

ADEMIR GONÇALVES ALBUQUERQUE

**AVALIAÇÃO EXERGÉTICA DOS EFLUENTES DO PROCESSO INDUSTRIAL
DO ÁLCOOL**

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 Hidráulica e Saneamento

Orientador : Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma

São Carlos
2005

AGRADECIMENTOS

Neste longo caminho muitas pessoas foram importantes, mas algumas se destacam pela motivação constante para finalização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Woodrow Nelson Lopes Roma, meu orientador, paciente, generoso, sábio, pela condução da orientação culminando com esta dissertação em uma área inovadora e muito promissora ainda.

Ao Dr Aldo Roberto Ometto, pelos aconselhamentos no decorrer dos seus estudos de doutoramento.

Ao engenheiro químico Guilherme Leiria Filho por ter me auxiliado na compreensão do processo industrial do álcool etílico carburante e em correções do processo.

Aos meus pais, José Hermínio Albuquerque e Maristela da Silva Albuquerque pela constância, amor e apoio estando sempre ao meu lado.

Minhas filhas, Agnes Afrodite, Isis Penélope e Ariadne Palas que mesmo num sutil acompanhamento me deram as forças para prosseguir neste trabalho.

A Rose Rubini, companheira, pessoa especial, que com seu incentivo, união de forças e dedicação esteve ao meu lado nesta empreitada, os mais efusivos agradecimentos.

*“Em todas as operações da natureza, nada se cria:
a qualidade e quantidade dos elementos
permanecem precisamente os mesmos, antes e
depois de um experimento. O que muda são suas
combinações. Deste primeiro principio depende
toda a arte de executar experiências químicas”*

Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794)

RESUMO

ALBUQUERQUE, A.G.(2005)- *Avaliação exergética dos efluentes no processo industrial do álcool*. Dissertação (Mestrado) apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

A indústria sucroalcooleira tem na produção do álcool etílico carburante a captação de água em grande volume para geração de vapor, resfriamento e como parte do processo, sendo também geradora de grandes quantidades de efluentes. A indústria utilizando a energia proveniente da queima do bagaço nas caldeiras para transformação da água em vapor, gera sua própria eletricidade, e todo trabalho mecânico desenvolvido no processo. O grau de aproveitamento do vapor residual em trocadores de calor demonstra a eficiência da empresa. O balanço das massas que estão sendo transformadas neste processo, permite avaliar através da temperatura dos efluentes lançados, as perdas de exergia que podem ser minoradas. A ferramenta análise exergética (medida do grau de desequilíbrio energético entre uma substância e seu ambiente) empregada neste trabalho, mostra através de estudo de caso em duas usinas, como identificar, na avaliação dos efluentes lançados as perdas exérgicas em volumes de controle traçados no ciclo de produção do álcool, onde estão acontecendo as perdas e as possibilidades de melhorias que venham a corrigi-las.

Palavras chaves: exergia, efluentes líquidos, sucroalcooleira, cana-de-açúcar, álcool etílico.

ABSTRACT

ALBUQUERQUE, A.G.(2005) – *Exergetic assessment of effluents in the industrial alcohol process*. Master's Thesis presented at the São Carlos Engineering School, University of São Paulo, São Carlos, 2005.

In the production of ethyl alcohol as a fuel, the sugar and alcohol industry captures large volumes of water for steam generation, for cooling and as part of the process, generating large amounts of effluents. Using the energy produced by the burning of bagasse in the furnace for the transformation of water into steam, the industry generates its own electricity and the entire mechanical work developed in the process. The degree of utilization of residual steam in heat exchangers demonstrates the efficiency of the plant. The balance of the energies being transformed in this process shows, through the effluents launched, the losses that may be reduced. By means of case studies in two mills, the exergetic analysis tool (measurement of the degree of unbalance between the substance and its environment) employed in this study shows how to identify, in control volumes traced in the alcohol production cycle, where the losses are occurring and the possibilities of improvement that may eventually correct them.

Key words – exergy, liquid effluents, sugar and alcohol, sugar cane, ethylic alcohol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01- FLUXO DE PRODUÇÃO DO ÁLCOOL A PARTIR DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	12
FIGURA 02- ESQUEMAS DE EMBEBIÇÃO UTILIZADOS NAS INDÚSTRIAS CANAVIEIRAS.....	16
FIGURA 03- FLUXOGRAMA DESTILARIA.....	27
FIGURA 04- MODELO DEMONSTRATIVO DA TROCA DE EXERGIA TÉRMICA ENTRE DOIS ESTADOS.....	31
FIGURA 05- FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DO ÁLCOOL COM INDICAÇÃO DOS VOLUMES DE CONTROLE A SEREM ANALISADOS.....	36
FIGURA 06 -PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁLCOOL NA UNIDADE I.....	38
FIGURA 07- FLUXOGRAMA DAS ÁGUAS DA UNIDADE I	47
FIGURA 08- FLUXOGRAMA DAS ÁGUA UNIDADE II	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 01- Avaliação exergética aplicada ao ponto de descarte 1 da unidade I.....	54
TABELA 02- Avaliação exergética aplicada ao ponto de descarte 2 da unidade I.....	55
TABELA 03- Avaliação exergética aplicada ao ponto 1 da unidade II.....	55
TABELA 04 – Avaliação exergética aplicada ao ponto 2 da unidade II.....	55

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Produção nacional de cana-de-açúcar.....	09
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ART – Açúcar redutor total

ARC- açúcares redutores da cana

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CONSECANA – Conselho dos produtores de cana, açúcar e álcool do Estado de São Paulo

COPERSUCAR – Cooperativa dos produtores de açúcar e álcool do Estado de São Paulo

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas

IEA – Instituto de Economia Agrícola de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

PBU – Peso do bagaço úmido

PBS – peso do bagaço seco

OD – Oxigênio Dissolvido

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}Bé$ - grau Baumé

Brix – simbolo $^{\circ}Brix$, é a medida dos sólidos dissolvidos num líquido

pH – potencial hidrogeniônico

pol - percentual de sacarose aparente no caldo

Kgv – quilograma de vapor

kJ – quiloJoule

tc – tonelada de cana

tv – tonelada de vapor

T_0 - temperatura ambiente de referência

P_0 - pressão ambiente de referência

H – entalpia

S – entropia

Q_0 – quantidade de calor transferida

B_{ch} - exergia química

B_{ph} - exergia física

H_u - entalpia útil

S_u – entropia útil

H_{ur} – entalpia útil do processo reversível

S_{ur} – entropia útil do processo reversível

Q_{or} – quantidade de calor perdida no processo reversível

Σ - somatória

ΔS – variação da entropia

c_w – capacidade de calor específico da água

m – massa

T_s – temperatura de saída

T_e – temperatura de entrada

b_{fT} – exergia física à capacidade térmica constante

c_p – capacidade térmica específica

B_p – exergia a pressão constante

V_1 – vapor vegetal

SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE QUADROS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
SUMÁRIO.....	xi
INTRODUÇÃO.....	01
2. OBJETIVO.....	06
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	07
3.1 ASPECTOS GERAIS.....	08
3.2 ETAPAS DO PROCESSO INDUSTRIAL DO ÁLCOOL.....	10
3.2.1 CANA-DE-AÇÚCAR.....	10
3.2.2 RECEPÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	10
3.2.3 LAVAGEM DA CANA.....	13
3.2.4 PREPARAÇÃO DA CANA.....	14
3.2.5 EXTRAÇÃO DO CALDO DA CANA.....	15
3.2.6 TRATAMENTO DO CALDO.....	18
3.2.6.1 PENEIRAMENTO DO CALDO.....	18

3.2.6.2 CALAGEM.....	19
3.2.6.3 AQUECIMENTO DO CALDO.....	19
3.2.6.4 DECANTAÇÃO DO CALDO.....	20
3.2.6.5 FILTRAÇÃO.....	21
3.2.6.6 REGENERAÇÃO DO CALDO.....	22
3.2.7 PREPARO DO MOSTO.....	22
3.2.7.1 PREPARO DO FERMENTO.....	23
3.2.8 FERMENTAÇÃO	23
3.2.9 DESTILAÇÃO.....	24
3.3 EXERGIA (ou DISPONIBILIDADE DE ENERGIA) e QUALIDADE DE ENERGIA.....	28
4. MÉTODOS.....	36
4.1 O PROCESSO INDUSTRIAL DO ÁLCOOL E OS EFLUENTES GERADOS.....	37
4.2 TRATAMENTO DOS DADOS.....	39
4.3 MÉTODOS DE CÁLCULO.....	39
5. RESULTADOS.....	42
5.1 RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES.....	42
5.1.1 CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL I.....	43
5.1.2 PROCESSO INDUSTRIAL DESENVOLVIDO NA UNIDADE I	43
5.1.3 CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL II	48
5.1.4 PROCESSO INDUSTRIAL NA UNIDADE INDUSTRIAL II	49
5.2 RESULTADOS DA EXERGIA.....	53
6. CONCLUSÕES.....	57
7. REFERÊNCIAS	59