UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA
AMBIENTAL

DJOLSE NASCIMENTO DANTAS

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
2010

DJOLSE NASCIMENTO DANTAS

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

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos-SP

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D192u Dantas, Djolse Nascimento
 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 / Djolse Nascimento Dantas ; orientador
 Frederico Fábio Mauad. -- São Carlos, 2010.

 Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área
 de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São
 Paulo, 2010.

 1. Biomassa. 2. Cogeração. 3. Meio ambiente.
 4. Termodinâmica. 5. Energia. 6. Exergia. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Engenheiro Químico DJOLSE NASCIMENTO DANTAS.

Dissertação defendida e julgada em 11/03/2010 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **FREDERICO FÁBIO MAUAD** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof.^a Dr.^a **SILVIA AZUCENA NEBRA DE PÉREZ**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **ALDO ROBERTO OMETTO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Associado **EVALDO LUIZ GAETA ESPINDOLA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental

Prof. Titular **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus pais, José Dantas Filho e Djalma Silva Nascimento Dantas, e à minha avó, Maria Madalena da Silva, por todo carinho, incentivo, ajuda e dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me guiar em mais esse caminho e por ter me iluminado permitindo a conclusão de mais essa etapa da minha vida;

Aos meus pais, José Dantas e Djalma por me apoiar e mais uma vez tornar possível mais uma realização;

A minha irmã, Débora pelo amor, paciência e compreensão, pois tivemos que ficar distantes durante todo esse tempo de estudo;

A todos da minha família que torceram, mesmo de longe, pela concretização desta etapa;

Ao Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad pela orientação, confiança e amizade durante os dois anos de desenvolvimento deste trabalho;

À Prof^a Dr. Silvia Azucena Nebra, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, pelas aulas de exergia, por estar sempre disponível esclarecendo todas as minhas dúvidas e por todo o apoio dado;

Ao Daniel, pelo incentivo para vir à cidade de São Carlos, pela companhia durante boa parte do mestrado e pelas palavras que, com sua experiência como pesquisador, me conduziram ao crescimento na área acadêmica;

À Cristiane, minha amiga, que também se permitiu vir a São Carlos e que, com sua companhia diária, me deu forças para permanecer distante da minha cidade;

Aos meninos da UNICAMP, Mauro, Jonathan e Reynaldo pelo acolhimento em Campinas-SP, pela companhia nas aulas da Prof^a. Silvia, e, principalmente, por toda disponibilidade e amizade demonstradas;

Às minhas amigas Tereza de Lisieux, Karla Patrícia e Fernanda Moraes, e ao meu amigo Antônio Esley, que mesmo de longe permaneceram quase que diariamente em minha vida, me apoiando durante esses dois anos;

A todas as amizades que fiz em São Carlos, em especial à Simone Pereira, pela companhia no mestrado, pelo auxílio na definição do tema inicial e por toda sua disponibilidade de ajuda;

Aos professores Dr. Aldo Roberto Ometto (USP) e Dr. José Jailton Marques (UFS) também pela disponibilidade de ajuda e aos meus antigos professores da UFS, pelos seus ensinamentos que garantiram minha formação básica como Engenheira;

Aos professores, técnicos e funcionários do CRHEA, aos amigos do Núcleo de Hidrometria (Victor, Artur, Ivo, Cesinha, Marcus (Doriana), Liliane, Edwardo, André (Pardal), Márcia), em especial ao Renato e ao Gustavo que estiveram sempre dispostos e, como puderam, souberam me ajudar, me dando dicas para conclusão deste trabalho;

Às duas usinas que se disponibilizaram a fornecer os dados para o desenvolvimento deste trabalho e ao Gaspar, pela preocupação e por ter tornado possível a primeira visita técnica a uma das usinas em estudo;

À CAPES, pela bolsa concedida para realização desta pesquisa;

E, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que esse mestrado se completasse.

RESUMO

DANTAS, D. N. **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.** 2010. 127f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Com a necessidade de novos investimentos no setor energético, e o emprego de técnicas que minimizem as agressões ao meio ambiente, a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem se mostrado importante na matriz energética brasileira. Diante da grande concentração de usinas de cana-de-açúcar no interior de São Paulo e considerando que a biomassa proveniente destas agroindústrias vem demonstrando grande importância na produção de energia, foi feita uma análise energética, exergética e ambiental, baseadas nos princípios da Termodinâmica, de sistemas de geração de energia elétrica em sucroalcooleiras do interior paulista. E ainda, foi realizada uma avaliação do melhor sistema de aproveitamento dos subprodutos da cana-de-açúcar proveniente deste setor. Nesse contexto, foram realizados estudos de caso em duas agroindústrias, indicando qual delas apresenta o melhor desempenho no sistema. A que mais se destacou foi aquela que emprega um sistema de alta e média pressão, utilizando-se apenas de duas caldeiras ao invés da outra que contém cinco. Os valores de eficiência energética foram de 82% e 75% para a de melhor e menor desempenho, respectivamente, e de performance exergética, de 31,02% e 26,15%, na mesma ordem. Mostrando, então, a diferença entre a utilização somente da Primeira Lei da Termodinâmica e ao aplicar também o Segundo Princípio para realizar um estudo mais aprofundado e, então, complementá-la. Na análise ambiental foram aplicados indicadores exergéticos que se apresentaram como viáveis instrumentos de avaliação de impacto ambiental, pelos quais foi classificada como sendo a de menor taxa de poluição para a usina que obteve a melhor eficiência termodinâmica na utilização do bagaço como insumo energético.

Palavras-chave: biomassa, cogeração, meio ambiente, Termodinâmica, energia, exergia.

ABSTRACT

DANTAS, D. N. **Use of sugarcane biomass to generate electricity: energetic, exergetic and environmental analysis of cogeneration systems in sugarcane plants in State of São Paulo.** 2010. 127f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Due to necessity of new investments in the energy sector, using techniques that minimize environmental damages, the generation of electricity from renewable sources has shown important in the Brazilian energy matrix. Given the high concentration of sugar and alcohol mills in São Paulo and considering that the biomass from these agro-industries has presented great importance in energy production, it was made an energy, exergetic and environmental analysis, based on the laws of Thermodynamics, on systems of energy generation used in sugarcane industries in São Paulo State. And, it was made an evaluation of the best exploitation system from sugarcane sub-products of this sector. In this context, case-studies were conducted in two sugarcane power plants, denoting which of them had the best performance. The industry that uses a system of high and medium pressure was the plant that stood out, using only two boilers instead of one that uses five. The values of efficiency were 82% and 75% for the one that showed better accomplishment and for plant that produced a lower efficiency, respectively, and exergetic efficiency of 31.02% and 26.15%, in the same order. These results presented the difference between using only the First Law of Thermodynamics and to apply the Second Law also for the purpose of to make a more detailed study in order to complement it. For an environmental analysis, energy indicators were applied and they presented themselves as viable evaluators of environmental impact, which was presented as the lower rate of pollution to the plant that showed the greatest efficiency in the use of bagasse as an energy input.

Keywords: biomass, cogeneration, environment, Thermodynamics, energy, exergy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Oferta interna de Energia no Brasil. Ano base 2008.....	10
Figura 3.2: Oferta interna de energia mundial. Ano base 2006	11
Figura 3.3: Gráfico sequencial das matrizes energéticas brasileiras, tendo como anos bases de 2002 a 2008.	13
Figura 3.4: Gráfico da expansão da produção brasileira do bagaço e da palha da cana, até o ano de 2030.	19
Figura 3.5: Diagrama de um Sistema de Cogeração com Turbinas de Contrapressão.	25
Figura 3.6: Diagrama de um Sistema de Cogeração com Turbinas de Contrapressão e de Condensação	26
Figura 3.7: Diagrama de um Sistema de Cogeração com turbina de extração-condensação.....	27
Figura 5.1: Análise Termodinâmica para caldeiras de bagaço.....	53
Figura 5.1: Representação esquemática do impacto de um processo no meio ambiente	69
Figura 6.1: Gráfico representativo das eficiências de primeira e segunda lei das caldeiras das usinas A e B	77
Figura 6.2: Gráfico representativo das eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas da usina A	82
Figura 6.3: Gráfico representativo das eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas da usina B	82
Figura 6.4: Balanço exergético da planta de cogeração da Usina A.....	92
Figura 6.5: Balanço exergético da planta de cogeração da Usina B.....	92
Figura 6.6: Balanço exergético da planta de cogeração da Usina C.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais culturas agrícolas do Estado de São Paulo.	14
Tabela 3.2 Dados comparativos da produção sucroalcooleira no Brasil e no Estado de São Paulo – safra 2008/2009	14
Tabela 3.3 – Estimativa da oferta da biomassa de cana até o ano de 2030 (em milhões de toneladas)	20
Tabela 3.4 – Limites de emissões de poluentes provenientes da combustão pela queima do bagaço de cana.	31
Tabela 3.5 – Limites máximos de emissão de CO provenientes da combustão pela queima do bagaço de cana.	32
Tabela 4.1 - Parâmetros termodinâmicos fundamentais das caldeiras da Usina A...	47
Tabela 4.2 - Parâmetros termodinâmicos fundamentais das caldeiras da Usina B...	49
Tabela 5.1 - Exergia química específica de algumas substâncias	65
Tabela 6.1 - Fluxos fundamentais obtidos para avaliação do sistema de geração de vapor das usinas	74
Tabela 6.2 – Dados da composição química do bagaço seco em (%).....	75
Tabela 6.3 – Eficiências energéticas e exergéticas das caldeiras e da geração total de vapor em cada usina	76
Tabela 6.4 – Parâmetros dos principais fluxos de vapor do sistema de geração de potência mecânica e elétrica da Usina A.	78
Tabela 6.5 – Parâmetros dos principais fluxos de vapor do sistema de geração de potência mecânica e elétrica da Usina B.	78
Tabela 6.6 – Eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas do sistema de geração de potência da Usina A.	80
Tabela 6.7 – Eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas do sistema de geração de potência da Usina B	81

Tabela 6.8 - Potências calculadas, em função da configuração da planta de cada usina	83
Tabela 6.10 – Fluxos de vapor nas válvulas redutoras e na entrada do desaerador e fluxos de água de reposição e condensado de retorno referente à Usina B.....	85
Tabela 6.11 – Dados comparativos dos índices de desempenho do sistema obtidos..	85
Tabela 6.12 – Fração volumétrica dos componentes dos gases de combustão em base seca e as respectivas temperaturas em Kelvin.....	88
Tabela 6.13 – Fluxos mássicos e exergias do vapor d'água que saem das chaminés das caldeiras.....	89
Tabela 6.14 – Parcelas das irreversibilidades ou exergias perdidas em cada planta...	89
Tabela 6.15 – Valores de exergia de entrada, de saída e da soma das parcelas de destruição e perdas de exergia dos sistemas de cogeração das usinas de cana. ...	91
Tabela 6.16 – Valores da eficiência de segunda lei, da eficiência ambiental e da taxa de poluição global dos sistemas de cogeração das três usinas de cana.....	93

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Análise de Ciclo de Vida

AECV – Análise Exergética de Ciclo de Vida

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

A-REP – Água de Reposição

BEN – Balanço Energético Nacional

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa

CET – Carbon Exergy Tax (Taxa de Exergia do Carbono)

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COP – Conference of Parties (Conferências das Partes)

COPLANA – Cooperativa dos Plantadores de Cana da Zona de Guariba

CR – Condensado de Retorno

CT – Carbon Tax (Taxa de Carbono)

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

DRD – Desaerador

EDIP – Environmental Development of Industrial Products (Desenvolvimento Ambiental de Produtos Industriais)

EES – Engineering Equation Solver

ELCA – Exergetic Life Cycle Analysis (Análise Exergética de Ciclo de Vida)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

Eq. – Equação

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

FUE – Fator de Utilização de Energia

GEE – Gases do Efeito Estufa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEL – Instituto Euvaldo Lodi

IGP – Índice de Geração de Potência

IPE – Índice de Poupança de Energia

LCA – Life Cycle Assesment (Análise de Ciclo de Vida)

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MM – Massa Molar

MME – Ministério de Minas e Energia

N.A. – Não Aplicável

PCI – Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PLT – Primeira Lei da Termodinâmica

RCE – Redução Certificada de Emissões

RPC – Razão Potência Calor

RPEC – Razão de Poupança de Energia do Combustível

SLT – Segunda Lei da Termodinâmica

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção
Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas)

UNICA – União das Indústrias de Cana-de-Açúcar

USP – Universidade de São Paulo

VC – Volume de Controle

VR – Válvula Redutora

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas Maiúsculas

B – Fluxo exergético (kW, MW)

E – Energia (kW, MW)

H – Fluxo entálpico (kW, MW)

I – Irreversibilidade (kW, MW)

P – Pressão (kPa, MPa)

Q – Energia em forma de calor (kW, MW)

R – Taxa, referida a taxa de poluição e taxa de recurso

T – Temperatura (°C ou K)

U – Fluxo de energia interna (kW, MW)

V – Volume

W – Potência (kW, MW)

Z – Fração em massa, referida aos elementos químicos presentes no bagaço

Letras Latinas Minúsculas

b – exergia específica (kJ/kg)

f – fração molar

h – entalpia (kJ/kg)

m – fluxo de massa (kg/s)

s – entropia específica (kJ/kg.K)

Letras Gregas

η - eficiência

ψ - eficiência de segunda lei

σ - entropia do volume de controle

Δ - referido à variação de algum parâmetro

β - coeficiente função das frações em massa dos componentes químicos do bagaço

Sobrescritos e Subscritos

° - padrão, referente à exergia química-padrão

0 – estado de referência

aa – água de alimentação

amb – ambiental

bag – bagaço

cald – caldeira

calor_cald – calor perdido na caldeira

calor_eco – calor perdido no economizador

calor_pré-ar – calor perdido no pré-aquecedor de ar

comb – combustível

desat. – desativação

e – referente à entrada

eco – economizador

el – elétrica

exhaust - exaustores

f – fornecido

fis – físico

g – gases de combustão

gs – gases de escape

gv – gerador de vapor

II – referente à segunda lei

iso – isentrópico

mec – mecânica

p – palha

pol, fis – poluição física

pol, qui – poluição química

pol,t – poluição total

pré-ar – pré-aquecedor de ar

prep. – preparação

qui – químico

qui_el – elemento químico

rec – recurso

rec. nat. – recursos naturais

s – referente à saída

t – total

term – térmica

turb – turbinas

v – vapor

vc – volume de controle

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo Geral	5
2.2. Objetivos Específicos	5
3. REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1 O Desenvolvimento Sustentável e a Biomassa para Geração de Energia...	6
3.2 O Setor Sucroalcooleiro no Brasil e no Estado de São Paulo	11
3.3 Cogeração na Indústria de Cana-de-Açúcar	15
3.4 Sistemas e Equipamentos para Cogeração	20
3.5 Emissões e Legislação	29
3.6 A Termodinâmica	33
3.6.1 Análise Energética e Exergética	34
3.6.2 Exergia como indicador de impacto ambiental	41
4. LOCAL DE ESTUDO	45
4.1 Desenvolvimento do Projeto	45
4.2 Caracterização dos Sistemas de Cogeração das Usinas Analisadas	45
4.2.1 Usina A	46
4.2.2 Usina B	48
5. METODOLOGIA	51
5.1 Análise Energética e Índices de Desempenho Baseados na Primeira Lei da Termodinâmica	52
5.2 Análise Exergética e Índices de Desempenho Baseados na Segunda Lei da Termodinâmica	58
5.2.1 Cálculo das exergias específicas dos principais fluxos do sistema	59

5.2.2 Exergia do Vapor e da Água.....	61
5.2.3 Exergia do Combustível.....	61
5.2.4 Exergia do ar e dos gases de combustão.....	63
5.2.5 Eficiências de Segunda Lei.....	66
5.3 Análise Ambiental Utilizando Indicadores Exergéticos.....	68
6. RESULTADOS.....	73
6.1 Análise Energética e Exergética dos Sistemas de Cogeração das Usinas.....	73
6.2 Análise Ambiental das Plantas de Cogeração Utilizando Indicadores Exergéticos	87
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	94
REFERÊNCIAS.....	94

1. INTRODUÇÃO

A busca por melhorias nos sistemas energéticos existentes e a procura por novas fontes de produção de energia têm sido cada vez mais expressivas. Isso devido à preocupação gerada pelas graves consequências que os gases do efeito estufa têm provocado ao meio ambiente e ao grande crescimento da demanda da população mundial pelo consumo de energia. A crise energética ocorrida no Brasil em 2001 evidenciou o descompasso entre essa demanda e a oferta de recursos (ARAÚJO, 2001) e, por isso, essa conturbada fase ofereceu ao país a oportunidade de realizar novos investimentos no setor energético.

Muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas, nesse sentido, cujo interesse comum é o de associar a busca pela produtividade energética e garantir a sustentabilidade, reduzindo ao máximo os impactos ao meio ambiente. Tanto no mercado internacional como no Brasil, a biomassa tem sido considerada como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e diminuição da utilização dos combustíveis fósseis (CENBIO, 2001).

Atualmente essa matéria-prima é avaliada como uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos (MME, 2009). E no Brasil, a fonte que tem se destacado é a biomassa da cana-de-açúcar, que além do seu crescente destaque na produção de etanol, seus subprodutos, o bagaço e a palha da cana, assim como a maioria dos resíduos de biomassa obtidos nas atividades agrícolas e industriais, possuem elevados teores de materiais lignocelulósicos (DIAS et al., 2009), fazendo com que se tornem matérias-primas capazes de produzir energia.

Atualmente parte do resíduo é utilizada para geração de energia térmica e elétrica em sistemas de cogeração nas usinas de açúcar e álcool (GOMAZAKO; OLIVEIRA, 2007). A maioria das sucroalcooleiras brasileiras e quase todas as usinas de cana instaladas no interior do Estado de São Paulo possuem o sistema de cogeração já otimizado com o processo convencional de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar (LEME, 2005). Assim, todas elas possuem auto-suficiência

energética, sendo que algumas produzem excedentes de eletricidade para serem vendidos às concessionárias de energia elétrica estaduais.

Segundo o Centro de Tecnologia Canavieira, a biomassa cana-de-açúcar pode ainda adquirir uma maior importância em termos energéticos, econômicos e ambientais (CTC, 2005). Por isso, tem sido crescente a busca pela melhoria desses sistemas. Para avaliação, tanto desses excedentes como da eficiência dos processos de produção de energia, é comum utilizar os fundamentos da Termodinâmica, que é a ciência que envolve qualquer transformação de energia (MORAN; SHAPIRO, 2002).

Tida como a ciência que estuda as relações entre o calor trocado e o trabalho realizado num determinado processo físico que envolve a presença de um corpo e/ou sistema e o meio exterior, a Termodinâmica possui leis que permitem a quantificação e verificação da qualidade da energia gerada em um processo, buscando explicar a eficácia dos sistemas que envolvem transformações energéticas.

A maneira mais clássica de determinar o desempenho térmico de sistemas é através da utilização da primeira lei da termodinâmica (HORLOCK, 1997), que permite definir o desempenho de cada equipamento e o desempenho global do sistema.

Mas, quando se fala no primeiro princípio, traduz-se que está se tratando apenas dos princípios da conservação da massa e da conservação da energia, pelos quais se afirma que nada se cria e nada se perde, tudo se transforma. No entanto, em todo processo ocorrem perdas, o que impossibilita usar e reutilizar a mesma energia inúmeras vezes em processos de conversão de energia (OMETTO, 2005). Por isso a necessidade da segunda lei, pois permite avaliar a transformação de toda a quantidade de energia de um sistema que esteja em desequilíbrio físico-químico com o ambiente em trabalho mecânico.

Para Rezac e Metghalchi (2004), não é energia a palavra certa para a potência adquirida em sistemas de conversão. De acordo com estes pesquisadores, o termo mais adequado seria exergia, pois se define como a máxima quantidade de energia útil que pode ser obtida de um desequilíbrio entre um sistema e o meio de

referência estabelecido. O conceito de exergia é a ferramenta que cientistas e engenheiros utilizam para contabilizar as ineficiências e perdas dos sistemas, assim como para dar uma visão dos melhoramentos que poderiam ser efetuados sobre o mesmo.

Segundo Ayres, Ayres e Martinàs (1996), a análise exergética de um sistema termodinâmico consiste, fundamentalmente, na identificação e quantificação das irreversibilidades do sistema com aplicação das exergias de entrada (insumos) e de saída (produto e rejeitos) e no cálculo da eficiência exergética. Pela segunda lei, que complementa a primeira, além de possibilitar a visualização também das perdas em um determinado processo, permite quantificar a energia disponível que pode ser usada em um processo mecânico (TORRES, 1999).

Toda energia dissipada que se acumula no ambiente pode ameaçar o ecossistema poluindo e/ou degradando-o. Entretanto, como descrito em Ometto (2005), por esta lei torna-se possível quantificar os fluxos naturais em termos ecológicos, pois trata da qualidade de energia em termos de trabalho útil, propriedade que depende das características físico-químicas de equilíbrio com o meio.

Pelo que estabelece a Resolução CONAMA 01, de 23 de janeiro de 1986 (BRASIL, 1986), apesar da exergia não satisfazer todos os itens necessários para uma análise ambiental completa, ela se apresenta como ferramenta bastante útil e importante para que seja quantificada parte do impacto ambiental ocasionado por um efluente. Pois, como observado por Cornelissen (1997), a análise exergética é um dos ícones para obtenção do desenvolvimento sustentável.

Bejarano (2004) explica que a exergia é apropriada e utilizada como um instrumento comum da qualidade da matéria-prima e dos fluxos, e como uma ferramenta adequada para medições da quantidade desperdiçada e de seu potencial para causar prejuízos ambientais. Diante disso, viabiliza-se um estudo qualitativo da cogeração de energia através das duas leis da termodinâmica, aplicando ainda o estudo da influência da eficiência do processo de cogeração na emissão de gases agressivos ao meio ambiente.

Nessa linha de pesquisa e com a finalidade de avaliar a eficiência dos sistemas de cogeração instalados no setor sucroalcooleiro paulista atual, onde se utilizam da biomassa da cana-de-açúcar como insumo do processo, foram propostos os objetivos definidos para o desenvolvimento desse estudo. Utilizando, desta maneira, além da análise energética, a exergia, por ser uma medida da diferença do estado do sistema em relação ao ambiente (ROSEN; DINCER; KANOGLU, 2008).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo comparativo, em termos energéticos, exergéticos e ambientais, da eficiência de sistemas de cogeração utilizados no setor sucroalcooleiro, onde é utilizada a biomassa da cana (bagaço e/ou palha) como fonte de produção de energia, considerando como estudos de caso duas usinas de cana-de-açúcar instaladas no interior do Estado de São Paulo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Através da literatura, reunir dados atuais sobre a contribuição do setor sucroalcooleiro paulista no sistema energético brasileiro, dando ênfase ao uso dos derivados da cana para geração de energia elétrica;
- Aplicar a Termodinâmica como ferramenta para a avaliação de duas agroindústrias canavieiras do interior paulista e comparar os resultados com outros estudos que envolvem eficiência energética e exergética em sistemas de cogeração pelos quais se utilizam caldeiras alimentadas por bagaço;
- Mostrar uma metodologia de avaliação ambiental através da exergia, ao utilizar seus indicadores exergéticos e, ao aplicá-los nos estudos de caso, estudar a relação entre essa ferramenta e o meio ambiente;
- Quantificar a exergia dos gases de combustão emitidos, provenientes dos processos de conversão de energia em estudo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA.

Criado pelas Nações Unidas, no início da década de 70, devido a uma série de preocupações com os problemas ambientais decorrentes dos processos de crescimento e desenvolvimento, o desenvolvimento sustentável é tido como o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações (BEZERRA; BURSZTYN, 2000; BRÜSEKE, 2003; CAMARGO, 2002; CAVALCANTI, 2003).

De acordo com Barbieri (2005), o interesse em discutir e propor meios de harmonizar o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental deu-se lentamente e de modo muito diferenciado em uma época que já se cogitavam urgências de medidas de escassez dos recursos naturais. A carência de água potável, ar puro, solo com qualidade para plantio e produção de alimentos devido ao excesso de lixo urbano, aquecimento global e o excessivo consumo de bens materiais são citados, pela última referência, como exemplos destes recursos.

A partir de meados da década de 80, surgiram algumas dificuldades também no setor energético brasileiro, que desde então entrou em uma fase de reestruturação e que ainda tem provocado algumas alterações em vários e diferentes setores (PRIETO, 2003). Dificuldades tais que em 2001 provocou uma crise energética que marcou a história dos brasileiros.

Tolmasquim (2000) já destacava como principais causas desta conturbada fase, o aumento do consumo de energia nos dois anos anteriores à referida data e a escassez das chuvas, que deixaram de abastecer os reservatórios das principais hidrelétricas brasileiras. Evidenciando, assim, a falta e a insuficiência de

investimentos no setor energético brasileiro, que devido à crise incentivou o país na busca de novas e diferentes alternativas de produção de energia.

Um dos métodos mais utilizados neste setor, principalmente pelos países que não possuem recursos hídricos nem outras fontes renováveis, é o emprego de combustíveis fósseis (MENEGUELLO; CASTRO, 2007). Prática que vem intensificando a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera e aumentando os problemas relacionados ao efeito estufa.

Para um maior controle dessas emissões, foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas – *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) – na qual seus membros se reúnem para discussões sobre o tema nas Conferências das Partes (*Conference of Parties* – COP) (ROCHA; MELLO, 2004). A última referência afirma que, dentre todas, a que mais se destacou foi a que ocorreu em Kyoto, no Japão, em 1997

Nesta reunião foi criado o Protocolo de Kyoto, que determinou a redução dos Gases do Efeito Estufa (GEE) nos países industrializados como medida contra o aquecimento global do Planeta (ROCHA; MELLO, 2004). Neste Protocolo está descrito, em seu artigo 12, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que apresenta uma proposta para que cada tonelada de CO₂ retirada ou deixada de ser emitida na atmosfera, em projetos instalados para países em desenvolvimento, possa ser negociada no mercado internacional com uma Redução Certificada de Emissões (RCE) ou um crédito de carbono (OLIVEIRA, 2007).

À procura de fontes mais eficientes e menos impactantes, o mundo tem buscado novas e diferentes alternativas, e vem procurando priorizar as mais limpas. Como resultado, as que mais têm se destacado são as fontes ditas como renováveis, que em pesquisas do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos feitas em 2001, já se destacava em sua crescente utilização no mundo como insumo energético (CGEE, 2001).

Como uma fonte de energia primária, a biomassa é tida como uma das principais responsáveis pela energia consumida nos países em desenvolvimento. Segundo Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005) esta fonte renovável possui escala de produção de energia suficiente para desempenhar um papel expressivo no

desenvolvimento de programas de energias renováveis e na criação de uma sociedade ecologicamente mais consciente.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define a biomassa como todo recurso renovável constituído principalmente de substâncias de origem orgânica (de origem vegetal ou animal) (ANEEL, 2005). Tem sido usada de forma crescente no mundo como insumo energético, muito mais para usos finais como energia térmica, mas já com destaque como geradora de energia elétrica, e de forma também crescente como origem de combustíveis líquidos (BARROS, 2007). Para o último caso, temos como exemplo, o etanol.

O termo biomassa se destaca com o uso da matéria vegetal criada pela fotossíntese a partir de seus derivados. Lora (1997), em seu trabalho sobre conservação de energia elétrica no meio rural, explica que tais derivados abrangem os resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos domésticos e municipais.

Ainda de acordo com a mesma referência, essa fonte energética pode ser dividida em duas categorias: a biomassa tradicional, como é o caso da lenha, carvão vegetal, palha e casca de arroz, resíduos vegetais e animais, e a biomassa moderna, que se trata dos resíduos da utilização industrial da madeira, bagaço de cana, culturas energéticas e resíduos urbanos.

Dentre as formas de energia renovável, a oriunda da biomassa é uma das mais utilizadas no mundo. Estima-se que seu consumo atual esteja entre 10% e 14%, é o que afirma Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005). Segundo estes autores, o papel da energia da biomassa tem se transformado rapidamente devido a vários aspectos, e os que têm se destacado são os fatores ambientais, energéticos, climáticos, sociais e econômicos. Por essas e outras razões, sua importância cresce significativamente em muitos países industrializados.

Nos países em desenvolvimento, a produção de energia elétrica a partir da biomassa, tem sido bastante defendida (BARROS, 2007). Alguns programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas, o que não tem sido diferente no Brasil, onde há vários anos tem sido crescente a aplicação de tecnologias para a utilização da biomassa como fonte

geradora de energia, gerando empregos e com muito pouco recurso financeiro (FIESP, 2001).

Lora e Teixeira (2001) apresentam algumas vantagens do uso da biomassa como combustível, quando comparados com a utilização de combustíveis fósseis. Como vantagens os autores apresentam o fato de ser uma fonte de energia renovável, possuir baixo custo de aquisição e o de suas emissões líquidas de CO₂ serem baixas. Da mesma forma, afirma que as emissões de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e particulados são muito menores que as emissões provocadas no uso de óleo combustível e carvão mineral.

Como desvantagens, a última referência aponta alguns fatores principais, tais como: menor poder calorífico; maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera, o que significa maior custo de investimento para a caldeira e os equipamentos para remoção de material particulado e dificuldades no estoque e armazenamento.

Atualmente a utilização de biomassa para produção de energia, tanto elétrica como em forma de vapor, em caldeiras ou fornos já é uma realidade no Brasil e tem sido bastante expressiva quanto ao crescimento e desenvolvimento do setor (GRAUER; KAWANO, 2001). Diversas fontes renováveis de biomassa são conhecidas, tais como: lenha, carvão vegetal, babaçu, óleos vegetais, sisal, biogás, casca de arroz e resíduos vegetais, como é o caso da biomassa da cana-de-açúcar.

Dentre estes, os combustíveis mais comuns, são os resíduos agrícolas, madeira e plantas como a cana-de-açúcar, que são colhidos com o objetivo de produzir energia. O lixo municipal pode ser convertido em combustível para o transporte, indústrias e mesmo residências. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2009), nos resultados preliminares do Balanço Energético Nacional 2009, a cana-de-açúcar tem se destacado significativamente com seu crescimento na Matriz Energética Brasileira.

Ainda segundo o MME (2009), as últimas pesquisas da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em 2008, os seus derivados atingiram a segunda posição dentre os mais energéticos, ficando com 16,4% na composição das fontes primárias de energia, superando assim, a energia hidráulica, que apresentou 13,8%. Essa fonte

perdeu em números apenas para oferta de energia do petróleo e seus derivados, que ocupa o primeiro lugar, com 36,7% da utilização de energia no Brasil (MME, 2009). As Figuras 3.1 e 3.2 a seguir mostram, respectivamente, as matrizes energéticas brasileira e mundial, tendo a primeira como base o ano de 2008 e a outra o ano de 2006.

Figura 3.1: Oferta interna de Energia no Brasil. Ano base 2008. (MME, 2009)

Em que:

* As duas parcelas representam a fração total de biomassa de 31,5%.

Os resultados que envolvem a cana-de-açúcar abrangem tanto a produção de biocombustível (o etanol), como a produção de energia elétrica através da cogeração, que é o sistema já adotado pela maioria das usinas sucroalcooleiras espalhadas no território brasileiro, e em quase todas as agroindústrias distribuídas no interior do Estado de São Paulo (LEITE et al., 2003).

No mundo, a oferta de biomassa é crescente, mas ainda é baixa, e menor ainda a disponibilidade de derivados da cana, que está inclusa na parcela de 2,2%

de Biomassa Moderna e outras. O que se destaca é o uso do petróleo, carvão mineral, gás natural e derivados, como apresenta a Figura 3.2.

Figura 3.2: Oferta interna de energia mundial. Ano base 2006. (ANEEL, 2007; MME, 2007a)

3.2 O SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL E NO ESTADO DE SÃO PAULO

Como afirmado no item anterior, a biomassa tem sido usada de forma crescente no mundo como insumo energético, tanto para usos finais como energia térmica, como geradora de energia elétrica e produtora de combustíveis líquidos. Nesse contexto, o setor sucroalcooleiro vem apresentando especial destaque.

Introduzida no Brasil pelos portugueses no início do século XVI, a cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum L.*), principal matéria-prima do setor, tem sido utilizada quase que integralmente para geração dessas três formas de energia. O

elevado potencial de geração de energia a partir de sua biomassa tem provocado crescentes buscas por opções diferenciadas do completo aproveitamento dessa matéria-prima.

Do seu processo industrial obtém-se o açúcar e suas derivações: o álcool combustível e o álcool comum utilizado em bebidas alcoólicas e para limpezas domésticas (etanol na forma hidratado e anidro), o vinhoto e a levedura de cana. Além disso, o bagaço e a palha da cana, que eram considerados como resíduos industriais têm sido hoje utilizados também como produtores de energia térmica e elétrica em sistemas de cogeração instalados na maioria das sucroalcooleiras distribuídas pelo Brasil e estão com potencialidade em estudo para produção do etanol celulósico, mais conhecido como etanol de segunda geração (DIAS et al., 2009).

Ribeiro e Morelli (2009) mostram que processos de reutilização e reaproveitamento de resíduos como estes economizam recursos naturais e reduzem os impactos ambientais ao serem utilizados em seu processo produtivo, quando comparados aos processos que utilizam matérias-primas virgens.

Como uma das mais importantes culturas agrícolas brasileiras, a cana apresenta um ciclo produtivo de cinco anos, com possibilidade de cinco cortes e um rendimento médio de 85 toneladas por hectare, podendo variar de 65 até 120 toneladas por hectare (SCARPINELLA et al., 2009). Segundo Jank (2007), cada tonelada colhida e processada nas usinas pode gerar até 82 litros de álcool combustível ou 138 quilos de açúcar.

Andreolli (2008) complementa essa informação, pois apresenta que a cada tonelada de cana é possível ainda gerar aproximadamente 250 kg de bagaço úmido (50% b.u.) e, por dados da União das Indústrias de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2009), em média 204 kg de palha e pontas.

A Figura 3.3 apresenta um gráfico, mostrando uma sequência das matrizes energéticas brasileiras de oferta de energia interna, do ano de 2002 até 2008, obtida através dos resultados dos balanços energéticos nacionais, do Ministério do Meio ambiente, até os resultados de 2009. Por ele, pode-se verificar a redução da oferta

do petróleo e seus derivados e o crescimento na disponibilidade de utilização da biomassa da cana-de-açúcar nos últimos anos.

Figura 3.3: Gráfico sequencial das matrizes energéticas brasileiras, tendo como anos bases de 2002 a 2008. (MME, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007a, 2008, 2009)

Por essas razões, essa matéria-prima coloca o Brasil em destaque no mercado internacional como o segundo maior produtor de etanol (ANEEL, 2005).

O Estado de São Paulo produziu, na safra 2008-2009, cerca de 20 bilhões de litros de etanol (consumo interno mais exportações). Nessa mesma safra, foi o responsável por aproximadamente 61% da produção total brasileira de etanol. Havendo também um aumento na demanda de energia elétrica cogerada a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar (UNICA, 2009).

Dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2009), indicam haver no Brasil 423 usinas sucroalcooleiras cadastradas no Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia. Deste montante, 16 usinas são produtoras de açúcar, 159 de álcool e 248 mistas (produção de açúcar e álcool). São Paulo, por sua vez possui 195 usinas cadastradas, pelas quais 61 são produtoras de álcool, 6 (seis) são produtoras de açúcar e o restante (128), usinas mistas.

De acordo com Jank (2007), a safra de cana de 2006-2007 no Estado de São Paulo gerou aproximadamente 260.000 empregos diretos, entre trabalhadores na colheita manual, colheita mecânica e indústria sucroalcooleira. O que pode ser explicado pelo fato de que dentre todas as culturas agrícolas do Estado de São Paulo (temporárias e permanentes), a cana-de-açúcar é a que mais se destaca em termos de produção (SCARPINELLA et al., 2009).

Segundo a última referência, somente em área cultivada, são utilizados quase quatro milhões de hectares apenas para a cana-de-açúcar, enquanto que todas as outras culturas agrícolas existentes em São Paulo (aproximadamente 40) somam uma área de 759.864 hectares. A Tabela 3.1 apresenta as culturas agrícolas mais expressivas em termos de área cultivada do Estado de São Paulo.

Tabela 3.1 – Principais culturas agrícolas do Estado de São Paulo.

CULTURA AGRÍCOLA	ÁREA CULTIVADA (ha)
Cana-de-açúcar	3.890.414
Milho	904.147
Laranja	584.096
Soja	475.973
Café	207.914
TOTAL	6.062.544

Fonte: IBGE (2007)

Muitos outros dados mostram a elevada produção do Estado de São Paulo, quando comparado aos outros lugares do Brasil. A Tabela 3.2 resume essa diferença com os principais números na safra de 2008/2009.

Tabela 3.2 Dados comparativos da produção sucroalcooleira no Brasil e no Estado de São Paulo – safra 2008/2009

DESCRIÇÃO	BRASIL	SÃO PAULO
Usinas de cana-de-açúcar cadastradas	423	195
Moagem de cana (em milhões de tonelada)	569	346
Produção de açúcar (em milhões de toneladas)	31,05	19,66
Produção de álcool anidro (em milhões de litros)	9,34	6,01
Produção de álcool hidratado (em milhões de litros)	18,17	10,72
Produção total de etanol (em milhões de litros)	27,51	16,72

Fonte: UNICA (2009)

3.3 COGERAÇÃO NA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR

O sistema de cogeração é o principal responsável pelo suprimento de energia térmica e eletromecânica nas usinas de cana-de-açúcar espalhadas pelo mundo. Como descrito em Costa e Balestieri (1998) a cogeração é um processo no qual uma fonte de energia primária alimenta uma máquina ou aparelho térmico que, pela reação de combustão, transforma a energia química do combustível em mecânica de eixo, que é convertida em energia elétrica por meio de geradores elétricos.

Existem várias definições para o termo. Moran e Shapiro (2002) tratam-no como o método que produz sequencialmente potência (energia elétrica e/ou mecânica) e transferência de calor (energia térmica ou vapor de processo) para certo uso. Já Lozano (1998) define-o como a produção conjunta, em processo seqüencial, de energia elétrica ou mecânica e de energia térmica útil, partindo de uma mesma fonte de energia primária.

Dessa forma, pode-se afirmar que um dos principais objetivos desse princípio é usar um sistema integrado para desenvolver a potência e transferência de calor com um gasto menor que o necessário para desenvolver as duas quantidades separadamente (GABRIEL FILHO et al., 2007).

Os primeiros sistemas de cogeração passaram a ser instalados ao redor do mundo a partir da primeira década do século XX (GOMAZAKO; OLIVEIRA, 2007). Segundo estes autores, diante da necessidade de independência energética, por causa das crises sistêmicas que passaram a ser comuns no setor energético, a geração de energia elétrica logo passou a ser uma prática adotada pela agroindústria sucroalcooleira. Tal prática iniciou-se pela queima do bagaço.

A importância da cogeração enquanto medida de eficiência energética levou a União Europeia a estabelecer como meta para 2010 os 18% de energia cogorada (SELF ENERGY, 2008). O Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), aponta que em países como Holanda ou Finlândia, esta forma de produção de energia já representa mais de 40% da potência instalada (INEE, 2007). Em Portugal, o Plano Nacional de Alterações Climáticas aprovado em 2004 estabelece que a potência proveniente da cogeração a instalar até 2010 deve ser de aproximadamente 800 Megawatts (SELF ENERGY, 2008).

No Brasil, a cogeração é uma prática tradicional há alguns anos. O que tem mudado é a eficiência com que os seus resíduos vêm sendo utilizados (RAMOS et al., 2003). Inicialmente, a cogeração chegou a ser muito utilizada pelas indústrias, época em que foram adaptados modelos tecnológicos com emprego preferencial de energia proveniente de combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo (SCHIRMER, 2006).

Mas logo a cogeração ficou limitada a sistemas isolados e a indústrias com lixos combustíveis, pois esse sistema acabou perdendo a competitividade para a eletricidade produzida pelas grandes concessionárias (SCHIRMER, 2006). De acordo com Ramos et al. (2003), as caldeiras eram consideradas verdadeiros incineradores e a ineficiência tecnológica, tanto do ponto de vista da transferência de calor, como dos sistemas de recuperação e aproveitamento efetivo do vapor, gerava um consumo exagerado de vapor no processo.

Schirmer (2006) explica ainda que, a partir daí algumas usinas e destilarias passaram por uma fase de transição, acompanhadas por uma redução no consumo de energia térmica nos processos. Contudo, juntamente com a necessidade de reduzir emissões de CO₂, um novo modelo no setor elétrico voltou a estimular a produção de energia elétrica local que fosse mais eficiente e com custos reduzidos

que beneficiasse não só as usinas de grande, mas também as de pequeno e médio porte.

Vieira e Oliveira Júnior (1998), a partir de suas análises termoeconômicas de sistemas de cogeração e geração termoelétrica, concluíram que uma maior utilização dos sistemas de cogeração na matriz energética brasileira traria apenas benefícios no que diz respeito à redução do consumo de combustível e à diminuição dos contaminantes atmosféricos, que levaria, como consequência, a redução dos custos dessas emissões.

Concluíram ainda a viabilidade de tais sistemas em termos técnicos e econômicos por possuir um menor tempo de retorno do projeto, permitir a geração de excedentes de energia elétrica para venda, além do benefício do auto-suprimento. Dados da ANEEL (2005), apontam que cada tonelada de cana processada requer em média cerca de 12 MWh de energia elétrica, o que é facilmente gerado nos sistemas convencionais de cogeração instalados nessas usinas (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

As indústrias que exploram mais intensamente a comercialização de excedentes de energia planejam a expansão futura da atividade sucroalcooleira de forma a disponibilizar mais energia no futuro. As razões indicadas pelas usinas foram os aumentos do preço da energia vendida pelo governo, que incitaram as usinas à auto-suficiência e a valorização do bagaço para a venda e para outros fins (BALBO, 1990).

A grande maioria dessas indústrias hoje é auto-suficiente em suas demandas térmica e eletromecânica, havendo usinas produtoras de excedentes de energia elétrica, que são exportados para a rede de transmissão de eletricidade (LEME, 2005). Neste sentido, a geração de energia elétrica atual proveniente do setor sucroalcooleiro, encontra-se muito abaixo de seu potencial, quando comparados aos países industrializados (BARJA, 2006).

De acordo com Souza (2003), utilizando-se das tecnologias disponíveis de cogeração a partir do bagaço para produção de excedentes de energia por parte das usinas paulistas, seria capaz de suprir o déficit de toda região sudeste devido o racionamento durante a crise de 2001 e 2002. Com isso, o último autor explica que,

as empresas passaram a focar a cogeração também como mais uma opção de lucros, junto com o açúcar e o álcool.

A partir de dados do MME (2007b), obtêm-se que a potência instalada em 2007 no Brasil para geração de eletricidade a partir da biomassa de cana era de 2.822 MW, em um pouco mais de 250 usinas. Esse valor representa aproximadamente 14% da capacidade termelétrica do país.

Em um estudo feito pelo Instituto Euvaldo Lodi (IEL, 2008), em parceria com a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e a Itaipu Binacional, apresentou que a biomassa da cana tem condições de adicionar ao sistema elétrico brasileiro até 2020 aproximadamente 15 mil megawatts (MW) de eletricidade, o que seria equivalente a incorporar uma nova Itaipu ao parque gerador nacional. Tais dados mostram que o setor poderá vir a contribuir para suprir a crescente demanda por energia no País.

Para cogerar energia a partir destes insumos, utiliza-se um sistema que caldeiras e turbinas trabalham seqüencialmente com os geradores de energia elétrica. Atualmente, quase todas as usinas e destilarias brasileiras possuem sistemas de geração de vapor, que operam em cogeração queimando o bagaço, e algumas delas já vêm adicionando a palha, devido ao seu elevado potencial energético (DANTAS; MAUAD; OMETTO, 2009). O bagaço ainda é utilizado em quantidade muito superior que a palha, pois a maior parte da palha fica no campo e mais da metade é aproveitada como adubo.

Mas, pela lei estadual nº 11.241 de 2002 do Estado de São Paulo, até 2021 será proibida a queima da palha da cana na área mecanizável, e até 2031 na área não mecanizável (SÃO PAULO, 2002). Mas, o governo do Estado assinou um Protocolo Agroambiental se comprometendo em sanar essa queima até 2014 na área mecanizável e até 2017 na área onde não é possível o trabalho com máquinas (COPLANA, 2008). Com isso, sobrarão muita palha e a tendência é que a disponibilidade e utilização deste insumo para geração de energia aumente ao longo dos próximos anos.

A Figura 3.4 apresenta uma estimativa feita pelo Ministério do Meio Ambiente do aumento da produção da biomassa da cana nos próximos anos, até 2030, e do total, o quanto de bagaço e o quanto de palha poderão ser produzidos. A Tabela 3.3

apresenta uma estimativa feita pelo mesmo órgão da oferta da biomassa de cana também até 2030.

Figura 3.4: Gráfico da expansão da produção brasileira do bagaço e da palha da cana, até o ano de 2030. (MME,2007b)

Tabela 3.3 – Estimativa da oferta da biomassa de cana até o ano de 2030 (em milhões de toneladas)

DESCRIÇÃO	2005	2010	2020	2030
Produção de cana				
Total	431	516	849	1140
Biomassa produzida				
Total	117,8	141,9	233,5	313,5
Bagaço seco	57,8	69,7	114,6	153,9
Palha seca	60	72,2	118,9	159,6
Biomassa ofertada				
Total	57,8	73,3	132,3	185,8
Uso do Bagaço	100%	100%	100%	100%
Recuperação da palha	0,0%	5,0%	14,9%	20,0%
Destinação da biomassa				
Produção de etanol	0	0,3	17,7	18,7
Produção de eletricidade	57,8	73	114,6	167,1

Fonte: MME (2007b)

Pela Tabela 3.3, pode-se verificar que há uma tendência de que a maior parte do bagaço produzido e da palha recuperada seja destinada à produção de eletricidade, deixando implícito que, com a melhoria dos sistemas de cogeração existentes, poderá ocorrer um aumento considerável da oferta de eletricidade por parte das usinas sucroalcooleiras.

3.4 SISTEMAS E EQUIPAMENTOS PARA COGERAÇÃO

Com a expansão do setor sucroalcooleiro, novas e modernas tecnologias vêm sendo adotadas, inclusive em seus sistemas de cogeração. Esses sistemas e equipamentos para geração distribuída têm atraído muitos investimentos em

pesquisas e em muitos fabricantes que atualmente oferecem tecnologias competitivas para sua implantação e melhoria (FIOMARI et al., 2006).

Gabriel Filho et al. (2007) descrevem que, atualmente, os sistemas de cogeração mais utilizados são as turbinas a gás, turbinas a vapor, motor alternativo e célula a combustível. Segundo os últimos autores, são diferenciados entre eles pela relação entre as necessidades em energia térmica e elétrica, os custos de instalação e operação e os níveis de emissões e ruídos.

Para classificar os sistemas de cogeração, pode-se afirmar que são separados basicamente em dois grandes grupos, que se diferenciam em função da sequência de utilização da energia, podendo ser de ciclo *"topping"* ou ciclo *"bottoming"* (PRIETO, 2003). A última referência explica a diferença entre eles:

- O primeiro é usado primeiramente na produção de energia elétrica (ou mecânica) em turbinas ou motores a gás, e o calor rejeitado é recuperado para o sistema térmico. São requeridas temperaturas médias ou baixas, por isso possui uma grande variabilidade de aplicações;
- Ao contrário do que se aplica para os ciclos *"topping"*, os sistemas com ciclo *"bottoming"* são caracterizados por produzir primeiramente vapor, que é então utilizado para produção de energia mecânica (e/ou elétrica) em turbinas a vapor e depois repassadas ao processo. Esse ciclo é geralmente empregado na indústria química, onde o resíduo energético na forma de calor pode atingir temperaturas muito altas favorecendo a conversão. Neste caso, os ciclos a vapor são os mais frequentemente utilizados.

Existem várias tecnologias empregadas aos sistemas de cogeração, e dentre elas, vários ciclos, tais como a cogeração com turbinas a vapor, com turbinas a gás, que envolve ciclos de turbina a gás com injeção de vapor, ciclos combinados e ciclos de turbinas a gás com recuperação química e ainda a cogeração com motores de combustão interna.

Nessa última configuração (ciclos de cogeração com motores de combustão interna) recupera-se a energia térmica residual dos gases de exaustão e o calor dos sistemas de lubrificação e resfriamento das camisas dos pistões (GABRIEL FILHO et al., 2007). É comumente aplicada em pequenas indústrias, em plantas que

prevalecem as necessidades de energia elétrica, água quente ou vapor a baixa pressão, com potências de cogeração em torno de 20 MW.

Na utilização de ciclos de cogeração com turbinas a gás, os gases de exaustão, na saída, apresentam uma temperatura relativamente alta que, segundo Prieto (2003), variam entre 400 e 600 °C. A última referência escreve que os gases de escape carregam entre 60 e 80% da energia primária consumida pela turbina, há um elevado conteúdo de oxigênio nos gases de saída e baixos teores de gases poluentes com o emprego do gás natural. Esse tipo de sistema tem sido utilizado na área industrial e aeronáutica devido tanto pela grande evolução tecnológica de seus componentes, que tem levado a um significativo incremento na sua eficiência, como pela disponibilidade crescente do gás natural a preços competitivos.

Merecem destaque, neste tipo de ciclo de cogeração, os ciclos com injeção a vapor, o ciclo combinado e os ciclos de turbinas a gás com recuperação química, pois têm obtido altos índices de desempenho e aproveitamento do potencial energético dos gases de saída (CARCASCÍ; FACCHINI; HARVEY, 1998).

Segundo a última referência, apesar de gerar uma proporção mais baixa de gás carbônico quando comparados aos demais combustíveis fósseis, o uso do gás natural como combustível possui um grande problema ambiental que é a emissão óxidos de nitrogênio (NO_x). A utilização de queimadores com injeção a vapor na zona de combustão das turbinas reduz o NO_x e eleva a capacidade produtiva de máquina por aumento do fluxo de massa através da turbina.

Gabriel Filho et al. (2007) explica que no ciclo combinado, o processo de produção de energia elétrica possui turbinas a gás e a vapor pelo qual o combustível é queimado em uma turbina a gás e a energia contida nos gases de exaustão produz vapor em uma caldeira de recuperação. Tanto a turbina a gás como a turbina a vapor acionam os geradores de eletricidade. Este ciclo prioriza a eficiência de conversão da energia do combustível para a energia elétrica e as grandes instalações de ciclo combinado atingem uma eficiência na ordem de 57% que, segundo os últimos autores, deverão atingir 60% em aproximadamente 3 ou 4 anos.

Nos ciclos de cogeração com recuperação química, o calor dos gases de escape é inicialmente aproveitado no reformador de vapor (gás metano), que

assume a função do Gerador de Vapor Recuperador de Calor, que é geralmente utilizado nos ciclos com injeção a vapor e nos ciclos combinados. Nesse reformador de vapor, também chamado de reformador químico, possui uma zona de reação onde, de acordo com Carcasci, Facchini e Harvey (1998), se comportam conforme as reações descritas nas equações abaixo:

Como explicado por Prieto, Nebra e Gallo (2000), esses gases obtidos (CO, H₂, excesso de vapor de água, restos de metano e CO₂), são então levados ao combustor da turbina a gás, onde seu potencial energético é eficientemente aproveitado.

Para as usinas de cana-de-açúcar os sistemas térmicos com turbinas a vapor são os mais difundidos, seguindo a configuração do Ciclo Rankine (SOSA-ARNAO, 2008). Como já explicado, a partir da queima desses resíduos, as caldeiras produzem o vapor, no qual é utilizado para ativar os turbogeradores para gerar eletricidade e turbinas de geração de energia mecânica para ativar o restante do sistema.

Segundo Del Campo (1999) a grande difusão dos sistemas de cogeração com turbinas a vapor deu-se, principalmente, às vantagens da longa vida útil desses equipamentos ao uso de uma grande variedade de combustíveis. São compostos basicamente por caldeiras, turbinas a vapor, válvulas redutoras e geradores de energia elétrica. Cada um com sua característica, a quantidade e a forma de utilização desses equipamentos são diferenciadas entre eles de acordo com a necessidade de cada usina.

O emprego das turbinas a vapor aparece vinculado a três configurações fundamentais, todas operando em ciclos a vapor. Possuem um aspecto em comum, que é o aproveitamento do conteúdo energético do vapor gerado na estação

geradora para o acionamento de turbinas e conseqüente geração de potência (PRIETO, 2003). São três as configurações:

- Sistemas de Cogeração com Turbinas de Contrapressão;
- Sistemas de Cogeração com Turbinas de Contrapressão e Condensação;
- Sistemas de Cogeração com Turbinas de Extração-Condensação.

Os sistemas com turbinas a contrapressão são os mais utilizados na indústria sucroalcooleira. Nesse tipo de turbina a pressão de vapor na saída da turbina é maior que a atmosférica e o nível de pressão na saída depende do nível de pressão do processo produtivo (LOZANO, 1998).

A Figura 3.5 apresenta um esquema de processo que atua em regime de cogeração empregando uma turbina de contrapressão. Neste esquema, típico da indústria de cana-de-açúcar brasileira, é característico que a geração de energia elétrica seja determinada pelas variações da demanda da energia em forma de calor de processo. Prieto (2003) enfatiza que estes tipos de sistemas visam a auto-suficiência e contribuem em dar um caráter sazonal a eventuais excedentes de eletricidade para comercialização.

Figura 3.5: Diagrama de um Sistema de Cogeração com Turbinas de Contrapressão (PRIETO, 2003; PELLEGRINI, 2009).

Os sistemas de cogeração que possuem turbinas a vapor de contrapressão e turbinas de condensação são um tipo de solução que pode ser empregada quando uma mesma indústria necessita de vapor a distintos níveis de pressão, o que pode estar unido à necessidade de estabilizar o fornecimento da energia elétrica às concessionárias (LOZANO, 1998). O último autor explica que essa combinação permite uma maior flexibilidade às entregas de energia elétrica e calor para processo, ainda que o custo de duas turbinas seja maior do que o custo de uma.

Figura 3.6: Diagrama de um Sistema de Cogeração com Turbinas de Contrapressão e de Condensação (PRIETO, 2003; PELLEGRINI, 2009).

Já os sistemas de extração-condensação trabalham também em períodos de não safra. Segundo Del Campo (1999), o interesse de empregar esse tipo de turbina se justifica pela sua capacidade de satisfazer uma relação energia térmica/elétrica, que pode variar numa ampla faixa, pela qual uma fração de energia que pode ser significativa é cedida pelo condensador. Esse condensador permite que o sistema funcione como uma central termelétrica fora do período de safra, pois permite condensar o vapor que chega à saída da turbina que junto com a água de reposição fornecida no desaerador forma a água de alimentação das caldeiras.

Prieto (2003) explica que dentro do setor de açúcar e álcool, a adoção deste sistema implica analisar a viabilidade de sua operação no período fora de safra, pois são empregados combustíveis complementares que correspondam o déficit de

bagaço na entressafra. A Figura 3.7 reproduz um sistema de cogeração com turbina de extração-condensação.

Figura 3.7: Diagrama de um Sistema de Cogeração com turbina de extração-condensação (PRIETO, 2003; PELLEGRINI, 2009).

Com relação às geradoras de vapor, o setor sucroalcooleiro brasileiro atual, utiliza-se de caldeiras aquatubulares para a produção do vapor (SOSA-ARNAO, 2008). O vapor produzido nas caldeiras de cogeração de usinas de cana é direcionado para ativar a geração de potência dos turbogeradores (sistema de geração de eletricidade), das turbomoendas, turbinas do sistema de preparo da cana, turbobombas e turboexaustores.

O trabalho da última referência apresenta um histórico da utilização de caldeiras em usinas de cana, e o autor descreve que na época do Proálcool, em torno de 1975, as caldeiras produziam vapor saturado com pressão de 1,0 a 1,4

MPa e afirma que as usinas compravam a maior parte da eletricidade e ainda adquiriam uma grande quantidade de lenha para complementar o bagaço.

Segundo essa mesma fonte, foi a partir da década de 90 que as usinas passaram a se interessar pela reestruturação dos seus sistemas com a intenção principal de aumentar sua produção de geração de potência elétrica para venda de excedentes. Até os dias atuais, elas têm acrescentado em seus sistemas, caldeiras consideradas de média e alta pressão, cuja pressão varia de 4,4 a 10 MPa (COELHO, 1999). Segundo Sosa-Arnan (2008) essa mudança iniciou-se a partir dos anos 90.

Jank (2007) afirmou que são perdidos dois terços da energia de uma planta ao queimar a palha e as pontas em um processo ineficiente e ao usar o bagaço em caldeiras de baixa pressão, pois só serve para gerar energia para as próprias usinas e ainda não conseguem suprir sua completa demanda.

As geradoras de vapor alimentadas por bagaço de cana-de-açúcar possuem outros equipamentos em sua composição que possuem a função de recuperar calor. Algumas possuem o pré-aquecedor de ar, comumente conhecido como pré-ar e o pré-aquecedor de água, denominado como economizador. O pré-aquecedor é um trocador de calor que eleva a temperatura do ar antes que o mesmo entre na caldeira, e está localizado depois dos tubos de superaquecimento do vapor.

O calor cedido para estes equipamentos é proveniente dos gases residuais quentes ou do vapor da própria caldeira. Da mesma forma, os economizadores aquecem a água de alimentação da caldeira e, por estarem, geralmente, localizados na parte superior da caldeira, entre o tambor de vapor e os tubos onde é gerado o vapor, os gases são obrigados a circular através dele, antes de saírem pela chaminé.

No Brasil, é comum a utilização desses dois equipamentos nos sistemas de geração de vapor. Outra opção é a utilização de secadores de bagaço, pois reduzem a umidade do bagaço e consequentemente o Poder Calorífico Inferior (PCI) desse combustível. Procknor (2004) afirma que o PCI do bagaço está relacionado com vários fatores, mas a sua umidade é a variável mais preponderante e em cujo valor é possível influir mais diretamente. Em seu artigo mencionou um caso estudado em

que o bagaço cuja umidade passou de 51,3% para 50,0% (base úmida - b.u) representou um acréscimo de 3,5% na produção de vapor.

Correia¹ (1983, apud SOSA-ARNAO et al., 2004) e Barbosa (1992) descreveram o uso de secadores pneumáticos que foram instalados no Brasil. Em seus resultados foi apresentado um aumento de 16% da produção de vapor, relacionando-o com a queda nos valores de umidade, que após passar pelo secador reduziu de 50% a 38% (b.u). Esses secadores foram utilizados na Usina Cruz Alta, pela qual Prieto (2003) apresenta um estudo termoeconômico em sistemas de cogeração, e em seus resultados o autor confirma, na utilização desses seguradores, a redução de umidade de 50% a valores próximos a 40% (b.u). Atualmente, na última usina citada, estes equipamentos encontram-se desativados.

3.5 EMISSÕES E LEGISLAÇÃO

Devido às graves conseqüências que o efeito estufa tem ocasionado e pode ainda provocar no meio ambiente, a preocupação pela busca da redução das emissões de gases na atmosfera tem sido cada vez maior e tem diversificado temas de pesquisas e debates em todo o mundo.

Nesse sentido, tem sido cada vez mais notório o conflito existente entre a necessidade de preservação do meio ambiente e a busca pela produtividade energética, dois fatores indispensáveis para garantir a qualidade de vida e a sua sustentabilidade. Isso devido aos vários impactos ambientais provocados pelas fontes de energias comumente utilizadas, como é o caso do combustível fóssil e do carvão mineral.

Por isso, como já afirmado neste trabalho, as fontes renováveis vêm conquistando um bom espaço na matriz energética mundial e uma parcela ainda maior na matriz energética brasileira (MME, 2009). O setor sucroalcooleiro se destaca neste aspecto (SEABRA, 2008).

¹ Correia, L.E.M. Bagasse drying. Seminário de Avaliação do Bagaço – São Paulo Sopral – Sociedade de Produtores de Açúcar e Alcool, p. 1-15, 1983.

Segundo o último autor, no ciclo completo a redução de emissão de CO₂ pelo etanol é 89% menor que a da gasolina. Mas, como apresentado em Scarpinella et al. (2009), ainda assim o setor apresenta problemas ambientais, por isso vários estudos têm sido feitos e diversas metodologias têm sido aplicadas em torno do tema, para um melhor controle dos impactos.

No trabalho de Seabra (2008), o autor contabiliza que o uso do bagaço para geração de eletricidade e energia excedente evita 225 kg de CO₂ emitidos na atmosfera. E, Ometto, Roma e Souza (2003) descrevem que esse gás emitido na atmosfera, na queima desse combustível nas fornalhas das caldeiras, completa o ciclo de CO₂ quando absorvido pela plantação para o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar.

Mas, Teixeira e Lora (2003) destacam, além deste, a presença de outros poluentes emitidos pelas chaminés, tais como: material particulado, hidrocarbonetos não queimados (C_xH_y) e o óxido de Nitrogênio (NO_x), que é considerado como uma das maiores causas da chuva ácida. Por isso a necessidade de um controle periódico dos gases que tais caldeiras lançam para a atmosfera.

Considerando as plantas térmicas queimando combustíveis sólidos, para a comunidade Européia, Áustria e Japão, as emissões padrão de NO_x são de 650, 200 e 411 mg/m³, respectivamente (KUCOWSKI et al.², 2003 apud TEIXEIRA; LORA, 2003). Na Índia, esse padrão é de 115 mg/m³ (NATU, 2005).

No Brasil, essa especificação é dada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que pela resolução n° 382 publicada em 26 de dezembro de 2006 estabeleceu os limites de emissões para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de bagaço de cana-de-açúcar (BRASIL, 2006). Esses números estão representados na Tabela 3.4.

² Kucowsky, J., Laudyn, D. Przekwas, M. Energetika a Ochrona Srodowiska. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 1997 (in Polish).

Tabela 3.4 – Limites de emissões de poluentes provenientes da combustão pela queima do bagaço de cana.

Potência Térmica Nominal (MW)	Material Particulado (mg/Nm³)	NO_x (mg/Nm³) (como NO₂)
Menor que 10	280	N.A.
Entre 10 e 75	230	350
Maior que 75	200	350

Fonte: Brasil (2006)

De acordo com a resolução citada, os resultados devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e 8% de excesso de oxigênio. A sigla N.A. refere-se a “Não aplicável” e na coluna do NO_x aponta-se a soma das concentrações de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂).

Segundo a mesma resolução (BRASIL, 2006), a capacidade nominal declara a condição máxima de operação da unidade de geração de calor para a qual o equipamento foi projetado, determinado em termos de potência térmica, com base no poder calorífico inferior (PCI), calculado a partir da multiplicação do PCI do combustível pela quantidade máxima de combustível queimada por unidade de tempo.

Para sistemas com até 10 MW de potência, ainda pela Resolução n° 382 do CONAMA, o órgão ambiental licenciador poderá aceitar o monitoramento periódico apenas de monóxido de carbono (CO) (Brasil, 2006). Neste caso, o limite máximo de emissão para este poluente está especificado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Limites máximos de emissão de CO provenientes da combustão pela queima do bagaço de cana.

Potência Nominal (MW)	CO (mg/Nm ³)
Até 0,05	6500
Entre 0,05 e 0,15	3250
Entre 0,15 e 1	1700
Entre 1 e 10	1300

Fonte: Brasil (2006)

Também, pela mesma resolução, os resultados também devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e 8% de excesso de oxigênio.

Teixeira e Lora (2003) mediram uma faixa de concentração de NO_x nas emissões da caldeira de uma usina em Monte Alegre em Minas Gerais e encontraram valores entre 88 e 118 mg/Nm³.

Para o controle da emissão desses poluentes, Cortez, Lora e Gomez (2008) apresentam dois equipamentos principais: os separadores ciclônicos e os lavadores de gases. Segundo esses autores, os separadores ciclônicos operam a pressões negativas e geralmente estão localizados antes do exaustor a fim de diminuir a erosão das pás. Afirmam ainda que uma das maiores preocupações é o cuidado para evitar as infiltrações de ar, pois afetam a eficiência de separação dos particulados.

Descrevendo também o princípio de operação dos lavadores de gás, Cortez, Lora e Gomez (2008) explicam que consistem na separação dos particulados de fluxos de gás por meio de lavagem de água, na forma de película ou de *spray*. Em algumas experiências descritas pela última referência, esses equipamentos apresentaram eficiências superiores a 97%, o que mostra a viabilidade desses lavadores para redução das emissões de poluentes.

3.6 A TERMODINÂMICA

Originada das palavras gregas *therme* (calor) e *dynamics* (força), a hoje conhecida como Termodinâmica, apresenta-se como objeto de estudo desde a Antiguidade (MORAN; SHAPIRO, 2002). Desde o surgimento da primeira máquina a vapor, durante a Revolução Industrial, o mundo tem vivido uma preocupação constante em busca de melhorias na performance das máquinas e de diversas tecnologias.

Os últimos autores explicam que os construtores e desenvolvedores de engenhos, como a própria máquina a vapor, o motor de combustão interna, o motor a jato e outros tipos de motores, eram conhecidos como engenheiros e, a partir deles, surgiu então o conceito de energia, que era tido como “capacidade de realizar trabalho”. Juntamente com esse conceito, foram-se conhecendo as diferentes formas de energia, tais como a energia cinética, potencial, química, dentre outras (LEVENSPIEL, 2002).

O francês Sadi Carnot (1796-1832), fundador da Termodinâmica, começou seus estudos termodinâmicos com a intenção de obter máquinas a vapor mais eficientes (NASCIMENTO; BRAGA; FABRIS, 2004). Especialmente do século XIX, surgiram grandes teorias desenvolvidas pelos mais diversos cientistas, nos quais a ciência tem se baseado até os dias atuais.

Pela necessidade de avaliação dessas diferentes formas de energia, nesse mesmo século, como descrito em Mora e Shapiro (2002), a Termodinâmica foi levada a um estudo mais formal, através das considerações sobre a força motriz do calor, ou seja, a capacidade que os corpos quentes têm de produzir trabalho.

Segundo Nascimento, Braga e Fabris (2004), em suas publicações, Carnot descreve a relação entre calor e trabalho, explica que todo calorífico (conhecido hoje como calor) de uma máquina térmica se desloca de quente a frio e que uma determinada quantidade de calor, ou calorífico, é sempre perdida. Além de introduzir também o novo conceito de ciclo e discutir a possibilidade de um ciclo reversível.

Segundo a última referência, atualmente, o estudo é mais abrangente, pois além da energia, tratam-se das relações entre suas propriedades. Por isso, quando se fala em avaliação de processos de conversão de energia, torna-se implícito que o estudo será baseado na Termodinâmica. Esse princípio possui leis que juntas permitem avaliar não só a parte quantitativa do sistema, mas também a qualidade da energia gerada.

3.6.1 Análise Energética e Exergética

Considerado o pai da Termodinâmica, o cientista alemão Julius Robert von Mayer (1814-1878), desenvolveu a Primeira Lei da Termodinâmica (PLT) (NASCIMENTO; BRAGA; FABRIS, 2004). É conhecida também como a Lei da Conservação de Energia, pois diz que a energia não pode ser criada ou destruída. Só é possível transformá-la de uma forma para outra, ou transferi-la entre sistemas (BEJAN, 1988; ÇENGEL; BOLES, 2006; LEVENSPIEL, 2002; MORAN; SHAPIRO, 2002; VAN NESS, 1983; VAN WYLEN; SONNTAG; BOORGGNAKKE, 1995).

Passos (2009), em seu trabalho, faz uma análise das diferentes formulações da primeira lei a partir de informações históricas, mostra que essa lei é considerada como uma das conquistas mais importantes da física e descreve como seus princípios podem ser sustentados mediante todos os documentos sobre a conservação da energia de Mayer e seu enunciado de equivalência, além de outros escritos pelos cientistas James Prescott Joule (1814-1889) e Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz (1821-1894).

Para entender a PLT, torna-se necessário ter a energia como um conceito fundamental da Termodinâmica o que a torna um dos aspectos mais significativos de análise na Engenharia. Portanto, como descreve Jørgensen (2006), tem-se então que a massa e a energia são conservadas, como traduzidas na Eq. (3.3).

$$\text{Acumulação} = \text{Entradas} - \text{Saídas} \quad (3.3)$$

Em um sistema qualquer, que não esteja isolado, podem ocorrer diferentes maneiras de transformação ou de transferência de energia, tanto na forma de transferência de calor (Q) ou por trabalho (W). O grande executor de experiências envolvendo tais transformações de trabalho e calor foi o físico inglês Prescott Joule, que também desenvolveu a teoria cinética do gás, a qual define que o calor é obtido mediante variações moleculares (WALL, 2001).

Através de conceitos atuais, Levenspiel (2002) explica que o calor pode ser adicionado ou retirado do sistema por contato com um corpo mais quente ou mais frio, e o trabalho representa todas as outras formas de mudança de energia quando se executa a remoção ou adição de calor.

É importante saber que quando se trata de sistema fechado ou batelada não existe nenhum tipo de massa entrando nem saindo do sistema (MORAN; SHAPIRO, 2002), então a primeira lei, geralmente descrita em forma de taxas, é tida da seguinte maneira:

$$\Delta \dot{E} = \dot{Q} - \dot{W} \quad (3.4)$$

Em trabalhos que utilizam a PLT para avaliação de sistemas de energéticos, é comum verificar que, quando envolvem sistemas abertos, é feito um balanço de massa e energia, pois em todo sistema podem existir fluxos de entrada e saída tanto de massa como de calor e trabalho. Tais balanços, ao assumir sua forma integral em um volume de controle, são obtidos, respectivamente, conforme segue:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_i \dot{m}_e - \sum_i \dot{m}_s \quad (3.5)$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_i \dot{m}_e \left(h + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)_e - \sum_i \dot{m}_s \left(h + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right)_s \quad (3.6)$$

Em que:

$\dot{m}_e$ - Fluxo de massa que entra no volume de controle (kg/s);

$\dot{m}_s$ - Fluxo de massa que sai no volume de controle (kg/s);

h_e - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

h_s - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

$\dot{Q}_{vc}$ - Fluxo de calor no volume de controle (kW);

$\dot{W}_{vc}$ - Potência referente ao volume de controle (kW);

h_e - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

h_s - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg).

A partir desses fundamentos, dependendo do sistema de conversão de energia, esses termos podem ser calculados e utilizados em diversos tipos de aplicações. Como exemplo, tem-se o trabalho de Goldemberg, Coelho e Guardabassi (2008) que, através de um balanço energético, mostraram os impactos positivos e negativos que esclarecem os aspectos da sustentabilidade no processo de produção e uso do etanol de cana, enfatizando o Estado de São Paulo que, como visto, se destaca sobre o resto do Brasil nesse aspecto.

Alonso-Pippo et al. (2009), aplica os conceitos de energia para estudar o valor energético dos resíduos de biomassa da cana e verificar através da possibilidade de melhoria na capacidade de produção de etanol de segunda geração, através de implementação de turbinas de extração-condensação a vapor ou gaseificado de biomassa integrada (turbina a gás de ciclo combinado).

A análise energética é baseada nesse primeiro princípio e tem como objetivo prover a informação necessária para reduzir a perda de energia térmica e melhorar a recuperação de calor. Segundo Dincer e Cengel (2001), uma das limitações que esse método contém é a falta de informação disponível sobre a degradação de energia que ocorre no processo e a quantidade de utilidade ou qualidade do calor contido nos fluxos que saem do processo como produto e/ou resíduo.

Enquanto a primeira lei da termodinâmica estabelece a conservação de energia em qualquer transformação, a segunda lei a complementa estabelecendo

condições para que as transformações termodinâmicas possam ocorrer, mostrando a diferença na qualidade entre as várias formas de energia (ALBUQUERQUE, 2005).

O método de exergia, como explica Dincer e Cengel (2001), supera as limitações que apresenta a análise baseada na primeira lei. Isto porque o conceito de exergia se baseia nas duas primeiras leis da termodinâmica e a análise exergética pode claramente, indicar a localização da degradação de energia num processo, identificar e calcular a magnitude real das perdas de exergia.

Passos (2003) mostra que, com base nos trabalhos de Carnot e Clayperon, os pesquisadores William Tomsom (conhecido como Lord Kelvin) e Rudolf Clausius desenvolveram as premissas e enunciados que formularam a Segunda Lei da Termodinâmica (SLT). O mesmo autor mostra que embora a segunda lei seja apresentada, nos livros e cursos de termodinâmica, após o estudo da primeira lei, as duas surgiram em torno da mesma época, por volta de 1850.

Para esse segundo princípio existem diversos enunciados. Quando tratado com relação ao fluxo de calor, tem-se que não é possível estabelecer um processo no qual o único resultado é transferir energia sob forma de calor de um objeto frio para um mais quente. Enquanto que, quando definido sob forma de calor e trabalho, é tido que não existe máquina capaz de ter como único efeito a transformação de calor integralmente em trabalho, sem causar mudanças em outro corpo (LEVENSPIEL, 2002).

Segundo Moran e Shapiro (2002), tal discussão indica que quando não perturbados, os sistemas tendem a sofrer mudanças espontâneas até atingir uma condição de equilíbrio, tanto internamente quanto com suas vizinhanças. Tal equilíbrio pode ser atingindo rápida ou lentamente, mas sempre satisfazendo o princípio da conservação de energia, que, como descrito pelos últimos autores, com a segunda lei se tornam suficientes para determinar o estado final do equilíbrio.

A Termodinâmica diferencia, pela SLT, um processo reversível de um irreversível. Çengel e Boles (2006) explica que se o sistema pode retornar ao seu estado inicial sem deixar qualquer efeito na vizinhança tem-se aí um processo reversível. Os autores interpretam o processo reversível como um processo ideal, no

qual não existem irreversibilidades internas ou externas, ou seja, é executado de uma forma perfeita. Por isso, como descrito pela última referência, todos os processos reais são irreversíveis.

Ensinas et al. (2009) avaliam através da SLT, dividindo a planta em oito subsistemas, a possibilidade de redução de irreversibilidades de um sistema integrado de produção de açúcar, álcool com o uso do bagaço como co-produto para geração de eletricidade. Tal análise mostrou que as maiores irreversibilidades ocorrem no processo de cogeração e, através de proposição de melhorias, verificou que as irreversibilidades podem ser reduzidas em 10%.

Pela SLT, é considerada uma medida do grau de desordem das moléculas ou de uma substância, mais conhecida como entropia (S). Esse grau está relacionado com os movimentos de translação, rotação e vibração dos átomos e moléculas das substâncias. Como descrito por Moran e Shapiro (2002):

$$S_{\text{gás}} > S_{\text{líquido}} > S_{\text{sólido}} \quad (3.7)$$

Dependendo do sistema de conversão de energia, tanto para utilização da primeira como da segunda lei, podem ser tomadas diferentes considerações que são determinadas diferentemente para cada caso a ser estudado. Neste trabalho, são considerados apenas os métodos utilizados para sistemas de cogeração, de acordo com os equipamentos e os dados disponíveis pela usina de cana-de-açúcar estudada.

Pela SLT, são utilizados os fundamentos da exergia ou disponibilidade energética – método que utiliza os princípios de conservação de massa e de energia, juntamente com a SLT para o projeto e análise de sistemas térmicos (MORAN; SHAPIRO, 2002), pela qual são definidas equações que avaliam a qualidade da energia gerada por um sistema.

Apesar de ser considerada pouco conhecida e considerada como um método novo de avaliação de sistemas por muitos cientistas e engenheiros, a exergia se desenvolveu um século depois do surgimento da Termodinâmica, em meados do século XX. Segundo Rojas (2007), a base do conceito exergia teve início quando o

francês Sadi Carnot introduziu a idéia de quantificar trabalho. Seu desenvolvimento se deu paralelamente na Europa e nos Estados Unidos fundamentado nos conceitos, leis e princípios científicos já definidos pela Termodinâmica.

Sciuba (2007), descreveu que em uma reunião científica em 1953, o eslovênio Zora Rant sugeriu que o termo exergia (em alemão, *Exergie*) deveria ser adotado para o tido “capacidade técnica de trabalho”, pois energia significa literalmente “trabalho interno” e o prefixo “ex” abrange também a quantidade externa. O mesmo autor mostra que antes da adoção deste nome, ocorreram várias outras manifestações tais como energia disponível, disponibilidade, trabalho disponível, trabalho potencial, energia útil, entropia potencial, essergia, dentre outros.

A então determinada exergia, também chamada atualmente por alguns autores de disponibilidade (*availability*), possui diversas definições que ao interpretá-las são conduzidas como a quantidade máxima de trabalho mecânico internamente reversível, disponível em um fluxo de matéria ou energia, quando estes se deslocam de um estado de desequilíbrio físico e/ou químico para o ambiente-padrão de referência, trocando calor somente com o ambiente (BEJAN, 1988; CORNELISSEN, 1997; KOTAS, 1995; ROSEN E DINCER, 1999; SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988; WARK, 1995).

De acordo com os últimos autores, num processo real (irreversível), existe uma quantidade de trabalho não realizável, que dá uma medida da irreversibilidade do processo. Tratando-a de modo inverso, a exergia é tida como o trabalho que se deve fornecer ao sistema para removê-lo do estado de equilíbrio com o ambiente e levá-lo ao estado considerado.

Mais didaticamente, Moran e Shapiro (2002) a define como o maior trabalho teórico possível de ser obtido entre dois sistemas que interajam, até que o equilíbrio termodinâmico seja alcançado. Segundo estes autores, para tais sistemas, estão envolvidos um de interesse e outro denominado ambiente de referência de exergia. Esse último se trata do meio ambiente.

Como afirmado pela última referência, é considerado como meio ambiente a porção da vizinhança do sistema estudado cujas propriedades (pressão, temperatura e potencial químico) não se alteram significativamente ao interagir com

o sistema. Além disso, Bejarano (2004) explica que, para utilizá-lo em análise exergética, é exigido que esteja em estado de perfeito equilíbrio termodinâmico e que, apesar do ambiente real ser complexo, procura-se modelá-lo como uma composição de substâncias existentes em abundância na atmosfera (geralmente nas CNTP), oceanos e crosta terrestre.

Uma análise exergética permite a obtenção dos valores exergéticos dos fluxos do sistema, como descrito em Kotas (1995), é uma aplicação sistemática da primeira e segunda lei, uma vez que localiza e quantifica as irreversibilidades e perdas dos componentes, bem como suas eficiências exergéticas. Trata-se de um método técnico para diagnosticar, avaliar e otimizar processos de conversão de energia.

Assim, para sistemas energéticos cujos fluxos operam com parâmetros fora das condições do meio ambiente, a tendência é de aumentar a geração de irreversibilidades, aumentando, dessa forma, as perdas exergéticas para o meio ambiente e a destruição de exergia. E, como explica Moran e Shapiro (2002), quando o equilíbrio é atingido, as condições de equilíbrio térmico, mecânico e químico entre o sistema e o ambiente são satisfeitos e sistema não pode sofrer nenhuma mudança de estado por meio de interações com meio ambiente. Portanto, neste ponto a exergia é nula e, como descrito pelos últimos autores, trata-se do estado morto.

Bejan; Tsatsaronis e Moran (1996) e Kotas (1995), discutem que o estudo da exergia tem sido aplicado a plantas de potência nas quais as oportunidades de economia de energia são identificadas. Rojas (2007) faz uma revisão de todos os trabalhos publicados na literatura do ano de 1993 até o ano de 2005 e afirma que muitas pesquisas têm sido desenvolvidas neste sentido, e que a partir do ano de 2002, o aumento do número de trabalhos publicados relacionados à exergia cresceu consideravelmente, comportamento que reflete a relação com situação energética mundial.

As pesquisas têm abrangido temas que relacionam a exergia, aplicando as análises em diversos campos de estudo. Além da aplicação convencional de avaliar a eficiência de utilização de energia e detectar as causas de imperfeição termodinâmica em processos térmicos ou químicos, a exergia tem despertado

grandes interesses desde a área de economia, no levantamento dos gastos com recursos energéticos, até contabilização dos recursos ambientais, avaliação de impacto ambiental, avaliação de custos ecológicos e modelagem ecológica (Bejarano, 2009).

Leite et al. (2003) fizeram um análise exergética em sistemas de cogeração utilizando o gás natural e o bagaço em usinas de cana brasileira. Os resultados mostraram que o uso de gás natural e bagaço de cana são mais econômicos do que utilizando somente gás natural, com redução de 48% nos custos de produção de vapor e 37% nos custos de produção de eletricidade através de turbinas a vapor.

Alguns outros estudos foram realizados envolvendo a análise exergética de sistemas de cogeração, que se diferenciam pelo uso dos mais variados insumos para o processo. Como exemplos têm-se os trabalhos de Leal (2003) e Matelli (2001), que aplicaram a análise exergética para caracterizar sistemas de cogeração empregando células de combustível, outros aplicados em indústria petroquímica (TORRES, 1998; TORRES; GALLO, 1999), siderúrgica (SILVA, 2004), celulose e papel (SILVA, 2002) e até em hospitais (MATELLI, 2001) e universidades (LUZ-SILVEIRA et al., 2002). E outros em sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, pelos quais se destaca a realização de análise termoeconômica desses sistemas (DEL CAMPO; CERQUEIRA; NEBRA, 1998; DEL CAMPO; NEBRA, 1999; PRIETO, 2003).

3.6.2 Exergia como indicador de impacto ambiental

Para a identificação de problemas ambientais têm surgido diferentes métodos de análise e, dentre eles, está a exergia com a utilização de seus indicadores exergéticos. Sabendo que a exergia pode ser definida como um potencial de se causar uma mudança, essa variável pode ser tida também como uma medida do potencial de impacto físico-químico direto que uma substância pode causar no meio ambiente (ROSEN; DINCER, 1997).

Dessa forma, é possível afirmar que através de índices termodinâmicos, mais especificamente a partir de índices exergéticos, podem ser representadas formas de avaliação de impacto ambiental (BEJARANO, 2004). Para entendê-la nesse sentido, talvez a melhor definição tenha sido a dada em Szargut, Morris e Steward (1988). Eles tratam-na como a quantidade de trabalho obtida quando uma massa é trazida até o estado de equilíbrio termodinâmico com os elementos comuns do meio ambiente, por meio de processos reversíveis, envolvendo interação apenas com estes componentes.

Esta ferramenta surgiu com o crescimento dos estudos baseados na relação de energia e ambiente, que cresceu a partir da década de 1980, época em que o tema passou a despertar interesse mundial (ROSEN; DINCER, 2001). Desde o final do século XX, as pesquisas vêm sendo intensificadas no sentido de avaliar o impacto causado por sistemas energéticos no meio ambiente, com atenção especial ao problema do aquecimento global.

Rojas (2007) apresenta uns dos primeiros estudos realizados envolvendo exergia e meio ambiente. Dentre eles, têm-se: Cornelissen (1997); Crane, Scott e Rosen (1992); Dincer e Rosen (1998); Makarytchev (1998); Szargut (1980), Rosen e Scott (1987), Valero e Arauzo (1991) e Wall (1977).

Apesar da grande quantidade de estudos sobre a relação energia e meio ambiente, a relação entre exergia e meio ambiente sempre foi pouco explorada (DINCER; ROSEN, 1998). Além de ser tida como trabalho ou potencial máximo de trabalho de um material ou uma forma de energia em relação ao seu meio de referência, Pellegrini (2009) explica que, quando presente em um fluxo poluidor, a exergia, pode ser entendida também como o potencial desse fluxo em provocar dano.

Santarelli (1998) descreve que a exergia representa um índice de desequilíbrio com respeito ao meio ambiente padrão e mostra que é possível tratá-la como uma medida de poluição. Explica ainda que, por meio da exergia residual, associada com as substâncias contidas nos gases de combustão, por exemplo, pode-se efetuar a valoração da poluição. Portanto, ao minimizá-la irá interferir no efeito poluidor da atividade do sistema.

Nesse sentido, Pellegrini (2009) aponta quatro metodologias que são utilizadas para empregar a exergia como quantificadora de impactos e/ou benefícios ambientais, tais como: inclusão de custos ambientais na análise termoeconômica; aplicação direta de índices exergéticos para avaliação de impacto; análise exergética de ciclo de vida e quantificação de “taxas exergéticas” para impactos ambientais.

Atualmente, a introdução de taxas ambientais é a alternativa mais comum para empregar os aspectos ambientais na análise de sistemas energéticos ou de políticas energéticas. Santarelli (1998) utiliza um método termoeconômico para a utilização eficiente dos recursos de exergia e propõe o uso de uma taxa sobre a exergia do carbono, em inglês, *Carbon Exergy Tax (CET)*. Por essa última, o autor se baseia na avaliação da análise da exergia destruída e rejeitada, conectando com as emissões de CO₂ de um sistema de energia, tida como taxa de carbono pela qual o autor usa as abreviações CT, do termo em inglês, *Carbon Tax*.

A produção de gás combustível e eletricidade a partir do carvão foi estudada por Makarytchev (1998). Apoiando-se na evolução do ciclo de vida da exergia contida em cada um dos fluxos, o autor apresentou três indicadores ambientais: a taxa de recursos, a eficiência ambiental e a taxa de poluição total.

Bejarano (2004) definiu a eficiência exergética ambiental de processos de conversão de energia como a razão da exergia final pela exergia total consumida dos recursos humanos e naturais. Utilizando-se também da taxa de poluição global, o autor aplicou esse índice para avaliar o desempenho exergético-ambiental (exergoambiental) em plantas de tratamento de esgoto (BEJARANO, 2009).

A análise exergética tem vários usos também na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Para Wall (2006), é um dos métodos mais populares dentre os que utilizam a análise exergética para valorização de impacto ambiental. Definida pela Norma ISO 14040, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2001), a ACV é tida como uma metodologia objetiva para avaliação dos impactos ambientais associados ao uso de um produto, a um processo produtivo, a atividades ou a um sistema em geral, dentro de limites bem definidos.

Conhecida na língua inglesa como *life cycle assessment* (LCA), consiste em um procedimento pelo qual os problemas ambientais são associados a um produto, processo ou atividade, e a avaliação de impactos é realizada mediante a identificação e quantificação dos materiais, da energia utilizada e dos resíduos lançados ao ambiente (FINNVEDEN; ÖSTLUND, 1997).

Os últimos autores afirmam que a análise exergética, numa ACV, é usada como um forte indicador de impacto ambiental, e a exergia poderia ser usada, também, como uma medida do esgotamento e uso de recursos de materiais e de energia. Segundo Wall (2006), o enfoque multidimensional da ACV causa grandes problemas quando a análise compara diferentes substâncias.

Para o último autor, esse problema é evitado se for usado exergia como uma quantidade comum, como é feito na Análise Exergética de Ciclo de Vida - AECV (*Exergetic Life Cycle Analysis – ELCA*), método proposto por Cornelissen (1997) que contabiliza toda destruição de exergia ao longo do ciclo de vida de um produto, servindo como ferramenta de melhoria do desempenho ambiental pela busca da minimização das irreversibilidades do mesmo. Partindo do trabalho de Cornelissen (1997), Wall e Gong (2001) analisaram a exergia a partir da definição de indicador ecológico, em um estudo de caso.

Na agroindústria canavieira, a ACV foi aplicada por Ometto (2005), onde o autor faz a valoração de impacto no ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pela exergia, aplicando também os métodos EDIP (*Environmental Development of Industrial Products*) e a Emergia como ferramentas avaliadoras de impacto ambiental. E em 2009, baseado no conceito de exergia química, o autor estuda os impactos atmosféricos das emissões provocadas pelo etanol combustível no Brasil (OMETTO; ROMA, 2009).

4. LOCAL DE ESTUDO

4.1 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto foi desenvolvido no Núcleo de Hidrometria e Energia do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos/USP. O Centro está localizado no município de Itirapina, a aproximadamente 25 km da cidade de São Carlos e a pesquisa foi complementada com visitas a duas usinas de cana-de-açúcar instaladas no interior do Estado de São Paulo, que se disponibilizaram em fornecer dados para realização dos estudos de caso.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO DAS USINAS ANALISADAS

As visitas técnicas e coletas de dados foram realizadas em duas das usinas de cana-de-açúcar instaladas em diferentes regiões do Estado de São Paulo. Para tal escolha foram levados em consideração os critérios de disponibilidade da usina quanto ao fornecimento dos dados e proximidade das indústrias ao local de estudo.

Os sistemas de cogeração de cada uma delas são constituídos pelos subsistemas de: Geração de Vapor, Geração de Energia Elétrica, Geração de Energia Mecânica (que por sua vez inclui o Sistema de Preparo de Cana e o Sistema de Moenda) além do emprego do vapor nos turboexaustores, e na turbobomba de água de alimentação, e finalmente o sistema de condensado e água de reposição.

O condensado de vapor de água dos sistemas é formado pelo condensado proveniente do vapor consumido na fabricação de açúcar e é usado para realimentação de caldeiras por meio de bombas centrífugas que direcionam este condensado para o desaerador térmico e deste para a bomba de água de alimentação, que introduzem a água desaerada nas caldeiras.

O consumo de vapor no processo também é complementado por duas válvulas redutoras de pressão que fornecem vapor ao processo e o sistema de recuperação, de calor de cada caldeira, é composto de um pré-aquecedor de ar e um economizador de água nos dois casos estudados.

Apesar de apresentarem similaridade na composição de seus subsistemas, cada sucroalcooleira possui algumas diferenças nas configurações de seus sistemas de cogeração, como descritas a seguir.

4.2.1 Usina A

A primeira usina, localizada na região de Ribeirão Preto-SP, tem seu sistema de produção voltado para fabricação de açúcar, álcool e geração de energia, a partir de uma produção de 13000 toneladas de cana moída por dia.

Seu sistema de cogeração é composto por duas caldeiras geradoras de vapor, sendo que uma delas, a caldeira A-1, é considerada de média pressão, produzindo vapor a 2,1 MPa. Esse vapor é então direcionado para as turbinas, onde é produzida energia mecânica para o processo de produção da usina. Esta geradora de vapor produz cerca de 30 kg/s de vapor.

A caldeira A-2, é tida como caldeira de alta pressão. A maior parte do vapor produzido, aproximadamente 40 kg/s, é direcionada ao sistema de geração de energia elétrica, e o restante (em média 4,2 kg/s) é encaminhado para complementar a quantidade de vapor requerida para o restante do processo de produção da usina. A Tabela 4.1 apresenta os dados de vapor fornecidos pelo fabricante para cada caldeira utilizada.

Tabela 4.1 - Parâmetros termodinâmicos fundamentais das caldeiras da Usina A

Caldeira	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Capacidade (ton/h)
A-1	310	2,1	100
A-2	480	6,4	150

Fonte: Dados do fabricante.

A primeira caldeira consome em média 12,2 kg/s de bagaço e a outra em torno de 20 kg/s. Cada uma dessas geradoras possui um turboexaustor que trabalha com vapor gerado na própria caldeira, com o objetivo de retirar os gases de escape da estação de geração de vapor.

O sistema de condensado e de bombas de água de alimentação é dotado de duas bombas centrífugas e uma turbobomba ou uma motobomba. A última só funciona no caso de a turbobomba não estar operando. Parte do vapor de escape da turbobomba é aproveitada no desaerador e esse sistema envia, pela bomba de água de alimentação, cerca de 260 m³/h de água para as duas caldeiras.

O subsistema de geração de energia elétrica é composto por dois turbogeradores, que juntos produzem um valor aproximado de 25 MW de eletricidade. O turbogerador A-1, produz a maior parte, 15 MW de potência elétrica, sendo que cerca de 10 MW é direcionado para a própria usina e o restante vendido para concessionária estadual de energia elétrica. O turbogerador A-2 produz em torno de 10 MW e quase toda essa energia, entre 95 e 98%, é vendida para a mesma concessionária.

A usina possui 2 válvulas redutoras, que inicialmente trabalham reduzindo o vapor de 6,4 MPa não utilizado pelos turbogeradores para 2,1 MPa. O vapor reduzido juntamente com o que é produzido na caldeira A-1 é direcionado para as turbomoendas, turbinas dos picadores, desfibradores, turboexaustores e turbobombas. A sobra deste vapor é novamente enviada para as válvulas redutoras, reduzindo-o para 0,15 MPa, para ser utilizado no processo e o restante, junto com

parte do vapor de escape das turbinas, é direcionado para uma nova redução, cuja nova pressão é de aproximadamente 0,08 MPa.

Com relação ao sistema de preparo de cana, difusor e de moenda, a usina A possui dois picadores e um desfibrador dispostos em série, a fim de reduzir o tamanho da cana e facilitar a extração do caldo no difusor. O desfibrador e os picadores são acionados por turbinas de vapor, alimentados por uma parcela de vapor gerado pela caldeira A-1 a uma pressão aproximada de 2,0 MPa e uma temperatura de 300°C. O vapor de escape faz parte do vapor que alimenta o processo fabril.

O caldo misto produzido nesse sistema é enviado para a fabricação de açúcar e, na saída do difusor, o bagaço é enviado a um sistema de dois ternos de moendas acionados por turbinas de vapor de características similares às anteriormente descritas no desfibrador e picadores. O caldo diluído obtido neste sistema retorna ao difusor, sendo também usado para embebição e o bagaço final que sai desse sistema tem em torno de 50% de umidade e é transportado, pelas esteiras distribuidoras de bagaço, para queima nas caldeiras.

4.2.2 Usina B

Esta usina está localizada na Região de Catanduva-SP. Utilizando uma média de 18000 toneladas de cana por dia, seu processo produtivo é responsável também pela produção de açúcar, álcool e energia, sendo que o último produto é utilizado somente para consumo na própria indústria.

O sistema de geração de vapor está integrado por cinco caldeiras que produzem vapor com pressão de 2,1 MPa. As três primeiras (caldeiras B-1, B-2 e B-3) possuem uma capacidade de aproximadamente 22 kg/s de produção de vapor e consumo de 10 kg/s de bagaço. As caldeiras B-4 e B-5 produzem em torno de 28 kg/s de vapor e consomem cerca de 12,5 kg/s de combustível. A Tabela 4.2 apresenta os dados de vapor fornecidos pelo fabricante das geradoras de vapor da usina B.

Tabela 4.2 - Parâmetros termodinâmicos fundamentais das caldeiras da Usina B

Caldeira	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Capacidade (ton/h)
B-1	300	2,1	80
B-2	300	2,1	80
B-3	300	2,1	80
B-4	300	2,1	100
B-5	300	2,1	100

Fonte: Dados do fabricante.

O sistema de geração de vapor possui três conjuntos de exaustores de gases, localizados nas caldeiras B-3, B-4 e B-5. O sistema de condensado também possui duas bombas centrífugas e o sistema de água de alimentação é acionado por meio de uma turbobomba ou uma motobomba, com uma vazão média de 400 m³/h para alimentar as cinco caldeiras. Da mesma forma, a motobomba só é utilizada quando a turbobomba está fora de operação.

O subsistema de geração de energia elétrica constitui-se de três geradores de eletricidade que produzem em média 15,5 MW. Toda essa potência é utilizada para abastecer a própria usina e mantê-la auto-suficiente em termos de energia.

O sistema de preparo de cana desta usina é composto por dois picadores e dois desfibradores, e o sistema de moagem da cana é realizado por seis ternos de moendas. Sendo três deles dispostos em série com um picador e um desfibrador, e os outros três também em série com os outros equipamentos.

Todos esses equipamentos são acionados por turbinas que trabalham a uma pressão aproximada de 2,0 MPa e a uma temperatura na entrada de 300°C. Da mesma forma, o vapor de escape faz parte do vapor que alimenta o processo de fabricação de açúcar e álcool e o bagaço produzido é direcionado para as caldeiras com uma umidade média de 50%.

A usina possui duas válvulas redutoras de pressão. O vapor produzido nas caldeiras e que não é utilizado nas turbinas é direcionado para uma delas. A primeira válvula (VR-B1) reduz o vapor de 2,1 MPa para a pressão de 0,15 MPa para utilizar no processo, e o restante desse vapor é então enviado para outra válvula redutora (VR-B2) cuja redução é realizada de 0,15MPa para aproximadamente 0,08 MPa que é então direcionado para outros equipamentos do processo de fabricação.

5. METODOLOGIA

A fim de cumprir os objetivos deste trabalho, foram feitas aplicações de métodos termodinâmicos para uma avaliação do estado atual dos sistemas de cogeração em usinas de cana-de-açúcar do interior paulista. Com descrito anteriormente, estudos de caso foram realizados em duas diferentes sucroalcooleiras instaladas em diferentes regiões do Estado de São Paulo.

Para isso, foram realizadas visitas técnicas para o reconhecimento dos sistemas de conversão de energia utilizados pelas usinas de acordo com a tecnologia adotada por cada uma e, paralelamente, dados foram sendo coletados para a realização das análises propostas neste trabalho.

Inicialmente, foi realizado um diagnóstico energético, utilizando as equações já definidas pela PLT e que são utilizadas especificamente para sistemas térmicos. Em seguida, foi feita uma comparação entre todos os indicadores de eficiência, mostrando a necessidade de não só da primeira, mas também da segunda lei para avaliar sistemas de conversão de energia, a fim de verificar as diferentes metodologias de geração de vapor e energia elétrica e seus diferentes desempenhos.

Empregando este último princípio, foi feita uma análise exergética para uma melhor visualização das perdas e possibilitar maiores oportunidades de melhoria dos processos e, ainda, por meio de indicadores exergéticos, realizou-se um diagnóstico ambiental dos sistemas de cogeração em estudo. Os resultados obtidos para cada usina foram comparados entre si com trabalhos realizados anteriormente em diferentes sistemas de cogeração de energia.

5.1 ANÁLISE ENERGÉTICA E ÍNDICES DE DESEMPENHO BASEADOS NA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Como descrito em Torres (1999), a análise energética continua tendo sua validade para diagnosticar os sistemas térmicos. Mas, o autor afirma que para ampliar essa avaliação faz-se necessário a utilização da SLT. Vale lembrar que as análises de primeira e segunda lei não são concorrentes e sim complementares. Deste modo, para realizar uma avaliação exergética faz-se necessária, inicialmente, a análise energética, com base no primeiro princípio.

De acordo com Moran e Shapiro (2002), para aplicação dos métodos termodinâmicos deve-se, inicialmente, prescrever o volume de controle no espaço onde os mesmos serão empregados. Por esses mesmos autores, este volume trata-se da região envolta em um contorno prescrito, ou seja, a região do espaço onde a massa escoar.

Portanto, considerando um volume de controle para cada equipamento pertencente ao sistema de cogeração e sabendo que o sistema opera em regime permanente e desconsiderando as variações de energia cinética e potencial, os balanços de massa e energia apresentados nas equações (3.5) e (3.6), assumiram as formas abaixo, respectivamente:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s = 0 \quad (5.1)$$

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_e h_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s h_s = 0 \quad (5.2)$$

Determinadas a quantidade de trabalho, de calor e suas respectivas entalpias, foi calculada a eficiência de primeira lei para cada um dos equipamentos do sistema, tais como, turbomoendas, turbogeradores, turbobombas, turboexaustores e turbinas do sistema de preparo da cana, conforme a Eq. (5.3).

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{m}\Delta h_{iso}} \times 100 \quad (5.3)$$

Em que:

η - Eficiência Isentrópica (%)

Δh_{iso} - Diferença entre as entalpias de entrada e saída do equipamento, para processo isentrópico (kJ/kg);

$\dot{W}$ - Potência mecânica ou elétrica da turbina (kW);

$\dot{m}$ - Fluxo de massa (líquido ou vapor) no equipamento (kg/s).

Para a análise termodinâmica de caldeiras de cogeração, Sosa-Arnan e Nebra (2009) apresenta uma representação esquemática dos procedimentos disponíveis para o emprego da primeira e da segunda Lei, conforme a Figura 5.1.

Figura 5.1: Análise Termodinâmica para caldeiras de bagaço. (SOSA-ARNAO; NEBRA, 2009)

Os métodos de balanço energético e exergético envolvem o cálculo das perdas energéticas e exergéticas, respectivamente. Envolve as perdas por gases de exaustão, por combustão química incompleta do bagaço, por combustão incompleta por causas mecânicas, perdas por troca de calor, pelas cinzas e pelas purgas. Por este método, a eficiência é dada então pela Eq. (5.4).

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum \text{perdas}}{E_f} \right) \times 100 \quad (5.4)$$

Em que:

$\sum \text{perdas}$ - Somatório das perdas energéticas das caldeiras (kW ou MW);

η - Eficiência de Primeira Lei (%);

E_f - Energia fornecida pelo combustível (kW ou MW).

Neste trabalho, tanto para análise pela primeira, como para segunda lei, foi utilizado o método de Entradas e Saídas ou Insumo-Produto, do inglês *Input/Output*, devido à disponibilidade de fornecimento de dados das usinas em que foram aplicados os estudos de caso.

Para análise energética, esse procedimento envolve a relação entre a energia térmica produzida pelo vapor de água devido à combustão de um combustível (E_{vp}), com a energia cedida pelo combustível (E_f) durante a combustão com base no poder calorífico inferior (PCI). Cada caldeira foi avaliada separadamente, utilizando a Eq. (5.5).

$$\eta = \frac{E_{vp}}{E_f} \times 100 \quad (5.5)$$

Os dados do PCI do combustível fornecido para cada sistema, quando se utiliza do bagaço e da palha da cana para queima, pode ser determinada pela Eq. (5.6).

$$PCI_{comb} = \frac{PCI_{bag}(\dot{m}_{bag}) + PCI_p(\dot{m}_p)}{(\dot{m}_{bag} + \dot{m}_p)} \quad (5.6)$$

Em que:

PCI_{bag} - PCI do bagaço;

PCI_p - PCI da palha;

$\dot{m}_{bag}$ - vazão média do bagaço (kg/s)

$\dot{m}_p$ - vazão média da palha (kg/s)

O procedimento Insumo-Produto para a análise exergética é apresentado mais detalhadamente no Item 5.2 deste trabalho.

Para avaliar o processo, ainda pela PLT, foram utilizados diferentes fatores de desempenho globais do sistema. É prática comum avaliar a eficiência dos sistemas de cogeração através da chamada eficiência de primeira lei ou fator de utilização de energia, designado como FUE. Este parâmetro considera a equivalência do calor e o trabalho como produtos, e é calculado pela Eq. (5.7), descrita em Horlock (1997) e Huang (1996).

$$FUE = \frac{\dot{W}_{total} + \dot{Q}_{útil}}{E_f} \quad (5.7)$$

Para efetuar o cálculo, foi obtido previamente o calor útil ($Q_{útil}$) total do sistema empregado no processo. Tal valor é composto pelo fluxo de entalpia do vapor na saída do sistema de preparo, na saída das turbomoendas, na saída das válvulas redutoras (VR's), na saída dos turbogeradores e o que deixa as turbinas das caldeiras (turbobomba e exaustores), menos o fluxo de entalpia do condensado de retorno (CR), água de reposição (A-REP) e fluxo do vapor utilizado no desaerador (DRD). A Eq. (5.8) expressa a quantidade de calor útil no sistema de cogeração:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = (H_{\text{turb-preparo}} + H_{\text{VRs}} + H_{\text{turb-moendas}} + H_{\text{turb-bomba}} + H_{\text{turb-exaust}})_s - (H_{\text{CR}} + H_{\text{A-REP}} + H_{\text{V-DRD}}) \quad (5.8)$$

O prefixo “*turb-*” nos sub-índices dos fluxos de entalpia referem-se à turbina de cada equipamento especificado, e o sub-índice “s” indica que são os fluxos de saída. A potência total produzida ($\dot{W}_{\text{total}}$) foi calculada pela soma das potências mecânicas ($\dot{W}_{\text{mec}}$) e das potências elétricas ($\dot{W}_{\text{el}}$) geradas:

$$\dot{W}_{\text{total}} = \dot{W}_{\text{mec}} + \dot{W}_{\text{el}} \quad (5.9)$$

Existem também outros indicadores de desempenho, mas que avaliam a contabilidade de energia. Tais índices permitem a obtenção de uma análise mais detalhada do desempenho do sistema (HORLOCK, 1997). E, dentre eles, foram calculados os listados a seguir:

- Índice de Poupança de Energia (IPE), em inglês. Energy Saving Index, indicada pela sigla IPE, dado por Huang (1996):

$$IPE = \frac{E_f}{\frac{\dot{W}_{\text{total}}}{\eta_{\text{term}}} + \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\eta_{\text{cald}}}} \quad (5.10)$$

O índice de poupança de energia está associado à economia de combustível obtida por sistemas de cogeração em relação a plantas convencionais que produzem separadamente energia elétrica e térmica. Os termos η_{term} e η_{cald} referem-se à eficiência térmica de uma planta de potência e de uma caldeira, respectivamente.

Para o primeiro termo adotou-se 0,4, valor comumente adotado para plantas de geração de potência (DEL CAMPO, 1999; PRIETO, 2003; SCHIRMER, 2006) e para eficiência térmica retomou-se a Eq. (5.5) considerando todas as caldeiras como uma única estação geradora de vapor, avaliada para as condições de pressão e

temperatura médias do sistema de geração de vapor de cada usina. Este valor de eficiência foi avaliado segundo a Eq. (5.11).

$$\eta_{cald} = \frac{\dot{m}_{t-vapor} (h_{vapor} - h_{aa})}{\dot{m}_{t-comb} PCI_{comb}} \quad (5.11)$$

Sendo:

$\dot{m}_{t-vapor}$ -fluxo total do vapor produzido pelas caldeiras (kg/s);

h_{vapor} - entalpia do vapor produzido (kJ/kg);

h_{aa} - entalpia da água de alimentação das caldeiras (kJ/kg);

$\dot{m}_{t-comb}$ - fluxo total do combustível consumido pela caldeira (kg/s).

- Razão da economia de energia do combustível (RPEC), determinada pela sigla RPEC em inglês, *Fuel Energy Saving Ratio*, que representa a razão de poupança de energia do combustível. Também de acordo com Huang (1996), pode ser obtida conforme segue:

$$RPEC = 1 - IPE \quad (5.12)$$

- Índice de Geração de Potência (IGP), conhecida como *Efficiency of power generation*, em inglês. É definida como a razão do combustível utilizada para produzir potência em relação a potência total (elétrica e mecânica) produzida pelo sistema:

$$IGP = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb} - \frac{\dot{Q}_{util}}{\eta_{cald}}} \quad (5.13)$$

- Razão Potencia- Calor (RPC), que representa a relação entre a quantidade de potência total produzida e o calor destinado ao processo:

$$RPC = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{\acute{u}til}} \quad (5.14)$$

5.2 ANÁLISE EXERGÉTICA E ÍNDICES DE DESEMPENHO BASEADOS NA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Diferentemente da primeira lei, a exergia não é conservativa, pois parte dela é perdida devido às irreversibilidades internas do sistema e à perda entrópica nos processos termodinâmicos (BEJAN; TSATSARONIS; MICHAEL, 1996; KOTAS, 1995; YANTOVSKII, 1994). Como descrito em Prieto (2003), sua aplicação, juntamente com a primeira lei, permite determinar o valor termodinâmico de um fluxo em termos de trabalho mecânico máximo que não foi e poderia ser extraído, possibilitando assim a visualização das ineficiências e das perdas reais dos sistemas energéticos.

Para realizar o balanço de exergia para um volume de controle, em regime permanente e desprezando as energias cinética e potencial, utiliza-se da Eq. (5.15).

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_e b_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s b_s - \dot{I}_{vc} = 0 \quad (5.15)$$

Em que:

T_i - Temperatura superficial do volume de controle (K);

T_0 - Temperatura de irreversibilidade no volume de controle (K);

$\dot{W}_{vc}$ - Trabalho útil ou exergia do volume de controle (kJ);

b_e - Exergia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

b_s - Exergia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

$\dot{i}_{vc}$ - Taxa de irreversibilidade no volume de controle (kW).

A taxa de irreversibilidade do sistema ($\dot{i}_{vc}$) quantifica as perdas exergéticas do sistema e a exergia destruída no processo. Pode ser obtida através do produto da temperatura do ambiente-padrão (T_0) pela entropia gerada no volume de controle (σ), conforme a Eq. (5.16).

$$\dot{i}_{vc} = T_0 \sigma \quad (5.16)$$

Outra maneira de quantificar a irreversibilidade total (interna e externa) do equipamento ou da planta é pela diferença da unidade menos a eficiência exergética do sistema, como expresso na Eq. (5.17).

$$\dot{i}_{vc} = (1 - \eta_{II}) = \sum_i (\dot{i}_{vc})_i \quad (5.17)$$

5.2.1 Cálculo das exergias específicas dos principais fluxos do sistema

A exergia total de um fluxo, de um fluido ou de uma substância pode ser subdividida em exergia cinética, potencial, física ou termo-mecânica e química (SZARGUT, 1999; KOTAS, 1995). O cálculo da exergia cinética envolve a velocidade em relação à superfície da Terra e a potencial é obtida pelo valor do nível gravitacional da vizinhança com relação ao sistema considerado. Em sistemas de cogeração essas duas parcelas geralmente são desprezadas devido a variação de entalpia presente nos fluxos e por não haver variação gravitacional nesses sistemas.

Portanto, a exergia total do fluxo material em um sistema de cogeração é dada pela soma da exergia física com a exergia química do fluido, como representado na Eq. (5.18).

$$b_{total} = b_{física} + b_{química} \quad (5.18)$$

A exergia física é obtida pela diferença de temperatura e de pressão em relação ao ambiente e a química pela diferença entre a composição química dos componentes do sistema e a composição padrão do ambiente de referência.

As exergias físicas específicas de entrada e saída de cada equipamento são calculadas a partir dos valores de entalpia e entropia e foram calculadas pela Eq. (5.19), dada em Szargut, Morris e Steward (1988).

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5.19)$$

Em que:

h - Entalpia específica do fluxo (kJ/kg);

s - Entropia específica do fluxo (kJ/kg);

h_0 - Entalpia da água para o estado de referência (kJ/kg);

s_0 - Entropia da água para o estado de referência (kJ/kg).

A exergia química expressa o valor exergético da substância resultante da diferença de sua concentração em relação à composição química do ambiente, com temperatura e pressão já equilibrados com o meio (BEJAN; TSATSARONIS; MICHAEL, 1996; SZARGUT, 1999). De acordo com Ometto (2005), está baseada no potencial químico da espécie estudada e se torna maior à medida que vai se afastando de seu estado padrão no ambiente.

Como afirmado anteriormente, um elemento fundamental é a definição do estado de referência-padrão a partir do qual a exergia vai ser determinada. De acordo com Bejan (1988); Cornelissen (1997); Kotas (1995); Rosen e Dincer (1999); Szargut, Morris e Steward (1988) e Wark (1995), este deve ser estabelecido pela temperatura, pela pressão e pela composição química do ambiente.

Usualmente, são utilizadas as condições normais de temperatura e de pressão (CNTP) $T_0=298,15$ K e $P_0=101,325$ kPa, respectivamente, e a composição química mais estável do ambiente, a da atmosfera. Portanto, considerando o do meio ambiente como o estado se referência padrão, neste trabalho, o mesmo será considerado nas condições anteriormente citadas.

5.2.2 Exergia do Vapor e da Água

Para efetuar o cálculo das exergias da água e o vapor foi utilizada a Eq. (5.20). Neste caso, o estado intermediário referente às condições ambiente corresponde a água líquida.

Dessa forma, a exergia do vapor foi calculada pela soma da exergia física, dada pela Eq. (5.19) com a exergia química da água. Para água (H_2O) no estado líquido foi admitido o de 49,96 kJ/kg dado em Szargut, Morris e Steward (1988), e, para água no estado gasoso (vapor) foi utilizado o valor de 527,33 kJ/kg, dado pela mesma referência.

$$b_{vapor} = b_{vapor}^{fis} + b_{água}^{qui} \quad (5.20)$$

5.2.3 Exergia do Combustível

Para calcular a exergia específica do bagaço da cana é utilizada uma equação, definida pela última referência para combustível sólido úmido, que faz a correlação entre a exergia química e o poder calorífico inferior do combustível, considerando a relação entre as frações em massa de oxigênio e carbono, a composição elementar do combustível, conforme a Eq. (5.21).

$$b_{bag} = \beta(PCI_{bag} + h_{água}Z_{água}) + b_{água}Z_{água} \quad (5.21)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,2160 \left(\frac{Z_{H_2}}{Z_C} \right) - 0,2499 \left(\frac{Z_{O_2}}{Z_C} \right) \left[1 + 0,7884 \left(\frac{Z_{H_2}}{Z_C} \right) \right] - 0,0450 \left(\frac{Z_{N_2}}{Z_C} \right)}{1 - 0,3035 \left(\frac{Z_{O_2}}{Z_C} \right)} \quad (5.22)$$

Em que:

- β - Função das frações de massa dos componentes químicos do bagaço (%);
- Z_i - Fração em massa dos diferentes elementos químicos (%);
- $Z_{água}$ - Fração em massa de água no bagaço úmido (%);
- $h_{água}$ - Entalpia de vaporização da água;
- $b_{água}$ - Exergia química da água líquida.

A Eq. (5.22) é utilizada para calcular a exergia específica da madeira e compostos com composição semelhante. Segundo Sosa-Arnan e Nebra (2005), tal equação é satisfatória para o caso do bagaço e da palha da cana por atender esses requisitos, pois possuem a celulose, a hemicelulose e a lignina em sua composição.

5.2.4 Exergia do ar e dos gases de combustão

Para a exergia específica do ar e gases de combustão (considerando uma mistura ideal de gases ideais) também foram consideradas as parcelas físicas (b_g^f ou b_{ar}^f) e químicas (b_g^q ou b_{ar}^q), assim da Eq. (5.18), resultam as equações (5.23) e (5.24).

$$b_g = b_g^f + b_g^q \quad (5.23)$$

$$b_{ar} = b_{ar}^f + b_{ar}^q \quad (5.24)$$

A exergia física foi obtida pela Eq. (5.19). E, para calcular a entalpia e entropia total do fluxo ideal, em kJ/kg e kJ/kg.K, foram empregadas as equações (5.25) e (5.26), respectivamente.

$$h = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i h_i}{MM_i} \right) \quad (5.25)$$

$$s = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i s_i}{MM_i} \right) \quad (5.26)$$

Em que f_i e MM_i equivalem, respectivamente, à fração e à massa molar de cada componente dos gases.

Também para a determinação da exergia química dos gases é necessário estabelecer o ambiente de referência, que determinará então as concentrações das espécies de referência. Por ser um dos modelos mais aceitos pela comunidade científica internacional, neste trabalho foi considerado o modelo de substâncias de referências usando o ambiente de referência padrão e os valores de Exergia química dados por Szargut, Morris e Steward (1988).

Segundo os últimos autores, o ambiente de referência atua como um sistema infinito, considerando-se que, nele, ocorram somente processos internamente reversíveis, cujo estado intensivo permanece inalterado, isto é, a temperatura, a pressão e os potenciais químicos de seus componentes permanecem constantes. Ainda por eles, as espécies de referências gasosas são as mais convenientes para utilizar, porque, com exceção para o vapor de água, suas concentrações na atmosfera podem ser medidas e são consideradas constantes.

A exergia química padrão, para qualquer composto pela sua reação de formação e com os dados de referência da exergia química-padrão dos elementos químicos puros, é dada, segundo Szargut, Morris e Steward (1988), por:

$$b_{qui}^{\circ} = \Delta_f G^{\circ} + \sum n_{el} \cdot b_{qui_el}^{\circ} \quad (5.27)$$

b_{qui}° - exergia química-padrão do composto (kJ/mol);

$\Delta_f G^{\circ}$ - energia livre de Gibbs de formação padrão do composto (kJ/mol);

n_{el} - número de moles do elemento em um mol de compostos ou de íons de referência;

$b_{qui_el}^{\circ}$ - exergia química-padrão dos elementos químicos puros (kJ/mol).

Szargut, Morris e Steward (1988) descrevem que, utilizando as concentrações ou pressões parciais médias convencionais das espécies de referência, a exergia química de uma substância pode ser considerada igual à sua exergia química padrão (com exceção da água (H₂O) líquida e do vapor de H₂O), como representado na Equação (Eq.) (5.28).

$$b_{qui} = b_{qui}^{\circ} \quad (5.28)$$

Sendo a exergia química para cada substância emitida:

$$b_{qui} = (b_{qui}^o / MM).1000 \quad (5.29)$$

b_{qui} - exergia química específica da substância (kJ/kg);

MM - massa molecular da substância (g/mol)

Para os componentes dos gases contidos nos gases emitidos pelas caldeiras alimentadas pelo bagaço e palha da cana, os valores utilizados são os calculados e determinados pela última, referência conforme a Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 - Exergia química específica de algumas substâncias

Substância	b_q (kJ/kmol)
CO ₂	19870
O ₂	3970
N ₂	720
H ₂ O (g)	9500

Fonte: Szargut, Morris e Steward (1988)

Foi considerada a composição dos gases em base seca, a partir dos dados disponibilizados pelas usinas, através das frações molares de cada componente citado, e utilizada a Eq. (5.30) para determinar a exergia química específica.

$$b^{qui} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i b_i^{qui}}{MM_i} \right) \quad (5.30)$$

b^{qui} - exergia química específica do ar ou dos gases de combustão (kJ/kg);

b_i^{qui} - exergia química molar de cada componente presente na mistura ideal (kJ/kmol).

A exergia presente nas moléculas de vapor d'água foi estimada a partir da quantidade de vapor d'água produzida nas reações de combustão. A partir das porcentagens de cada componente químico presente no bagaço, a reação química de queima do bagaço foi determinada em Nebra (1985), conforme apresentada na Eq. (5.31).

Resolvendo algebricamente as equações correspondentes, foram obtidas as vazões mássicas de vapor d'água devido à combustão e, a partir dos resultados encontrados foram, então, obtidas a exergia total referente à água no estado vapor que sai da chaminé das caldeiras de cogeração.

5.2.5 Eficiências de Segunda Lei

Como definidos por Kotas (1995), os cálculos das eficiências pela segunda lei (Ψ) da termodinâmica, para as turbinas do sistema, podem ser realizados considerando a Eq. (5.32).

$$\Psi = \left(\frac{\Delta h_{real}}{b_e - b_s} \right) \times 100 \quad (5.32)$$

Em que, Δh_{real} indica a diferença entre as entalpias de entrada e saída do equipamento em quilojoules por quilograma (kJ/kg) e os parâmetros b_e e b_s indicam

as exergias específicas na entrada e na saída do equipamento, respectivamente, na mesma unidade.

Incluídas as perdas de transmissão mecânica e as de geração elétrica no gerador, tal índice é obtido pela potência da energia elétrica obtida ou pela potência mecânica, de acordo com o volume de controle considerado, como apresentado na Eq. (5.33).

$$\Psi = \left(\frac{\dot{W}}{b_e - b_s} \right) \times 100 \quad (5.33)$$

No caso específico de caldeiras, como comentado no subitem 5.2, a eficiência da segunda lei foi calculada pelo método Insumo/Produto. Alguns autores como Baloh e Wittwer (1995) e, Sosa-Arnan e Nebra (2007) têm usado o mesmo conceito neste tipo de análise, representada pela Eq. (5.34).

$$\Psi = \frac{\dot{m}_{vapor}(b_{vapor} - b_{aa})}{\dot{m}_{comb} b_{comb}} \times 100 \quad (5.34)$$

Sendo:

Ψ - Eficiência de Segunda Lei (%);

$\dot{m}_{vapor}$ - Fluxo de massa do vapor superaquecido na saída da caldeira (kg/s);

b_{vapor} - Exergia específica de vapor superaquecido na saída da caldeira (kJ/kg);

$\dot{m}_{aa}$ - Fluxo de água de alimentação na entrada da caldeira (kg/s);

b_{aa} - Exergia específica da água na entrada da caldeira (kJ/kg);

Para avaliação do desempenho global do sistema de cogeração pela segunda lei (η_{II}), foi utilizada a Eq. (5.19), descrita em Horlock (1997) e Huang (1996), na qual

$B_{calor_útil}$ é a exergia do calor útil obtida no processo e B_{comb} a exergia do combustível consumido.

$$\eta_{II} = \frac{W_{total} + B_{calor_útil}}{B_{comb}} \quad (5.35)$$

A exergia que acompanha um fluxo de calor do sistema a uma temperatura T para o meio de referência a T_0 foi calculada pela Eq. (5.36).

$$B_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)Q \quad (5.36)$$

5.3 ANÁLISE AMBIENTAL UTILIZANDO INDICADORES EXERGÉTICOS

Para avaliar de maneira não monetária as tecnologias de conversão de energia, Makarytchev (1998) apresentou três indicadores de impacto ambiental baseados no conceito de exergia. O autor explica que os impactos de um processo podem ser quantificados por meio de indicadores que relacionam o processo com o ambiente humano e natural. Esses indicadores são a taxa de recurso (R_{rec}), a eficiência ambiental (η_{amb}) e a taxa de poluição (R_{pol}).

Segundo Bejarano (2009), o impacto ambiental pode ser diminuído pelo aumento da eficiência exergética do processo. Os impactos globais podem ser classificados em três partes: a primeira, associada ao consumo dos recursos naturais, envolve a exergia dos recursos naturais consumidos pelo processo (inclui a exergia do combustível, água, ar, etc.), a segunda é tida pela eficiência pela qual o processo converte a energia disponível nos recursos, e a última, que trata dos rejeitos das emissões dos processos.

Dessa forma, um aumento da eficiência exergética poderia ter como consequência uma redução no consumo dos recursos e, com isso, uma diminuição dos rejeitos e das emissões desse ambiente. Segundo a última referência, isso pode

ser traduzido em uma melhora no desempenho ambiental desses processos, permitindo, assim, associar os aspectos ambientais à eficiência exergética.

A Figura 5.1 apresenta um esquema de interações em um processo de conversão de energia e as quantidades usadas para a definição dos indicadores, como apresentado abaixo:

Figura 5.1: Representação esquemática do impacto de um processo no meio ambiente. (MAKARYTCHEV, 1998)

Sendo:

$\dot{W}_{prep.}$ - Trabalho requerido para a extração e preparação dos recursos naturais;

$\dot{W}_{remoção}$ - Trabalho utilizado para remoção/desativação dos rejeitos;

$\dot{W}_{produto}$ - Trabalho produzido ou exergia do produto final do processo;

$\dot{B}_{rec.nat.}$ - Valor exergético dos recursos naturais consumidos pelo processo;

$\dot{B}_{desat.}$ - Exergia dos recursos naturais adicionais, destruída durante a desativação dos resíduos;

$\dot{B}_{rejeitos}$ - Exergia dos rejeitos sólidos, do calor rejeitado e das emissões.

A eficiência ambiental do processo é sempre menor que a eficiência exergética e é calculada pela razão da exergia do produto final ou trabalho produzido e a exergia total dos recursos naturais e humanos consumidos:

$$\eta_{amb} = \frac{\dot{W}_{produto}}{(\dot{B}_{rec.nat.} + \dot{W}_{prep.} + \dot{B}_{desat.} + \dot{W}_{remoção})} \quad (5.37)$$

A taxa de recurso pode ser traduzida como o consumo total do recurso, e é inversa à eficiência ambiental:

$$R_{rec.} = \frac{(\dot{B}_{rec.nat.} + \dot{W}_{prep.} + \dot{B}_{desat.} + \dot{W}_{remoção})}{\dot{W}_{produto}} \quad (5.38)$$

Ou seja:

$$\eta_{amb} = \frac{1}{R_{rec.}} \quad (5.39)$$

Quanto maiores forem as interações do processo com o meio ambiente, menor a eficiência ambiental e, conseqüentemente, maior será o impacto ambiental.

Makarytchev (1998) apresenta também a taxa de poluição como um indicador de risco ambiental causado pela desativação dos resíduos e a define como a razão entre a soma das parcelas das perdas de exergia nos rejeitos e dos recursos naturais adicionais para desativação dos rejeitos, e a exergia do produto final do processo:

$$R_{pol} = \frac{(\dot{B}_{rejeitos} + \dot{B}_{desat.})}{\dot{W}_{produto}} \quad (5.40)$$

A taxa de poluição pode ser obtida pela soma das taxas de poluição física e taxa de poluição química. A primeira se refere aos impactos causados pela temperatura e pressões por estarem em quantidades diferentes das do meio ambiente. E a química, se refere ao quanto que o resíduo é capaz de reagir com os componentes do meio ambiente enquanto atinge o equilíbrio químico. Ambas são obtidas respectivamente por:

$$R_{pol,fis} = \frac{(\dot{B}_{rej,fis.} + B_{desat.,fis})}{\dot{W}_{produto}} \quad (5.41)$$

$$R_{pol,qui} = \frac{(\dot{B}_{rej,qui} + B_{desat.,qui})}{\dot{W}_{produto}} \quad (5.42)$$

No caso dos sistemas de cogeração alimentados por bagaço, a parcela referente à exergia dos recursos naturais adicionais para remoção ou desativação dos resíduos, foi calculada a exergia presente na água utilizada para lavagem dos gases e das cinzas. Já para a primeira parcela, referente à exergia dos rejeitos, foram consideradas a exergia das cinzas, que são os rejeitos sólidos das caldeiras e a exergia das emissões dos gases que saem pelas chaminés.

Essa última parcela, referente à exergia presente na emissão dos gases de combustão, foi calculada de acordo com a Eq. (5.43).

$$B_{emissões} = \dot{m}_g \times b_g \quad (5.43)$$

Em que $\dot{m}_g$ representa o fluxo de gases que sai da chaminé das caldeiras em kg/s e b_g a soma das parcelas das exergias físicas e químicas dos gases de combustão em kJ/kg, como descrito anteriormente na Eq. (5.23).

Para o cálculo da exergia dos rejeitos sólidos foi determinada pela soma da exergia química dos componentes químicos presentes nas cinzas das caldeiras. Esses dados foram obtidos em De Paula et al. (2008) que, estudando o potencial das cinzas do bagaço da cana para substituir parte do cimento Portland,

encontraram valores de 5% de carbono sólido (C_2) e 84% de sílica (SiO_2). Na porcentagem restante estão distribuídas diversas substâncias químicas, em pequenos valores, como apresentadas por eles. Dessa forma, a exergia perdida nas cinzas foi calculada pela Eq. (5.44).

$$\dot{B}_{cinzas} = \sum_{i=1}^i b_{q,i} \quad (5.44)$$

Os valores de exergia para cada componente i , presentes nas cinzas, assim com os componentes químicos das substâncias presente nos gases emitidos, foram retirados de Szargut, Morris e Steward (1988).

Portanto, calculando todas essas parcelas e obtendo a taxa de poluição total, de acordo com Bejarano (2004), se:

$R_{pol,t} = 0 \rightarrow$ O processo é reversível e não causa nenhum impacto ao meio ambiente;

$0 < R_{pol,t} < 1 \rightarrow$ O processo apresenta um impacto ambiental em função das limitações tecnológicas dos processos de conversão de energia;

$R_{pol,t} \gg 1 \rightarrow$ As emissões e os resíduos do processo provocam um grande impacto ao meio ambiente.

6. RESULTADOS

Neste item, são apresentados os resultados da avaliação termodinâmica, em termos energéticos, exergéticos e ambientais, dos sistemas de cogeração das usinas em estudo. São fornecidos e comparados os valores de eficiência de primeira e segunda lei dos equipamentos de cada usina, além dos resultados da avaliação global para cada uma delas. A exergia é apresentada como um indicador ambiental para esses sistemas, que são aplicados e analisados para cada caso em estudo.

6.1 ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DOS SISTEMAS COGERAÇÃO DAS USINAS

As avaliações das eficiências energéticas e exergéticas no uso do bagaço da cana em sistemas de cogeração foram feitas separadamente para cada caso estudado e os dados foram levantados através de medições baseadas na experiência prática da usina.

Os resultados foram obtidos utilizando-se as médias diárias e mensais do banco de dados das usinas e por meio de entrevistas com os responsáveis do setor. As entalpias e entropias foram calculadas a partir da biblioteca de propriedades termodinâmicas do programa de simulação *Engineering Equation Solver*[®] (EES[®]).

Para a avaliação dos sistemas de geração de vapor, são apresentados os fluxos médios das caldeiras considerando cada uma como um subsistema isolado, como apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Fluxos fundamentais obtidos para avaliação do sistema de geração de vapor das usinas

Parâmetros	USINA A		USINA B	
	Caldeira A1	Caldeira A2	Caldeiras B1, B2 e B3	Caldeiras B4 e B5
Fluxo de combustível (kg/s)	12,2	20,44	10,0	12,5
Fluxo de água na entrada (kg/s)	29,27	40,6	18,5	25
Energia térmica produzida (MW)	71,8	128,56	56,82	71,16
Energia fornecida (MW)	91,99	154,24	75,46	94,32
Exergia da água (kJ/kg)	93,05	93,05	93,05	93,05
Exergia do vapor (kJ/kg)	1.552,41	1.879,90	1.541,63	1.541,63

Tais fluxos permitiram o cálculo das eficiências energéticas e exergéticas de cada caldeira e dos sistemas de geração de vapor de cada usina. Neste último caso, considerando como volume de controle todas as caldeiras de cada agroindústria estudada.

As frações mássicas utilizadas para o cálculo da exergia do bagaço foram obtidas da literatura. Van der Poel, Schiwek e Schwarz (1998) informam os valores da composição química dos elementos do bagaço da cana-de-açúcar, e os cálculos foram realizados a conforme os valores médios apresentados por eles, como descritos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Dados da composição química do bagaço seco em (%)

Elemento	Valor médio	Valor máximo	Valor mínimo	Número de dados
Carbono	47,2	49,1	44	9
Hidrogênio	6,3	7,4	5,8	9
Nitrogênio	0,3	0,4	0,2	2
Oxigênio	44,5	48	41,5	9
Enxofre	0,1			1
Cinzas	2,5	3,1	1	8

Fonte: Van der Poel, Schiwek e Schwarz (1998)

Os outros dados para o cálculo da exergia específica do bagaço são: $PCI = 7546 \text{ kJ/kg}$ e $Z_{\text{água}} = 0,50$, segundo Prieto (2003); $h_{\text{água}} = 104,8 \text{ kJ/kg}$ e $b_{\text{água}} = 49,94 \text{ kJ/kg}$, adotando-se 70% de umidade relativa do ar e temperatura ambiente, $T_0 = 25^\circ\text{C}$ e pressão a 1 atm, segundo Szargut, Morris e Steward (1988).

O resultado da exergia específica do bagaço, com 50% de umidade, calculado para as duas usinas é de $8.639,75 \text{ kJ/kg}$, o que indica ser um bom combustível, mas não melhor do que a palha, que a 15% de umidade e $PCI = 15.173,49 \text{ kJ/kg}$ (LORA; ARRIETA; CARPIO, 2001), apresenta uma exergia de $17.228,4 \text{ kJ/kg}$, que representa quase o dobro do valor da exergia do bagaço.

Os dados indicam que ao empregar a palha para alimentação de caldeiras, juntamente com o bagaço, a tendência seria de elevar a disponibilidade de produção de potência e, como consequência, aumentar a eficiência das geradoras de vapor e do processo. Outra alternativa seria o uso do secador de bagaço no sistema de recuperação de calor, pois ao reduzir a umidade do combustível o valor do PCI do combustível é aumentado e, por consequência, a sua exergia.

Tabela 6.3 – Eficiências energéticas e exergéticas das caldeiras e da geração total de vapor em cada usina

Nº	Descrição	η (%)	ψ (%)
01	Caldeira A1	78,05	38,52
02	Caldeira A2	83,35	44,72
03	Caldeiras B1, B2 e B3	75,31	37,22
04	Caldeira B4 e B5	75,44	37,29
05	Sistema de Geração de Vapor da Usina A	81,37	41,45
06	Sistema de Geração de Vapor da Usina B	75,37	36,50

A metodologia utilizada facilitou a determinação dos valores de eficiência para cada caldeira, assim como os respectivos consumos do combustível (bagaço) e os outros índices de desempenho. Dessa forma, os resultados indicam o destaque da estação geradora de vapor da Usina A, que ao adotar apenas duas caldeiras em sua configuração apresentou melhor desempenho que a estação geradora da Usina B que possui cinco.

Isso pode ser explicado pela melhoria do sistema ao inserir na sua configuração uma caldeira de alta pressão, como é o caso da caldeira A2 que trabalha a uma pressão de vapor com cerca de 6,4 MPa. O que pode ser confirmado quando são comparados os valores encontrados para as duas caldeiras da Usina A, pela qual a caldeira A2 (de alta pressão) apresentou uma eficiência mais elevada que a da outra geradora.

Outro fator importante a ser considerado é que a estação geradora da Usina A possui uma configuração mais nova, recentemente modificada, o que provavelmente justifica menores perdas ocorridas em suas caldeiras.

A Figura 6.1 representa os dados apresentados na Tabela 6.3, permitindo uma melhor visualização das diferenças de eficiências. As caldeiras estão representadas pela numeração distribuída na mesma tabela.

Figura 6.1: Gráfico representativo das eficiências de primeira e segunda lei das caldeiras das Usinas A e B

Nota-se que, independente da configuração, as eficiências das caldeiras calculadas pela primeira lei são bem maiores que aquelas obtidas pela segunda lei. A diferença dos valores encontrados entre as duas análises podem ser explicados pela própria definição, pois enquanto que a primeira lei expressa apenas a relação entre a energia útil absorvida pelo vapor e a energia do combustível, pelo seu poder calorífico, a segunda estabelece uma relação entre o trabalho máximo que poderia ser extraída pelo vapor produzido pela caldeira e a exergia disponível pelo combustível.

Pelos resultados da eficiência de segunda lei, evidencia-se que as maiores irreversibilidades do sistema estão presentes nos sistemas de geração de vapor, pelo qual as perdas acontecem desde a liberação de calor pelo combustível no processo de combustão. Os baixos valores de eficiência exergética das caldeiras confirmam essa afirmação. Essas são as irreversibilidades relacionadas à produção de energia térmica.

Para o cálculo das eficiências dos turbogeradores, turbobombas, turbomoendas e as outras turbinas de geração de potência mecânica, são

apresentados, nas Tabelas 6.4 e 6.5, os valores coletados e calculados dos principais fluxos de acordo com cada usina em análise.

Tabela 6.4 – Parâmetros dos principais fluxos de vapor do sistema de geração de potência mecânica e elétrica da Usina A.

Descrição	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)
Vapor na (e) do turbogerador A-1	22	480	6,276	3371	6,794	1877,33
Vapor na (e) do turbogerador A-2	18	480	6,08	3373	6,811	1874,33
Vapor na (s) do turbogerador A-1	22	150	0,1471	2773	7,428	1089,73
Vapor na (s) do turbogerador A-2	18	150	0,1471	2773	7,428	1089,73
Vapor na (e) da turbobomba	4,0	300	2,059	3021	6,749	1540,33
Vapor na (s) da turbobomba	4,0	180	0,2452	2827	7,32	1176,43
Vapor na (e) da turbomoenda A-1	2,0	300	2,059	3021	6,829	1563,33
Vapor na (e) da turbomoenda A-2	2,0	300	2,059	3021	6,829	1563,33
Vapor na (s) do turbomoenda A-1	2,0	160	0,1353	2793	7,515	1084,73
Vapor na (s) do turbomoenda A-2	2,0	160	0,1353	2793	7,515	1084,73
Vapor na (e) da turbina do picador A-1	2,0	290	2,059	2997	6,078	1529,33
Vapor na (e) da turbina do picador A-2	2,0	290	2,059	2997	6,078	1529,33
Vapor na (s) da turbina do picador A-1	2,0	180	0,2452	2827	7,32	1176,43
Vapor na (s) da turbina do picador A-2	2,0	180	0,2452	2827	7,32	1176,43
Vapor na (e) da turbina do desfibrador	3,0	290	2,059	2997	6,708	1529,33
Vapor na (s) da turbina do desfibrador	3,0	175	0,2452	2817	7,298	1172,93
Vapor na (e) do turboexaustor A-1	2,0	285	1,961	2989	6,714	1518,93
Vapor na (e) do turboexaustor A-2	2,0	285	1,961	2989	6,714	1518,93
Vapor na (s) do turboexaustor A-1	2,0	170	0,2452	2807	7,275	1169,53
Vapor na (s) do turboexaustor A-2	2,0	170	0,2452	2807	7,275	1169,53

Tabela 6.5 – Parâmetros dos principais fluxos de vapor do sistema de geração de potência mecânica e elétrica da Usina B.

Descrição	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (kPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)
Vapor na (e) a do turbogerador B-1	23,5	290	2,01	2999	6,678	1527,37
Vapor na (e) do turbogerador B-2	19,5	290	2,01	2999	6,678	1527,37
Vapor na (e) do turbogerador B-3	16,0	290	2,01	2999	6,678	1527,37
Vapor na (s) do turbogerador B-1	23,5	180	0,1471	2833	7,566	1108,87
Vapor na (s) do turbogerador B-2	19,5	180	0,1471	2833	7,566	1108,87
Vapor na (s) do turbogerador B-3	16,0	180	0,1471	2833	7,566	1108,87
Vapor na (e) da turbobomba	4,0	280	2,059	2974	6,665	1518,37
Vapor na (s) da turbobomba	4,0	180	0,2256	2828	7,361	1165,47
Vapor na (e) das turbomoendas (B-1 a B-3)	3,0	270	2,059	2949	6,621	1507,37
Vapor na (e) das turbomoendas (B-4 a B-6)	3,0	270	2,059	2949	6,621	1507,37
Vapor na (s) das turbomoendas (B-1 a B-3)	3,0	160	0,1373	2793	7,508	1086,67
Vapor na (s) das turbomoendas (B-4 a B-6)	3,0	160	0,1373	2793	7,508	1086,67
Vapor na (e) da turbina do picador B-1	2,5	280	1,961	2977	6,692	1513,37
Vapor na (e) da turbina do picador B-2	2,5	280	1,961	2977	6,692	1513,37
Vapor na (s) da turbina do picador B-1	2,5	180	0,2452	2827	7,32	1176,37
Vapor na (s) da turbina do picador B-2	2,5	180	0,2452	2827	7,32	1176,37
Vapor na (e) da turbina do desfibrador B-1	4,0	290	1,961	3001	6,735	1524,37
Vapor na (e) da turbina do desfibrador B-2	4,0	290	1,961	3001	6,735	1524,37
Vapor na (s) da turbina do desfibrador B-1	4,0	175	0,2452	2817	7,298	1172,97
Vapor na (s) da turbina do desfibrador B-2	4,0	175	0,2452	2817	7,298	1172,97
Vapor na (e) do turboexaustor A-1	1,5	295	1,961	3012	6,755	1530,37
Vapor na (e) do turboexaustor A-2	1,5	295	1,961	3012	6,755	1530,37
Vapor na (e) do turboexaustor A-3	1,5	295	1,961	3012	6,755	1530,37
Vapor na (s) do turboexaustor A-1	1,5	170	0,2452	2807	7,275	1169,57
Vapor na (s) do turboexaustor A-2	1,5	170	0,2452	2807	7,275	1169,57
Vapor na (s) do turboexaustor A-3	1,5	170	0,2452	2807	7,275	1169,57

Da mesma forma, as Tabelas 6.6 e 6.7 apresentam, respectivamente, os resultados das eficiências isentrópicas dos equipamentos geradores de potência das Usinas A e B.

Tabela 6.6 – Eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas do sistema de geração de potência da Usina A.

Nº	Equipamento	Eficiência Isentrópica (%)	Eficiência de Segunda Lei (%)
01	Turbogerador A1	80,58	86,56
02	Turbogerador A2	65,66	70,53
03	Turbobomba	58,26	68,64
04	Turbomoendas A1 e A2	42,75	49,35
05	Turbina do Picador A1	48,07	57,43
06	Turbina do Picador A2	47,38	56,67
07	Turbina do Desfibrador	47,38	56,11
08	Turboexaustor A1	41,35	48,65
09	Turboexaustor A2	38,91	45,79

Tabela 6.7 – Eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas do sistema de geração de potência da Usina B

Nº	Equipamento	Eficiência Isentrópica (%)	Eficiência de Segunda Lei (%)
01	Turbogerador B1	52,99	63,61
02	Turbogerador B2	51,09	61,33
03	Turbogerador B3	52,92	63,53
04	Turbobomba	51,78	63,00
05	Turbomoendas B1, B2 e B3	36,57	43,59
06	Turbomoendas B4 e B5	39,89	47,56
07	Turbinas dos picadores	39,23	47,47
08	Turbinas dos desfibradores	45,83	54,05
09	Turboexaustores B1, B2 e B3	31,90	36,99

De forma inversa aos resultados obtidos das estações geradoras de vapor, observa-se que as turbinas apresentam eficiências de segunda lei superiores às da primeira lei. Isso ocorre porque na primeira lei tem-se como referência um processo ideal reversível, utilizando-se os valores teóricos das entalpias do vapor de saída das turbinas, enquanto que na segunda lei a eficiência é calculada com base no fluxo de exergia real.

As Figuras 6.2 e 6.3 representam os dados apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7, permitindo uma melhor visualização das diferenças entre as eficiências. As turbinas de cada usina estão representadas pela numeração relacionada a cada equipamento, como distribuídas nas referidas tabelas.

Figura 6.2: Gráfico representativo das eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas da Usina A

Figura 6.3: Gráfico representativo das eficiências isentrópicas e de segunda lei das turbinas da Usina B

As turbinas da Usina A apresentaram melhores desempenho que as turbinas da Usina B, destacando-se para os dois casos, a presença de maiores irreversibilidades de geração de potência nos turboexaustores e nas turbinas das moendas. Segundo Del Campo (1999) essas baixas eficiências estão associadas a algumas limitações, tanto de desenho e construção das turbinas, como com os parâmetros de utilização de vapor que estão limitados ao regime de utilização e manutenção desses equipamentos. O autor explica que essas limitações influenciam no desempenho do sistema de geração de potência e aumenta a presença de irreversibilidades.

A Tabela 6.8 mostra as potências mecânica e elétrica produzidas, consumidas e disponíveis para comercialização de cada um dos sistemas de cogeração analisados.

Tabela 6.8 - Potências calculadas, em função da configuração da planta de cada usina

Descrição	Usina A (MW)	Usina B (MW)
Potência mecânica gerada	3,96	6,77
Potência elétrica gerada	25,0	15,5
Potência total gerada (elétrica e mecânica)	28,96	22,27
Potência consumida na turbobomba	1,0	1,0
Potência mecânica total consumida pelos turboexaustores	0,66	0,60
Potência mecânica total consumida nas moendas, picador e desfibrador	2,30	5,17
Potência elétrica consumida no processo e instalações	10,0	15,5
Potência elétrica adquirida (comprada)	-	-
Potência elétrica disponível para comercialização	15,0	-

Para o cálculo do calor útil de cada um dos sistemas de cogeração estudados, foi necessária a coleta de dados e cálculos dos fluxos de vapor na entrada e na saída das válvulas redutoras de pressão, na entrada do desaerador e dos fluxos de água de reposição e condensado de retorno, conforme as Tabelas 6.9 e 6.10, também separadas por usina.

Tabela 6.9 – Fluxos de vapor nas válvulas redutoras e na entrada do desaerador e fluxos de água de reposição e condensado de retorno referente à Usina A

Descrição	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)
Vapor na entrada da 1ª Redução das VR's	4,2	480	6,178	3372	6,802	1876,33
Vapor na saída da 1ª Redução das VR's	4,2	280	2,059	2974	6,665	1518,23
Vapor na entrada da 2ª Redução das VR's	6	290	2,059	2997	6,708	1529,33
Vapor na saída da 2ª Redução das VR's	6	200	0,147	2974	7,652	1224,13
Vapor na entrada da 3ª Redução das VR's	3,5	190	0,147	2853	7,609	1115,83
Vapor na saída da 3ª Redução das VR's	3,5	130	0,0785	2738	7,632	994,53
Vapor na entrada do Desaerador	0,75	180	0,2452	2827	7,32	1176,43
Água de reposição	4,2	25	0,147	104,89	0,3674	49,87
Condensado de retorno	65,7	105	0,2059	440,17	1,3605	89,20

Tabela 6.10 – Fluxos de vapor nas válvulas redutoras e na entrada do desaerador e fluxos de água de reposição e condensado de retorno referente à Usina B

Descrição	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	P (MPa)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)	b (kJ/kg)
Vapor na entrada da VR-B1	12,3	290	2,059	2997	6,708	1529,33
Vapor na saída da VR-B1	12,3	200	0,1373	2873	7,684	1113,83
Vapor na entrada da VR-B2	9,5	190	0,1373	2853	7,542	1106,63
Vapor na saída da VR-B2	9,5	130	0,0785	2873	7,632	1129,43
Vapor na entrada do Desaerador	0,825	180	0,2256	2828	7,361	1165,47
Água de reposição	12,05	25	0,147	104,89	0,3674	49,87
Condensado de retorno	94,95	100	0,2092	419,04	1,3069	84,05

A Tabela 6.11 mostra os resultados da avaliação dos índices de desempenho globais de primeira e segunda lei das Usinas A e B e dados levantados da literatura, de outras usinas de cana-de-açúcar instaladas no interior do Estado de São Paulo, em outros períodos de safra.

Tabela 6.11 – Dados comparativos dos índices de desempenho do sistema obtidos.

Usinas	FUE	RPEC	IGP	RPC	η_{II}
Usina A (safra 2009)	0,82	0,1354	0,856	0,1676	0,3099
Usina B (safra 2009)	0,75	0,055	0,703	0,0771	0,2615
Usaciga (safra 2005) *	0,73	0,0314	0,73	-	-
Dedini (safra 2005) *	0,74	0,0255	0,67	-	-
Cruz Alta (safra 2002) **	0,784	0,026	0,49	0,080	-
Vale do Rosário (safra 98) ***	0,735	0,055	0,548	0,133	-
Vale do Rosário (safra 97) ***	0,74	0,032	0,513	0,087	-

Fonte: * Schirmer (2006); ** Prieto (2003); *** Del Campo (1999).

Esse procedimento foi realizado a fim de obter um estudo comparativo das eficiências das duas usinas em análise para uma melhor conclusão das análises dos sistemas envolvidos. Os valores encontrados para o parâmetro η_{cald} , necessário para o cálculo do IPE e do IGP, foram 0,8137 para as caldeiras a Usina A e 0,7537 para a estação de geração de vapor da Usina B, conforme os valores apresentados na Tabela 6.3.

Para os resultados do critério de desempenho de primeira lei, o FUE, tanto a Usina A como a Usina Cruz Alta apresentaram valores maiores que os encontrados para as outras usinas. Para o sistema de cogeração A, essa afirmação pode ser justificada pela presença de sistemas de alta pressão, pois através de elevadas pressões de vapor permite a produção de maiores quantidades de potência. Para o sistema da Cruz Alta, a justificativa dada é pela utilização de secadores de bagaço nos sistemas de recuperação de calor, já que influencia diretamente no PCI do combustível. Entre essas duas, a Usina A se destaca.

A Usina Vale do Rosário, assim como a Usina A possui sistemas de alta pressão operando com os de baixa, mas apresenta resultados um pouco mais inferiores de eficiência. Como a safra em estudo da Vale do Rosário é mais antiga do que a da usina atual, estes resultados podem estar diretamente envolvidos com a questão da evolução dos sistemas de cogeração nos últimos anos.

No caso da eficiência relativa à geração de potência (IGP), o valor obtido entre as duas usinas analisadas neste trabalho apresentam destaque juntamente com as duas analisadas na safra de 2005, a Usaciga e a Dedini. Como explicado em Horlock (1997), esses resultados indicam que as Usinas Cruz Alta e Vale do Rosário consomem mais energia para produzir 1 kW de potência elétrica e/ou mecânica do que as outras.

Pelos valores apresentados em todos os casos, a economia de energia do combustível (RPEC) é evidente na utilização de sistemas de cogeração. Foi observada que a economia variou de 2,5% a 5,5%, apresentando para a Usina A uma economia de 13,3% no combustível em relação aos sistemas que produzem separadamente potência e calor. A ótima economia da primeira usina deve-se ao

fato de que o excedente de energia elétrica obtido representa a maior parte da potência total produzida pela mesma.

A Razão Potência-Calor (RPC), que indica a relação entre a quantidade de potência elétrica e/ou mecânica produzida e o calor destinado ao processo mostra que as usinas produzem muito mais calor útil do que potência mecânica e/ou elétrica.

E finalmente, pelos índices de desempenho de segunda lei obtidos apenas para as usinas em estudo, evidenciam-se as irreversibilidades inerentes aos equipamentos que compõem os sistemas de cogeração. Tanto neste parâmetro, quando comparada com a Usina B, quanto nos outros índices de desempenho, a Usina A apresentou destaque sobre todas as outras.

6.2 ANÁLISE AMBIENTAL DE PLANTAS DE COGERAÇÃO UTILIZANDO INDICADORES EXERGÉTICOS

Para a análise de impacto ambiental de sistemas de cogeração que utilizam a biomassa da cana como insumo energético, foram aplicados os indicadores exergéticos inicialmente nas usinas de cana em estudo e a partir dos dados referente à safra de 2002 da Usina Cruz Alta, também instalada no interior do Estado de São Paulo, disponíveis no trabalho de Prieto (2003), que permitiram a realização dos cálculos.

Neste item, essa usina será tratada como Usina C, e suas três caldeiras que fornecem vapor a aproximadamente 2,1 MPa a 300°C, cada, são denominadas como caldeiras C1, C2 e C3, respeitando a ordem utilizada pelo autor em seu trabalho.

O procedimento realizado baseado na proposta de Makarytchev (1998) foi realizado para testar a validade da eficiência exergética ambiental como um indicador ambiental das plantas de cogeração do setor sucroalcooleiro. Foi realizada uma comparação deste indicador com outros parâmetros ambientais, tais como

emissões de gases do efeito estufa (CO_2), exergias destruída e perdida, dentre outros, para os casos analisados.

Nos três sistemas têm-se como fluxos exergéticos de entrada as exergias da água, do ar quente e do bagaço. No fluxo de saída temos a soma da exergia do calor útil do sistema com o trabalho elétrico e mecânico total produzido. Na parcela de exergia perdida, como já descrito no item 5, temos a exergia das emissões e a exergia perdida pelas cinzas (rejeitos sólidos).

A fração volumétrica, em base seca, de cada componente gasoso presente nos gases na saída da chaminé, fornecidos pelas usinas, são apresentados, juntamente com suas respectivas temperaturas, na Tabela 6.12. Pelo volume molar e massa molar, de cada composto químico desses gases, foram determinadas as frações molares e mássicas para o cálculo da exergia.

Tabela 6.12 – Fração volumétrica dos componentes dos gases de combustão em base seca e as respectivas temperaturas em Kelvin

Descrição	N_2 (%v/v)	O_2 (%v/v)	CO_2 (%v/v)	T (K)
Gases emitidos na caldeira A1	81,8	8,3	9,9	366,05
Gases emitidos na caldeira A2	80,6	6,6	12,8	363,05
Gases emitidos na caldeira B1	81,9	9,8	8,3	523,15
Gases emitidos na caldeira B2	82,3	8,5	9,2	503,15
Gases emitidos na caldeira B3	81,13	9,77	9,1	463,15
Gases emitidos na caldeira B4	82,1	9,8	8,1	473,15
Gases emitidos na caldeira B5	83,6	8,5	7,9	488,15

A Tabela 6.13 apresenta os resultados estimados para as quantidades de fluxo mássico e exergético do vapor d'água emitidas nas chaminés das caldeiras.

Tabela 6.13 – Fluxos mássicos e exergias do vapor d'água que saem das chaminés das caldeiras.

Descrição	$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O(g)}}$ (kg/s)	$B_{\text{H}_2\text{O(g)}}$ (kW)
Caldeira A1	9,67	5.512
Caldeira A2	16,21	9.202
Caldeira B1	7,93	9.253
Caldeira B2	7,93	9.117
Caldeira B3	7,93	8.723
Caldeira B4	9,91	10.972
Caldeira B5	9.91	11.087

O autor do trabalho, pelo qual foram retirados os dados referentes à Usina C, apresentou somente as temperaturas e as exergias totais dos gases para cada caldeira, não estavam disponíveis as frações referentes a cada componente químico nos gases emitidos.

Dessa forma, as parcelas de irreversibilidade total devido aos gases emitidos ($B_{\text{emissões}}$), às cinzas (B_{cinzas}), ao restante das irreversibilidades do sistema ($B_{\text{destruída}}$) e da exergia dos recursos naturais ($B_{\text{desat.}}$) encontram-se na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Parcelas das irreversibilidades ou exergias perdidas em cada planta.

Descrição	Usina A	Usina B	Usina C
$B_{\text{emissões}}$ (kW)	22.517,37	76.915,07	22.703,85
B_{cinzas} (kW)	6.720,25	11.327,41	4.717,56
$B_{\text{destruída}}$ (kW)	176.520,50	287.076,23	182.619,21
$B_{\text{desat.}}$ (kW)	9.368,30	12.971,61	7.207,73

Apresentando aproximadamente 10,94%, 20,49% e 10,81% das irreversibilidades totais do sistema, respectivamente para os casos A, B e C e cerca de 77%, 87% e 83% da fração da exergia perdida pelos rejeitos (soma das parcelas $B_{\text{emissões}}$ e B_{cinzas}) para mesmas plantas, em ordem respectiva, verifica-se que a exergia das emissões representa uma parcela bastante considerável.

Os números mostram que a planta de cogeração da Usina A, mesmo liberando maior quantidade de CO_2 na atmosfera (Tabela 6.12), foi a que apresentou o melhor controle dos seus poluentes relacionados à exergia das emissões. Isso, devido ao melhor controle de temperatura na saída das chaminés que influencia na quantidade da exergia física das emissões.

Enquanto a Usina A faz as medições das emissões nas chaminés pelo menos uma vez no mês, a Usina B só realizou essa verificação duas vezes durante a safra de 2009. As outras porcentagens molares volumétricas para os diferentes compostos químicos, ainda referentes à mesma tabela, mostraram valores bastante semelhantes entre eles.

Os valores apresentados na Tabela 6.14 mostram que a maior parte da exergia rejeitada, perdida pelo sistema de cogeração, está relacionada às emissões gasosas. Tanto neste ponto, como com relação às emissões, a Usina B apresenta uma quantidade de exergia perdida bastante significativa. Isso ocorre devido à presença de uma maior quantidade de equipamentos em seu sistema, principalmente de geradoras de vapor. Desta forma, quanto mais equipamentos no sistema, sem o devido controle das perdas ocasionadas por eles, mais poluentes são lançados ao meio ambiente.

Com relação à exergia química que é descartada nas cinzas, percebe-se que, mesmo sendo uma parcela pequena da irreversibilidade total do sistema, apresenta valores de perdas consideráveis, quando contabilizadas.

Como apresentado anteriormente, é alta a parcela de quantidade de exergia destruída por outras causas ($B_{\text{destruída}}$). Sosa-Arnan (2008) aponta e calcula as principais delas e, mostra que maior parcela é devido à mistura e evaporação da umidade do bagaço seco, que representa, aproximadamente 27% quando relacionada à exergia cedida pelo combustível. O autor fala também das partes

perdas por transferência de calor, nos sistemas de recuperação de calor das caldeiras.

Outra causa de destruição exergética são devido é devido a secagem do bagaço no secador de bagaço, sendo também uma pequena parcela, cerca de 0,7% (SOSA-ARNAO, 2008), mas que é importante ser contabilizada, para que seja feito o devido controle.

Para a parcela B_{desat} , que se refere à quantidade dos recursos naturais adicionais destruída para remover os rejeitos, foi considerada a exergia da água de lavagem dos gases e das cinzas que saem da mesma tubulação. Pelo não fornecimento de dados por partes das usinas estudadas, a vazão de água gasta para esse tipo de lavagem foi estimada pelos dados fornecidos em Torquato Júnior et al. (2004).

Os últimos autores informaram uma vazão média de 1,25 m³/TC (metros cúbicos de água por tonelada de cana moída), para caldeiras alimentadas por bagaço de cana. Foram obtidos então os valores de 187,52 kg/s para a Usina A, 259,64 kg/s para a Usina B e, para Usina C, que produz 10000 TC/dia, foi calculado um fluxo de 144,22 kg/s de água para lavagem dos seus resíduos.

Os valores de exergia na entrada, saída e a soma das parcelas de exergia perdida e destruída, que representa as irreversibilidades totais do processo, são exibidos na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Valores de exergia de entrada, de saída e da soma das parcelas de destruição e perdas de exergia dos sistemas de cogeração das usinas de cana.

Planta	Exergia na Entrada (MW)	Exergia na Saída (MW)	Exergia Perdida e Destruída (MW)
Planta de cogeração A	289,18	87,46	201,72
Planta de cogeração B	486,08	124,26	361,82
Planta de cogeração C	268,74	58,70	210,04

Nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 são apresentados os balanços exergéticos dos sistemas de cogeração de cada uma das usinas, pelos quais são mostradas as parcelas da exergia perdida e destruída, separadamente e a exergia calculada para os recursos naturais adicionais, que entram e saem do processo sem participar da conversão.

Figura 6.4: Balanço exergético da planta de cogeração da Usina A

Figura 6.5: Balanço exergético da planta de cogeração da Usina B

Figura 6.6: Balanço exergético da planta de cogeração da Usina C

Diante dos resultados dos balanços exergéticos e dos valores apresentados nas outras tabelas deste subitem, foi possível determinar a eficiência ambiental e a taxa de poluição para cada caso, que juntamente com os valores da eficiência exergética de cada sistema, são descritos na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Valores da eficiência de segunda lei, da eficiência ambiental e da taxa de poluição dos sistemas de cogeração das três usinas de cana.

Planta	η_{II}	η_{amb}	R_{pol}
Planta de cogeração da Usina de Cana A	0,31	0,29	0,44
Planta de cogeração da Usina de Cana B	0,26	0,25	0,81
Planta de cogeração da Usina de Cana C	0,22	0,21	0,59

Os valores de trabalho para preparação dos recursos naturais (W_{prep}) e a exergia gasta para remoção dos rejeitos ($W_{remoção}$) não foram determinados. Para o volume de controle estudado, o primeiro termo não foi considerado, já que para preparação dos recursos naturais os equipamentos para cálculo da potência gasta, seriam apenas o pré-ar e o economizador e, como visto, estes são acionados pelo calor recuperado das próprias caldeiras.

Com relação à exergia de desativação dos resíduos ou trabalho de remoção, teria que ser determinada a potência gasta pelos lavadores de gases, mas, para isso, as usinas não forneceram dados. Apesar disso, é confirmada a afirmação de Makarytchev (1998), que realizando todas as considerações possíveis para a avaliação ambiental, a eficiência ambiental é sempre menor que a eficiência exergética.

Poderia também ser considerada uma maior área de estudo para os dois parâmetros, a fim de realizar uma análise mais completa, mas envolveria um estudo muito mais detalhado, considerando que para preparar os insumos e desativar os rejeitos desse processo abrangeria um campo de coleta de dados e informações muito amplo que não se encontra nos limites de estudo deste trabalho.

Pelos resultados da análise, apresentados na Tabela 6.16, as plantas de cogeração apresentam um baixo desempenho ambiental. Isso devido às altas irreversibilidades do processo. Dentre os sistemas analisados, a planta B apresentou um pior desempenho ambiental, o que pode ser confirmado por seu maior valor de dano apresentado como indicador ambiental ($R_{pol,t}=0,81$).

De acordo com as condições descritas por Bejarano (2004), detalhadas no subitem 5.3 do Item 5 deste trabalho, assim como na planta de cogeração A, suas emissões e seus resíduos estão provocando um impacto ambiental ao meio ambiente, o que implica na necessidade de um melhor controle das irreversibilidades dos processos para os três estudos apresentados.

O estudo comparativo também indica que a planta que apresenta um menor impacto ambiental é a apresentada pela Usina A, isso devido às menores taxas de emissões de gases e ao melhor aproveitamento exergético do sistema. Percebe-se ainda que a eficiência exergética, a eficiência ambiental e a taxa de poluição estão diretamente ligadas. Assim, é possível confirmar que quanto menor a eficiência do sistema, menor a eficiência ambiental devido a uma maior taxa de poluição.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Baseando-se na análise bibliográfica, foi possível confirmar o quanto a biomassa da cana-de-açúcar tem se apresentado como ótima alternativa de geração de energia. Por ser uma das mais baratas do Brasil, tem tornado as sucroalcooleiras auto-suficientes em sua demanda de energia térmica, elétrica e mecânica, quando a adotam como combustíveis para o processo. Isso tem ajudado a aumentar a utilização da biomassa, ou de recursos tidos como renováveis, na matriz energética brasileira, tornando-a cada vez mais limpa.

Observou-se também o destaque de produção de cana e geração de energia que o Estado de São Paulo apresenta e o potencial que esse Estado ainda tem a proporcionar sobre todas as outras regiões do Brasil. O levantamento bibliográfico mostrou as vantagens de serem utilizados o bagaço e a palha da cana para queima

em caldeiras de cogeração, já que até 2030 a produção desses dois insumos tende a duplicar, quando comparados ao quanto está sendo gerado atualmente.

Utilizando os conceitos de energia e exergia, neste trabalho foi realizado um estudo em sistemas de cogeração que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como insumo energético, por meio dos fundamentos disponíveis na literatura e por aplicação dos princípios da Termodinâmica em estudos de caso.

Por permitir uma análise mais aprofundada e dar uma visão real das perdas ocorridas em sistemas produtivos, o método da exergia mostrou-se como uma ferramenta termodinâmica capaz de avaliar, juntamente com os princípios da primeira lei, em termos quantitativos e qualitativos a eficiência de um processo. Por isso, como visto na revisão de literatura, tem sido cada vez mais implementada para estudar sistemas energéticos e industriais.

Os estudos de caso aplicados neste trabalho comprovam isto, pois enquanto que a PLT só disponibiliza as perdas relacionadas ao calor, a segunda lei, por considerar diversas outras causas de perdas, e por mostrar a capacidade da matéria-prima em produzir potência até que atinja o equilíbrio com o meio ambiente, permite um estudo mais aprofundado, completando, assim o que é defendido pelo primeiro princípio.

Ao utilizar a análise exergética para análise ambiental, concluiu-se que tal metodologia fornece uma abordagem coerente com as tecnologias que primam pela sustentabilidade de soluções ambientais. Nesse sentido, pelos estudos de caso, verificou-se que existe uma taxa de poluição considerável em tais sistemas energéticos.

E, apesar da plantação de cana compensar o efeito do CO₂ emitido na atmosfera, como apresentado na literatura, os resultados mostram que existem outros poluentes que são lançados ao meio ambiente. O principal deles está representado pela alta parcela de vapor d'água nos gases emitidos nas chaminés das caldeiras e a alta presença de N₂ (Nitrogênio), gás que pode reagir com o oxigênio e produzir os óxidos de nitrogênio (NO, NO₂) que contribuem para a intensificação do efeito estufa.

Os resultados mostraram que a eficiência exergética ambiental é um índice de impacto que ao ser utilizado com a taxa de poluição total, se apresenta como um parâmetro viável para avaliar e quantificar o impacto ambiental para processos de conversão de energia, tal como sistemas de cogeração. Dessa forma, é possível que a partir dos resultados seja feita uma otimização do desempenho ambiental do processo, associando com a performance de produção de energia.

Dentre todas as usinas analisadas, percebeu-se que pelos valores de eficiência, energética, exergética e ambiental, e ainda pelas altas taxas de poluição, a Usina B necessita repensar em sua configuração e fazer um melhor controle ambiental de seus poluentes.

Prieto (2003) informou que no ano de estudo foi feito um investimento de um novo bloco energético, na usina C, para aumentar a produção de eletricidade e melhorar o aproveitamento do combustível a fim de incrementar a produção de potência para fins de venda. Enquanto que para a Usina B, a possibilidade de modificação ainda encontra-se em estudo.

Para esta última usina, é recomendado que seja adicionado pelo menos um sistema de alta pressão no processo, a fim de reduzir a quantidade de caldeiras geradoras de vapor e aumentar o aproveitamento energético do combustível que as alimentam, pois assim reduziria as emissões. E ainda, que ao invés de utilizar tantos ternos de moenda, mudasse a forma de moagem acrescentando um difusor. Assim, reduziria a quantidade de vapor enviado para as turbinas de moendas sendo então destinado para outros fins e assim ser bem melhor aproveitado.

Uma recomendação para as duas usinas que foram estudadas e apresentadas pela autora deste trabalho, é que sejam adicionados em seus sistemas de recuperação de calor, secadores de bagaço a fim de reduzir a umidade do seu combustível e elevar a sua capacidade de geração de potência. Desta forma, a produtividade dos seus processos se elevaria, reduzindo, assim, tanto às irreversibilidades ocorridas neles como, conseqüentemente, a elevada poluição apresentada nos resultados deste trabalho.

De modo geral, foram atendidos os objetivos específicos desse trabalho, o que possibilitou desenvolver a idéia central da dissertação, que foi o de aplicar a

termodinâmica para avaliar o sistema em termos energéticos, exergéticos e ambientais em sistemas de cogeração a partir da biomassa da cana, aplicando estudos em usinas instaladas no interior do Estado de São Paulo.

Para trabalhos futuros é recomendado que:

- Seja feita, utilizando a Análise de Ciclo de Vida, uma análise considerando toda área envolvida para preparação dos recursos naturais que são utilizados como matéria-prima do processo e para desativação máxima do resíduo (emissões gasosas e resíduos sólidos) que é lançado ao meio ambiente;
- Fazer uma análise termodinâmica e ambiental, por meio de indicadores exergéticos, e com os resultados fazer uma análise de otimização, encontrando um ponto ótimo de produção de energia associando ao desempenho ambiental do processo;
- Implementar também a análise termoeconômica para a última sugestão, e assim considerar os três fatores a fim de encontrar o ponto ótimo para um melhor desempenho do sistema;
- Aplicar a mesma metodologia utilizada neste trabalho para avaliação de impacto ambiental através da exergia em sistemas de cogeração alimentados por outros insumos e comparar os dados com os obtidos na utilização da biomassa da cana;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR ISO 14040. **Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Brasil: ABNT. Novembro. 2001. 10p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Biomassa. **Atlas de Energia Elétrica**. 2 ed., pp. 77-92. Brasília: ANEEL, 2005.

ALBUQUERQUE, A. G. **Avaliação exergética dos efluentes no processo industrial do álcool**. 2005. 63f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

ALONSO-PIPPON W.; LUENGO, C. A.; FELFLI, F. F.; GARZONE, P.; CORNACCHIA, G. Energy recovery from sugarcane biomass residues: Challenges and opportunities of bio-oil production in the light of second generation biofuels. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 1, pp. 063102, 2009.

ANDREOLLI, C. Convergência de Agricultura e Energia: I. Produção de Biomassa Celulósica para Biocombustíveis e Eletricidade. **Economia & Energia**. Ano XI – Nº 66, 2008.

ARAÚJO, J. L. R. H. A Questão do Investimento no Setor Elétrico Brasileiro: Reforma e Crise. In: XXIX Encontro Nacional da ANPEC, 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: 2001.

AYRES, R. U.; AYRES, L. W.; MARTINÀS, K. **Eco-Thermodynamics: Exergy and Life Cycle Analysis**. INSEAD, 96/04/EPS, Fontainebleau, France. 1996.

BALBO, J. M. **Geração de energia elétrica a partir da utilização do bagaço da cana-de-açúcar**. Sertãozinho: Usina São Francisco, 13p, 1990.

BALOH, T; WITTWER, E. **Energy manual for sugar factories**. Verlag Dr. Albert Bartens. 2nd edition. 135p, Berlin, 1995.

BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento e Meio Ambiente: as estratégias de mudança da agenda 21**. Editora Vozes, Petrópolis, RJ, 2005.

BARBOSA, R. D. **Secagem do bagaço de cana-de-açúcar em um Sistema Pneumático**. 1992. 237f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1992.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 157f. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

BARROS, E. V. B. A Matriz Energética Mundial e a Competitividade das Nações - Bases De Uma Nova Geopolítica. **Engevista**, v. 9, n. 1, pp. 47-56, junho 2007.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. John Wiley & Sons, New York, N.Y, 1988.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal Design and Optimization**. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, USA & Canada. 1996.

BEJARANO, C. H. M. **Avaliação Exergoecológica de Processos de Tratamento de Esgoto**. 2009. 197f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

BEJARANO, C. H. M. **Indicadores exergéticos para avaliação do Impacto Ambiental de Processos de Conversão de Energia**. 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2004.

BEZERRA, M. C. L.; BURSZTYN, M. **Ciência & tecnologia para o desenvolvimento sustentável**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis; Consórcio CDS/UnB/Abipti, 2000.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Seção 1, pp. 2548-2549.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 jan. 2007. nº 1, pp. 131.

BRÜSEKE, F. J. O Problema do desenvolvimento sustentável. In: CAVALCANTI, C. (org.). **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. 4ª Ed. pp.29-40. São Paulo: Cortez; Recife: Fundação Joaquim Nabuco. 2003.

CAMARGO, A. L. B. **As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana**. 2002. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

CARCASCI, C., FACCHINI, B., HARVEY, S. Design issues and performance of a chemically recuperated aero derivative gas turbine, **Process Instruments Mechanical Engineers**, Vol. 212, Part A, pp. 315-329, 1998.

CAVALCANTI, C. Sustentabilidade da economia: paradigmas alternativos de realização econômica. In: CAVALCANTI, C. (org.). **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. pp.153-176. São Paulo: Cortez, 2003.

ÇENGEL, Y. A; BOLES, M. A. **Thermodynamics: an engineering approach**. 5 ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2006.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. CGEE, 2001. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br>>. Acesso em: 15 abr. 2008.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Alternativas a partir da cana-de-açúcar. In: **Seminário Alternativas Energéticas a partir da Cana-de-Açúcar**. CTC, 2005. Disponível em: <<http://www.ctc.com.br>>. Acesso em: 10 abr. 2008.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Cana-de-Açúcar no Brasil**. Instituto de Eletrotécnica e Energia – IEE. Universidade de São Paulo. São Paulo: CENBIO, 2001. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br>>. Acesso em 02 jun. 2008.

COELHO, S. T. **Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa – Um modelo para o Estado de São Paulo.** 1999. 278f. Tese (Doutorado em Energia). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, SP, 1999.

COPLANA. Assinatura do Protocolo Agroambiental prevê o fim da queima da cana para 2014. **Revista Coplana.** Abril de 2008. Disponível em: <<http://www.coplana.com/gxpfiles/ws001/design/RevistaCoplana/2008/Abril/pag8-9.pdf>>. Acesso em 05 dez. 2009.

CORNELISSEN, R. L. **Thermodynamics and Sustainable Development.** Ph.D. Thesis. University of Twente, The Netherlands, 1997.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GOMEZ, E. O. **Biomassa para Energia.** 1. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2008. 732 p.

COSTA, M. H. A.; BALESTIERI, J. A. P. Viabilidade de Sistemas de Cogeração em Indústria Química. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (ENCIT), 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** v. 1, pp. 358-363. Rio de Janeiro - RJ, 1998.

CRANE, P., SCOTT, D.S., ROSEN, M.A. Comparison of exergy of emissions from two energy conversion technologies, considering potential for environmental impact. **International Journal of Hydrogen Energy**, n. 17, 345–350. 1992.

DANTAS, D. N.; MAUAD, F. F.; OMETTO, A. R. Potential for generation of thermal and electrical energy from biomass of sugarcane: a exergetic analysis. In: 11th International Conference on Advanced Material. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, 2009.

DE PAULA, M. O.; TINÔCO, I. F. F.; RODRIGUES, C. S.; SILVA, E. N.; SOUZA, C. F. Potencial da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como material de substituição parcial do cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, pp. 353-357, 2009.

DEL CAMPO, E. R. B. Avaliação termoeconômica do Sistema de Cogeração da Usina Vale do Rosário. 1999. 306f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1999.

DEL CAMPO, E. R. B.; CERQUEIRA, S. A. A. G.; NEBRA, S.A (1998); Thermoeconomic analysis of a Cuban sugar cane mill. **Energy Conversion and management**, vol. 39, Issues 16-18, pp. 1773-1780. 1998.

DEL CAMPO, E. R. B.; NEBRA, S. A. Análise Termoeconômica de uma Usina de Açúcar e Álcool Brasileira. In: COBEM99 - XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia. **Anais...**, pp. 1-10. Águas de Lindóia, SP, 1999.

DIAS, M. O. S.; ENSINAS, A.V.; NEBRA, S. A.; FILHO, R. M.; ROSELL, C. E. V.; MACIEL, M. R. W. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research & Design**, v. 87, pp. 1206-1216, 2009.

DINCER, I., CENGEL, Y. (2001). Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering. **Entropy**. vol. 3, pp. 116-149, ISSN 1099-4300. 2001.

DINCER, I; ROSEN, M.A. Current and future perspectives on energy and environmental impact. **International Journal Enviromental Pollution**. 10 (2), pp. 240-253. 1998

ENSINAS, A.V.; MODESTO, M.; NEBRA, S.A.; SERRA, L. Reduction of irreversibility generation in sugar and ethanol production from sugarcane. **Energy (Oxford)**, v. 34, pp. 680-688, 2009.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ampliação da Oferta de Energia através da Biomassa**. São Paulo: FIESP/CIESP, 2001. Disponível em: http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio_dma.pdf. Acesso em 01 nov. 2009

FINNVEDEN, G., ÖSTLUND, P. Exergies of natural resources inlyfe-cycle assesment and other applications. **Energy**, vol 22, pp. 923-931, 1997.

FIOMARI, M. C.; MASHIBA, M. H. S.; LIMA, R. S.; MAIA, C. R. M.; RAMOS, R. A. V. Análise Termodinâmica e Termoeconômica de uma Usina Sucroalcooleira que Produz Excedente de Energia para Comercialização. In: VI Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 2006, Campinas. **Proceedings...** UNICAMP: Campinas, SP, 2006.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; CATANEO, A.; SERAPHIM, O. J. . Estudo teórico sobre cogeração de energia seus equipamentos e ciclos. In: Fórum Ambiental da Alta Paulista, 2007, Tupã. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**. Tupã, 2007. v. III. pp. 1-21. 2007

GOLDEMBERG, J; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy** 36, pp. 2086– 2097, 2008

GOMAZAKO, M. S.; OLIVEIRA, C. J. Geração de Bagaço e Cogeração de Energia Elétrica na Indústria Sucroalcooleira. In: V Workshop Internacional Brasil-Japão em Biocombustíveis, Meio Ambiente e Biomassa, 2007, Campinas-SP. **Anais...** UNICAMP: Campinas, SP, 2007.

GRAUER, A.; KAWANO, M. Uso de Biomassa para a Produção de Energia **Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem**, Ano I, nº 5, nov/dez -2001. Disponível em: <<http://www.bolsafiep.com.br>>. Acesso em: 05 Ago. 2009

HASSUANI, J.S.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass Power Generation: Sugar cane Bagasse and Trash**. 1. ed., Piracicaba, Brasil: PNUD / CTC, Vol. 1, 2005. 216 p.

HORLOCK, J.H. **Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics**. Krieger Publishing Company, 226p, Florida, USA, 1997.

HUANG, F. F., Performance Assessment Parameters of a Cogeneration System, **Proceedings: Efficiency, Costs, Optimisation, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems**. ECOS'96, June 25-27, Stockholm. pp. 225-229, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. 2007 Disponível em: <www.ibge.gov.br> Acesso em: 15 set. 2009.

INSTITUTO EUVALDO LODI. **Álcool combustível**. Série Indústria em Perspectiva – Brasília: IEL/NC, 2008. 163 p.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Geração Distribuída e Co-geração**. INEE: 2007. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp?Cat=forum>. Acesso em: 20 jul. 2008.

JANK, M. S. **A relação do setor sucroalcooleiro com o meio ambiente**. União da Indústria de Cana-de-açúcar, Fórum Internacional sobre o futuro do álcool, Sertãozinho, SP. 2007. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/downloads/jank_unica.pdf>, Acesso em: 22 ago. 2009.

JØRGENSEN, S. E. **Eco-Exergy as Sustainability**. Book Series: The Sustainable World Series vol. 16. WIT Press publishing. 2006. 224p.

KOTAS, T.J. **The exergy method of thermal plant analysis**. Reprint Edition. Florida, USA, Krieger Publishing Company. 328 p, 1995.

LEAL, E. M. **Caracterização de Sistemas de Cogeração Empregando Células de Combustível**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP. Ilha Solteira, SP, 2003

LEITE, C. P. ; ZAMBONI, L. M. ; TRIBESS, A. ; OLIVEIRA JUNIOR, S. Use of Natural Gas and Sugar Cane Bagasse in Cogeneration Systems. In: ECOS'2003 Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2003, Copenhagen. **Proceedings of the ECOS'2003 Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems**, v. I. pp. 209-216. 2003.

LEME, R.M. **Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa da cana-de-açúcar**. 2005. 144f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

LEVENSPIEL, O. **Termodinâmica amistosa para engenheiros**. Tradução de José Luís Magnani e Wilson Miguel Salvagni. São Paulo : Edgard Blücher, 2002

LORA, E. E. S. Tecnologia e Aplicação Racional da Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura. In: Odivaldo José Seraphim. (Org.). **Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura**. Campina Grande, Paraíba: UFPB, v. 1, pp. 97-134, 1997.

LORA, E. E. S.; ARRIETA, F. P.; CARPIO, R. C. Eletricidade a partir do bagaço de cana. In: Marcello Guimarães Mello. (Org.). **Biomassa Energia dos Trópicos em Minas Gerais**: Labmida, , v. 1, pp. 59-81, 2001.

LORA, E. E. S.; TEIXEIRA, F. N. Energia e Meio Ambiente. In: Milton Marques; Jamil Haddad; André Ramon Silva Martins. (Org.). **Conservação da Energia**: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos, v. 1, pp. 30-93, Itajubá: UNIFEI, 2001.

LOZANO, M. **Cogeneración**, Area de Máquinas y Motores Térmicos. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, 175 p, 1998.

LUZ-SILVEIRA, J.; BEYENE, A.; LEAL, E. M.; SANTANA, J.A.; OKADA, D. . Thermoeconomic analysis of a cogeneration system of a university campus. **Applied Thermal Engineering**, vol. 22, Issue 13, 2002, pp. 1471-1483. 2002.

MAKARYTCHEV, V. S. Enviromental impact analysis of ACFB-based gas and power cogeneration. **Energy**, vol.23, no. 9, pp. 711-717, 1998.

MATELLI, J. A. **Sistemas de Cogeração Baseados em Células-combustível Aplicados em Hospitais**. 2001. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

MENEGUELLO, L. A.; CASTRO, M. C. A. A. O protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Interações (Campo Grande). **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, v. 8, pp. 33-45, 2007.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, AGROPECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia**, Disponível em: <www.agricultura.gov.br>, Acesso em: 18 jul. 2009.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2003 - Ano Base 2002**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2003.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2004 - Ano Base 2003**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). BRASIL/MME/EPE, Rio de Janeiro: MME/EPE, 2004.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2005 - Ano Base 2004**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2005.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2006 - Ano Base 2005**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2006.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2007 - Ano Base 2006: Resultados Preliminares**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2007a.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Matriz Energética Nacional 2030**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, DF: BRASIL/MME/EPE, 2007b.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2008 - Ano Base 2007: Resultados Preliminares**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2008.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2009 - Ano Base 2008: Resultados Preliminares**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2009.

MORAN, M. J; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. Trad. de Francesco Scofano Neto, Albino José Kalab Leiroz e Rodrigo Otávio de Castro Guedes. 4ª Edição, Rio de Janeiro – RJ: LTC, 681p, 2002.

NASCIMENTO, C. K.; BRAGA, J. P.; FABRIS, J. D. N. Reflexões sobre a Contribuição da Carnot à Primeira Lei da Termodinâmica. **Quím. Nova**, vol.27, n.3, pp. 513-515. São Paulo, 2004.

NATU, S. C. Bagasse based cogeneration, India marching ahead, **International Sugar Journal**, v.107, n.1279, pp. 416-424, 2005.

NEBRA, S. A. **Secagem Pneumática de bagaço de cana**. 1985. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade de Campinas. Campinas, 1985.

OLIVEIRA, J. G. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista**. 2007. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

OMETTO, A. R.; ROMA, W.N.L.; SOUZA, M. P. Environmental Management of Fuel Alcohol Coupled with Energy Production, Based on a Life Cycle Impact Analysis. In: 16th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2003, Compenhagem. **Anais...** Copenhagen. 2003.

OMETTO, A. R. **Avaliação do Ciclo de vida do Álcool Etílico Hidratado Combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Energia.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005.

OMETTO, A. R.; ROMA, W. N. L. Atmospheric impacts of the life cycle emissions of fuel ethanol in Brazil: based on chemical energy. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, pp. 71-76, 2009.

PASSOS, J. C. Carnot e a Segunda Lei da Termodinâmica. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 22, n. 01, pp. 25-31, 2003.

PASSOS, J. C. Os Experimentos de Joule e a Primeira Lei da Termodinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física** (Impresso), v. 31, pp. 3603-1-3603-8, 2009.

PELLEGRINI, L. F. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade.** 2009. 254f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PRIETO, P. M .G.; NEBRA, S. A.; GALLO, W.L.R. Exergetic Analysis of a gas turbine plant with chemical recuperation. 8th Braziliam Congress of Thermal Engineering Mechanical and Sciences. **Abstracts...** ENCIT 2000, pp. 63, 2000.

PRIETO, M. G. **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso.** 2003. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2003.

PROCKNOR, C. **O Tamanho da Caldeira.** Seção Soluções da Fábrica. Edição Julho. 2004. Disponível em: <<http://www.procknor.com.br/stabjulago04.htm>>. Acesso em: 20 dez. 2009.

RAMOS, R. A. V.; MAIA, C. R. M.; GASCHE, J. L.; UCHÔA, T. B.; BRANCO, F. P.; FIOMARI, M. C.; TAKAKI, A. T. Análise Energética e Exergética de uma Usina Sucro-Alcooleira com Sistema de Cogeração de Energia em Expansão. In: V Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2003, São Pedro. **Anais ...**, São Pedro, SP, 2003.

REZAC P.; METGHALCHI, H. A brief note on the historical evolution and present state of exergy analysis. **International Journal Exergy**. vol.1, pp. 426-437.2004

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos Sólidos: Problema ou Oportunidade?**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2009. 158 p.

ROCHA, M. T. e MELLO, P. C. **O Efeito Estufa e o mecanismo de desenvolvimento Limpo**. In: A questão Ambiental: desenvolvimento e sustentabilidade. Escola Nacional de Seguros. Rio de Janeiro, 2004.

ROJAS, S. P. **Análise exergética, termoeconômica e ambiental de um sistema de geração de energia. Estudo de caso: Usina Termoeletrica UTE – Rio Madeira**. 2007. 195 f. Dissertação (mestrado em Ciências Mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2007.

ROSEN, M. A. e DINCER, I. Exergy analysis of waste emissions. **International Journal of Energy Research**. n. 23. pp. 1153 – 1163, 1999.

ROSEN, M. A., SCOTT, D. S. A Methodology based on Exergy, Cost, Energy and Mass for the Analysis of Systems and Processes. **Proc. Meeting of International Soc. for General Systems Research**, 20-22 May, Toronto, pp. 8.3.1- 8.3.13. 1987.

ROSEN, M. A.; DINCER, I. On exergy and environmental impact. **International Journal of energy research**, vol. 21, pp. 643-654. 1997

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Exergy as the confluence of energy, environmental and sustainable development. **Exergy as International Journal**, vol. 1, no. 1, pp. 3-13. 2001

ROSEN, M. A; DINCER, I.; KANOGLU, M. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. **Energy Policy** 36(1), 128-137, 2008.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da Biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Tradução José Dilcio Rocha e Maria Paula G. D. Rocha.- Campinas-SP: Editora UNICAMP, 2005. Tradução de: Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil.

SANTARELLI, M. **Thermodynamic, economic and environmental considerations in the analysis and optimization of energy systems**. Ph.D. Thesis, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 1998.

SÃO PAULO. Lei Estadual nº 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial [do Estado]**, São Paulo, SP, v. 112, n. 180, 20 set. 2002, Seção I, pp. 02.

SCARPINELLA, G. D. A. ; MAUAD, F. F. ; MATOS, A. J. S. ; DANTAS, D. N.. A Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo, seus Impactos Ambientais e Influência na Demanda e Disponibilidade de Água. In: IX SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Planificación, Proyecto y Operación de Sistemas de Abastecimiento de Agua. 2009, Valencia. **Anais...**, 2009

SCHIRMER, F. **Comparação de indicadores de eficiência energética e exergética em duas indústrias do setor sucroalcooleiro**. 2006. 88 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, PR, 2006

SCIUBA, E. A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004. **International Journal of Thermodynamics**. vol. 10, n. 1, pp. 1-26, March 2007.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da cana no Brasil**. 2008. 274 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2008.

SELF ENERGY. **Co-geração**. 2008. Disponível em: <<http://www.sefenergy.eu>>. Acesso em 05 jun. 2009.

SILVA, J. **Análise termoeconômica do processo de geração de vapor e potência do segmento de celulose e papel**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG, 2002.

SILVA, M. M. da; **Repotenciamento em Sistemas de Geração de Potência na Indústria Siderúrgica Utilizando Análise Termoeconômica**. 2004. 248f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2004.

SOSA-ARNAO, J. H.; OLIVEIRA, F.M; CORREA, J. L. G.; SILVA. M. A; NEBRA, S. A. Sugar Cane Bagasse Drying – A Review. **Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)** São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. B, pp. 990-997, 2004.

SOSA-ARNAO, J. H.; NEBRA, S. A. . The Exergy of Sugar Cane Bagasse. In: 14th European Biomass Conference and Exhibition: Biomass for energy, Industry and Climate Protection, 2005, Paris. **Proceedings of the 14th European Biomass Conference and Exhibition: Biomass for energy, Industry and Climate Protection**, 2005.

SOSA-ARNAO, J. H.; NEBRA, S. A. First and Second law analysis applied on boilers fuelled by sugar cane bagasse. In: 20th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, 2007, Padova. **Proceedings...** Padova: Servizi Grafici Editoriali, v. I. p. 847-854. 2007.

SOSA-ARNAO, J. H. **Caldeiras Aquatubulares de Bagaço – Estudo do Sistema de Recuperação de Energia**. 2008. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

SOSA-ARNAO, J. H.; NEBRA, S. A. First and Second law to analyse the performance of bagasse boiler. In: 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems, 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** ECOS 2009, Foz do Iguaçu, PR, 2009.

SOUZA, Z. J. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação. Uma Avaliação das formas de comercialização da energia co-gerada pelo setor sucroalcooleiro**. São Carlos, 2003. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, SP, 2003.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Energia Elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir de usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília-DF, v. 44, n. 2, pp. 20-35, 2006.

SZARGUT, J. International progress in second law analysis. **Energy** 5, pp. 709–718. 1980

SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R. **Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical process**. New York, Hemisphere Publishing Co, 1988.

SZARGUT, J. **Exergy analysis of thermal processes; ecological cost**. In: Proceedings of the International Workshop “Advances in Energy Studies: energy flows in ecology and economy. Porto Venere, Itália. 1999.

TEIXEIRA, F., LORA, E. Experimental and analytical evaluation of NO_x emissions in bagasse boiler. **Biomass & Bioenergy**. v.26, pp.571-577. 2003.

TOLMASQUIM, M. T.. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente e Sociedade**, v. 6/7, p. 179-184, Campinas, SP, 2000.

TORQUATO JÚNIOR, H.; CALLADO, N.H; PEDROSA, P. A.; PIMENTEL, I. M. C; MENEZES, A. C. V.; OMENA, S. P. F.; Caracterização da água de lavagem de cinzas e gases de caldeiras na Indústria de cana-de-açúcar. VII Simpósio de Recursos Hídricos Do Nordeste, 2004, São Luís. **Anais...** São Luís, MA, 2004.

TORRES, E. A. **Avaliação Exergética e Termoeconômica de um Sistema de Cogeração de um Pólo Petroquímico**. 1999. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 1999.

TORRES, E.A; GALLO, W.L.R. Exergetic evaluation of a cogeneration system in a petrochemical complex. **Energy Conversion and management**, vol. 39, Issues 16-19, 1998, pp. 1845-1852. 1998.

UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor Sucroenergético - Mapa da Produção - Produção de etanol do Brasil**. UNICA, 2009 – Disponível em: <http://www.unica.com.br>. Acesso em 10 out. 2009.

VALERO, A. e ARAUZO, I. Exergy outcomes associated with the greenhouse effects. **Second Law Analysis – Industrial and Environmental Applications**. vol.25, 1991.

VAN DER POEL, P.W, SCHIWECK, H., SCHWARTZ, T. **Sugar Technology Beet and Cane Sugar Manufacture**. Berlin, Verlag Dr. Albert Bartens KG, Germany, 1998, 1118p.

VAN NESS, H.C. **Understanding Thermodynamics**. Dover Publications. New York, 1983. 103p.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E., BOORGGNAKKE, G. **Fundamentos da Termodinâmica**, Tradução Euryale de Jesus Zerbini e Ricardo Santilli Ekman Simões, 4a ed., Edgard Blücher Ltda, 1995.

VIEIRA, S.; OLIVEIRA JÚNIOR., S. Estudo de Sistemas de cogeração e geração termoelétrica através da análise termo-econômica. In: Brazilian Congresso of Engineering and Thermal Sciences – ENCIT, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** pp. 381-386. Rio de Janeiro: PUC, 1998.

WALL, G. Engineering Sustainability. Inaugural presentation at the 8th Liège Conference, Belgium 2006, **Materials for Advanced Power Engineering**, Liège, Belgium, publ. J. Lecomte-Beckers et al. Eds, pp. 5-24, 2006.

WALL, G. **Exergetics**. Ed. M.K. Tolba, Eolss Publishers, Oxford. 2001.

WALL, G. **Exergy - a useful concept within resource accounting**. Report N. 77-42, Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Goteborg, Sweden, 1977.

WALL, G., GONG, M. On exergy and sustainable development – Part 1: conditions and concepts. **Exergy an International Journal**. 1(3): 128-145, 2001.

WARK, K. Jr. **Advanced Thermodynamics for Engineers**. Mc Graw-Hill, Inc. Series in Mechanical Engineering. New York, USA, 1995.

YANTOVSKII, E. I. **Energy and Exergy Currents**. Nova Science, New York. 1994