

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMPARAÇÃO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E**  
**EXERGÉTICA EM DUAS INDÚSTRIAS DO SETOR**  
**SUCROALCOOLEIRO.**

**FLORIAN SCHIRMER**

**CASCADEL – PR**

**2006**



**FLORIAN SCHIRMER**

**COMPARAÇÃO DE INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E  
EXERGÉTICA EM DUAS INDÚSTRIAS DO SETOR  
SUCROALCOOLEIRO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Lins  
de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. José Antonio Rabi

**CASCADEL – PR**

**2006**

## **Florian Schirmer**

“Comparação de indicadores de eficiência energética e exergetica em duas indústrias do setor sucroalcooleiro”

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação “stricto sensu” em Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, pela comissão formada pelos professores:

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira  
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Prof. Dr. José Airton Azevedo dos Santos  
UTFPR – Medianeira - PR

Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira  
UNIOESTE/CCET – Cascavel - PR

Cascavel, 27 de junho de 2006.



## **DEDICO ESTE TRABALHO**

**Aos meus pais,**

**Eron Milton Schirmer e Marlene Maria Costa Schirmer.**

Por todo o apoio, motivação, confiança, exemplo de vida e por acreditarem em mim.

**A minha noiva,**

**Fernanda Gaio Pacheco**

Pelo companheirismo, confiança, estímulo e paciência.

**Aos meus irmãos,**

**Hamilton Schirmer, Peter Schirmer e Karin Schirmer;**

Pelo apoio, amizade, carinho e pelo senso de família.

**Aos meus amigos,**

Pela amizade, incentivo, respeito e companheirismo.

**E, ainda,**

Ofereço este trabalho a todos aqueles que acreditaram em mim.

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,  
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”*

*Chico Xavier*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter estado do meu lado sempre, indicando-me o caminho correto, dando-me forças para a vida e realização desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira, por sua dedicação, interesse e principalmente por sempre me apoiar quando eu precisei.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), *Campus* de Cascavel, em especial ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas e aos professores, por terem me concedido a oportunidade da realização deste curso.

Ao Amigo Jorge Tomoyoshi Tamagi, pelo incentivo, estímulo, amizade e, principalmente, por não me deixar desistir.

À Usaciga – Açúcar Álcool e Energia Elétrica Ltda. nas pessoas do engenheiro químico Leandro Tormena, do engenheiro eletricista Reginaldo Duarte Chaves e de todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho na Indústria.

Ao acadêmico de engenharia agrícola da UNIOESTE César Marim, pelo grande apoio na confecção do trabalho.

Aos acadêmicos de Engenharia de Alimentos da USP Fausto Makishi e Juliana Letra, pelo grande interesse e dedicação nos estudos realizados na Usina Dedini.

Aos meus amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o sucesso desse trabalho, o meu sincero agradecimento.

## SUMÁRIO

<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
1.1 SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL E NO PARANÁ.....	1
1.2 INCENTIVO GOVERNAMENTAL À INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA .....	2
<u>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</u>	<u>6</u>
1.3 A IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	6
1.4 A COGERAÇÃO NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA.....	9
1.5 A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR INDUSTRIAL .....	12
1.6 EXERGIA NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA.....	17
1.7 EQUIPAMENTOS PARA COGERAÇÃO.....	19
<u>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	<u>20</u>
1.8 USINAS ANALISADAS.....	20
1.9 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO.....	23
<u>3.1.1 Consumo de Bagaço.....</u>	<u>23</u>
<u>3.1.2 Bagaço Excedente.....</u>	<u>24</u>
<u>3.1.3 Potência Média Fornecida pelos Geradores.....</u>	<u>25</u>
<u>3.1.4 Energia Produzida pelos Geradores.....</u>	<u>26</u>
<u>3.1.5 Consumo Elétrico da Fábrica.....</u>	<u>26</u>
<u>3.1.6 Energia Disponível para a Venda.....</u>	<u>27</u>
<u>3.1.7 Potência Média Exportada.....</u>	<u>27</u>
<u>3.1.8 Consumo Específico.....</u>	<u>27</u>
<u>3.1.9 Geração Média.....</u>	<u>29</u>
<u>3.1.10 Fator de Utilização.....</u>	<u>29</u>
1.10 DIAGNÓSTICO EXERGÉTICO.....	30
<u>3.1.11 Eficiência da Primeira Lei da Termodinâmica.....</u>	<u>30</u>
<u>3.1.12 Eficiência da Segunda Lei da Termodinâmica.....</u>	<u>32</u>
<u>3.1.13 Definição da Equação de Exergia.....</u>	<u>33</u>
<u>3.1.14 Eficiência Racional da Segunda Lei para Caldeiras.....</u>	<u>37</u>
<u>3.1.15 Exergia do Bagaço.....</u>	<u>37</u>

<u>3.1.16 Fator de Utilização de Energia - FUE.....</u>	<u>38</u>
<u>3.1.17 Economia de Energia de Combustível - ESI.....</u>	<u>39</u>
<u>3.1.18 Razão de Poupança de Energia do Combustível - RPEC.....</u>	<u>40</u>
<u>3.1.19 Combustível Destinado à Produção de Potência - FCP.....</u>	<u>41</u>
<u>3.1.20 Eficiência de Geração de Potência - E.....</u>	<u>42</u>
<u>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u>	<u>43</u>
<u>1.11 INDICADORES ENERGÉTICOS.....</u>	<u>43</u>
<u>4.1.1 Quantidade de Bagaço Consumido e Bagaço Excedente.....</u>	<u>45</u>
<u>4.1.2 Medições Setoriais do Consumo de Energia.....</u>	<u>47</u>
<u>4.1.3 Potência Média Fornecida pelos Geradores.....</u>	<u>49</u>
<u>4.1.4 Energia Gerada e Comercializada.....</u>	<u>50</u>
<u>4.1.5 Energia Produzida pelos Geradores.....</u>	<u>51</u>
<u>4.1.6 Energia Disponível para Venda.....</u>	<u>52</u>
<u>4.1.7 Potência Média Exportada em kW.....</u>	<u>52</u>
<u>4.1.8 Consumo Específico.....</u>	<u>53</u>
<u>4.1.9 Geração Média.....</u>	<u>54</u>
<u>4.1.10 Fator de Utilização.....</u>	<u>55</u>
<u>1.12 INDICADORES EXERGÉTICOS.....</u>	<u>56</u>
<u>4.1.11 Rendimento da 1º Lei da Termodinâmica, Eficiência Racional e Eficiência Racional com Perdas.....</u>	<u>59</u>
<u>4.1.12 Eficiências das Caldeiras.....</u>	<u>61</u>
<u>4.1.13 Critérios de Desenvolvimento Baseados na Primeira Lei da Termodinâmica.....</u>	<u>62</u>
<u>4.1.13.1 Fator de utilização de energia - FUE.....</u>	<u>62</u>
<u>4.1.13.2 Eficiência de geração de potência para o sistema - <math>E = 1/FCP</math>.....</u>	<u>63</u>
<u>4.1.13.3 Razão de poupança de combustível - RPEC.....</u>	<u>63</u>
<u>4.1.13.4 Combustível destinado à produção de potência - FCP.....</u>	<u>64</u>
<u>CONCLUSÃO.....</u>	<u>65</u>
<u>REFERÊNCIAS.....</u>	<u>67</u>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios do coeficiente de resíduos CR.....	8
Tabela 2 - Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca.	9
Tabela 3 - Equipamentos de cada usina.....	32
Tabela 4 - Critérios de desempenho de sistemas térmicos.....	42
Tabela 5 - Dados fornecidos pela Usina Usaciga.....	44
Tabela 6 - Dados fornecidos pela Usina Dedini.....	45
Tabela 7 - Quantidade de bagaço produzido, consumido e excedente da Usina Usaciga.....	46
Tabela 8 - Quantidade de bagaço produzido, consumido e excedente da Usina Dedini.....	46
Tabela 9 - Consumo de energia do período da safra por setores da Usaciga.....	47
Tabela 10 - Consumo de energia do período da safra por setores da Dedini.....	48
Tabela 11 - Potência média fornecida pelos geradores em kW.....	49
Tabela 12 - Energia gerada e comercializada na safra 2005 da Usaciga.....	50
Tabela 13 - Energia gerada e comercializada na safra 2005 da Dedini.....	51
Tabela 14 - Energia produzida pelos geradores.....	51
Tabela 15 - Energia disponível para venda em kWh.....	52
Tabela 16 - Potência média exportada para concessionária.....	53
Tabela 17 - Consumo específico em kWh por tonelada de cana moída.....	54
Tabela 18 - Geração média em MW.....	55
Tabela 19 - Fator de utilização.....	56
Tabela 20 - Dados fornecidos dos equipamentos do processo da Usaciga.....	57
Tabela 21 - Dados fornecidos dos equipamentos do processo da Dedini.....	58
Tabela 22 - Rendimento da 1º lei, eficiência racional e eficiência racional com perdas da Usina Dedini.....	60
Tabela 23 - Rendimento da 1º lei, eficiência racional e eficiência racional com perdas da Usaciga.....	60

Tabela 24	Eficiência racional da primeira lei e da segunda lei da termodinâmica para Usina Dedini.....	62
Tabela 25 -	Eficiência racional da primeira lei e da segunda lei da termodinâmica para Usaciga.....	62
Tabela 26	Critérios de desempenho baseados na primeira lei da termodinâmica .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do consumo energético.....	7
Figura 2 - Divisão de exergia.....	17
Figura 3 - Foto aérea da Usina Dedini - Fazenda São Luiz.....	20
Figura 4 - Foto da Usina Usaciga.....	23
Figura 5 - Correia transportadora de bagaço.....	24
Figura 6 - Montanha de bagaço excedente.....	25

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar e comparar indicativos energéticos e exergéticos de duas indústrias do setor sucroalcooleiro. O estudo foi realizado no período de safra 2005 em ambas as indústrias. Optou-se em se fazer o experimento utilizando-se dados das caldeiras individualmente em cada indústria, quantidade de cana moída, propriedades da cana e do bagaço, quantidade de energia envolvida no processo por setores, energia comercializada com a concessionária de cada região e características de cada equipamento envolvido no processo. Os dados foram colhidos dos bancos de dados dos respectivos departamentos e por meio de entrevistas com os responsáveis de cada setor, sendo o trabalho baseado em estudos feitos pelas médias diárias e mensais dos dados coletados. Os resultados apontaram que cada indústria analisada tem indicadores diferentes para cada dado estudado. O estudo comprova que ambas as usinas necessitam de equipamentos mais eficientes. Já os indicadores exergéticos apresentaram resultados muito próximos aos do estudo feito para a Usina Vale do Rosário e mencionados neste trabalho.

**Palavras-chave:** cogeração, indicadores energéticos, indicadores exergéticos, eficiência energética.

## ABSTRACT

### **Comparison of indicatives of energetic and exergetic efficiency in two industries of sugar-alcohol sector**

This work has an objective to study and to compare energetic and exergetic indicatives of two sugar and alcohol sector industry. The study was realized in 2005 harvest time at both industries. It was opted in doing the experiment collecting datas from individual boilers in each industry, quantity of ground cane, properties of cane and bagasse, quantity of energy involved in process per sectors, commercialized energy with the concession of each region and characteristics of each equipment involved in the process. The data were collected from respective department data-bank and through interviews with the responsables for each sector, being the work based on studies done by diary and monthly average from collected data. The results pointed that each analyzed industry has different indicators for each studied data. The study states that both factories need more efficient equipments. And exergetic indicators presented results next to the studies done to *Vale do Rosário* Factory and mentioned on this work.

**Keywords:** combined heat and power station, energetic indicators, exergetic indicators, energetic efficiency.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 SETOR SUCROALCOOLEIRO NO BRASIL E NO PARANÁ

O setor sucroalcooleiro brasileiro tem cadastrado no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento 346 unidades industriais de produção de açúcar e álcool em todo o Brasil. Dessas, 28 estão situadas no Estado do Paraná e 157 estão no Estado de São Paulo, o maior em termos de produtividade e também número de usinas. O Brasil produziu, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, na safra de 2003/2004, um total de 389.929 mil toneladas de cana, em uma área de 5.343 mil hectares de terra, resultando em uma produtividade média de 72,98 toneladas por hectare. (MAPA, 2005)

Segundo MACEDO (2001), de cada tonelada de cana resultam: 140 kg de bagaço, 150 kg de açúcar, 140 kg de palha, que hoje é perdida na queimada no campo. Para o mesmo autor, o autoconsumo de energia elétrica de uma usina (12 kWh/t cana) e o uso de energia mecânica (16 kWh/t cana) correspondem a uma potência instalada de cerca de 2,4 GW e conclui que as usinas utilizam cerca de 330 kWh/t de cana.

A energia renovável produzida pelas usinas para uso externo, hoje principalmente etanol, é cerca de nove vezes maior que o insumo fóssil utilizado na sua produção, tornando o processo o mais atraente entre os usos comerciais de energia alternativa no mundo, sob o ponto de vista de sustentabilidade, com a redução da emissão de gases de efeito estufa em cerca de 12,7 milhões de toneladas de carbono (MACEDO, 2001).

Na área agricultável do Paraná, SHIKIDA (2001) cita que, em 1998, o PIB total do Estado foi de US\$ 46,9 bilhões, sendo o setor sucroalcooleiro

responsável por US\$ 1,1 bilhão desse total, ou seja, 2,3% do PIB estadual. O Paraná vem se destacando nacionalmente pela sua produtividade média de 74 t/ha na safra 99/00, quando a média nacional ficou em 69 t/ha. Das 28 indústrias do estado que processam cana, 8 são somente destilarias autônomas e 20 são usinas com destilaria anexa. O mesmo cita também que as unidades industriais são responsáveis, quando em período de safra, pela geração de 70.000 empregos diretos e 200.000 empregos indiretos.

SHIKIDA (2001) cita que as usinas do Estado do Paraná produziram na safra 1999/2000 1429 milhões de toneladas de açúcar e 1049 bilhões de litros de álcool, dos quais 615,6 milhões de litros referiram-se a produção de álcool hidratado e 433,5 milhões de litros à produção de álcool anidro.

## 1.2 INCENTIVO GOVERNAMENTAL À INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

Após a grande crise mundial do petróleo, em 1973, o Brasil, que importava 80% das suas necessidades de petróleo, precisou de um programa inédito mundialmente para criar uma nova fonte de energia alternativa. Em 1975, o governo em parceria com a iniciativa privada, lançou o Programa Nacional do Álcool - PRÓALCOOL, que foi a primeira iniciativa mundial para a produção de energia alternativa em larga escala.

A implantação do PRÓALCOOL dividiu-se em duas etapas. A primeira, iniciada em 1975, utilizou a infra-estrutura existente em produção de álcool anidro a ser adicionado na gasolina; a segunda, marcada por outra crise do petróleo em 1979, além de produzir álcool anidro, passou a fabricar álcool hidratado que serviria para consumo em veículos projetados para o uso exclusivo do álcool como combustível. Conscientes da necessidade do mercado, os

fabricantes lançaram a partir de 2003 motores bicombustível, ou seja, funcionando com álcool ou gasolina, conforme o desejo do consumidor, ampliando ainda mais a comercialização do álcool hidratado no Brasil.

Em 2004, o governo lançou um novo programa denominado: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA. Esse programa visa à diversificação da matriz energética nacional e a garantir maior confiabilidade e segurança no abastecimento de energia elétrica no Brasil. O programa, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, estabelece a contratação de 3.330 MW de energia no Sistema Interligado Nacional, produzido por fontes Eólicas, Biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas, sendo 1.100 MW para cada fonte. Criado em 26 de abril de 2002, muitas usinas de açúcar e álcool estão usufruindo do programa para instalação de geradores para exportação de energia. O PROINFA é um programa governamental que tem o apoio a investimentos em fontes alternativas renováveis de energia elétrica com crédito de financiamento de até 70% do investimento, com o suporte do BNDES, excluindo apenas bens e serviços importados e a aquisição de terrenos. Os investidores devem garantir somente 30% do projeto com capital próprio.

Devido a projetos como o PROINFA, que incentivam empresas a gerar energia, com isso a matriz energética brasileira tem vantagens como a geração descentralizada, ficando a geração mais próxima das unidades consumidoras; vantagens econômicas, como combustíveis e equipamentos nacionais; crescimento no setor de máquinas e equipamentos, com conseqüente aumento na arrecadação de impostos; vantagens sociais, com a utilização de mão-de-obra da zona rural; e vantagens ambientais, pela produção de um combustível limpo e renovável, com balanço nulo de carbono (GUARDABASSI, 2002).

A urbanização crescente, a industrialização e a modernização das atividades industriais têm gerado um aumento do consumo de energia nos países em desenvolvimento (JANNUZZI; SWISHER, 1997). No Brasil esse aumento também tem sido sentido e, com a retomada do crescimento econômico, a preocupação com a disponibilidade de energia cresce.

TOLMASQUIM (1998) afirma que a eficiência energética aumenta quando se consegue realizar um serviço e/ou produzir um bem com uma quantidade de energia inferior a que era usualmente consumida. Para esse autor, eficiência energética embute, assim, outros conceitos relacionados a características técnicas dos equipamentos de geração de energia, dos processos produtivos, dos bens produzidos, dos equipamentos de uso final de energia e as características econômicas.

O mesmo autor cita que o consumo específico de energia é o consumo de energia por bem de serviço produzido. As variações da eficiência energética se devem a combinações de diferentes fatores: aspectos tecnológicos, efeitos sazonais, aspectos sócio-culturais, efeitos estruturais, aspectos econômicos e políticos.

A necessidade de conservar e racionalizar o uso de energia elétrica no Brasil levou o Governo, por meio das concessionárias estatais de energia elétrica, criando várias agências para aplicação de Energia: CEPEL, CODI, comandadas pela ELETROBRÁS, o DNAEE e em sintonia com a Iniciativa privada, ABILUX – Associação brasileira da indústria de iluminação, ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento e outras, à criação do PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Esse programa tem como objetivos, promover a conservação e combater o desperdício de energia elétrica, utilizando-se de planos estratégicos, aplicados para a indústria, para o comércio, para o setor residencial e bem discretamente para o meio rural, por meio de iniciativas das concessionárias e de órgãos governamentais, como elaboração de manuais, distribuição de prêmios, realização de palestras, aplicação de tarifas diferenciadas, utilização de fontes renováveis, etc. (SERAPHIM; TEIXEIRA, 1997).

Diante do exposto, foi estabelecido como objetivo para este trabalho: comparar os indicadores de eficiência energética e exergética em duas indústrias do setor sucroalcooleiro. Espera-se com isso fornecer uma ferramenta importante para o planejamento industrial, com a possibilidade de análise do impacto no

consumo de energia referente a modernizações tecnológicas e, também, mostrar a influência do setor sucroalcooleiro no planejamento energético nacional.

Para que isso ocorra, serão identificados indicadores de fator de utilização de energia, economia de energia de combustível, razão de poupança de energia, quantidade de combustível destinado à produção de potência e eficiência de geração de potência.

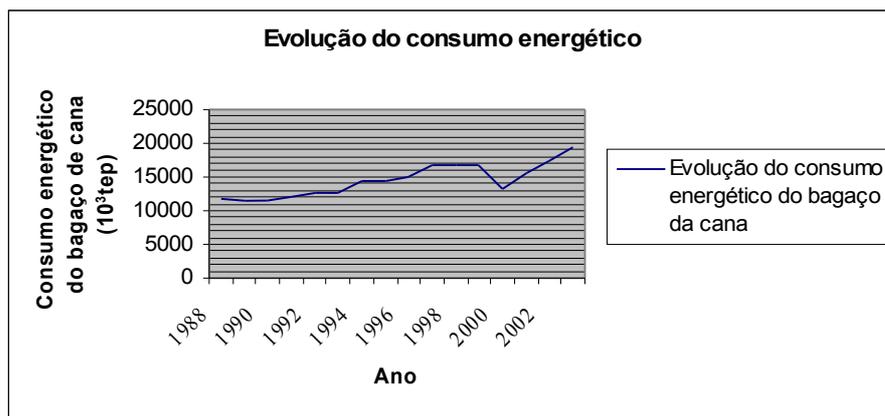
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.3 A IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Segundo LORA (1997), o termo biomassa abrange a matéria vegetal criada pela fotossíntese e seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos domésticos e municipais. A biomassa pode ser dividida em duas categorias:

- biomassa tradicional: lenha, carvão vegetal, palha e casca de arroz, resíduos vegetais e animais.
- biomassa “moderna”: resíduos da utilização industrial da madeira, bagaço de cana, culturas energéticas e resíduos urbanos.

Larson, *apud* LORA (1997), afirma que 15% da energia primária consumida no mundo é obtida a partir da biomassa. Nos países em desenvolvimento esse índice atinge 38,1%. Na América Latina a utilização da biomassa como combustível corresponde a 19,1% do consumo total de energia (Olade, *apud* LORA, 1997). O balanço energético brasileiro de 2004 informou que a produção da energia primária a partir da biomassa é de 60,1% . O gráfico da Figura 1 mostra a evolução do consumo energético do bagaço de cana de açúcar, citada no balanço energético nacional de 2004.



**Figura 1** - Evolução do consumo energético.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2004 (MME, 2005).

Devido à falta de investimentos no setor elétrico, o Brasil passou no final da década de 90 por uma crise no setor. Isso fez com que fontes de energia não convencionais, principalmente as fontes como biomassa que, tecnicamente e economicamente, tornaram-se uma boa opção de geração descentralizada e uma saída rápida para suprir a falta de energia no mercado. Além de favorável ao meio ambiente, o uso energético de biomassa promove a geração local e descentralizada de empregos, reduzindo o problema do êxodo rural e a dependência externa de energia, em função da sua disponibilidade local (JAGUARIBE et al., 2004).

Segundo LORA (2001), em comparação com os combustíveis fósseis a utilização da biomassa como combustível apresenta as seguintes vantagens:

- é uma fonte de energia renovável e a sua utilização de maneira sustentável não contribui para o acréscimo da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e, conseqüentemente, para o efeito estufa;
- a substituição de combustíveis fósseis pela biomassa representa uma redução líquida das emissões de CO<sub>2</sub>,
- as emissões de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e de particulados são muito menores que as emissões oriundas da utilização de óleo combustível e carvão mineral.

Os resíduos de cultivo e de seu processamento constituem uma das maiores fontes de biomassa energética. Para determinar o potencial de fornecimento de um resíduo utiliza-se o denominado coeficiente de resíduos CR, que se calcula como a relação entre a quantidade de resíduos base seca CRE e a massa da colheita com a umidade do campo MC:

$$CR = \frac{CRE}{MC} \quad (1)$$

Na Tabela 1, são apresentados os valores médios do coeficiente de resíduos CR para diferentes culturas.

**Tabela 1 -** Valores médios do coeficiente de resíduos CR

CULTURA	PRODUTO PRINCIPAL	RESÍDUOS	CR
Cereais			
Trigo	Grão	Palha	1,30
Milho	Grão	Palha	1,00
Arroz	Grão	Palha	1,43 – 1,60
Tubérculos e Raízes			
Batata	Tubérculo	Rama	0,4 – 1,40
Amendoim	Noz	Rama	1,00 – 1,48
Cacau	Noz	Casca / fibra exterior	0,20
Cana de açúcar	Açúcar	Bagaço	1,16
Algodão	Algodão	Rama	2,45

Fonte: Streher e Stutzle, *apud* LORA (2001).

As características técnicas mais importantes da biomassa, como fonte de energia, são: a composição química elementar e imediata e o poder calorífico, conforme demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2 -** Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca

TIPO DE BIOMASSA	COMPOSIÇÃO ELEMENTAR					COMPOSIÇÃO IMEDIATA				PCI
	%					%				
	C	H	O	N	S	A	V	A	F	MJ/kg
Pinho	49,29	4,99	44,36	0,06	0,03	0,30	82,54	0,29	17,70	20,03
Eucalipto	49,00	4,87	43,97	0,30	0,01	0,72	81,42	0,79	17,82	19,42
Casca de arroz	40,96	4,30	34,86	0,40	0,02	18,34	64,47	17,89	16,67	16,40
Bagaço de cana	44,80	4,35	39,55	0,38	0,01	9,79	73,78	11,27	14,95	17,33
Casca de coco	48,23	4,23	33,19	2,98	0,12	10,25	67,95	8,25	23,80	19,04
Sabugo de milho	46,58	4,87	44,46	0,47	0,01	1,40	80,10	1,36	18,54	18,77
Ramas de algodão	47,05	4,35	40,97	0,65	0,21	4,89	73,29	4,51	21,20	18,26

Fonte: Jenkins, *apud* LORA (2001).

#### 1.4 A COGERAÇÃO NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

Segundo COSTA e BALESTIERI (1998), a cogeração é formada basicamente por uma fonte primária de combustível, que alimenta uma máquina ou aparelho térmico o qual transformará a energia química do combustível, liberada no processo de combustão, em energia mecânica de eixo no contexto de um ciclo térmico. A energia mecânica será transformada em energia elétrica por meio de um gerador elétrico. A energia térmica dos gases quentes provenientes da combustão pode ser utilizada de forma direta ou convertida numa outra forma energética útil, tal como vapor. ERBER (2005) explica que a tecnologia desenvolvida em que o calor produzido na geração elétrica que é usada no processo produtivo sob a forma de vapor é denominado cogeração. O mesmo

autor cita ainda que o grande inconveniente da cogeração é que o calor só pode ser usado próximo ao equipamento, o que limita essas instalações a unidades relativamente pequenas se comparadas com os geradores das concessionárias. Até meados do século XX, a cogeração chegou a ser muito usada nas indústrias, perdendo depois a competitividade para a eletricidade produzida pelas concessionárias nas grandes centrais geradoras com ganhos de escala. Assim, a cogeração ficou limitada a sistemas isolados e a indústrias com lixos combustíveis. Nos últimos tempos, porém, um novo modelo do setor elétrico voltou a estimular a produção elétrica local que fosse mais eficiente e de baixo custo, levando ao aperfeiçoamento da tecnologia da cogeração, inclusive para pequeno porte. A necessidade de reduzir emissões de CO<sub>2</sub> também incentivou a adoção desse processo eficiente. Hoje, na Holanda e Finlândia, a cogeração já representa mais de 40% da potência instalada.

A cogeração na Espanha vem sendo utilizada a muitos anos no setor de fabricação de açúcar, sendo um dos setores pioneiros na cogeração do país com o setor expandindo-se muito nos últimos anos (IDAE, 1997).

Promover a cogeração industrial não é garantia de êxito financeiro, sobretudo no caso do setor sucroalcooleiro, dada as opções de mercado oferecidas pelo comércio do próprio bagaço. Assim, o ideal é que se estude amplamente, qualquer projeto de instalação de um novo sistema ou mesmo da ampliação de um sistema de cogeração, antes de executá-lo (JAGUARIBE et al., 2004).

FACCENDA e SOUZA (1997) constataram que, no período de safra da cana-de-açúcar (maio a novembro), o consumo de energia elétrica é maior no estado de São Paulo. De forma inversa, nos meses de entressafra (dezembro a abril) o consumo de energia elétrica é menor, isto é, o consumo médio das médias dos meses que correspondem ao período de safra representa 6,17% a mais que o consumo médio das médias dos meses que representam o período de entressafra.

Para esses autores, ao contrário da demanda, pode-se observar, pelos dados apresentados, que, no período de safra a geração de energia elétrica foi

menor. De forma inversa, nos meses de entressafra a geração de energia elétrica foi maior, isto é, a geração média das médias dos meses que corresponderam ao período de safra representou 5,32% a menos da geração média das médias dos meses que representaram o período de entressafra.

Empreendimentos termoelétricos se tornam atraentes porque são projetos que envolvem capital menos intensivo, em relação à opção hidroelétrica, baixo tempo de maturação do projeto, facilidade de modularização de equipamentos, custos dos equipamentos preponderantemente menores em relação aos custos de obras civis. (VIEIRA; OLIVEIRA JR., 1998).

Ainda, segundo VIEIRA e OLIVEIRA JR., (1998), os critérios de partição utilizados para a obtenção dos custos específicos, baseados no conceito da segunda lei da termodinâmica, demonstram que o custo definido pela exergia e não pela energia, traz o benefício da valorização efetiva das utilidades produzidas. A utilização do método da exergia para a quantificação do desempenho de uma unidade térmica de potência torna possível a identificação da magnitude e as reais causas termodinâmicas em cada equipamento. O método da partição pela igualdade, em que o vapor e a energia elétrica cogenerada têm o mesmo valor, pode ser do interesse da indústria que emprega cogeração e não gera excedente de energia elétrica. Inversamente, o método da extração é mais aproveitado para aquelas indústrias nas quais há excedente de energia elétrica.

Os autores citados acima concluíram então que uma maior utilização dos sistemas de cogeração na matriz energética brasileira traria benefícios claros, tanto no que diz respeito à redução do consumo de combustível quanto na redução dos níveis de emissão dos contaminantes atmosféricos e, por consequência, dos custos dessas emissões. Além disso, esses sistemas são viáveis em relação aos aspectos técnicos e econômicos, tendo em vista um menor tempo de retorno do projeto, permitindo a geração de excedentes de energia elétrica que pode ser incorporado na capacidade instalada do país e que representa um lucro agregado para o autoprodutor, além do benefício do auto-suprimento.

BINI e SOUZA (1997) demonstraram que o investimento realizado para ampliação de uma usina se pagaria em prazo inferior a cinco anos, ainda que lhe

fosse adicionado um custo financeiro de 6% a.a.. Tal fato permite afirmar que o resultado líquido a ser obtido do investimento oferece perspectivas de retorno a médio prazo, enquanto em países economicamente estabilizados, os empreendimentos geralmente oferecem resultados significativos somente a longo prazo.

Da simulação efetuada por PELLEGRINI, RAMOS e VIEIRA (2002), constata-se que as usinas de açúcar e álcool, embora apresentem um regime sazonal de operação, típico do setor sucroalcooleiro, poderão ser empreendimentos bastante interessantes do ponto de vista da expansão do sistema elétrico. Os autores acima concluíram que o custo do combustível é um fator decisivo e que o setor poderá participar ativamente não só no reforço de oferta local de energia elétrica como também no Sistema Interligado.

## 1.5 A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR INDUSTRIAL

A urbanização crescente, industrialização e modernização das atividades industriais têm implicado um aumento do consumo de energia em países em desenvolvimento (JANNUZZI; SWISHER, 1997). No Brasil o aumento também tem sido sentido e com a retomada do crescimento econômico a preocupação com a disponibilidade de energia cresce.

Segundo Brasil, *apud* ZANIN (2002), o setor industrial brasileiro apresentou, desde 1970, um crescimento elevado do consumo energético nacional, chegando a 54% do consumo total em 1980 e obteve 44% deste total no fim da década de 90. De acordo com o autor, o crescimento do consumo energético esteve relacionado ao desenvolvimento e à modernização do país. Para o mesmo autor, a produção de energia elétrica foi de 4 a 7% superior ao consumo total, no período de 80 a 99. Para ELETROBRÁS (1998), a evolução

do preço da energia elétrica, a modernização dos processos industriais e a incorporação de avanços tecnológicos aos equipamentos que consomem energia elétrica tendem a incentivar uma atitude contra o desperdício. Na maioria das vezes a observação válida é a de que a inovação tecnológica surge para diminuir o desperdício e não o inverso.

Para ELETROBRÁS (1994), o uso eficiente da energia está condicionado à produção da mesma quantidade de determinado produto com o menor consumo energético, não alterando a qualidade, o conforto ou a satisfação sobre o produto. Temos também que o custo para conservar determinada quantidade energia elétrica, normalmente, é mais barato que o custo da produção dessa mesma quantidade.

GOTTSCHALK (1999) afirma que o uso da energia deve ser o mais efetivo possível, reduzindo os custos da produção e otimizando seus altos custos. A maior parte das organizações trata a energia como um insumo necessário para a produção e isso afeta diretamente o valor final do produto ou serviço gerados. Essa visão empresarial faz com que a energia seja considerada um custo de alto valor, independente do valor pago.

Os estudos de WORREL et al. (1994) mostraram que uma indústria de plásticos na Nova Zelândia alcançou um potencial de economia energética de 8%. Segundo os autores, esse potencial pode variar de 12% a 25% quando relacionado às indústrias de polivinilclorídeo. WORRELL, MARTIN e PRICE (2000) encontraram um potencial de redução da ordem de 11% a 18%, do total da energia utilizada nas indústrias de cimento dos Estados Unidos (EUA) e, para LIMONI FILHO e VENTURINI FILHO (1999), uma redução de 8,2% do consumo energético na fabricação do mosto cervejeiro. Na produção de ferro e aço dos EUA, WORREL, MARTIN e PRICE (2001) encontraram melhoria do potencial de eficiência do uso da energia da ordem de 18%. Com relação à energia residencial, ALMEIDA, SCHAEFFER e ROVERE (2001) mostraram que o Brasil possui um potencial de economia que varia entre 8% e 28%.

A avicultura brasileira apresentou, segundo POGI e PIEDADE JR. (1991) e FERREIRA e TURCO (2000), potencial de economia de 27,1%, em se

tomando medidas de redução do consumo de energia de ventiladores, nebulizadores, iluminação e comedouros na criação de frangos de corte, bastando para isso a troca do sistema de iluminação por outro com menor número de lâmpadas e menor potência instalada, respeitando porém, a iluminância mínima dos ambientes.

O crescimento da demanda brasileira de energia elétrica exigirá a instalação de pelo menos 15 mil MW até 2010. Embora se conte com grande potencial hídrico e considerável oferta de carvão e gás natural, a utilização destas fontes tradicionais enfrenta entraves ambientais e incertezas de várias naturezas, inclusive quanto aos preços do gás. Esse cenário gera preocupação quanto ao atendimento da demanda, a médio prazo. Entretanto, será sempre possível contar com expressiva oferta de energia elétrica gerada a partir da biomassa residual do setor sucroalcooleiro, da ordem de 5 mil MW, passível de ser criada tempestivamente e a preços competitivos com os das demais fontes.

FACCENDA e SOUZA (1997) indicam que o consumo médio dos meses de safra da cana-de-açúcar representa 6,17% a mais que o consumo médio dos meses de entressafra e que a geração média dos meses de safra representa 5,32% a menos que a geração média dos meses de entressafra. Portanto, o sistema poderia ser planejado de forma a acrescentar energia firme ao parque gerador, entre 6,17% e 11,5%, incluindo a cogeração, com o objetivo de equacionar a sazonalidade anual do consumo e geração de energia elétrica no Estado de São Paulo.

Para tanto, são necessárias condições financeiras e institucionais que atraiam os possíveis investidores. Trata-se de utilizar, com a eficiência economicamente justificada, a energia de uma quantidade apreciável e crescente de combustível renovável, que já vem sendo queimado com lamentável desperdício do calor produzido, bem como substituir a utilização de combustíveis fósseis, em benefício do meio ambiente e da balança comercial (PORTAL GD, 2005b).

A eficiência energética também é motivo de muitos estudos nos EUA. GALITSKY, WORREL e RUTH (2003) afirmam que existe muito a melhorar na

eficiência energética em moinhos de milho, enquanto se mantém ou até aumenta a produtividade. Para uma boa eficiência energética algumas medidas bastante firmes são necessárias para o combate ao desperdício. Primeiramente, nos moinhos de milho, equipamentos como motores, bombas e compressores devem passar por manutenção freqüente e substituição por equipamentos mais modernos, caso necessário. O ponto posterior é verificar a eficiência do processo, otimizando-o quando necessário. Finalmente, como em moinhos de milho existem vários processos funcionando em paralelo, coordenar essa planta para que os processos sejam os mais eficientes possíveis é indispensável.

Em aspectos industriais, uma usina sucroalcooleira tradicional é ineficiente do ponto de vista energético. A maioria das usinas se desfaz de todo o bagaço da cana, devido ao risco de ignição espontânea e contaminação ambiental. Em consequência disso, os geradores, as turbinas e demais componentes trabalham com baixa eficiência (LEON, 1999).

LEON (1999) cita também que uma solução para o desenvolvimento energético na agroindústria açucareira está vinculada ao incremento da eficiência de geração e uso do vapor nos processos industriais, assim como as possibilidades de cogeração com o processamento dos resíduos do processo. O uso racional da energia ocupa um papel preponderante dentro das estratégias de modernização e diversificação que deve ser comparada com a indústria açucareira. O fato de se ter o próprio combustível lhe dá uma larga vantagem sobre a indústria açucareira que utiliza a beterraba.

Segundo PRINDLE et al. (2003), os EUA estão optando por tomar medidas de incentivo para o aumento da eficiência energética, apresentando algumas políticas de incentivo à eficiência. Dentro dessas áreas está a cogeração, que ocupa o terceiro lugar nas categorias oferecidas. Esse autor afirma que existe uma política severa de encorajamento tecnológico para a queima de restos para geração de energia e calor, que atende de pequenas plantas industriais até as comerciais.

Estudo feito por KALICASLAN et al. (1999), em um comparativo da *Shakarganj Sugar Cane Factory*, no Paquistão, que já utiliza o bagaço para gerar

energia, com a *Adapazarj Sugar Beet Factory*, na Turquia, que ainda não utiliza esse combustível para gerar energia, verifica que a produção de bagaço satisfaz toda a necessidade de energia para a usina do Paquistão, gerando por dia 1045 toneladas de bagaço que é utilizado como combustível para a caldeira para um esmagamento de 5000 toneladas diárias. São geradas 1275 toneladas de cana por dia, o excedente de 230 toneladas é destinado para outros usos. Para essa fonte na usina de Shakarganj, foram vendidos ao governo 1MW de energia em 1993, aumentando para 5MW em 1994 usando somente o bagaço no período de safra.

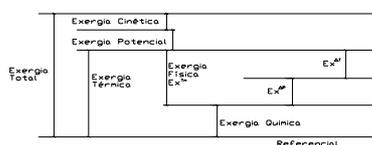
O PORTAL GD (2005a) informa que a biomassa residual do setor sucroalcooleiro representou, em 2003, cerca de 9% da oferta de energia primária do país. Esse setor utilizou em 2004 cerca de 340 milhões de toneladas de cana que equivalem, em termos energéticos, a cerca de 75 % da produção nacional de petróleo, naquele ano. Empregando tecnologias convencionais de cogeração, com caldeiras de alta pressão e turbinas de contrapressão, que vêm sendo empregadas para substituir os tradicionais sistemas de baixa pressão, pode-se obter cerca de 50 kWh excedentes por tonelada de cana. Para uma produção de 510 milhões de toneladas, prevista para 2010, a oferta de energia elétrica do setor sucroalcooleiro poderia, então, alcançar mais de 25 TWh ou 4% da totalidade dos requisitos de geração previstos para o setor.

Conforme indicam Macedo e Nogueira, *apud* PORTAL GD (2005a), turbinas de extração-condensação, ainda não são empregadas no setor sucroalcooleiro, embora disponíveis no mercado, aumentariam a energia elétrica excedente para até 150 kWh/t de cana, ou seja, proporcionariam uma oferta da ordem de 60 TWh em 2010, admitindo-se que metade das palhas também seja aproveitada, em vez de ser queimada no campo, como ocorre tradicionalmente. Tecnologias experimentais, futuramente disponíveis, que envolvem a gaseificação da biomassa, novamente duplicariam a produção de excedentes.

## 1.6 EXERGIA NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

A energia, segundo TORRES (2001), é a propriedade proveniente do primeiro postulado da termodinâmica: a energia não pode ser criada nem destruída, só transformada sempre se conservando e, a cada transformação, haverá sempre uma parte perdida. Rant, *apud* TORRES (2001), que sugeriu a palavra exergia, também propôs a palavra Anergia para denominar a parte da energia que não pode ser aproveitada, isto é: Energia = Exergia + Anergia.

Portanto, energia é a soma de tudo aquilo que pode ser aproveitado (exergia) com a parte que não se utiliza (anergia). Existem muitas definições e, dentre elas, pode-se citar: A exergia é a parte da energia que pode ser completamente convertida em qualquer outra forma de energia (Rant, *apud* TORRES, 2001), é a parte nobre da energia ou, em outras palavras, é a parcela que pode ser convertida em calor e/ou trabalho. Porém, apesar desse conhecimento, pode-se ainda observar que existem subparcelas dentro desse fluxo exergético. Para calcular a exergia é necessário que se defina o estado de referência, para que se possa ter base sobre quais são os valores adotados. Segundo Szargut e Kotas, *apud* TORRES (2001), a exergia pode ser dividida em quatro tipos: cinética, potencial, termomecânica e química. A Figura 2 ilustra essa divisão.



**Figura 2 -** Divisão de exergia.

Fonte: TORRES (2001).

Portanto, a exergia é:  $E_{XT} = Ex_{cinética} + Ex_{potencial} + Ex_{Termomecânica} + Ex_p + Ex_{química}$ .

Em uma análise apresentada por DEL CAMPO et al. (1998), na Usina Vale do Rosário, por meio do estudo da exergia, os autores constataram que, no conjunto, a eficiência das caldeiras tem uma grande importância no desempenho global. Outro aspecto é a necessidade de instrumentação adequada, para o monitoramento do funcionamento dos equipamentos, particularmente as caldeiras e turbinas. As eficiências de Segunda Lei obtidas demonstram a limitação do nível de pressão da caldeira para a geração de energia elétrica: incremento substancial na geração só poderá ser obtido com a elevação dos níveis de pressão praticados. A baixa eficiência dos acionamentos mecânicos diretos, via turbinas de menor porte, põe de manifesto a questão das perdas energéticas (e exergéticas) neles. Considerando somente aspectos termodinâmicos, a sua substituição por acionamentos com motores elétricos de boa eficiência seria aconselhável, embora nesses casos seja necessário considerar os custos.

Outro aspecto citado no trabalho de SOUZA, NEBRA e GALLO (1998), no qual se faz uma análise exérgica comparativa de sistemas de recuperação de energia dos gases efluentes de caldeiras a bagaço de cana, conclui que a recuperação de energia de gases de combustão na chaminé da caldeira, via secagem de bagaço, mostrou-se ligeiramente mais eficiente, sob o ponto de vista termodinâmico, que a via preaquecimento do ar de combustão.

Os critérios de partição utilizados para a obtenção dos custos específicos, baseados no conceito da Segunda Lei da Termodinâmica, demonstram que o custo definido pela exergia e não pela energia, traz o benefício da valorização efetiva dos bens produzidos. A utilização do método da exergia para a quantificação do desempenho de uma unidade térmica de potência torna possível identificação da magnitude e as reais causas de perdas termodinâmicas em cada equipamento (VIEIRA; OLIVEIRA JR., 1998).

## 1.7 EQUIPAMENTOS PARA COGERAÇÃO

A dimensão dos equipamentos de cogeração é medida pelas necessidades de vapor do processo produtivo. Como é economicamente inviável o transporte do vapor a grandes distâncias e para aumentar a eficiência do ciclo de energia do sistema, prevê-se a instalação da fonte cogeneradora próxima aos usuários ou fazendo parte de indústrias cujas atividades gerem, como excedentes, produtos que apresentam características combustíveis. O cogrador, portanto, pode ser definido por duas situações distintas:

a) Cogrador com excesso de energia elétrica. Neste caso, haverá condições de comercialização da eletricidade excedente por meio de:

- Venda direta: o cogrador vende diretamente a outros consumidores;
- Venda à Concessionária: o cogrador vende para empresas de serviço público;
- Venda por um comercializador: o cogrador vende para consumidores por meio de um agente comercializador.

b) Cogrador que supre, no todo ou em parte, suas necessidades. Neste caso o cogrador, provavelmente, complementa as suas necessidades de energia elétrica comprando de concessionária, de produtor independente ou de outro cogrador (PELLEGRINI, 1999).

Definindo-se a situação em que o cogrador irá trabalhar e o sistema de cogeração de energia utilizado, no caso das indústrias do setor sucroalcooleiras o bagaço de cana, pode-se dividir um sistema de cogeração em: fornalha, caldeira, tubulações de vapor e turbina.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 1.8 USINAS ANALISADAS

Os dados para esta pesquisa foram coletados das seguintes usinas:

1) **DIC – DEDINI S/A. Indústria e Comércio:** Fundada em 1960, está localizada na Fazenda São Luiz, município de Pirassununga-SP e tem como atividade principal a produção de açúcar, açúcares líquidos e álcool, utilizando como matéria prima a cana de açúcar. Tem capacidade para esmagamento de 13.000 toneladas/dia de cana de açúcar e capacidade de produção instalada para fabricação de 28.000 sacas de 50 kg/dia de açúcar cristal e 400.000 litros de álcool/dia. A usina está localizada na Latitude 21°85'S e longitude 47°15'W. O período de safra 2005 ocorreu entre os dias 20/04/2005 e 14/12/2005.



**Figura 3 -** Foto aérea da Usina Dedini - Fazenda São Luiz.

2) **USACIGA – Açúcar, Álcool e Energia Elétrica Ltda.:** Fundada em 1980, está localizada no município de Cidade Gaúcha e tem como atividade principal a produção de açúcar e álcool, utilizando como matéria prima a cana de açúcar. Tem capacidade para esmagamento de 8.400 toneladas/dia de cana de açúcar e capacidade de produção instalada para fabricação de 14.000 sacas de 50 kg/dia de açúcar cristal e 180.000 litros de álcool/dia. A Usina está localizada na Latitude 23°22'30''S e longitude 52°56'00''W. O período de safra 2005 ocorreu entre os dias 18/04/2005 e 04/12/2005.



**Figura 4 -** Foto da Usina Usaciga.

## 1.9 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

Para a execução do diagnóstico energético a coleta de dados foi desenvolvida por duas equipes diferentes em cada indústria, uma coordenada pelo grupo de pesquisa em reciclagem e eficiência energética da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, na Usina Dedini e a outra coordenada pela equipe da UNIOESTE na Usina Usaciga.

Objetivando melhor compreender o funcionamento da usina e a relação entre o processo de produção de açúcar e álcool e a geração de energia pela queima do bagaço de cana, foram realizadas várias visitas às plantas das indústrias, bem como entrevistas com os responsáveis de cada departamento e operadores dos setores estudados.

### 3.1.1 Consumo de Bagaço

O consumo de bagaço (B) em toneladas, para manter a planta operando durante a safra, é dado pelo produto do fluxo de bagaço consumido,  $m_b$ , em t/h, pela duração do período, N, em horas (JAGUARIBE et al., 2004).

$$B = m_b * N \quad (2)$$

A quantia de bagaço consumida foi fornecida pelo departamento de preparo de cana, que informou a quantidade de cana recebida na usina dividida pelo percentual de fibra da cana média por dia, que foi atestado pelo responsável

do laboratório de cada Usina. O período de produção foi obtido das horas totais do período de safra, subtraída das horas de parada da usina, que foi fornecido pelo responsável da caldeira.

A Figura 5 mostra a correia transportadora de bagaço de cana da Usina Usaciga.

---

**Figura 5 -** Correia transportadora de bagaço.

### 3.1.2 Bagaço Excedente

O bagaço excedente:  $B_{exc}$  em t, é calculado subtraindo-se do bagaço total produzido:  $B_T$ , as parcelas correspondentes ao consumo do bagaço, durante a safra:  $B_{sf}$ , e a entressafra:  $B_{ef}$  e uma parcela correspondente ao estoque de segurança:  $B_{est}$  em t (JAGUARIBE et al., 2004).

$$B_{exc} = B_T - B_{ef} - B_{sf} - B_{est} \quad (3)$$

Na Usina Dedini esse dado é coletado e armazenado no banco de dados da sala da caldeira. Na Usina Usaciga esse dado foi fornecido pelo gerente industrial, pois atualmente esse dado não é coletado.

A Figura 6 mostra a montanha de bagaço de cana excedente da Usaciga.



**Figura 6 -** Montanha de bagaço excedente.

### 3.1.3 Potência Média Fornecida pelos Geradores

A potência média das máquinas de contrapressão:  $W_{ep}$ , em kW, é dada pela soma da potência média produzida pelo turbogerador 1:  $W_1$ , em kW, e o turbogerador 2,  $W_2$ :

$$W_{ep} = W_1 + W_2 \quad (4)$$

Obtido dos arquivos da sala de máquinas de cada usina, fornecido em kW, e, no caso da Usina Dedini, obtido pela soma dos 3 geradores, já para a Usaciga, foi o dado de energia gerada pelo gerador que está em operação, pois a usina tem 2 grupos, no entanto, o grupo MAUSA de 2,5MW não está operacional, sendo utilizado somente em caso de emergência, pois não tem potência suficiente para atender à demanda total da indústria, caso o gerador WEG de 6MW saia do sistema.

### 3.1.4 Energia Produzida pelos Geradores

A energia produzida pelos geradores:  $E_T$ , em MWh, é o produto da potência média produzida:  $W$ , pela duração do período:  $N$ , em horas:

$$E_T = W_{ep} \cdot N \quad (5)$$

Esse dado foi fornecido pelo departamento de elétrica de cada indústria, dos dados coletados a cada hora.

### 3.1.5 Consumo Elétrico da Fábrica

O consumo elétrico da fábrica:  $E_F$ , em MWh, é dado pelo produto da demanda elétrica média da fábrica:  $W_F$ , em kW, pela duração total do período, (JAGUARIBE, et al., 2004).

$$E_F = W_F * N \quad (6)$$

O consumo da indústria foi analisado de forma diferente para cada usina. Na Usina Usaciga, foi fornecido a valor médio da demanda de cada mês para cada setor da indústria. Esse dado foi fornecido pelo Gerente do Departamento Elétrico da Usina. Como se tinha o número de horas de parada da indústria, calculou-se o consumo mensal de cada setor em kWh. A energia comprada da concessionária foi coletada do histórico dos últimos 12 meses do consumo na ponta e fora de ponta e também demanda de cada período de faturamento, fornecido pela concessionária.

Na Usina Dedini existem medidores setorizados coletando-se as medições nos períodos requisitados. Os dados são formatados somente para o modelo de dados analisados para se fazer as comparações e análises.

### 3.1.6 Energia Disponível para a Venda

A energia disponível para a venda:  $E_{exc}$ , em MWh, é obtida subtraindo-se da energia total produzida:  $E_T$ , a energia consumida pela fábrica:  $E_F$ :

$$E_{exc} = E_T - E_F \quad (7)$$

Novamente as duas usinas apresentaram situações diferentes, pois a Usina Dedini, na safra em estudo, exportava energia para a Elektro – Eletricidade e Serviços S/A., empresa distribuidora de energia elétrica do estado de São Paulo, o que não ocorria com Usina Usaciga, que ainda não comercializa a energia elétrica para a concessionária que atende à região. Com isso, na Usina Dedini foi feito um estudo da energia que foi comercializada e na Usaciga não foi possível fazer qualquer análise.

### 3.1.7 Potência Média Exportada

A potência média exportada:  $W_{exc}$ , em kW, é dada pela soma das potências fornecidas pelos geradores:  $W$ , menos a demanda elétrica média da fábrica:  $W_F$ :

$$W_{exc} = W - W_F \quad (8)$$

### 3.1.8 Consumo Específico

O consumo específico CE, dado em kWh/t, é a soma da energia comprada:  $E_c$  (caso necessário), mais a energia gerada:  $E_g$ , dividida pela quantidade de cana moída:  $M$ , em toneladas (BINI, 1993).

|

(9)

Como ambas as usinas apresentaram todos os dados armazenados, foi possível calcular esse indicador sem maiores problemas.

### 3.1.9 Geração Média

Geração média:  $G_m$  é a divisão da energia gerada:  $E_g$  pela quantidade de horas de moagem  $T$  (BINI, 1993).

$$G_M = \frac{E_G}{T} \quad (10)$$

Na Usina Dedini foi mais complexo o estudo, pois existem 3 geradores. Na Usina Usaciga foi considerado somente o gerador WEG. Optou-se em fazer os indicadores para a situação real das indústrias, desconsiderando o gerador MAUSA desse indicador.

### 3.1.10 Fator de Utilização

O fator de utilização:  $F_u$  é a divisão da geração média  $G_m$ , pela potência instalada de turbogeradores  $P_g$ , na usina (BINI, 1993).

$$F_U = \frac{G_M}{P_G} \quad (11)$$

No caso da Usaciga foram calculados dois fatores de utilização, pois se considerou em uma situação somente o grupo gerador WEG de 6MW e, em outra situação, os dois grupos, somando-se o WEG com o MAUSA de 2,5MW, totalizando 8,5MW. Esse indicador exigiu que fossem criadas as duas situações, pois em se considerando somente o gerador de 6MW não se teria a situação da

potência instalada total de geradores, no entanto, não se pode desprezar a existência do grupo MAUSA.

## 1.10 DIAGNÓSTICO EXERGÉTICO

### 3.1.11 Eficiência da Primeira Lei da Termodinâmica

Segundo DEL CAMPO (1998), define-se eficiência pertencente à Primeira Lei da Termodinâmica para cada um dos equipamentos fundamentais do sistema: turbomoendas, turbogeradores e turbobombas, de acordo com a primeira lei como:

$$| \quad \text{ou} \quad \frac{W_E}{mv \times \Delta h_{ISO}} \quad (12)$$

Em que:

$\eta$  - eficiência do sistema;

$W_{\text{mec}}$  - potência mecânica (kJ/s);

$W_e$  - potência elétrica (W);

$m_v$  - consumo de vapor (kg/s);

$\Delta h_{\text{iso}}$  - salto térmico isoentálpico (kJ/kg).

### 3.1.12 Eficiência da Segunda Lei da Termodinâmica

Para a eficiência da Segunda lei da Termodinâmica, nesses equipamentos foram utilizadas duas definições: a racional ( $\psi$ ), discutida por KOTAS (1995), e a definição que inclui as perdas mecânicas de transmissão ( $\psi_{\text{Perdas}}$ ).

Cada indústria apresentou uma lista de equipamentos diferentes para serem estudados.

**Tabela 3 - Equipamentos de cada usina**

USACIGA	DEDINI
Turbina	Turbina
Faca niveladora	Faca oscilante
Faca picadora	Faca fixa
Desfibrador	Desfibrador
1° Terno	1° e 2° ternos
2° e 3° Ternos	3° e 4° ternos
4° e 5° Ternos	5° e 6° ternos
Turbobomba 1	Turbobomba 1
Exaustor 1	Turbobomba 2
Exaustor 2	Turbobomba 3
Gerador 1 WEG	Ventilador
	Gerador 1 - Siemens
	Gerador 2 - Turbimaq
	Gerador 3 - Toshiba

Para obter os indicadores, definiu-se como referência o estado da água líquida com a temperatura e pressão de 25°C e 101,3kPA. A entalpia e a entropia

dos dados do sistema foram calculados pelo programa CATT (*Computer – Aided Thermodynamic Tables*).

Utilizaram-se as potências de cada equipamento em kJ/s, repassadas pelo departamento de mecânica de cada Usina. O consumo de vapor necessário para acionar cada turbina foi passado pelo fabricante.

### 3.1.13 Definição da Equação de Exergia

Equação para o cálculo da exergia é:

$$E_x = h - h_o - T_o(s - s_o) \quad (13)$$

Em que:

$E_x$  - exergia específica;

$H$  - entalpia do vapor ou da água nas condições de processo (kJ/kg);

$h_o$  - entalpia de referência (kJ/kg);

$T_o$  - temperatura ambiente (K);

$s$  - entropia do vapor ou da água nas condições de processo (kJ/kg/K);

$s_o$  - entropia de referência (kJ/kg/K).

A eficiência é obtida considerando-se a variação da entalpia (real), ou seja, entalpia de saída da caldeira e na saída das turbinas, considerando-se a temperatura e a pressão médias nesses pontos e aplicando-se ao programa CATT. Na equação, divide-se pela diferença das exergias na entrada e saída de cada equipamento considerado. Isso é possível, pois se tem uma linha única de vapor na entrada e na saída dos equipamentos, possibilitando a generalização dos dados.

|

(14)

Em que:

$\Psi$  - eficiência racional;

$\Delta H_{\text{real}}$  - salto térmico real;

$E_{x1}$  - fluxo de exergia de entrada;

$E_{x2}$  - fluxo de exergia de saída.

Incluindo-se as perdas de transmissão, tem-se uma realidade mais concreta das indústrias. Na equação, foi considerada a soma das potências de cada equipamento considerado, dividida pela diferença das exergias de entrada e saída da linha de vapor.

|

$$\text{ou } \frac{W_{MEC}}{E_{X1} - E_{X2}} \quad (15)$$

Em que:

$\Psi_{\text{Perdas}}$  - eficiência racional com perdas de transmissão;

$W_E$  - potência elétrica (W);

$W_{\text{MEC}}$  - potência mecânica (kJ/s);

$E_{x1}$  - fluxo de exergia de entrada;

$E_{x2}$  - fluxo de exergia de saída.

### 3.1.14 Eficiência Racional da Segunda Lei para Caldeiras

No caso das caldeiras a eficiência “racional” de segunda lei é calculada considerando-se no numerador a diferença das exergias dos fluxos de vapor (e água de extração) que saem, menos o de água que entra e, no denominador, a exergia do bagaço alimentado:

$$\psi_c = \frac{Ex_{VSC} + Ex_{VS} + Ex_{EXT. COM} - Ex_{AGUA ENTR.}}{Ex_{BAG}} \quad (16)$$

Em que:

$\psi_c$  - eficiência de caldeira;

$Ex_{VSC}$  - exergia do vapor superaquecido;

$Ex_{VS}$  - exergia do vapor saturado;

$Ex_{ext. com}$  - exergia de contrações contínuas;

$Ex_{agua entr.}$  - exergia da água na entrada da caldeira;

$Ex_{bag}$  - exergia do bagaço consumido na caldeira.

### 3.1.15 Exergia do Bagaço

A energia do bagaço será calculada segundo a equação proposta por Szargut, *apud* DEL CAMPOS (1998), que leva em conta a umidade do bagaço (conteúdo de água em estado líquido):

$$Ex_{bag} = C_{P,C}(T_C - T_{REF}) + m_{ar\ seco}(C_{P,AR} + w * C_{P,V})(T_{AR} - T_{REF}) + PSC_U \quad (17)$$

Em que:

$Ex_{bag}$  - exergia do bagaço consumido na caldeira;

$C_{P,C}$  - calor específico médio do combustível (kJ/kg°C);

$T_C$  - temperatura do combustível (°C);

$T_{REF}$  - temperatura de referência adotada (°C);

$m_{AR\ SECO}$  - massa de ar necessária para combustão (kg<sub>ar</sub>/kg<sub>combustível úmido</sub>);

$C_{P,AR}$  - calor específico médio do ar (kJ/kg°C);

$w$  - umidade absoluta do ar (kg<sub>água</sub>/kg<sub>ar seco</sub>);

$C_{P,V}$  - calor específico médio do vapor (kJ/kg°C);

$T_{AR}$  - temperatura do ar (°C);

$PCS_U$  - poder calorífico superior do combustível (kJ/kg<sub>combustível úmido</sub>).

### 3.1.16 Fator de Utilização de Energia - FUE

Horlock, *apud* DEL CAMPOS (1998), propôs o critério de cálculo para desempenho de um modelo de cogeração em uma usina sucroalcooleira. Objetivando-se comparar o modelo de duas usinas, o critério será utilizado em base de cálculos e seus resultados fornecerão a eficiência de cada sistema.

O fator de utilização de energia (FUE) é dado por:

$$FUE = \frac{W_{FN} + W_{FP} + W_{DEF} + W_{1T} + W_{2,3T} + W_{4,5T} + W_{TB} + W_{EX1} + W_{EX2} + W_{GER} + Q_{U\ SIST}}{m_B \times PCI} \quad (18)$$

Em que:

FUE - fator de utilização de energia;

$W_{FN}$  - potência faca niveladora (W);

- $W_{FP}$  - potência da faca picadora (W);
- $W_{DEF}$  - potência do desfibrador (W);
- $W_{1T}$  - potência do primeiro terno (W);
- $W_{2,3T}$  - potência do segundo e do terceiro ternos (W);
- $W_{4,5T}$  - potência do quarto e quinto ternos (W);
- $W_{TB}$  - potência turbobomba (W);
- $W_{EX1}$  - potência do exaustor 1 (W);
- $W_{EX2}$  - potência do exaustor 2 (W);
- $W_{GER}$  - potência do gerador (W);
- $Q_u$  - quantidade de calor útil do sistema ( $\text{kJ/kg}_{\text{combustível úmido}}$ );
- $m_b$  - fluxo total de bagaço consumido pelas caldeiras (kg/s).

Todos os dados foram encontrados nos arquivos das indústrias sem dificuldade, no entanto, a energia útil foi calculada conforme indicado pelo IPT.

### 3.1.17 Economia de Energia de Combustível - ESI

O parâmetro: economia de energia de combustível, fornece a eficiência de primeira lei para o sistema. Um parâmetro apresentado por Huang, *apud* DEL CAMPOS (1998) refere-se à economia de energia de combustível (Índice de poupança de energia), obtida por sistemas de cogeração em comparação a plantas convencionais que produzem separadamente energia elétrica e térmica. Este índice é definido pela sigla ESI. Para o caso deste sistema o índice fica definido como:

$$ESI = \frac{m_B \times PCI}{\frac{W_{ELET} + W_{MEC}}{\eta_{TERM}} + \frac{Q_{U. SIST}}{\eta_{CALD}}} \quad (19)$$

Em que:

ESI - índice de poupança de energia;

$m_B$  - fluxo total de bagaço consumido pelas caldeiras (t/h);

PCI - poder calorífico inferior (MJ/kg);

$W_{\text{ELET}}$  - potência elétrica (W);

$W_{\text{MEC}}$  - potência mecânica (kJ/s);

$\eta_{\text{TERM}}$  - eficiência térmica;

$Q_{\text{U. SIST.}}$  - calor útil do sistema (kJ/kg<sub>combustível úmido</sub>);

$\eta_{\text{CALD}}$  - eficiência da caldeira.

Esse índice tem como finalidade medir a economia de energia de combustível obtida por sistemas de cogeração e foi analisado com a quantidade do bagaço utilizado na queima da fornalha: PCI úmido do bagaço, que foi calculado conforme o IPT sugere, considerando-se a umidade, pois o bagaço em ambas as usinas é queimado úmido, potência dos equipamentos envolvidos no processo, rendimento da caldeira que foi calculado utilizando-se dados de vazão de água de entrada das caldeiras e quantidade de vapor gerado, energia útil e rendimento das caldeiras.

### 3.1.18 Razão de Poupança de Energia do Combustível - RPEC

A razão de poupança de energia do combustível é definida como:

(20)

Em que:

RPEC - razão de poupança de energia do combustível;

ESI - índice de poupança de energia.

### 3.1.19 Combustível Destinado à Produção de Potência - FCP

Outro parâmetro é baseado no conceito de combustível destinado à produção de potência: FCP, que é definido como a razão de combustível para processo em relação à potência produzida (elétrica e/ou mecânica) e é dado por:

$$FPC = \frac{(m_B \times PCI) - \frac{Q_{U. SIST}}{\eta_{CALD}}}{W_{ELET} + W_{MEC}} \quad (21)$$

Em que:

$m_B$  - fluxo total de bagaço consumido pelas caldeiras (t/h);

PCI - poder calorífico inferior (MJ/kg);

$W_{ELET}$  - potência elétrica (W);

$W_{MEC}$  - potência mecânica (kJ/s);

$Q_{U. SIST.}$  - calor útil do sistema (kJ/kg<sub>combustível úmido</sub>);

$\eta_{CALD}$  - eficiência da caldeira.

### 3.1.20 Eficiência de Geração de Potência - E

Então, a eficiência de geração de potência para o sistema define-se como:

$$E = \frac{1}{FCP} \quad (22)$$

Em que:

E - eficiência de geração de potência para o sistema;

FCP - combustível destinado à produção de potência.

Tomaram-se como referência os critérios apresentados no trabalho de DEL CAMPO (1998), em se apresentaram os valores de desempenho de sistemas térmicos, conforme Tabela 4 para vários sistemas diferentes.

**Tabela 4 -** Critérios de desempenho de sistemas térmicos

EXEMPLO	FUE	E 1/FCP	RPEC	FCP
Planta de extração condensada	0,48	0,43	0,057	2,33
Planta de contrapressão	0,85	0,75	0,235	1,33
Turbina a gás com caldeira de recuperação	0,85	0,77	0,265	1,30
Ciclo combinado com sistema de contrapressão	0,82	0,75	0,318	1,33
Usina Vale do Rosário	0,75	0,57	0,046	1,76

Fonte: Análise energética e exergética do sistema de cogeração da Usina Vale do Rosário (DEL CAMPO, 1998).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 1.11 INDICADORES ENERGÉTICOS

Para os indicadores energéticos, foram levantados os seguintes dados para cada indústria:

Na Tabela 5 são apresentados os dados pela Usina Usaciga, fornecidos conforme necessidade do trabalho. Verificou-se que a quantidade de cana moída variou muito. No mês de setembro e outubro ocorreu uma baixa na produção. Provavelmente as situações meteorológicas influenciaram nesse aspecto. Maio foi o mês com maior quantidade de cana moída. Nos meses de abril e dezembro os dados são pequenos, pois houve somente alguns dias de produção, pois a safra nessa usina começou no dia dezoito de abril e encerrou no dia quatro de dezembro, tornando, assim, os meses de dezembro e abril fora da média. A média de fibra no bagaço é um dado que informa em percentual a quantidade de fibra existente no bagaço que vai para as fornalhas das caldeiras. Esse dado é importante para o cálculo da quantidade de bagaço que é produzido na indústria, pois não é usual pesar o bagaço que está saindo das moendas, sendo então realizada por estimativa a quantificação do bagaço que a indústria está produzindo, utilizando-se a quantidade de fibra na cana e fibra no bagaço. Observou-se que na Usina Usaciga existe uma menor quantidade de fibra no bagaço, mostrando que o bagaço terá então um menor poder calorífico de queima, pois o principal combustível do bagaço é a fibra. A média de fibra da cana é um dado que informa a quantidade de fibra contido na cana que vem da

lavoura. Isso depende do solo e da espécie de cana plantada e é coletado na chegada do caminhão por amostragem na própria balança. Observou-se que na Usina Usaciga existe uma maior quantidade de fibra na cana do que na Usina Dedini. Caracterizou-se também, em ambas as usinas, um aumento na quantidade de fibra no decorrer da safra. O Pol do bagaço é a quantidade de sacarose que está deixando de ser aproveitada para a produção de açúcar. Na Usina Usaciga esse dado é substancialmente menor, havendo assim, um maior aproveitamento da sacarose. O dado Pol da cana é um dado que mostra a quantidade de sacarose que contém a cana vinda da lavoura. Na Usina Usaciga esse dado fica abaixo da quantidade média mensal da Usina Dedini. Provavelmente, isso tem a ver com a qualidade da terra em que são feitos os plantios de cada Usina. O Pol do caldo misto também é um dado que informa a quantidade de sacarose que contém o caldo de cana extraído, após a moagem. Este valor é muito mais baixo na Usina Usaciga, em relação aos valores encontrados na Usina Dedini, apresentando a Usaciga um processo menos qualitativo que a Dedini. Isso significa que, provavelmente, na Usina Usaciga existe uma maior quantidade de água de embebição, tornando o caldo misto mais pobre em sacarose.

**Tabela 5 -** Dados fornecidos pela Usina Usaciga

DATA	USACIGA						
	Quantidade Cana moída em t/mês	Média Fibra % bagaço	Média Fibra % cana	Média Pol do bagaço	Média Pol cana	Média Pol do caldo misto	Média Brix do bagaço
Abril	65862,30	41,95	13,13	1,86	12,90	12,38	2,50
Mai	210539,68	43,47	13,42	2,24	12,99	12,16	2,97
Junho	193896,70	43,73	14,18	2,25	12,50	11,78	3,13
Julho	191939,77	45,07	15,48	2,06	12,45	11,42	2,86
Agosto	180132,41	45,88	14,33	2,04	13,50	12,06	2,77
Setembro	122453,07	39,58	14,15	1,84	11,80	10,15	2,52
Outubro	134813,88	41,47	14,97	1,87	10,87	10,25	2,60
Novembro	174750,55	45,09	17,49	2,10	10,94	10,38	2,99
Dezembro	6375,05	45,13	17,42	1,98	10,75	10,26	2,86
<b>Safra 2005</b>	<b>1280763,41</b>	<b>43,49</b>	<b>14,95</b>	<b>2,03</b>	<b>12,08</b>	<b>11,20</b>	<b>2,80</b>

**Tabela 6 -** Dados fornecidos pela Usina Dedini

DATA	DEDINI						
	Quantidade Cana Moída em t/mês	Média Fibra % Bagaço	Média Fibra % Cana	Média Pol do Bagaço	Média Pol Cana	Média Pol do Caldo Misto	Média Brix do Bagaço
Abril	94355,98	47,29	11,80	2,82	12,96	14,76	3,82
Mai	312053,57	46,90	11,61	2,34	13,21	15,08	3,23
Junho	377644,83	47,74	11,76	2,03	13,78	15,38	2,73
Julho	384754,01	47,03	11,53	2,04	13,89	15,48	2,75
Agosto	399093,94	46,71	11,77	2,32	15,16	16,93	3,07
Setembro	322556,43	46,92	12,53	2,77	14,92	17,33	3,59
Outubro	315602,54	46,58	12,94	2,53	14,75	16,84	3,33
Novembro	272900,57	46,40	13,90	2,68	13,71	16,04	3,54
<b>Safra 2005</b>	<b>2478961,87</b>	<b>46,94</b>	<b>12,23</b>	<b>2,44</b>	<b>14,05</b>	<b>15,98</b>	<b>3,26</b>

#### 4.1.1 Quantidade de Bagaço Consumido e Bagaço Excedente

Na Tabela 7 observa-se que a quantidade de bagaço consumido pela Usina Usaciga, em tonelada por dia, na média, é substancialmente menor que a da usina Dedini, conforme apresentado na Tabela 8. Isso se deve ao fato do consumo diário de cana na Usina Usaciga ser menor que na Dedini, conforme apresentado nas tabelas 7 e 8. Os dados apresentados são dados em toneladas por dia e estão apresentados com média diária mensal. Observa-se que a quantidade de bagaço total produzida é proporcional à quantidade de cana moída mensalmente. Para o bagaço excedente, os resultados foram invertidos, tendo a Usina Usaciga apresentado uma quantidade maior que a Dedini. Isso ocorreu, pois a usina do Paraná não tem contrato de venda de energia com a concessionária local, tendo então, um excedente de bagaço maior, pois não existe a possibilidade de maior produção de vapor para aumentar a potência de energia gerada para ser inserida na rede de energia da Copel. Para a Usina Dedini, constatou-se no primeiro mês uma média negativa. Isso se deu pelo fato da Usina utilizar o bagaço que estava armazenado na montanha de bagaço e que é guardado para poder partir a indústria no início da safra, quando não existe

bagaço para a produção de vapor. Na Usina Usaciga também é utilizado bagaço da montanha de excedente do ano anterior, no entanto, como a produção foi grande no primeiro mês, na média, o valor ficou positivo. Contudo, para a próxima safra: 2007, provavelmente, esses dados serão bem diferentes, pois a Usina foi aceita no programa PROINFA, o que possibilitará à indústria investir na área de geração de energia e terá contrato de venda de energia garantido pelo programa governamental. Com isso, provavelmente, o excedente da Usina Usaciga será bem menor.

**Tabela 7 -** Quantidade de bagaço produzido, consumido e excedente da Usina Usaciga

DATA	USACIGA		
	Bagaço Total Produzido (t/dia)	Bagaço Total Consumido (t/dia)	Bagaço Excedente (t/dia)
Abril	1585,88	1427,29	158,59
Maio	2096,64	1886,97	209,66
Junho	2095,93	1886,34	209,59
Julho	2127,01	1914,31	212,70
Agosto	1814,50	1633,05	181,45
Setembro	1459,68	1313,71	145,97
Outubro	1569,88	1412,90	156,99
Novembro	2259,88	2033,89	225,99
<b>Safra 2005</b>	<b>1876,18</b>	<b>1688,56</b>	<b>187,62</b>

**Tabela 8 -** Quantidade de bagaço produzido, consumido e excedente da Usina Dedini

DATA	DEDINI		
	Bagaço Total Produzido (t/dia)	Bagaço Total Consumido (t/dia)	Bagaço Excedente (t/dia)
Abril	2161,82	2285,27	-123,45
Maio	2502,16	2398,00	104,16
Junho	3104,60	3056,13	48,47
Julho	3039,55	2817,35	222,19
Agosto	3238,94	3151,48	87,45
Setembro	2877,37	2602,90	274,47
Outubro	2815,55	2813,45	2,10
Novembro	2702,67	2675,83	26,83
<b>Safra 2005</b>	<b>2805,33</b>	<b>2725,05</b>	<b>80,28</b>

#### 4.1.2 Medições Setoriais do Consumo de Energia

Nas tabelas 9 e 10, a seguir, são apresentadas as medições setorizadas de cada indústria.

A Usina Usaciga apresenta somente 11 pontos de coleta, sendo um considerado de cargas em geral, totalizando 21% do consumo total de energia elétrica. O maior consumo elétrico da safra de 2005 ficou para a destilaria e também para a moenda 6, com 24% do total. O setor que apresentou a segunda maior medição foi o de captação e tratamento de água, posto de combustível e barracão agrícola, totalizando 22% do consumo de energia elétrica total da indústria. A Usaciga apresentou um consumo no período da safra 2005 de 22314 MWh. Valor bem inferior ao da Usina Dedini, que apresentou, para a safra 2005, um consumo de 40922 MWh.

A Usina Dedini tem sua energia dividida em muito mais setores, ficando mais evidente os pontos de maior consumo de energia elétrica dentro da indústria. O ponto de consumo de energia que apresentou maior consumo foi o de preparo de caldo, consumindo cerca de 21% do consumo total da indústria. A comparação entre as indústrias não pode ser melhor, pois os dados não têm equivalência, sendo apresentados de forma muito resumida para a Usaciga.

**Tabela 9 - Consumo de energia do período da safra por setores da Usaciga**

CONSUMO DE ENERGIA POR SETORES NA USACIGA (SAFRA 2005)		
	Setor	Total (kWh)
1	Captação e trat. de água/posto/barracão agrícola	4958700,00
2	Destilaria / Moenda 6	5454570,00
3	Fabrica açúcar MAC 1250	892566,00
4	Secador de levedura	495870,00
5	Turbina açúcar	991740,00
6	Moendas/recepção/preparo	545457,00
7	Tratamento de caldo	991740,00
8	Esteira das caldeiras	495870,00
9	Caldeira 1	1304138,10
10	Caldeira 2	1304138,10
11	Cargas - Geral	4879360,80
<b>Consumo de Energia Total – Safra 2005 (kWh)</b>		<b>22.314.150,00</b>

**Tabela 10 - Consumo de energia do período da safra por setores da Dedini**

CONSUMO DE ENERGIA POR SETORES NA DEDINI (SAFRA 2005)		
	Setor	Total (kWh)
1	Fábrica de Açúcar	4.339.100,40
2	Laboratório de Açúcar	39.949,22
3	Ensaque e Armazenagem	763.030,19
4	Fábrica de Álcool	5.231.743,50
5	Laboratório de Álcool	38.412,72
6	Armaz. / Carreg. Álcool	14.160,00
7	Fábrica de Açúcar Líq. / Gludex	827.792,00
8	Laboratório de Gludex	19.974,61
9	Armaz. / Carreg. Aç. Líq. e Gludex	43.568,00
10	Pesagem	10.281,66
11	Recepção de Cana	2.334.091,12
12	Preparo da Cana	416.968,10
13	Moagem	2.583.389,34
14	Aquecimento do Caldo	338.031,90
15	Tratamento do Caldo	1.044.825,88
16	Diluição da Cal	61.460,35
17	Clarificação do Caldo	755.962,25
18	Filtração do Lodo	1.229.206,91
19	Evaporação do Caldo	8.751.953,21
20	Laboratório PCTS	35.600,00
21	Laboratório Análise Moagem	15.365,09
22	Laboratório de Águas	21.511,12
23	Laboratório de Microbiologia	18.438,10
24	Geração e Distribuição de Vapor	7.481.161,00
25	Geração e Distribuição de Energia	794.067,67
26	Captação e Distribuição de Água	946.558,79
27	Central Prod. e Distr. Ar Comprimido	946.489,32
28	Captação e Distribuição de Efluentes	1.536.508,64
29	Manutenção Mecânica e Industrial	21.150,56
30	Manutenção Elétrica e Instrumentação	25.075,82
31	Construção Civil e Carpintaria	35.954,30
32	Veículos e Máquinas	0,00
33	Conservação e Limpeza	0,00
34	Administração Industrial	12.292,07
35	Almoxarifado Industrial	16.717,21
36	Montagens Metálicas e Tubulações	0,00
37	Serviços Prestados a 3.ºs	0,00
38	Controladoria	52.560,00
39	Gastos Gerais	0,00
40	Despesas com Açúcar	948,50
41	Despesas com Álcool	5.826,50
42	Despesas com Aç. Líq. / Gludex	6.775,00
43	Auto Posto	41.140,00
44	Restaurante	52.137,00
45	Segurança Patrimonial	0,00
46	Jardinagem	0,00
47	Vaca Mecânica	5.793,00
48	Alojamento	6.248,34
<b>Consumo de Energia Total – Safra 2005 (kWh)</b>		<b>40.922.219,40</b>

#### 4.1.3 Potência Média Fornecida pelos Geradores

A potência média fornecida pelos geradores é apresentada na Tabela 11. Nas médias mensais, a Usina Usaciga apresentou uma quantidade de potência média fornecida muito inferior aos dados fornecidos pela Dedini. Para o mês de outubro a Usaciga teve uma geração média muito baixa, provavelmente em função do grande número de paradas que a indústria teve, possivelmente em função das chuvas. Entretanto, houve certo equilíbrio nas médias, mostrando que o consumo nas indústrias é bastante constante. O valor máximo médio na Usina Dedini ficou, no mês de agosto, com 8634,3 kW, apresentando um valor que significa, aproximadamente, 86% da capacidade de geração da indústria. Na Usaciga, o maior valor médio ficou para o mês de agosto, totalizando 1506 kW, cerca de 25% da capacidade instalada de geração, considerando-se somente o gerador de 6MW, o que significa um valor baixo. Isso ocorre por que a usina não tem contrato de venda de energia, deixando muito tempo o gerador ocioso.

**Tabela 11** - Potência média fornecida pelos geradores em kW

MÊS	DEDINI	USACIGA
	Potência Média Fornecida pelos Geradores (kW)	Potência Média Fornecida pelos Geradores (kW)
Abril	645,18	540,99
Maio	6775,04	1202,08
Junho	8154,83	1343,83
Julho	8335,66	1501,67
Agosto	8634,30	1506,04
Setembro	7355,81	1414,46
Outubro	7702,46	859,44
Novembro	6863,46	1294,98

#### 4.1.4 Energia Gerada e Comercializada

Nas tabelas 12 e 13, apresenta-se a quantidade de energia gerada, comprada e vendida para a concessionária.

Na Usaciga não houve venda de energia, pois a indústria não tem contrato para comercializar essa energia. Já a Dedini, exportou 3.317 MWh no período da safra 2005. Isso significa uma grande quantidade de energia, cerca de 8% da energia total consumida na indústria. A energia comprada, para o período em estudo, na Usaciga foi de 230 MWh e 620 MWh para a Dedini. Provavelmente, essa quantidade de energia ficou alta, pois nesse mês a indústria esteve muito tempo parada.

Mesmo as indústrias tendo grande reserva de bagaço para a queima no início do processo, é necessário utilizar um pouco da energia da concessionária para a partida das caldeiras.

**Tabela 12** - Energia gerada e comercializada na safra 2005 da Usaciga

ENERGIA GERADA	
WEG 6MW	22083980,00
<b>Total energia gerada</b>	<b>22.083.980,00</b>
ENERGIA COMPRADA DA COPEL	
Consumo na Ponta (kWh)	18391,00
Consumo Fora Ponta (kWh)	211779,00
<b>Total energia comprada (kWh)</b>	<b>230.170,00</b>
ENERGIA VENDIDA PARA COPEL	
<b>Energia Vendida (kWh)</b>	<b>0</b>

**Tabela 13** - Energia gerada e comercializada na safra 2005 da Dedini

ENERGIA GERADA	
Gerador	Total (kWh)
Siemens 3MW	14.572.320,00
Toshiba 3MW	12.456.634,40
Toshiba 4MW	16.588.800,00
<b>Total de energia gerada</b>	<b>43.617.754,40</b>
ENERGIA COMPRADA DA ELEKTRO	
Consumo na Ponta (kWh)	46854,00
Consumo Fora Ponta (kWh)	573963,00
<b>Total de energia comprada (kWh)</b>	<b>620.817,00</b>
ENERGIA VENDIDA PARA ELEKTRO	
<b>Energia vendida (kWh)</b>	<b>3.316.352,00</b>

#### 4.1.5 Energia Produzida pelos Geradores

A Tabela 14 apresenta a quantidade de energia produzida em kWh pelos geradores de cada indústria.

Verifica-se uma linearidade na produção de energia, isso ocorre em virtude do consumo também apresentar essa mesma característica..

**Tabela 14** - Energia produzida pelos geradores

MÊS	DEDINI	USACIGA
	Energia Produzida pelos Geradores	Energia Produzida pelo Gerador
Abril	1407665,60	1180340,00
Maio	5420032,80	2622725,00
Junho	6313418,00	2932001,00
Julho	6453412,00	3276360,00
Agosto	6684620,00	3285909,00
Setembro	5884648,00	3086084,00
Outubro	5963194,00	1875143,00
Novembro	5490764,00	2825418,00

#### 4.1.6 Energia Disponível para Venda

Esse indicador só pode ser apresentado para a Usina Dedini, pois a Usaciga não tem exportação de energia. Observa-se que os valores de energia comercializada pela Dedini apresentaram uma linearidade, o que a torna bastante interessante para o setor a comercialização, pois é possível prever a quantidade de energia disponível para venda e manter essa quantidade disponível, conforme mostrado na tabela 15. Como a Usaciga não tem comercialização de energia, não tem também valores para que este estudo seja realizado.

**Tabela 15** - Energia disponível para venda em kWh

MÊS	DEDINI	USACIGA
	Energia Disponível para Venda (kWh)	Energia Disponível para Venda (kWh)
Abril	64714,00	0
Maio	392688,00	0
Junho	443096,00	0
Julho	532160,00	0
Agosto	532160,00	0
Setembro	441.500,00	0
Outubro	449.300,00	0
Novembro	460.734,00	0

#### 4.1.7 Potência Média Exportada em kW

A potência média exportada é fornecida em kW. Foi possível encontrar esse dado dividindo-se a energia gerada pela quantidade de horas do período. A demanda ficou com um valor relativamente médio, sendo o mês de julho e agosto com os maiores valores de demanda. Isso mostra que, no caso da Usina Usaciga, com um gerador de 2,5MW parado, poderia, caso houvesse um contrato, tornar economicamente interessante a venda de energia para diversificar o ramo de

atividade e também agregar renda para a indústria, pois fica evidente que mesmo com pequena potência instalada, é possível comercializar energia elétrica.

**Tabela 16** - Potência média exportada para concessionária

MÊS	DEDINI	USACIGA
	Potência Média Exportada (kW)	Potência Média Exportada (kW)
Abril	245,13	0
Mai	1487,45	0
Junho	1678,39	0
Julho	2015,76	0
Agosto	2015,76	0
Setembro	1672,35	0
Outubro	1701,89	0
Novembro	1745,20	0

#### 4.1.8 Consumo Específico

O consumo específico apresentado é a razão entre o consumo elétrico em kWh pela quantidade de cana moída em toneladas. Esse indicador é muito interessante, pois, com base nele é possível analisar mensalmente o rendimento elétrico pela produtividade da indústria. A Usina Dedini apresentou um valor bastante constante, com um mínimo de 16,74 kWh/t e um máximo de 20,24 kWh/t. Já na Usaciga, ocorreu um mínimo no mês de maio de 12,54 kWh/t e um máximo para o mês de setembro, com um indicador de 25,72 kWh/t. Na Dedini os indicadores constantes mostraram uma safra mais uniforme, com menos paradas. Já para a Usaciga, o indicador apresentou um valor mínimo para o mês de maior quantidade de cana moída. Com isso, aproveitaram-se melhor os equipamentos, provavelmente com tempos mínimos de equipamentos funcionando sem material sendo processado. Para o mês de novembro houve um consumo de energia em kWh por tonelada de cana moída muito grande. Provavelmente, foi o mês em que ocorreu um maior tempo de máquinas

trabalhando ociosas, possivelmente devido a problemas com chuvas ou equipamentos com problemas na indústria.

**Tabela 17** - Consumo específico em kWh por tonelada de cana moída

MÊS	DEDINI	USACIGA
	Consumo específico (kWh/t)	Consumo específico (kWh/t)
Abril	19,75	18,04
Maio	17,64	12,52
Junho	16,74	15,13
Julho	16,77	17,11
Agosto	16,78	18,43
Setembro	18,31	25,72
Outubro	18,91	14,08
Novembro	20,24	16,61

#### 4.1.9 Geração Média

A geração média é um dado calculado pela soma da energia gerada por todos os geradores da indústria dividida pela quantidade de horas de moagem do período considerado. Esse indicador ficou bem maior que o indicador potência média fornecida pelos geradores, que apresentou números considerando o tempo total do período. Para a geração média, consideraram-se somente as horas de moagem.

Na Usina Dedini os resultados apresentaram-se mais equilibrados, mostrando que a produção é mais constante. Observou-se também uma utilização bastante racional dos geradores, pois eles estão sendo bem utilizados, porquanto os indicadores são bastante altos. Considerando-se uma potência de 10MW instalada, tem-se uma média de 7,85MW para a safra toda, indicando um percentual de 78% de utilização dos geradores.

A Usaciga obteve valores altos também, no entanto, houve uma variação grande, por exemplo, no mês de outubro a geração média ficou em 2,52MW. No entanto, a média para a safra ficou em 3,95%, indicando um percentual de 65%

da potência total instalada. Esse valor mais baixo pode ser explicado, pois a Usaciga, não exporta energia da indústria, portanto não existe a possibilidade de melhor utilização dos grupos, ocasionando uma potência ociosa para os 6MW instalados.

**Tabela 18** - Geração média em MW

MÊS	DEDINI	USACIGA
	Geração Média (MW)	Geração Média (MW)
Abril	5,33	4,47
Maio	7,53	3,64
Junho	8,49	3,94
Julho	8,67	4,40
Agosto	8,98	4,42
Setembro	8,17	4,29
Outubro	8,02	2,52
Novembro	7,63	3,92

#### 4.1.10 Fator de Utilização

O fator de utilização é a razão da geração média dividida pela potência instalada de geradores.

A Usina Usaciga apresentou uma particularidade, tendo uma potência de geração instalada para duas situações, pois o gerador de 2,5MW não está operando normalmente, tendo então, a Usina, um gerador de 6MW operando normalmente e um gerador de 2,5MW que não está operacional.

Para a Usina Dediní, o fator de utilização teve valores bastante elevados. Isso significa que os geradores estão sendo melhor aproveitados pela indústria. Obteve-se um valor mínimo para o mês de abril, no entanto, como a safra iniciou nesse mês, considera-se, então, o pior valor para o mês de maio, que apresentou 75% de utilização dos geradores. No mês de agosto, houve a maior taxa do indicador: 90%. Isso mostra que os geradores estão sendo bem aproveitados.

Na Usina Usaciga, os valores encontrados ficaram relativamente baixos, considerando-se a potência instalada de geradores como sendo 6MW, no entanto, obteve valores menores ainda que os da usina Dedini. Isso ocorre, pois a Usaciga não exporta energia, tendo então, muito tempo da geração onerada por problemas no processo. Obteve-se um máximo para o mês de abril: 75%, que será desprezado, ficando então o mês de agosto com o maior indicador: 74%, e o pior rendimento para o mês de outubro, com 42% de fator de utilização. Para o mês de outubro, uma taxa tão baixa pode ser explicada com o excesso de paradas. Aplicando-se o fator de utilização para os 8,5MW de potência instalada, tem-se valores ainda mais baixos, chegando ao percentual de 30% para o mês de outubro. Mais uma vez fica evidenciada a necessidade da Usaciga de exportar energia, pois pelo fator de utilização da usina, verificou-se que o gerador se encontra ocioso em boa parte do período de funcionamento.

**Tabela 19** - Fator de utilização

MÊS	DEDINI		USACIGA	
	Fator de Utilização (10MW)	Fator de Utilização (6MW)	Fator de Utilização (6MW)	Fator de Utilização (8,5MW)
Abril	0,53	0,75		0,53
Maio	0,75	0,61		0,43
Junho	0,85	0,66		0,46
Julho	0,87	0,73		0,52
Agosto	0,90	0,74		0,52
Setembro	0,82	0,71		0,50
Outubro	0,80	0,42		0,30
Novembro	0,76	0,65		0,46

## 1.12 INDICADORES EXERGÉTICOS

Para o desenvolvimento e comparação dos indicadores exergéticos das indústrias estudadas, foram levantados os dados apresentados nas tabelas 20 e 21.

Na Usaciga a pressão de vapor é única, pois a usina tem somente uma linha de vapor para todos os equipamentos. A temperatura do vapor vivo também se encontra igual para todos os equipamentos, pois todos os equipamentos foram considerados nas mesmas condições. O vapor de escape de cada equipamento também é jogado numa única linha de vapor. Também chamado de vapor de baixa, configurado em: 1,7 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de 170°C. A rotação varia de equipamento para equipamento, dependendo da finalidade e também do fabricante. A potência considerada fornecida pela usina foi a potência real do equipamento, fornecida pelo fabricante e pelo gerente do departamento de mecânica. O consumo de vapor é um dado que não é medido na Usaciga, sendo então, fornecido pelo fabricante dos equipamentos e pelo gerente industrial, o qual forneceu os valores aproximados da indústria. No entanto, o consumo de vapor total, estando todos os equipamentos da indústria em pleno funcionamento, fica em 160 t/h. Foi nos passado pelo operador da sala de maquinas que as duas caldeiras juntas fornecem 140 t/h em plena carga.

Para a Usina Dedini, na qual existem 4 caldeiras instaladas, os dados fornecidos pelos departamentos técnicos e são apresentados na Tabela 21. A pressão de vapor vivo tem variação, pois existem duas linhas de vapor. Já a temperatura considerada, por existirem termômetros instalados em cada equipamento da usina, proporcionou a oportunidade de se ter dados reais em cada ponto do estudo. Os dados da pressão de escape e da temperatura do vapor de saída são dados que não são medidos, devendo, então, serem considerados os valores característicos do sistema. A rotação, potência e consumo de vapor foram dados fornecidos pelo departamento técnico e são reais, calculados e apresentados pelos fabricantes de cada equipamento.

**Tabela 20** - Dados fornecidos dos equipamentos do processo da Usaciga

TURBINA	P vapor vivo	t vapor vivo	P vapor escape	t vapor escape	Rotação	W	Consumo de Vapor
	kgf/ cm <sup>2</sup>	°C	kgf/ cm <sup>2</sup>	°C			
Faca niveladora	21	320	1,7	170	5600	891	10,49

Faca picadora	21	320	1,7	170	6000	668	7,87
Desfibrador	21	320	1,7	170	5800	1560	22,96
1° Terno	21	320	1,7	170	5200	660	7,77
2° e 3° Ternos	21	320	1,7	170	5200	1320	15,54
4° e 5° Ternos	21	320	1,7	170	5200	1320	15,54
Turbobomba 1	21	320	1,7	170	3500	350	5,20
Exaustor 1	21	320	1,7	170	4300	400	4,71
Exaustor 2	21	320	1,7	170	4300	300	3,53
Gerador 1 WEG	21	320	1,7	170	7500	5706	67,20

**Tabela 21** - Dados fornecidos dos equipamentos do processo da Dedini

TURBINA	P vapor vivo	t vapor vivo	P vapor escape	t vap escape	Rotação	W	Consumo de Vapor
	kgf/ cm <sup>2</sup>	°C	kgf/ cm <sup>2</sup>	°C	RPM	HP	t/h
Faca oscilante	30	330	1,7	170	4200	1720	15,5
Faca fixa	20	300	1,7	170	5000	830	9,70
Desfibrador	30	330	1,7	170	4300	2860	25,90
1° e 2° Ternos	20	300	1,7	170	3460	1910	21,90
3° e 4° Ternos	20	300	1,7	170	3160	1910	30,60
5° e 6° Ternos	20	300	1,7	170	3156	1910	25,60
Turbobomba 1	30	330	1,7	170	3500	270	4,50
Turbobomba 2	30	330	1,7	170	3500	185	3,10
Turbobomba 3	20	300	1,7	170	3500	275	5,60
Ventilador	30	330	1,7	170	7000	251	3,30
Gerador 1 Siemens	30	330	1,7	170	7000	3000	36,90
Gerador 2 Toshiba 3	30	330	1,7	170	4000	4000	45,80
Gerador 3 Toshiba 4	20	300	1,7	170	9000	3000	41,80

#### 4.1.11 Rendimento da 1<sup>o</sup> Lei da Termodinâmica, Eficiência Racional e Eficiência Racional com Perdas

O rendimento da primeira lei da termodinâmica é apresentado nas tabelas 22 e 23. Esse rendimento foi observado analisando-se cada equipamento de cada indústria. Os rendimentos apresentados na Usina Dedini ficaram com um valor relativamente baixo em relação aos equipamentos da Usaciga. Isso se deve, essencialmente ao consumo de vapor apresentado pela Usina Dedini ser maior para cada equipamento. Provavelmente, isso ocorre por serem equipamentos com eficiência menor do que os da Usina Usaciga.

A eficiência racional das usinas apresentou resultados bastante equilibrados, pois a equação desse indicador utiliza a variação da entalpia real, que utiliza a pressão e a temperatura de cada ponto dos equipamentos, que por ser em uma linha única de vapor, apresenta valores muito próximos de eficiência racional de um equipamento para o outro, da mesma forma que apresenta indicadores parecidos de uma usina para a outra.

Já a eficiência racional com perdas utiliza a potência de cada equipamento na equação para encontrar o indicador. Como as potências utilizadas são reais, fornecidas pelos fabricantes, os resultados apresentados ficaram com índices, para alguns equipamentos, superiores à eficiência racional teórica, que utiliza o salto térmico real para encontrar o indicador. No entanto, observou-se que em alguns equipamentos esse indicador ficou muito baixo, devendo ser feito um estudo para verificar a possibilidade de troca ou repotencialização da turbina.

**Tabela 22** - Rendimento da 1° lei, eficiência racional e eficiência racional com perdas da Usina Dedini

EQUIPAMENTO	DEDINI		
	Rendimento 1° Lei Termodinâmica	Eficiência Racional	Eficiência Racional c/ perdas
	$\eta$	$\Psi$	$\Psi_{\text{perdas}}$
Faca oscilante	0,5235	0,5232	0,6064
Faca fixa	0,4726	0,5106	0,5507
Desfibrador	0,5210	0,5232	0,6035
1° e 2° Ternos	0,4817	0,5106	0,5613
3° e 4° Ternos	0,3448	0,5106	0,4017
5° e 6° Ternos	0,4121	0,5106	0,4802
Turbobomba 1	0,2831	0,5232	0,3279
Turbobomba 2	0,2816	0,5232	0,3261
Turbobomba 3	0,2713	0,5106	0,3160
Ventilador	0,3589	0,5232	0,4157
Gerador 1 Siemens	0,5144	0,5232	0,5958
Gerador 2 Toshiba 3	0,5526	0,5232	0,6400
Gerador 3 Toshiba 4	0,5316	0,5106	0,6194

**Tabela 23** - Rendimento da 1° lei, eficiência racional e eficiência racional com perdas da Usaciga

EQUIPAMENTOS	USACIGA		
	Rendimento 1° lei termodinâmica	Eficiência racional	Eficiência Racional c/ perdas
	$\eta$	$\Psi$	$\Psi_{\text{perdas}}$
Faca niveladora	0,8029	0,5761	0,5132
Faca picadora	0,8023	0,5761	0,5128
Desfibrador	0,6422	0,5761	0,4105
1° Terno	0,8029	0,5761	0,5132
2° e 3° Ternos	0,8029	0,5761	0,5132
4° e 5° ternos	0,8029	0,5761	0,5132
Turbobomba 1	0,6362	0,5761	0,4066
Exaustor 1	0,8028	0,5761	0,5131
Exaustor 2	0,8033	0,5761	0,5135
Gerador 1 WEG	0,9431	0,5761	0,6028

#### 4.1.12 Eficiências das Caldeiras

A eficiência da primeira lei é menor que a da segunda lei, isso é verificado analisando-se as equações. A definição da eficiência de primeira lei é como o calor útil absorvido pelo vapor em relação ao calor desprendido pelo combustível. Na segunda lei o indicador é a relação entre a potência teórica máxima, que poderia ser extraída do vapor que sai da caldeira, e a exergia do bagaço. Na Usina Dedini o valor da exergia do bagaço calculada foi de 9670,468 kJ/kg de bagaço. Para a Usaciga o valor da exergia do bagaço calculado foi de 9519,268 kJ/kg de bagaço. A exergia calculada ficou com um valor menor na Usaciga, provavelmente, porque o bagaço que sai do último terno tem em média 50% de umidade, um valor maior que na Usina Dedini, que em média é 49,2% de umidade.

Observa-se nas tabelas 24 e 25 que a eficiência da segunda lei ficou em média menor para a Usina Usaciga, mostrando que as caldeiras desta usina necessitam de melhorias. Como esse fato já é conhecido do departamento de engenharia da Usina, a indústria já adquiriu uma nova caldeira, com pressão e capacidade de produção de vapor bem maior que as caldeiras existentes. Essa eficiência põe em evidência as irreversibilidades e perdas que ocorrem desde a liberação do calor pelo combustível que é queimado, um processo claramente irreversível, até que seja absorvido pela água. Esse indicador evidencia alguns pontos em que se podem fazer melhorias no sistema.

Por meio da equação de eficiência da primeira lei, obtiveram-se os valores mais altos dessa eficiência, no entanto, o valor resultante só considerou as exergias envolvidas no processo de saída e entrada, calor útil e a exergia do bagaço. Da mesma maneira, obteve-se um maior rendimento para a Usina Dedini.

**Tabela 24** Eficiência racional da primeira lei e da segunda lei da termodinâmica para Usina Dedini

EQUIPAMENTOS	DEDINI	
	Eficiência da 2ª Lei	Eficiência da 1ª Lei
	$\Psi$	$\Psi_c$
Caldeira I	0,2355	0,7384
Caldeira II	0,2360	0,7806
Caldeira III	0,2297	0,7592
Caldeira IV	0,2080	0,7087

**Tabela 25** - Eficiência racional da primeira lei e da segunda lei da termodinâmica para Usaciga

EQUIPAMENTOS	USACIGA	
	Eficiência da 2ª lei	Eficiência da 1ª lei
	$\Psi$	$\Psi_c$
Caldeira I	0,2218	0,7271
Caldeira II	0,2224	0,7285

#### 4.1.13 Critérios de Desenvolvimento Baseados na Primeira Lei da Termodinâmica

Nesses indicadores, compararam-se os resultados encontrados com os resultados apresentados por DEL CAMPOS (1998).

##### 4.1.13.1 Fator de utilização de energia - FUE

O fator de utilização de energia é considerado alto e equilibrado entre as usinas. Isso se deve basicamente ao tipo de combustível utilizado nas caldeiras,

que é substancialmente o mesmo, bagaço de cana em base úmida. As variações de indicadores seriam relevantes se fossem consideradas outras fontes de combustível aplicadas ao sistema. Nas usinas pesquisadas a variação encontrou-se dentro das expectativas. Encontra-se o FUE fazendo-se a soma das potências dos equipamentos com o calor útil do sistema de cada uma das usinas. Faz-se a divisão pelo produto do PCI (Poder Calorífico Inferior) pelo fluxo total de bagaço que é utilizado pelas caldeiras. O PCI foi calculado pela equação fornecida pelo IPT (1990) para a base úmida. Obtiveram-se valores de PCI para Usina Dedini de 7684,951 kJ/kg, para a Usaciga de 7525,467 kJ/kg e para a Usina Vale do Rosário ficou em 7655 kJ/kg (DEL CAMPOS, 1988).

#### 4.1.13.2 Eficiência de geração de potência para o sistema - $E = 1/FCP$

Esse indicativo é encontrado com o inverso de FCP, que é a relação do combustível para o processo dividido pela potência produzida. No caso de E, os valores ficaram bastante diferentes, isso por que a Usina Usaciga tem carência de vapor em seu processo, fazendo então com que a potência produzida pela quantidade de combustível utilizado ficasse maior que nas outras duas usinas analisadas. No entanto, mesmo assim os valores ficaram relativamente baixos, mostrando-se que os sistemas não são eficientes, pois não são exclusivos para a cogeração, são utilizados também no processo industrial, o que não foi considerado neste estudo.

#### 4.1.13.3 Razão de poupança de combustível - RPEC

O indicador RPEC apresentou a Usina Vale do Rosário como a que tem a maior razão de poupança de combustível entre as indústrias analisadas. A Usina Usaciga apresentou 3,14% de economia de combustível no sistema de cogeração. A que apresentou a menor taxa foi a Usina Dedini, tendo 2,55% de economia de

combustível. Mesmo assim, existe uma economia, tornando vantajosa a utilização de cogeração para o processo.

#### 4.1.13.4 Combustível destinado à produção de potência - FCP

O indicador FCP relaciona a Usina Usaciga como a que apresentou melhores resultados. Isso se deve ao fato, já citado anteriormente, da Usina estar trabalhando com as caldeiras produzindo ao máximo para a geração de vapor, para atender à demanda do processo. Já a Usina Vale do Rosário apresentou maiores indicadores, pois provavelmente tem vapor sobrando no sistema.

**Tabela 26** Critérios de desempenho baseados na primeira lei da termodinâmica

USINAS	FUE	$\frac{E}{1/FCP}$	RPEC	FCP
Usaciga	0,73	0,73	0,0314	1,36
Dedini	0,74	0,67	0,0255	1,50
Vale do Rosário	0,75	0,57	0,0460	1,76

## CONCLUSÃO

De acordo com os dados obtidos, nas condições analisadas pela pesquisa nas Usinas estudadas, foi possível concluir que:

- Através dos indicadores estudados conclui-se que a Usina Usaciga tem potência de geração instalada maior que suas necessidades, tendo combustível para produção de vapor excedente que pode ser colocado em operação com a aquisição de uma nova caldeira e, dessa forma aumentar a geração e fazer um contrato de venda de energia com a concessionária que atende à região. A Usina Dedini apresenta contrato de venda de energia com a Elektro, no entanto, foi possível observar que existe possibilidade de exportar mais energia do que a atual.
- O indicador FCP (1,36) mostrou que a Usina Usaciga apresenta a menor taxa de combustível destinado à produção de potência, isso significa que é a indústria que apresenta a melhor taxa de utilização do bagaço. Também foi observado na Usaciga falta de vapor, pois a potência instalada de equipamentos que demandam vapor é maior que a quantidade máxima de geração térmica.
- O indicador de eficiência de geração de potência (0,73) mostra claramente que a Usaciga é a indústria que apresenta o maior valor nesse quesito. A Usina Dedini apresentou um indicador de 0,67, considerado apropriado, porém inferior ao da Usaciga.
- Na Usina Usaciga o consumo específico foi, em média, 17,21 kWh/t para o período estudado. Isso mostra que a indústria teve um melhor coeficiente médio entre as indústrias estudadas, no entanto, apresentou o valor mais elevado dentro do período: 25,72 kWh/t,

para o mês de setembro. Para a Usina Dedini a média do período ficou em 18,14 kWh/t.

- O fator de utilização foi avaliado para a Usina Usaciga considerando-se duas situações: utilizando-se somente o gerador de 6MW, onde os resultados apresentaram 66% de taxa de utilização e outra se utilizando 8,5 MW de potência instalada de geração, obtendo-se 46%. Os indicadores mostram que a indústria tem uma baixa taxa de utilização dos geradores. A usina Dedini apresentou um fator de utilização de 79%, valor considerado bom, mostrando uma utilização racional dos geradores.
- O indicador de fator de utilização de energia – FUE apresentou resultados muito semelhantes para as indústrias estudadas e também teve um indicador muito próximo aos encontrados na literatura. O valor do FUE ficou em 0,73 para a Usaciga e em 0,74. para a Usina Dedini
- As eficiências racionais de primeira e segunda leis para as caldeiras apresentaram valores muito semelhantes para ambas as indústrias. Obteve-se em média 72,78% de rendimento para a primeira lei na Usaciga e 74,66% para a Dedini, mostrando um maior rendimento na Dedini para a primeira lei. A eficiência da segunda lei apresentou 22,21% de média para as duas caldeiras da Usaciga e 22,73% para a Dedini.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. A.; SCHAEFFER, R.; ROVERE, E. L. La. The potential for electricity conservation and peak load reduction in the residential sector of Brazil. **Energy**, England. v. 26, n. 2, p.413-429, 2001.

COSTA, M. H. A. de; BALESTIERI, J. A. P. Viabilidade de sistemas de cogeração em indústria química. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING - ENCIT, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC, 1998. p. 358-363.

BINI, A. **Análise econômica da produção industrial e do consumo de energia elétrica em uma Usina Sucro-Alcooleira**. Botucatu, 1993 113 f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários da Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus da UNESP de Botucatu, Universidade Estadual Paulista – UNESP.

BINI, A.; SOUZA, L. G. Viabilidade econômica da substituição de equipamento gerador de energia elétrica derivada da biomassa, em indústria de processamento de cana. **Energia na Agroindústria**, Botucatu. v. 12, n. 4, p. 45-55, 1997.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S/A. - ELETROBRÁS. **Plano decenal de expansão 1998 - 2008**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1998. 344 p.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S/A. - ELETROBRÁS. **Plano nacional de energia elétrica 1993/2015** – Plano 2015. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1994. v. 4.

DEL CAMPOS, E. R. B., et al. Análise energética e exergetica do sistema de cogeração da usina Vale do Rosário. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING - ENCIT, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC, 1998. p. 307-312.

ERBER, P. **Geração de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro**. Disponível em: <http://www.portalgd.com.br/zpublisher/materias/default.asp?id=16198>. Acesso em: 11 de abril de 2005.

FACCENDA, O.; SOUZA, L. G. A cogeração como alternativa no equacionamento da demanda de energia elétrica. **Energia na Agroindústria**, Botucatu. v. 12, n. 3, p .33-45. 1997.

FERREIRA, L. F. S. A.; TURCO, J. E. P. Avaliação do consumo e do custo de energia elétrica em galpão para criação de frangos de corte, em dois ciclos de criação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENERGIA NO MEIO RURAL – AGRENER, 3, 2000, Campinas. **Anais...** Campinas – SP: UNICAMP, 2000.

GALITSKY, C.; WORREL, E.; RUTH, M. **Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the corn wet milling industry**. An Energy star guide for energy and plant managers. Berkeley: University of California LBNL-52307, 2003. 90 p.

GOTTSCHALK, C. M., **Industrial energy conservation..** Paris, France: CMG International Energy Consultancy, 1999.

GUARDABASSI, P. M. **Biomassa como fonte de energia, conversão e utilização**. São Paulo, 2002. 98 f. Tese - Programa Interunidades de Pós-

Graduação em Energia, Instituto de Eletrotécnica e Energia. Universidade de São Paulo.

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA - IDAE. **Indicadores energéticos**. Sector: Fabricación de Azúcar. Madrid, Espanha: IDAE, 1997. 15p.

JAGUARIBE, E. F., LOBO, P. C., SOUZA, W. L., ROCHA, R. M., NASCIMENTO, E. T. **Vender bagaço ou comercializar energia gerada pela cogeração**. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING – ENCIT, 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABCM, 2004. p. 01-16.

JANNUZZI, G. M., SWISHER, J. N. P. **Planejamento integrado de recursos energéticos**: Meio ambiente, conservação de energia e fontes renováveis. Campinas: Autores Associados, 1997, 246 p.

KALICASLAN, I; SARAC, H. I.; OZDEMIR, E.; ERMIS, K. Sugar cane as an alternative energy source for Turkey. **Energy Conversion & Management**, Turkey, v. 40, 1-11, 1999.

KOTAS, T. J. The *Exergy Method of Termal Plant Análisis*. Kriger Publishing Company, Malabar, Florida, 1995.

LEON, L. Z. P. de. **Ahorro de energía en a Agroindustria Azucarera Cañera**, La energía en México: Replanteamiento de retos y oportunidades. p. 77-87. 1999.

LIMONI FILHO, G.; VENTURINI FILHO, W. G. Avaliação energética da substituição do arroz por xarope de maltose em cervejaria. **Energia na Agricultura**, Botucatu. v. 13, n. 4, p. 13-22, 1999.

LORA, E. E. S. **Conservação e racionalização de energia elétrica do meio rural**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16., 1997, Campina Grande - PB. **Anais...**: Campina Grande – PB: UFPB, 1997. p. 97-129.

LORA, E. E. S.; TEIXEIRA F. N. Energia e Meio Ambiente.. In: -----.  
**Conservação de energia**. Itajubá: Ed. da EFEI, 2001.

MACEDO, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. 2001. Relatório técnico.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 18 de março de 2005.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME .**Balanco energético nacional 2004**. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/site/menu/select\\_main\\_menu\\_item.do?channelId=1432&pageId=4060](http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=4060). Acesso em : 15 de 03 de 2005.

PELLEGRINI, M. C., OLIVEIRA, H. R., MORSELLO, P. M., LOUREIRO, R., SANTOS, R. F., 1999, Avaliação de alternativas energéticas – cogeração: bagaço de cana x gás natural, trabalho apresentado na disciplina Recursos e oferta de energia, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – IEE/USP, Agosto.

PELLEGRINI, M. C.; RAMOS, D. S.; VIEIRA, S. A cogeração no setor sucroalcooleiro – Usinas de médio porte. Seminário Nacional de Transmissão de Energia Elétrica, 18, 2002, Foz do Iguaçu – PR. **Anais...** Foz do Iguaçu – PR: 2002. p. 01-10.

POGI, R. C.; PIEDADE JR., C., Energia elétrica em atividades ligadas à avicultura. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 6, n. 2, p. 43-50, 1991.

PORTAL GD. **Cogeração teórico.** Disponível em:  
<http://www.portalgd.com.br/cogeraçao teorico/publisher/default.asp?id=17845>.  
Acesso em: 12 de março 2005a.

PORTAL GD. **Cogeração.** Disponível em:  
<http://www.portalgd.com.br/cogeração/materias/default.asp?id=14576>. Acesso em: 21 de março 2005b.

PRINDLE, W. et al. Energy efficiency's next generation: innovation at the state level. In: **American Council for an Energy-Efficient Economy**, Washington: 2003, 81 p.

SANTA ELISA. **Fluxo.** Disponível em:  
<http://www.santaelisa.com.br/port/default.asp>. Acesso em 15 de maio de 2006.

SERAPHIM, O. J.; TEIXEIRA, N. M. **Conservação e racionalização de energia elétrica do meio rural.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16., Campina Grande –PB. **Anais...** Campina Grande - PB: UFPB, 1997. p. 31-33.

SHIKIDA, P. F. A. **A dinâmica tecnológica da agroindústria canavieira do Paraná.** Cascavel: Edunioeste, 2001.

SOUZA, M. E. P.; NEBRA, S. A.; GALLO, W. I. R. Análise exergetica comparativa de sistemas de recuperação de energia dos gases efluentes de caldeiras a bagaço de cana, Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences - ENCIT, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC, 1998. p. 347-352.

TOLMASQUIM, M. T. et al. **Tendências da eficiência elétrica no Brasil**, Indicadores de Eficiência energética. Rio de Janeiro: Sirius Sistemas Digitais Ltda., 1998.

TORRES, E. A., **Análise exergética**. Salvador: Universidade Federal da Bahia (UFBA), Escola Politécnica, DEQ – LEN, 2001. 31 p. Relatório Técnico.

VIEIRA, S.; OLIVEIRA JR., S. **Estudo de sistemas de cogeração e geração termoeleétrica através da análise termo-econômica**. In: Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences - ENCIT, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC, 1998. p. 381-386.

WORREL, E.; DE BEER, J. G.; FAAIJ, A. P. C.; BLOCK, K., Potential energy savings in the production route for plastics. **Energy**, England. v. 35, n. 12, p. 1073-1085, 1994.

WORREL, E.; MARTIN, N.; PRICE, L., Potentials for energy efficiency improvement in the us cements industry. **Energy**, England. v. 25, p. 1189-1214, 2000.

WORREL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N., Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the us iron and steel industry. **Energy**, England. v. 26, p. 513-536, 2001.

ZANIN, A. **Consumo e Potencial de conservação de energia elétrica de uma agroindústria de abate de frangos**. Cascavel, 2002. 95 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

**ANEXO**

**ANEXO A – FLUXO ESQUEMÁTICO PARA FABRICAÇÃO DE  
PRODUTOS DERIVADOS DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Fonte: SANTA ELISA (2006).