina sucroalcooleira.

5.1 MODELO LINEARIZADO

O simulador de Franco Junior¹⁴ opera em uma região de operação diferente da usina a ser estudada neste trabalho. Com isso é necessário alterar os parâmetros apresentados e calculados fazendo as seguintes considerações:

Os coeficientes das matrizes A e B apresentados na seção 4.4 variam na região do ponto de operação da caldeira que é de 6,7 MPa, neste caso. Será aplicada uma variação de aproximadamente $\pm 3\%$ podendo reescrever as matrizes A e B da seguinte maneira:

$$A(p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{13}(p) & 0 \\ 0 & 0 & a_{23}(p) & 0 \\ 0 & 0 & a_{33}(p) & 0 \\ 0 & 0 & a_{43}(p) & a_{44}(p) \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

$$B(p) = \begin{bmatrix} b_{11}(p) & b_{12}(p) \\ b_{21}(p) & b_{22}(p) \\ b_{31}(p) & b_{32}(p) \\ b_{41}(p) & b_{42}(p) \end{bmatrix}. \quad (5.2)$$

Cada um dos termos das matrizes foi linearizado em torno da região de operação da caldeira conforme as seguintes equações:

$$\begin{aligned} a_{13}(p) &= -1,1503 * 10^{-22} p - 7,7065 * 10^{-16}, \\ a_{23}(p) &= 5,2489 * 10^{-18} p - 3,6785 * 10^{-11}, \\ a_{33}(p) &= 2,3198 * 10^{-9} p - 0,18716, \\ a_{43}(p) &= 4,6115 * 10^{-6} p - 96,934, \\ a_{44}(p) &= 1,2006 * 10^{-22} p - 0,08333. \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} b_{11}(p) &= 2,4311 * 10^{-11} p + 0,0011, \\ b_{21}(p) &= -3,5319 * 10^{-11} p - 17,484, \\ b_{31}(p) &= 5,4126 * 10^{-13} p + 1,2192 * 10^{-5}, \\ b_{41}(p) &= -8,4778 * 10^{-12} p - 4,2798 * 10^{-3}, \\ b_{12}(p) &= 7,1378 * 10^{-18} p + 9,2109 * 10^{-11}, \\ b_{22}(p) &= 1,5262 * 10^{-12} p + 4,9687 * 10^{-5}, \\ b_{32}(p) &= -1,4237 * 10^{-18} p + 3,5296 * 10^{-11}, \\ b_{42}(p) &= -1,5005 * 10^{-16} p + 1,7857 * 10^{-9}. \end{aligned} \quad (5.4)$$

5.2 CONTROLADOR

A caldeira da usina de açúcar e álcool que está sendo estudada opera com a pressão em torno de 6,7 MPa, valor no qual será determinado o controlador, considerando uma variação de $\pm 0,2$ MPa, como pressão máxima e mínima do sistema. Nas matrizes A_1 e B_1 temos os parâmetros calculados sobre a pressão mínima e, conseqüentemente na A_2 e B_2 , os valores da pressão máxima. Os cálculos apresentados na seção 5.1

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2,2963 * 10^{-17} & 0 \\ 0 & 0 & -2,6670 * 10^{-12} & 0 \\ 0 & 0 & -1,7208 * 10^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -66,96 & -8,3333 * 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1,2703 * 10^{-3} & 1,3850 * 10^{-10} \\ -40,441 & 5,9607 * 10^{-5} \\ 1,5710 * 10^{-5} & 2,6043 * 10^{-11} \\ -4,3349 * 10^{-3} & 8,1033 * 10^{-10} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2,3049 * 10^{-17} & 0 \\ 0 & 0 & -5,6747 * 10^{-13} & 0 \\ 0 & 0 & -1,7115 * 10^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & -65,115 & -8,3333 * 10^{-2} \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1,2800 * 10^{-3} & 14136 * 10^{-10} \\ -41,854 & 6,0218 * 10^{-5} \\ 1,5926 * 10^{-5} & 2,5473 * 10^{-11} \\ -4,3383 * 10^{-3} & 7,5031 * 10^{-10} \end{bmatrix}. \quad (5.8)$$

O controlador é definido através dos índices de estabilidade e desempenho determinados no apêndice A. Com relação à taxa de decaimento, utilizou-se uma faixa de $0,001 \leq \beta \leq 0,1$. O tempo para obter-se uma perturbação em uma usina de açúcar e álcool é de aproximadamente 150 segundos, com isso determinou-se um valor próximo de 600 segundos para assegurar a estabilidade do sistema e com isso o β foi projetado com o valor de 0,01.

Para a obtenção do controlador K, se deve seguir os passos indicados no Apêndice A. A escolha das variáveis (k_m) e (k_x) devem satisfazer as condições de

variação de fornecimento de calor e água para o sistema. Com isso faz-se necessária uma análise da região de factibilidade, respeitando as restrições descritas, para conseguir realizar o projeto da norma de ganho do controlador, conforme a Figura 5.1.

Figura 5.1 – Região de factibilidade, utilizando a faixa $10000 \leq km$, $kx \leq 50000$, para $\beta=0,01$.

Utilizando a Figura 5.1, foram testados, dentro da região factível, alguns valores de (k_m) e (k_x) para o sistema controlado. E os pontos com as melhores respostas obtidas foram: $k_m=30000$ e $k_x=40000$. Isto posto, a matriz de ganho do controlador a ser utilizada é:

$$K = \begin{bmatrix} 9,5050 & -1,2759 * 10^{-5} & 4,6822 * 10^{-5} & -2,2969 * 10^{-6} \\ 6,4420 * 10^6 & 199,3089 & 2,3329 * 10^{-1} & -1,1521 * 10^{-3} \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

5.3 SISTEMA CONTROLADO

Considerando a região de operação do sistema ($6,5 \text{ MPa} \leq p \leq 6,9 \text{ MPa}$), e que o sistema se encontra na mesma, é possível obter uma nova entrada¹⁴, que pode ser rescrita da seguinte maneira:

$$\delta u(t) = -K \delta x(t) . \quad (5.10)$$

Considerando uma realimentação de estados e as novas entradas, $u_{1\text{nov}}o$ como o fornecimento de água e $u_{2\text{nov}}o$ como o fornecimento de calor, temos as seguintes representações:

$$u_{\text{nov}}o = [u_{1\text{nov}}o(t) \ u_{2\text{nov}}o(t)]^T , \quad (5.11)$$

$$\delta u(t) = -K \delta x(t) + \delta u_{\text{nov}}o(t) , \quad (5.12)$$

sendo que $\delta u_{\text{nov}}o(t) = u_{\text{nov}}o(t) - u_e$, temos:

$$u(t) - u_e = -K (x(t) - x_e) + \delta u_{\text{nov}}o(t) - u_e , \quad (5.13)$$

$$u(t) = -K (x(t) - x_e) + \delta u_{\text{nov}}o(t) . \quad (5.14)$$

Com esta equação sendo substituída nos sistemas não linear e linear, podemos realizar as simulações do processo, que serão representadas no Capítulo 6.

6 SIMULAÇÃO COM OS DADOS DA PLANTA

Para a presente dissertação foi escolhida uma usina de açúcar e álcool que possui cogeração de energia elétrica ativa. Foi observado o comportamento de uma caldeira que possui a capacidade de produção de 250 toneladas de vapor por hora com o vapor a 6,7 MPa de pressão e temperatura de 520°C. Durante um dia comum de operação, a caldeira consome mais de 4.000 toneladas de bagaço e 5.000 m³ de água para gerar mais de 5.000 m³ de vapor no mesmo período. Por se tratar de um ciclo fechado, a água é reutilizada em um sistema de malha fechada, descrito na Figura 1.4.

De uma maneira simples, a Figura 6.1 mostra as entradas (vazão de água e vazão de bagaço) e saídas (vazão de vapor de alta) da malha da caldeira, reproduzindo os limites em que a malha foi determinada.

Figura 6.1 – Representação da caldeira.

O modelo de Astrom e Bell¹⁵ foi adaptado para o processo da usina. Com relação aos dados construtivos da caldeira, os parâmetros são ajustados de acordo

com Astrom e Bell¹⁵, devido à indisponibilidade de exatidão dos mesmos na usina. Estes valores estão descritos na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Dados construtivos e operacionais.

Variável	Valor	Unidade
A_d	27	m^2
A_{dc}	0.355	m^2
C_p	550	$J/(Kg^{\circ}C)$
g	9,81	m/s^2
h_f	482593	J/kg
k	25	-
m_d	100000	Kg
m_r	160000	Kg
m_t	300000	Kg
T_d	12	s
V_d	40	m^3
V_{dc}	11	m^3
V_r	37	m^3
V_{sd}^0	17,9	m^3
β	0,3	-

De acordo com a Tabela 6.1, os parâmetros da caldeira são: (A_d) a área da superfície líquida no tubulão, (A_{dc}) área do tubo de descida, (V_d) o volume do tubulão de vapor, (V_{dc}) o volume total dos *downcomers*, (V_r) o volume total dos *risers*, (m_d) a massa total do tubulão, (m_r) a massa total dos *risers*, (m_t) a massa total de metal dos tubos e tubulões da caldeira, (C_p) calor específico do metal, (k) coeficiente de atrito adimensional, (β) um parâmetro empírico, e (T_d) o tempo de residência do vapor dentro do tubulão. Em relação aos parâmetros do processo temos: (h_f) entalpia da água de alimentação da caldeira e o (V_{sd}^0) volume de vapor no tubulão sem condensação.

A entalpia e a densidade do vapor variam de acordo com as condições de pressão e temperatura, conforme as tabelas de água e vapor. Na simulação matemática, limitaram-se os valores das variáveis de acordo à faixa de operação da pressão, para transformá-las em gráficos e consequentemente em equações. O

método aplicado está descrito no Apêndice B e, conseqüentemente, as equações na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Equações da entalpia, temperatura e densidade do vapor.

Variável	Equação	Unidade
h_s	$3 \cdot 10^{-16}(p)^3 - 5,4 \cdot 10^{-9}(p)^2 + 0,21(p) + 2,2 \cdot 10^6$	J/kg
h_w	$2,2 \cdot 10^{-16}(p)^3 - 6,6 \cdot 10^{-9}(p)^2 + 0,11(p) + 7,3 \cdot 10^5$	J/kg
t_s	$8 \cdot 10^{-5}(p) - 32$	°C
ρ_s	$6,2 \cdot 10^{-7}(p) + 16$	Kg/m ³
ρ_w	$- 1,8 \cdot 10^{-5}(p) + 870$	Kg/m ³

As condições iniciais da simulação são descritas na Tabela 6.3:

Tabela 6.3 – Condições iniciais.

Variável	Valor	Unidade
p	6,75	MPa
q_f	59,4	Kg/s
q_s	59,4	Kg/s
Q	187,3	MW
V_{sd}	4,24	m ³
V_{wt}	94,4	m ³
α_r	0,051	-

A Figura 6.2 representa as condições de entrada do processo, que foram impostas para tais simulações. A demanda das entradas (Q) e (q_f) é constante, porém a saída de vapor é variável ao longo do tempo, representando a vazão necessária para operação da usina de cana-de-açúcar.

Figura 6.2 – Saída e Entradas de variáveis da malha de controle

Através dos dados apresentados, o modelo é simulado utilizando-se a função `ode45` do software MATLAB®, para que seja possível realizar três tipos de simulações, apresentadas nas próximas seções: Validação do modelo, aplicação do controle no processo existente e variação das condições da planta para atuação do controle.

Outro fator que deve ser levado em consideração é que todas as condições foram simuladas a partir de um cenário estável, desta forma os 50 valores iniciais das variáveis não apresentam mudança. Condição imposta à simulação.

6.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a validação, compararam-se os resultados encontrados nas simulações do modelo de Astrom e Bell¹⁵, linearizado conforme Franco Jr.¹⁴ e Oliveira¹⁶, com os valores medidos na usina. Das variáveis disponíveis no modelo, e descritas no Capítulo 4, foram comparados os valores de pressão e nível do tubulão da caldeira, que possui instrumentos a ele acoplados. O instrumento de pressão é conectado a um selo, e este a um bocal do vaso. A instrumentação de nível conecta-se ao tubulão através de uma estrutura conhecida como *stand pipe*. As demais variáveis não

possuem instrumentos de medição comercialmente viáveis, e serão calculadas, através do valor da medição de pressão, que foi fornecida pela planta.

O método de comparação dos valores reais com os simulados será realizado por meio da análise das áreas dos gráficos (comando trapz do Matlab), diferença entre os valores máximos encontrados (através do *data cursor* do Matlab), bem como a comparação visual da tendência e diferença entre as medições.

Para as entradas e saída descritas, os gráficos apresentarão os resultados obtidos para a validação do modelo. As linhas contínuas pertencem ao modelo matemático simulado, e as tracejadas representam os valores do processo da usina.

Figura 6.3 – Comparação da variável pressão.

Figura 6.4 – Comparação da variável de nível.

Os valores encontrados nas Figuras 6.3 e 6.4 são relativos à medição de pressão e nível respectivamente. Na variável de nível, é necessário considerar que o valor 0m representa 40% do nível do tubulão, e cada alteração de 0.1m é uma alteração de 10% no nível da caldeira.

Podemos observar que existe uma diferença de aproximadamente 2% sobre os valores máximos de medição da pressão ($6.5 \cdot 10^6$ MPa medido contra $6.7 \cdot 10^6$ MPa simulado). Já no nível do tubulão, houve uma falha no final da simulação, gerando uma diferença de valor máximo encontrado de 12%. Essas divergências ocorrem devido a uma série de fatores: imprecisão eletrônica (em torno de 0,025%)⁷⁵, falta de calibração e imprecisão do sensor do instrumento, e, principalmente, do ruído, que é inerente aos processos industriais. Fazendo-se uma análise geral, a divergência da média dos valores simulados e medidos é de 0,33% na pressão e 1,7% no nível do vaso, valores dentro da expectativa dos resultados esperados.

As próximas comparações serão entre as variáveis de estado do modelo, volume total de água, conforme Figura 6.5, qualidade do vapor, mostrada Figura 6.6 e volume de vapor no tubulão, de acordo com a Figura 6.7.

Figura 6.5 – Comparação da variável volume total de água.

Figura 6.6 – Comparação da variável qualidade do vapor.

Figura 6.7 – Comparação da variável volume de vapor no tubulão.

Por se tratarem de variáveis sem medição direta e obtidas através de cálculos, independentemente da variação de pressão, as mesmas não sofreram nenhum tipo de alteração no seu comportamento.

As Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 retratam as demais variáveis de apoio.

Figura 6.9 – Comparação das vazões nos *riser* e *downcomers*.

A diferença de comportamento das variáveis (q_r) e (q_{dc}), a partir dos cálculos com pressão constante (simulação) e variável (real), não é significativa. A diferença de picos é menor que 0,5% em ambos os casos, e a variação no comportamento total (área da figura) é de 0,08%. O comportamento e tendência das variáveis de vazão (q_r) e (q_{dc}) é idêntica em ambos os casos.

Figura 6.10 – Comparação da vazão de condensação e da fração volumétrica.

Com relação à variável de fração volumétrica de vapor (α_v), a mesma possui leve discrepância no comportamento geral, com divergência de 0,06%. Já a vazão de condensação (q_{ct}), sofre influência menor, com apenas 0,03%. Ou seja, são praticamente iguais.

As variáveis de contribuição do nível de vapor (l_s) e de água (l_w) não sofrem ação da pressão e são idênticas.

Figura 6.10 – Comparação da vazão de condensação e da fração volumétrica.

O modelo proposto foi validado, a partir dos resultados obtidos nessa seção, e pode ser utilizado para simular o comportamento da usina sucroalcooleira que está sendo estudada.

6.2 CONTROLE SOBRE A DEMANDA DE VAPOR DA USINA

O controlador a ser aplicado no processo foi descrito no Capítulo 5 desta dissertação, e será simulado nessa seção. Tal controlador foi configurado para atender a demanda de vapor da usina, ou seja, a vazão de saída de vapor superaquecido da caldeira, variável esta que será utilizada como referência.

A partir dessa premissa, será aplicado um controle tipo *feedforward*, que visa diminuir a entrada das variáveis de consumo da malha (água fria e bagaço), bem como a mitigação da oscilação do processo.

Para as entradas e saída descritas, os gráficos apresentarão os resultados obtidos para a comparação dos controles. As linhas contínuas pertencem ao modelo matemático simulado, e as tracejadas representam os valores do processo da usina. Os valores reais das variáveis da usina foram coletados em intervalos de sessenta segundos, e foram considerados constantes na simulação durante o período.

Figura 6.11 – Variáveis de entrada e saída utilizadas pela usina.

A Figura 6.11 retrata as entradas e saída reais da usina. Ou seja, o primeiro gráfico apresenta a quantidade de calor que é inserida através do bagaço, o gráfico central a vazão de água de entrada na caldeira e o mais à direita a vazão de vapor superaquecido, este conjunto representa o comportamento do processo real. É importante ressaltar que a quantidade de calor inserida no sistema foi calculada com base na Equação 4.52 apresentada na seção 4.5, porém com valor de PCI constante.

A Figura 6.12 mostra as condições das variáveis de estado e vazões de subida e descida dos tubos após a aplicação do controle.

Figura 6.12 – Variáveis de estado e vazões nos tubos auxiliares

É possível verificar uma baixa oscilação da variável de pressão, atendendo às variações da vazão de vapor superaquecido. Quando ocorre um acréscimo da vazão da saída de vapor em mais 3,45%, a pressão varia apenas -0,24%, ou seja, um decréscimo para 6,734 MPa. As variáveis de volume total de água e qualidade de vapor ficaram praticamente constantes, as vazões dos *risers* e *downcomers* atuam de acordo com a necessidade de vapor da planta, bem como a variação do volume de vapor no tubulão mostrou-se de acordo ao esperado, pois atua inversamente proporcional a quantidade de vapor solicitada pela planta.

Figura 6.13 – Variáveis de apoio sob atuação do controle

A Figura 6.13, mostra que o controle atua sobre o nível de água do tubulão não permitindo que o mesmo varie de forma brusca, em apenas 2% abaixo do nível médio. Essa adequação é realizada com a solicitação de inserção de mais água na entrada do sistema. Esta demanda é completamente atendida pela parte do nível representada pelo vapor (gráfico a direita), com baixa variação do nível da água. O comportamento da fração volumétrica do vapor é praticamente estável e a vazão de condensação aumenta quando da diminuição do nível do tubulão.

O controle atua efetivamente sobre as variáveis de alimentação do sistema, gerando uma nova entrada, para atuar no processo e mantê-lo estável. Essas novas entradas serão apresentadas em conjunto com as entradas do processo para mostrar uma visão geral, conforme Figura 6.14.

Figura 6.14 – Novas variáveis de entrada, em conjunto com as entradas reais do processo.

É possível verificar que o controlador atua sobre as entradas do processo e gera uma nova entrada atendendo à demanda de saída de vapor. As novas entradas proporcionam uma operação com uma menor oscilação das variáveis e com menos desperdício de matéria prima. Na Figura 6.15 faz-se uma comparação individual da entrada de água entre o valor medido e a atuação do controle.

Figura 6.15 – Entrada real (tracejada) e entrada sugerida pelo controlador (contínua) para o fornecimento de água.

É possível verificar um valor máximos de 64,32 Kg/h de entrada de água que é desnecessário ao processo, além de uma inserção de água maior que a demanda de saída de vapor durante os instantes 100 e 300 segundos. Outra análise é que ocorre uma necessidade de alimentação do fluido maior do que a usina forneceu ao processo, durante os instantes 400 a 600 segundos, prejudicando o nível real da caldeira. Em uma verificação geral o controle solicita que seja inserido 0,32% a mais de água para uma operação equilibrada. A Figura 6.16 mostra o comportamento da entrada do fornecimento de energia.

Figura 6.16 – Entrada real (tracejada) e entrada sugerida pelo controlador (contínua) para o fornecimento de calor.

O comportamento de ambas as entradas é semelhante, porém o controle mostra que existe um desperdício de bagaço enviado para a queima. Ou seja a usina poderia ter economizado 8,75% do bagaço utilizado pela caldeira. Existe mais um fator que pode gerar economia no uso de bagaço, que é a utilização do medidor de umidade para variação do controle. Com esse instrumento, seria possível confirmar o potencial energético instantâneo do bagaço, compensando a entrada do mesmo no processo de acordo com a necessidade.

6.3 SIMULAÇÃO DE ALTERAÇÃO DA SAÍDA DO VAPOR

Para otimizar a cogeração, será aplicada a máxima capacidade de produção de vapor na caldeira, sendo que, caso a usina não o esteja consumindo, na sua totalidade, a sobra deverá ser convertida em energia elétrica.

Nesta condição, a saída do processo será elevada a vazão até 70 Kg/s, ou seja um aumento de 17,8%, a partir do instante 100 segundos até 200 segundos. Para chegar a tal condição ira se elevar a entrada de água de alimentação ao mesmo patamar desde o instante 80 até o instante 180 segundos. Com essas condições, o processo e o controle se apresentam conforme retratado na Figura 6.17.

As demais condições iniciais e de estabilidade continuam as mesmas da usina já informadas no início do capítulo na Tabela 6.3.

Figura 6.17 – Entradas, saída e novas entradas conforme solicitação de vapor.

Verifica-se que a nova entrada de bagaço acompanha a tendência da saída, demorando 20 segundos a mais para começar a aumentar, entre outras palavras, instante 120 segundos. Leva-se em torno de 200 segundos para se estabilizar, o que significa instante 300 segundos. O aumento de fornecimento de energia é de 17,7%, proporcionalmente igual ao aumento de vazão de água. No caso do controle do fornecimento de água, o mesmo mostra que é possível inserir menos água no processo, visto a diferença das curvas, bem como o tempo para deixar o sistema no equilíbrio e constante é de aproximadamente 400 segundos. Essas condições fazem que as variáveis de estado se comportem de acordo com a Figura 6.18.

Figura 6.18 – Variáveis de estado e vazões dos tubos conforme solicitação de vapor.

O comportamento da pressão e do volume total de água são praticamente estáveis caindo em apenas 1%, para 6,68 MPa na medição de pressão e 1,5%, para 93 m^3 na variável de volume total de água. A qualidade do vapor aumenta para 0,06 e volume de vapor do tubulão tem um pico inicial quando da variação da saída de vapor de 100 a 200 segundos e depois cai até a estabilização, após 500 segundos. As vazões nos *downcomers* e *risers* se comportam da mesma maneira e conforme variação de controle da entrada de energia, aumentando em 9,3% a vazão. Portanto o processo se comporta de maneira coerente e aceitável.

Na Figura 6.19, é apresentado o comportamento das variáveis de apoio ao processo.

Figura 6.19 – Entradas, saída e novas entradas conforme solicitação de vapor.

As variáveis auxiliares mostram que o nível do tubulão tem um acréscimo de 5% na fase em que o fornecimento de energia é inferior a demanda do processo, bem como diminui quando o mesmo chega ao equilíbrio e se estabiliza em -8%. É possível verificar que o nível de vapor é quem influencia diretamente o nível total, e que o nível de água dentro do tubulão permanece praticamente estável, visto o comportamento da variável de entrada de água. A fração volumétrica do vapor tem um aumento de 9%, chegando a 0,48, e estabilizando a partir do instante 300 segundos. A vazão de condensação diminui em 31,8% no período de aumento de saída do vapor, e, posteriormente, volta à sua condição inicial no instante 300 segundos.

Através desses resultados é possível afirmar que tanto o modelo, quanto o controle estão validados e com condições de atuarem sobre a malha da caldeira na usina.

6.4 COMPARAÇÃO ENTRE CONTROLADORES

Nesta seção será comparado os resultados obtidos com o controle proposto nesta dissertação, com a medição de vazão e umidade do bagaço e o controle sem estas variáveis apresentado em Franco Jr¹⁴.

Para essa simulação, será aplicado um degrau na entrada de fornecimento de calor para simular um distúrbio nesta variável de entrada.

A primeira diferença é na coleta dos dados de entrada. Com os instrumentos medindo as características do bagaço, é possível antecipar o comportamento do bagaço em 150 segundos conforme retrata a Figura 6.20. Esta antecipação se dá, pois a alteração na característica do bagaço só será sentida, ao final do ciclo do processo. As linhas contínuas pertencem simulam a presença da instrumentação e a alteração no modelo, e as tracejadas representam os valores sem instrumentação.

Figura 6.20 – Degrau no fornecimento de calor.

A partir deste degrau, o controle irá atuar nas variáveis de entrada, resultando nas novas entradas, no fornecimento de água e calor, apresentadas nas Figura 6.21 e Figura 6.22, respectivamente.

Figura 6.21 – Nova entrada de água com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada).

Figura 6.22 – Nova entrada de calor com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada).

Com a atuação do controle tipo *feedforward* proveniente da nova instrumentação, é possível antecipar o comportamento da variação de água e diminuir a quantidade máxima de calor necessária para o sistema.

Realizando uma comparação das novas entradas com relação a vazão de entrada bagaço, temos uma economia de 2,13% de bagaço no período. Ou seja, 491 kgs de bagaço em pouco mais de 15 minutos. Se extrapolarmos os resultados para

um dia inteiro de operação da planta nessas condições de variação, será possível economizar aproximadamente 47 toneladas de bagaço. Os resultados estão na Figura 6.23.

Figura 6.23 – Nova entrada de vazão de bagaço com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada).

Outro fato relevante a ser considerado, é que as variáveis de estado e as variáveis auxiliares também sofrem alteração no seu comportamento, devido a antecipação da atuação do controle, conforme Figura 6.24 e Figura 6.25.

Figura 6.24 – Variáveis de entrada com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada).

Figura 6.25 – Variáveis auxiliares com instrumentação (linha contínua) e sem instrumentação (linha tracejada).

O principal ganho verificado é a antecipação do novo comportamento das variáveis, sendo que nas variáveis relacionadas ao nível do tubulão, é possível verificar uma menor oscilação nas mesmas.

6.5 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para completar o estudo da cogeração, serão analisados os dados de produção de energia elétrica da usina. Esta análise será realizada através de um simples balanço de energia, considerando que o controle e ajustes do conjunto turbogerador estão operando de forma normal.

A cogeração de energia elétrica desta usina opera com dois conjuntos turbogeradores com capacidade de 40 MW cada, sendo um com turbina de condensação e o outro com a turbina de contrapressão. Será objeto desse estudo, apenas o conjunto com a turbina de contrapressão, pois todo o potencial energético do vapor é transformado em eletricidade, respeitando-se as limitações da própria máquina. Ou seja, a conversão será realizada dentro da eficiência do conjunto.

Conforme verificado na Seção 6.3, é possível que a caldeira estudada forneça até 70 Kg/s de vapor, e que todo esse vapor seja utilizado para gerar energia elétrica. Também se pensando no máximo aproveitamento da caldeira, será utilizada a entalpia do vapor para as máximas condições de operação da planta com pressão de 6,9 MPa e temperatura de 520°C.

Já a saída da turbina de contrapressão possui vapor de baixa pressão, com a mesma vazão da entrada, porém com pressão de 0,25 MPa e temperatura de 130°C. Valores a serem considerados no cálculo térmico energético da malha de cogeração de energia. A Figura 6.26 representa o conjunto e suas variáveis.

Figura 6.26 –Representação do turbogerador.

Com isso temos as seguintes condições de operação da cogeração de energia, de acordo com a Tabela 6.4:

Tabela 6.4 – Condições da cogeração de energia

Variável	Valor	Unidade
Vapor de entrada - q _s		
p	6,9	MPa
T	520	°C
q _s	70	Kg/s
h _s	3460,3	J/kg
Vapor de saída - q _v		
p	0.25	MPa
T	130	°C
q _v	70	Kg/s
h _v	2716,5	J/kg

Através de um balanço de energia, entrada menos saída é possível obter um potencial energético de 52 MWh de produção de energia elétrica na usina. Se levarmos em consideração as perdas da máquina e do processo, que gira em torno de 10%, teremos 46,6MWh de energia disponível para a rede elétrica. Portanto, não é possível aproveitar todo o potencial da caldeira, pois o conjunto turbogerador tem a capacidade de gerar apenas 40 MWh, por si só é um limitador para a geração de eletricidade.

Para mitigar esse problema, é possível utilizar o segundo conjunto turbogerador ou diminuir a produção da caldeira, economizando bagaço, para utiliza-lo durante o período de entressafra.

Outro fator importante da cogeração de energia é o FUE, Equação 2.2, que foi apresentado no capítulo 2 e será calculado para a usina, a partir do balanço energético dos elementos estudados desta cogeração de eletricidade.

$$FUE = \frac{W + Qu}{F}$$

$$W = 40 - 14 = 26 \text{ MWh}$$

$$Q = 59,3 \text{ MWh}$$

$$F = 134,8 \text{ MWh}$$

$$\text{FUE} = 0,633$$

Através dos dados fornecidos sendo a produção de calor de 40MWh, o potencial energético de saída do vapor 59,3 MWh e o potencial de bagaço de 134,8MW/h foi possível verificar que o FUE obtido é de 0,633, valor baixo para a cogeração de energia elétrica.

Desta forma é possível concluir que a cogeração de energia desta usina de cana-de-açúcar necessita de adequações como: melhoria no controle da malha, melhor aproveitamento do bagaço e diminuição nas perdas do processo, para que seja extraído todo o potencial da mesma.

7 CONCLUSÃO

No Brasil a produção de eletricidade proveniente de biomassas é subaproveitada. Esta dissertação mostrou que o bagaço de cana de açúcar possui um grande potencial energético a ser explorado, mas ainda é desperdiçado em diversas usinas de açúcar e álcool. Dentre as usinas que possuem cogeração de energia, a implantação da instrumentação de medição de umidade e vazão no bagaço, possibilitará um acompanhamento real das condições deste produto e, conseqüentemente, o cálculo do potencial energético instantâneo. Esse cálculo, proporcionará a diminuição do desperdício de bagaço e/ou o aumento da geração de vapor superaquecido.

Na malha de cogeração de energia, verifica-se que o ajuste dos parâmetros é ineficiente, pois os mesmos são ajustados apenas para um ponto de operação, e, muitas vezes, esse ajuste é realizado pelo método de tentativa e erro. A operação desta malha é realizada com um nível de variação dos parâmetros de estado, bem como das variáveis de entrada, muito elevado, o que ocasiona um desgaste desnecessário dos equipamentos do processo.

Para melhorar estes cenários, foi utilizado um controle para a malha de cogeração de energia que permite a operação com variação de $\pm 3\%$ sobre a pressão do tubulão da caldeira, adequado a uma usina de açúcar e álcool. Neste controle, baseado no modelamento matemático da malha por Astrom e Bell¹⁵ e desenvolvido por Franco Jr.¹⁴, o parâmetro de entrada de energia do combustível foi adequado para uma usina, através da medição dos parâmetros de umidade e vazão do bagaço.

O modelo matemático proposto, foi validado por meio dos dados de uma usina de cana-de-açúcar. Posteriormente, foi simulada a ação do controlador, que é baseado no método de Desigualdades Matriciais Lineares, para este processo. Uma simulação foi realizada com o comportamento do processo real, através do atendimento à demanda do vapor superaquecido da planta. Foi comprovado, na Figura 6.16, que é possível economizar 8,75% da entrada do bagaço, além de proporcionar uma operação com menos oscilação da planta. Na mesma simulação, Figura 6.15, identificou-se que é necessário um acréscimo na vazão de entrada de água de 0,5%, em relação a vazão praticada na usina.

Na segunda simulação, foi proposto trabalhar com a caldeira em 100% da capacidade de produção de vapor. Mais uma vez, o controle se mostrou eficiente à essa variação de demanda, comprovando a possibilidade de operação nestas condições, sem gerar maiores perturbações nos parâmetros medidos e apresentados.

No estudo do potencial energético da usina, a mesma apresentou falhas na projeção dos seus equipamentos e parâmetros de eficiência, o que comprova a problemática descrita na introdução deste trabalho.

Este estudo mostra que a utilização de instrumentação que meça as condições de umidade e vazão do bagaço, aliado a um método eficiente de controle das variações de pressão da cogeração de energia de usina de açúcar e álcool, possibilita um ganho na produção de vapor, estabilidade no processo e redução na vazão de bagaço para a alimentação da caldeira.

O conteúdo deste trabalho possibilita a aplicação das melhorias propostas na cogeração de energia elétrica de uma usina sucroalcooleira, durante a produção da mesma. Outra possibilidade é o estudo, simulação e aplicação, de outro tipo de controlador, para o processo descrito através do modelo.

REFERÊNCIAS^a

1. MME. Balanço Energético Nacional 2016: ano base 2015. In: EPE, editor. Brasília (DF): Documento Governamental. 2016. p. 15-17;217.
2. MME. Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. In: energéticas Edp, editor. Brasília (DF): Documento Governamental; EPE; 2014. p. 80-93.
3. BRASIL. Entenda como funciona o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). 2014 [cited 2015 30/08/2015]; Available from: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2014/05/entenda-como-funciona-o-mecanismo-de-desenvolvimento-limpo-mdl>.
4. ANEEL. Atlas da Energia Elétrica no Brasil. Brasília (DF): TDA; Documento Governamental; 2008. p. 52;59;67;.
5. DANTAS DN. Uso da Biomassa da cana de açúcar para geração de energia elétrica: Análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. São Carlos (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2010. 131 p.
6. COGEN. Conceito e Tecnologias. São Paulo - SP2015 [cited 2015 30/08/2015]; Available from: http://www.cogen.com.br/cog_conceito.asp.
7. CITTADINO G, FRANCO Jr A, KASSAB Jr F. Otimização da malha de cogeração de energia em usina de açúcar e álcool através de instrumentação. Artigo. CBA2016 [Internet]. 2016:[1977-82 pp.].
8. SOUZA ZJ. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação. São Carlos (SP): Tese de Doutorado. UFSCAR; 2003. p. 156-159.
9. BRESSAN Filho Â. A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil. In: CONAB, editor. [local desconhecido]: Documento Governamental. 2011. p. 95-105.
10. TOLMASQUIM MT. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear [pdf]. Rio de Janeiro (RJ): Documento Governamental. EPE; 2016. p. 203-204.
11. CARDOSO TF. Cogeração de energia através do bagaço de cana de açúcar: Revisão de literatura. Sertãozinho (SP): Monografia. UFSC; 2011. 22 p.

^a De acordo com o Estilo Vancouver.

12. PRIETO MGS. Alternativas de Cogeração na Indústria Sucroalcooleira, Estudo de Caso. Campinas (SP): Tese de Doutorado. UNICAMP; 2003. 282 p.
13. PARO AC. Uma metodologia para gestão de eficiência energética de centrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana. São Paulo (SP): Tese de Doutorado. USP; 2011. 146 p.
14. FRANCO Jr A. Projeto e Simulação de um sistema de controle via LMIS da produção de vapor de uma caldeira aquatubular. Ilha Solteira (SP): Dissertação de Mestrado. UNESP; 2012. 102 p.
15. ASTROM KJ, BELL RD. Drum-boiler dynamics. Automatica [Internet]. Sweden: Article. 2000;16 p.
16. OLIVEIRA Jr VBd. Modelagem de central termelétrica a vapor para simulação dinâmica. Vitória (ES): Dissertação de Mestrado. UFES; 2009. 177 p.
17. RIBEIRO PR. A usina de açúcar e sua automação. Araçatuba (SP): Livro. 2003. 143 p.
18. BARJA GJA. A cogeração e a sua inserção ao sistema elétrico. Brasília (DF): Dissertação de Mestrado. UNB; 2006. 171 p.
19. ESCOBAR MR. Viabilidade econômico financeira da energia cogerada do bagaço de cana in natura. Informações Econômicas. [local desconhecido] Artigo. 2003; n 9. v. 33.
20. GALLINARI BRM. Comércio da energia cogerada em plantas termoeletricas com concessionárias e permissionárias e consumidores livres tendo como foco usinas sucroalcooleiras. Araçatuba (SP): Monografia. FATEC; 2013. 49 p.
21. FIOMARI MC. Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão. Ilha Solteira (SP): Dissertação de Mestrado. UNESP; 2004. 152 p.
22. RODRIGUES LGS. Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana de açúcar. Ilha Solteira (SP): Dissertação de Mestrado. UNESP; 2005. 145 p.
23. ENSINAS AV. Integração térmica e otimização termoeconômica aplicadas ao processo industrial de produção de açúcar e etanol a partir da cana de açúcar. Campinas (SP): Tese de Doutorado. UNICAMP; 2008. 207 p.
24. HORLOCK JH. Cogeneration - Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics. Michigan - USA: Book. Krieger Publishing Company; 1997. 246 p.

25. PELLEGRINI LF. Análise e otimização termo econômica ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade. São Paulo (SP): Tese de Doutorado. USP; 2009. 349 p.
26. MIOZZO NETO D. Análise de confiabilidade das termoelétricas a partir da biomassa: Comparação com *benchmarking* e sugestão de padronização de indicadores para *benchmarking*. São Paulo (SP): Monografia. USP; 2013. 135 p.
27. BARBELI MC. A cogeração de energia e sua importância no ponto de vista técnico, econômico e ambiental. Empreendedorismo, Gestão e Negócios, v4 [Internet]. 2015; Artigo. [238-46 pp.]. Available from: <http://www.fatece.edu.br/arquivos/arquivos%20revistas/empreendedorismo/volume4/12.pdf>.
28. OLIVEIRA SFA. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. São José dos Campos (SP): Dissertação de Mestrado. ITA; 2014. p. 19-20.
29. UNICA. Setor sucroenergético. São Paulo: 2016 [cited 2016 17/11/2016]; Available from: <http://www.unica.com.br/>.
30. NOVACANA. Cogeração: Como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira. 2015 [cited 2015 30/08/2015]; Available from: <http://www.novacana.com/usina/cogeracao-como-funciona-producao-energia-eletrica/>.
31. ABDENNOUR A. An intelligent supervisory system for drum type boilers during severe disturbances. [place unknown]: 2000; v.22: p.381-87.
32. XU M, LI S, CAI W. Cascade generalized predictive control strategy for boiler drum level. ISA Transactions. [place unknown]: 2005; p.399 - 411.
33. MARQUES FAPM. Modelagem e controle de nível do tubulão de uma caldeira de vapor aquatubular de uma refinaria de petróleo. Rio de Janeiro (RJ): Dissertação de Mestrado. UFRJ; 2005. 130 p.
34. VALLE EA, DIECK-ASSAD G. Modeling and simulation of a fuzzy supervisory controller for an industrial boiler. Simulation. [place unknown]: Article. 2006; p. 82(12):10.
35. SWARNAKAR A, MARQUEZ HJ, CHEN T. A New Scheme on Robust Observer Based Control Design for Nonlinear Interconnected Systems with Application to an Industrial Utility Boiler. American Control Conference; 13/07/2007; New York - USA. Article. 2007. p. 6.

36. MORADI H, BAKHTIARI-NEJAD F. Improving boiler unit performance using an optimum robust minimum-order observer. *Energy Conversion and Management*. [place unknown]: Article. 2011; p. 52:12.
37. IACOB M, ANDREESCU G-D. Drum-Boiler Control System Employing Shrink and Swell Effect Remission in Thermal Power Plants. *Ultra Modern Telecommunications and Control System and Workshops*; 7/10/2011; Budapest: IEEE; Article. 2011. p. 8.
38. MORATO MM, MENDES PRdC, BERTOL DW, CEMBRANEL D, ALBA CBA, NORMEY-RICO JE. Estudo de uma planta híbrida de geração de energia na indústria da cana de açúcar. CBA2016. Artigo. 2016. 6 p.
39. ODDONE DC. Cogeração: Uma alternativa para produção de energia. São Paulo (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2001. p. 12-15.
40. VAN WILEN GJ, BORGNACKE RE. Fundamentos de Termodinâmica Clássica. 4 ed. Michigan - EUA: Edgard Blucher Ltda; Livro. 1995. 548 p.
41. BALESTIERI JAP. Cogeração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor. Florianópolis (SC): Livro. Editora UFSC; 2002. 279 p.
42. SILVA WD. A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa inserida na matriz energética brasileira. São Carlos (SP): Monografia. USP; 2009. p. 10-11.
43. CHIERICATO T. Sistemas de cogeração. Ribeirão Preto (SP): Monografia. UFSC; 2010. p. 8.
44. LORA EES, N. TF. Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações. 3ª ed. Itajubá (MG): EFEI; Livro. 2006. 621 p.
45. RODRIGUES MLM. Estudo técnico-econômico da implantação da cogeração em pequena escala a biomassa em uma indústria. Belo Horizonte (MG): Dissertação de Mestrado. PUC-MG; 2009.
46. UNICA. Mapa da produção. Local desconhecido2016 [cited 2016 14/11/2016]; Available from: <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>.
47. IEA. Combined Heat and Power. In: Office HoCal, editor. Paris - France: OECD/IEA; Eletronic Document. 2008. p. 39.
48. OLIVEIRA JG. Perspectivas para cogeração com bagaço de cana de açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista. São Carlos (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2007. p. 63-71.
49. LORA BA. Potencial de geração de créditos de carbono e perspectivas de modernizaçãodo setor sucroalcooleiro do estado de São Paulo através do mecanismo

de desenvolvimento limpo. São Paulo (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2008. 134 p.

50. WEC. World Energy Resources. England: WEC; 2013. [place unknown]. Eletronic Document. p. 5.16, 7.22.

51. NETO OB. Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2ª Geração) nas atuais usinas de processamento de cana de açúcar (1ª Geração). São Paulo (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2009. p. 42-62.

52. BNDES. Bioetanol de cana-de-açúcar : energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro (RJ): Documento Governamental. 2008. p. 108.

53. OLIVEIRA CAd. Cogeração a partir do bagaço da cana de açúcar: histórico, situação atual e perspectivas para o setor. Sertãozinho (SP): UFSC; 2013.

54. MEZAROBIA S, MENEGUETTI CC, GROFF AM. Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema. IV Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial; Campo Mourão (PR): Artigo. 2010. 10 p.

55. DARROS T. Raízen constrói tela para conter bagaço de cana. Local desconhecido: O seminário; 2014 [cited 2015 26/08/2015]; Available from: <http://www.osemanario.com.br/blog/index.php/2014/06/raizen-constroi-tela-para-conter-bagaco-de-cana/>.

56. PELLEGRINI MC. Inserção de centrais cogeradoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: Exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética. São Paulo (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2002. 187 p.

57. SOARES LCSR. Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar. Lorena (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2012. p. 156-159.

58. OLIVEIRA MP. Cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar. Taquaritinga (DF): Monografia. Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga; 2013. p. 36-40.

59. SILONI JR. Cogeração de Energia - Aproveitamento de matéria orgânica: um relato da realidade do grupo Cosan - unidade Rafard. Capivari (SP): Monografia. FACECAP; 2008. p. 10-21.

60. BRUMER E. Oportunidades e desafios da geração de energia elétrica através de resíduos de cana do estado de são paulo. São Paulo (SP): Dissertação de Mestrado. USP; 2014. p. 54-68.

61. SANTOS ML, LIMA OJ, NASSAR EJ, CIUFFI KJ, CALEFI PS. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana de açúcar por análise térmica. Química Nova [Internet]. 2011 19/11/16; 34. Available from: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422011000300024.
62. MORAN MJ, SHAPIRO HN. Princípios da Termodinâmica para Engenharia. Ohio - USA: LTC; Livro. 2002. 681 p.
63. GOMAZAKO MS, OLIVEIRA CJ. Geração de bagaço e cogeração de energia elétrica na indústria sucroalcooleira. V Workshop internacional Brasil-Japão em biocombustíveis, meio ambiente e biomassa; Campinas (SP): Artigo. UNICAMP; 2007. 6 p.
64. SCHIRMER F. Comparação de indicadores de eficiência e exergética em duas indústrias no setor sucroalcooleiro. Cascavel (PR): Dissertação de Mestrado. UNIOESTE; 2006. p. 6-19.
65. SOLIDDA. Sistemas para Geração Termoelétrica e Cogeração. 2016 [cited 2016 25/11/2016]; Local Desconhecido. Available from: <http://www.solidda.com.br/sistemas-para-geracao-termoeletrica-e-cogeração>.
66. AQUAFIL. Desaeradores Térmicos - Modelo DST. Local desconhecido. 2004 [cited 2015 28/09/2015]; Available from: <http://www.aquafil.com.br/desae.htm>.
67. BIZZO WA. Geradores de Vapor. Geração, Distribuição e Utilização de Vapor. Campinas (SP): UNICAMP; Apostila. 2003. p. 15.
68. HPB. HPB - Produtos. Sertãozinho (SP)2016 [cited 2016 13/11/2016]; Available from: <http://www.hpb.com.br/produtos/>.
69. HPB. COSAN - Sistema tipo "Spreader Stoker" sobre Gelha Pin Hole. Valparaíso (SP)2015 [cited 2016 16/11/2016]; Available from: <http://www.hpb.com.br/produtos/casos/detalhes/cosan-sistema-tipo-spreader-stoker-sobre-gelha-pin/>.
70. TGM. Características das turbinas. Sertãozinho (SP)2015 [cited 2015 27/08/2015]; Available from: <http://www.grupotgm.com.br/produtos.php?id=29>.
71. WEG. Turbogenerador. Local desconhecido2015 [cited 2015 25/08/2015]; Available from: <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geracao-Transmissao-e-Distribuicao-de-Energia/Geradores/Turbogeneradores>.
72. MARRARI. Umidade bagaço de cana. In: Marrari, editor. Curitiba (PR): Catálogo Técnico. 2016. 2 p.
73. MARRARI. Volume - x. In: Marrari, editor. Curitiba (PR): Catálogo Técnico. 2016. 8 p.

74. EL-GUINDY A, RUNZI S, MICHELS K. Optimizing drum-boiler water level control performance: A practical approach [place unknown]: Article. 2014. p. 1675-80.
75. PROCESS E. Transmissores de pressão 3051S da Rosemount. 2016 [cited 2016 26/11/2016]; Available from: <http://www2.emersonprocess.com/pt-br/brands/rosemount/pressure/pressure-transmitters/3051s-series-of-instrumentation/pages/index.aspx>.
76. OGATA K. Engenharia de controle moderno. Nova Iorque - EUA: Livro. Prentice Hall; 2003. 208 p.

APÊNDICE A – CONTROLADOR

O controlador apresentado na dissertação de Franco Jr.¹⁴ será apresentado neste apêndice.

A.1 PONTO DE OPERAÇÃO

É possível representar o ponto de operação da pressão para o modelo através das seguintes equações:

$$p_{min} \leq p \leq p_{max} \Rightarrow p \in [p_{min}, p_{max}]. \quad (A.1)$$

$$p = \alpha_1(p)p_{min} + \alpha_2(p)p_{max}. \quad (A.2)$$

Sendo:

$$\alpha_1(p) + \alpha_2(p) = 1 \Rightarrow \alpha_1(p), \alpha_2(p) \geq 0. \quad (A.3)$$

Prova:

$$p = (1 - \alpha_2(p))p_{min} + \alpha_2(p)p_{max} = \alpha_2(p)(p_{max} - p_{min}) + p_{min}. \quad (A.4)$$

Logo,

$$\alpha_2(p) = \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}}. \quad (A.5)$$

E fazendo a substituição na equação A.3:

$$\alpha_1(p) = 1 - \alpha_2(p) = \frac{p_{max} - p}{p_{max} - p_{min}}. \quad (A.6)$$

Garantindo que α_1 e $\alpha_2 \geq 0$ pois para $p=p_{\max}$ temos $\alpha_1=0$ $\alpha_2=1$ e para $p=p_{\min}$ temos $\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$;

Sejam $a_{ij}(p)$ e $b_{ij}(p)$ os respectivos índices das linhas i e colunas j das matrizes $A(p)$ e $B(p)$, é possível realizar a representação genérica da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} a_{ij}(p) &= a_{0ij}p + b_{0ij}, \\ b_{ij}(p) &= c_{0ij}p + d_{0ij}, \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Considerando a_{0ij} , b_{0ij} , c_{0ij} , d_{0ij} valores constantes de acordo com os valores encontrados nas matrizes $A(p)$ e $B(p)$ é possível substituir os valores em função de α_1 e α_2 :

$$\begin{aligned} a_{ij}(p) &= a_{0ij}(\alpha_1(p)p_{\min} + \alpha_2(p)p_{\max}) + b_{0ij}(\alpha_1(p) + \alpha_2(p)), \\ b_{ij}(p) &= c_{0ij}(\alpha_1(p)p_{\min} + \alpha_2(p)p_{\max}) + d_{0ij}(\alpha_1(p) + \alpha_2(p)). \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Sendo:

$$\begin{aligned} a_{ij}(p) &= \alpha_1(p)(a_{0ij}p_{\min} + b_{0ij}) + \alpha_2(p)(a_{0ij}p_{\max} + b_{0ij}), \\ b_{ij}(p) &= \alpha_1(p)(c_{0ij}p_{\min} + d_{0ij}) + \alpha_2(p)(c_{0ij}p_{\max} + d_{0ij}). \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Considerando:

$$\begin{aligned} a_{1ij} &= a_{0ij}p_{\min} + b_{0ij}, \\ a_{2ij} &= a_{0ij}p_{\max} + b_{0ij}, \\ b_{1ij} &= c_{0ij}p_{\min} + d_{0ij}, \\ b_{2ij} &= c_{0ij}p_{\max} + d_{0ij}. \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

E ainda definindo as matrizes A e B para os valores de $p_{\min}$ e $p_{\max}$ A_1 , A_2 , B_1 e B_2 respectivamente, logo é possível reescrever as matrizes $A(p)$ e $B(p)$:

$$\begin{aligned} A(p) &= \alpha_1(p)A_1 + \alpha_2(p)A_2, \\ B(p) &= \alpha_1(p)B_1 + \alpha_2(p)B_2. \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

Ou

$$\begin{aligned} A(\alpha) &= \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2, \\ B(\alpha) &= \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2. \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Portanto é possível reescrever a equação de estados da seguinte maneira:

$$\dot{x}(t) = (\alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2)x(t) + (\alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2)u(t). \quad (\text{A.13})$$

Recordando que as matrizes A_1 , A_2 , B_1 e B_2 são constantes para a faixa de operação descrita nessa demonstração.

A.2 SISTEMAS LINEARES COM INCERTEZAS POLITÓPICAS

O controlador utilizado foi baseado em desigualdades matriciais lineares, garantindo a estabilidade do sistema através das equações de Lyapunov. As incertezas politópicas irão garantir a faixa de operação da pressão que já foi pré definida pelo fabricante da caldeira. Para isso temos:

$$\dot{x}(t) = A(\alpha)x(t) + B(\alpha)u(t). \quad (\text{A.14})$$

Considerando $x(t)$ o vetor das variáveis de estado, $u(t)$ a entrada de controle e $A(\alpha)$ e $B(\alpha)$ sendo:

$$(A, B)(\alpha) = \sum_{i=1, r} \alpha_i (A_i, B_i), \quad (\text{A.15})$$

Apresentando $A_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $i \in K_r$, no qual $K_r = \{1, 2, 3, \dots, r\}$ e sendo s o número de incertezas da planta¹⁴:

$$\sum_{i=1,r} \alpha_i = 1, \alpha_i \geq 0, \quad (A.16)$$

$$r = 2^s, \quad (A.17)$$

A lei de controle apresentada em Ogata⁷⁶:

$$u(t) = -Kx(t), \quad (A.18)$$

Sendo $K \in \mathbb{R}^{n \times m}$, temos a realimentação de estados através da seguinte equação:

$$\dot{x}(t) = A(\alpha)x(t) - B(\alpha)Ku(t). \quad (A.19)$$

E para a planta em questão temos: $s=1$ e $r=2$:

$$\begin{aligned} A(\alpha) &= \sum_{i=1,2} \alpha_i A_i, \\ B(\alpha) &= \sum_{i=1,2} \alpha_i B_i. \end{aligned} \quad (A.20)$$

A.3 ESTABILIDADE DO SISTEMA

O controlador deve respeitar os parâmetros de estabilidade do sistema, sendo que $dx/dt = (A - BK)x$ se e somente se existir uma matriz de Lyapunov $P = P' > 0$.¹⁴ Tal que:

$$(A - BK)'P + P(A - BK) < 0. \quad (A.21)$$

Aplicando a transformação de congruência na equação anterior:

$$P^{-1}((A - BK)'P + P(A - BK))P^{-1} = P^{-1}A' + A P^{-1} - P^{-1}K'B' - BK P^{-1} < 0. \quad (A.22)$$

e as mudanças de variáveis $W = P^{-1}$ e $Z = KW$, temos:

$$A W + W A' - B Z - Z' B' < 0. \quad (A.23)$$

Através desses cálculos, é necessário que as LMIs respeitem as seguintes equações para garantir a estabilidade do sistema e consequentemente apresentar o ganho do controlador:

$$W > 0, \quad (A.24)$$

$$A W + W A' - B Z - Z' B' < 0, \quad (A.25)$$

$$K = Z W^{-1}. \quad (A.26)$$

Também é possível garantir a estabilidade da malha fechada com o conceito de incertezas politópicas, se existir pelo menos uma matriz simétrica positiva definida W e Z , para todo o valor de $i \in K_r$:

$$A_i W + W A'_i - B_i Z - Z' B'_i < 0. \quad (A.27)$$

A.4 TAXA DE DECAIMENTO

A taxa de decaimento β é diretamente proporcional à velocidade de resposta do sistema às variações da planta, sendo que quanto maior for o parâmetro β ($\beta > 0$), mais rápido será o transitório do processo. A taxa de decaimento é apresentada na equação, satisfazendo toda a trajetória de $x(t)$ ¹⁴.

$$\dot{V}(x(t)) \leq -2\beta V(x(t)). \quad (A.28)$$

É possível inserir a taxa de decaimento nas equações de LMI de estabilidade, para garanti-la com a taxa de decaimento maior ou igual a β .

$$A_i W + W A_i' - B_i Z - Z' B_i + 2\beta W < 0. \quad (\text{A.29})$$

A.5 RESTRIÇÕES DA MATRIZ DE GANHO DO CONTROLADOR

As restrições são colocadas para garantir o desempenho do controlador respeitando os limites impostos e atuando nas entradas do sistema¹⁴.

$$K K' \leq k_m k_x^2 I_m, \quad (\text{A.30})$$

$$\begin{bmatrix} -k_m I_n & Z' \\ Z & -I_m \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{A.31})$$

$$\begin{bmatrix} -k_x I_n & I_n \\ I_n & W \end{bmatrix} > 0 \quad (\text{A.32})$$

Desde que existam $k_m > 0$ e $k_x > 0$ e que as LMIs respeitem as Equações A.29 e A.24.

APÊNDICE B – Variáveis de entalpia e densidade

As tabelas de pressão e temperatura de Mollier contém as propriedades termodinâmicas e de transporte do vapor⁶². Para que seja possível o modelamento matemático do sistema, faz-se necessário o equacionamento do comportamento das variáveis de temperatura, densidade e entalpia do vapor em função da pressão. Utilizou-se os valores descritos na Tabela B.1 aliados a função Basic Fitting do Matlab® para obter as equações.

Tabela B.1 – Variáveis do vapor em função da pressão⁶²

Pressão (MPa)	Temperatura (°C)	ρ_w (Kg/m ³)	ρ_s (Kg/m ³)	h_w (J/Kg)	h_s (J/Kg)
6,5	488	748,7464	19,57667	1232,488	3387,862
6,55	492	747,8348	19,60851	1235,087	3396,906
6,6	496	746,9253	19,64007	1237,675	3405,953
6,65	500	746,018	19,67135	1240,25	3415,003
6,7	504	745,1128	19,70235	1242,815	3424,057
6,75	508	744,2097	19,73307	1245,369	3433,115
6,8	512	743,3086	19,76352	1247,911	3442,177
6,85	516	742,4095	19,7937	1250,443	3451,242
6,9	520	741,5123	19,82362	1252,964	3460,313

Os resultados obtidos estão representados nas Figuras B.1, B.2, B.3, B.4 e B.5, apresentando o valor da Tabela B.1 em forma de losango e a função através de uma linha continua.

Figura B.1 – Gráfico da temperatura em função da pressão

Figura B.2 – Gráfico da densidade específica da água em função da pressão

Figura B.3 – Gráfico da densidade específica do vapor em função da pressão

Figura B.4 – Gráfico da entalpia específica da água em função da pressão

Figura B.5 – Gráfico da entalpia específica do vapor em função da pressão