

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL**  
**SUCROENERGÉTICA – MTA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA PALHA E DO BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**TIAGO RODRIGO DE SOUZA**

**Piracicaba**

**2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL**  
**SUCROENERGÉTICA – MTA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA PALHA E DO BAGAÇO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

**TIAGO RODRIGO DE SOUZA**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão de Produção Industrial Sucrenergética – MTA.

Aluno: Tiago Rodrigo de Souza

Orientador: Profa. Dra. Marta Cristina Marjotta-Maistro

**PIRACICABA**

**2012**

*Dedico a todas as pessoas neste mundo,  
que neste momento estão passando necessidades,  
tentando se proteger de pessoas de má índole.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha noiva Kelly, que me compreende e apoia em tudo que podemos trazer de benefícios para nosso futuro.

Aos meus pais Antônia Cicolin de Souza e Carlos Antônio de Souza, que me orienta em todas as coisas já vivenciadas e no qual me apoiaram sempre nos momentos difíceis.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1:</b> Introdução .....	14
<b>Capítulo 2:</b> A cana-de-açúcar como matéria-prima .....	16
2.1. Caracterização do Setor Sucroalcooleiro Paulista.....	17
2.2. Tendências Tecnológicas na produção de bioenergética.....	19
2.3. A Usina Diversificada .....	20
<b>Capítulo 3:</b> Características e usos do Bagaço .....	22
3.1. Composição química .....	22
3.2. Desmiolamento do bagaço .....	24
3.3. Armazenamento do bagaço.....	25
3.4. Utilização do bagaço .....	25
3.4.1. Geração de energia elétrica.....	26
3.4.2. Obtenção de etanol lignocelulósico.....	32
3.4.3. Outros derivados do bagaço.....	38
3.5. Impactos ambientais na co-geração com bagaço de cana.....	39
3.6. Aspectos econômicos .....	41
<b>Capítulo 4:</b> Características e usos da Palha .....	44
4.1. Composição da palha.....	44
4.2. Utilização da palha .....	45
<b>Capítulo 5:</b> Projeto eficiente de cogeração – o caso da UTE Pioneiros .....	47
5.1. Linha de transmissão de 138 kV .....	47
5.2. Subestação 13,8/138 kV da UTE .....	48
5.3. Turbogeneradores .....	48

5.4. Caldeiras .....	50
5.5. Eletrificação da moenda .....	50
5.6. Distribuição interna e energia – circuito de 13,8 kV.....	51
5.7. Consumo de energia da UTE .....	52
<b>Capítulo 6: Conclusão .....</b>	<b>54</b>
Referências .....	57
Anexos .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Ranking de Geração de Bioeletricidade – São Paulo – dezembro 2012.....	19
Tabela 2	Composição média do bagaço de cana-de-açúcar. ....	23
Tabela 3	Bagaço em excesso e energia elétrica marginal para diferentes exigências de vapor no processo e duas condições de geração. ....	30
Tabela 4	Geração de eletricidade marginal com turbinas de extração-condensação, para diferentes condições de vapor. ....	30
Tabela 5	Hidrólise Ácida e Enzimática de Biomassa Lignocelulósica para Produção de Etanol. ....	37
Tabela 6	Características de Turbogeneradores. ....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Composição química aproximada do bagaço integral, fração fibra e medula para diferentes regiões geográficas em percentagem. ....	24
Quadro 2	Bagaço em excesso para diferentes combinações de eficiência de caldeira e consumo de vapor no processo. ....	28

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Crescimento da moagem de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo.....	18
Gráfico 2	Perfil de consumo por setores .....	53

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
COGEN-SP	Associao Paulista de Cogerao de Energia
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
FAPESP	Fundao de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo
ha	Hectare
KW.h/t	KiloWatt Hora por Tonelada
LI	Licncia de Instalao
LO	Licncia de Operao
LP	Licncia Prévia
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	Megawatt
MW/h	Megawatt por Hora
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Programa de Acelerao do Crescimento
PROINFA	Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica

SMA	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
TC	Tonelada de Cana
UNICA	União da Indústria da Cana-de-açúcar
UTE	Unidade Termelétrica

## RESUMO

Uma das preocupações do mundo atual é com o suprimento de energia nas próximas décadas, uma vez que a principal fonte de energia utilizada hoje é o petróleo, e por se tratar de combustível fóssil não é renovável. Assim, este trabalho tem por objetivo geral informar as tecnologias de utilizações, em estudo e em prática, dos já conhecidos derivados da cana-de-açúcar, para obtenção de energias sustentáveis. Os objetivos específicos se voltam para o enfoque na co-geração de energia elétrica e obtenção de bioetanol com o bagaço e com a palha da cana-de-açúcar.

O enfoque dado para a utilização da cana-de-açúcar se justifica pelo fato de que essa gramínea apresenta as maiores e melhores condições de geração de energia renovável, como a cogeração de energia elétrica e as pesquisas com bioetanol, a partir da celulose do bagaço e da palha. Serão apresentadas informações de derivados de bagaço, e práticas existentes e em estudos, de cogeração de energia elétrica e obtenção de etanol por celulose pela hidrólise por vias ácida ou enzimática, com o bagaço e com a palha.

Palavras Chave: Cana-de-açúcar, bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana-de-açúcar, cogeração de energia elétrica, bioetanol.

## **ABSTRACT**

One of the current world concerns it is with the supply of energy in the coming decades, since the main source of energy used today is oil, and it is a non-renewable fossil fuel. This the aim of this paper is to inform the technologies in study and in practice uses of the already known derived from sugar cane for obtaining sustainable energies focusing especially in electrical energy cogeneration and bioethanol obtainment from bagasse and the straw of sugar cane.

This paper aims to address the use of sugar cane, as this grass presents the largest and better conditions for renewable energy generation, such as cogeneration of electricity and bioethanol searches from the cellulose, bagasse and straw. It will be presented information of derived from bagasse and existing practices and in studies of electricity cogeneration and ethanol obtainment from cellulose by acid hydrolysis or enzymatic, with bagasse and with straw.

**Keywords:** sugar cane; sugar cane bagasse; sugar cane straw; electrical energy cogeneration; bioethanol.

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo principal informar maneiras na qual a palha e o bagaço de cana-de-açúcar podem ser aproveitados na nova indústria bioenergética, de forma sustentável.

Da cana é possível obter energia convencional e alimentos em certa concorrência conciliável, enquanto que dos resíduos industriais também se obtém energia e alimentos. Pode-se ainda evitar a degradação do meio ambiente, atuando com inteligência e sentido de responsabilidade.

Produtores de cana têm uma indiscutível vantagem ao contarem com uma matéria-prima renovável, criadora de compostos químicos básicos, de um rendimento por hectare sem comparação com outra planta e com uma capacidade de conversão de energia cinco vezes superior à empregada para produzi-la. Com a possibilidade de oferecer a sua melhoria genética, para converterem a cana-de-açúcar, na matéria-prima ideal para as exigências do futuro. Fonte UDOP, “*Biblioteca Virtual*”,

A diversificação a partir da cana-de-açúcar oferece aos empresários, importantes vantagens: matéria-prima renovável, altos rendimentos em biomassa, compatibilidade com o meio ambiente, um importante número de alternativas produtivas para escolher e uma menor dependência na comercialização de um só produto.

## 2. A CANA-DE-AÇÚCAR COMO MATÉRIA-PRIMA

A cana-de-açúcar é cultivada em mais de cem países. Da colheita da cana e do seu processamento industrial é possível obter diversos produtos e subprodutos, que constituem matéria-prima para a indústria de transformação, química e bioquímica, os quais, por sua vez, permitem obter mais de cem produtos de valor comercial, obtidos nos países produtores de cana.

A cana-de-açúcar é considerada a planta que possui os mecanismos fisiológicos mais aperfeiçoados para a produção de sacarose, pois suas vias fotossintéticas para produzi-la ( $C_4$  ou via do ácido dicarboxílico), a partir dos açúcares simples, são mecanismos altamente eficientes, que o homem, através de um processo longo e continuado de melhoria, vem aperfeiçoando e desenvolvendo até criar variedades comerciais com alto teor de sacarose, bom percentual de fibras e resistência a doenças.

Esta planta é uma das que possuem maiores qualidades, entre as culturas comerciais, por sua eficiência de assimilação de fotossíntese e capacidade de produzir massa verde composta por açúcares, amidos, proteína e compostos lignocelulósicos, todos eles matérias-primas para um amplo campo de produções de importância econômica.

Durante a época do ano em que prevalecem temperaturas altas e a máxima atividade pluvial, a cana atinge um grande crescimento vegetativo. Sob estas condições, a fotossíntese se dedica fundamentalmente à produção de celulose e outros materiais, que constituem o palmito e o suporte fibroso do colmo, o fruto da cana. Ao terminarem as chuvas e diminuir a temperatura, adquire níveis máximos a síntese de sacarose que se armazena no colmo, a que se denomina maturidade tecnológica da cana.

Este ciclo de crescimento e maturação se repete anualmente, num curso de 12 a 14 meses. Em alguns países, a cana é cortada ao termo de um ciclo anual e noutros se faz depois de dois ciclos, com o objetivo de obter maior massa de cana por hectare.

Um hectare de cana por ano, com rendimento médio, é capaz de contribuir com 100 toneladas de matéria verde, mais que o dobro da maioria de outras plantas. Em termos de energia total, equivale a mais de 1,000 t de petróleo, e considerada como uma energia metabolizável, a 75,000 Mcal, cifra várias vezes superior a qualquer outra cultura em igualdade de condições.

Do ponto de vista de suas potencialidades, utilizando tecnologias químicas e biotecnológicas, a cana pode dar lugar a um número importante de produtos, apenas superados pelos que se obtém da petroquímica. A utilização dos produtos e subprodutos da cana permite um desenvolvimento industrial dentro de um ciclo fechado de aproveitamento integral, que abrange até os resíduos, utilizando estes de forma tal que não prejudiquem ao meio ambiente e ao mesmo tempo tenham utilidade econômica.

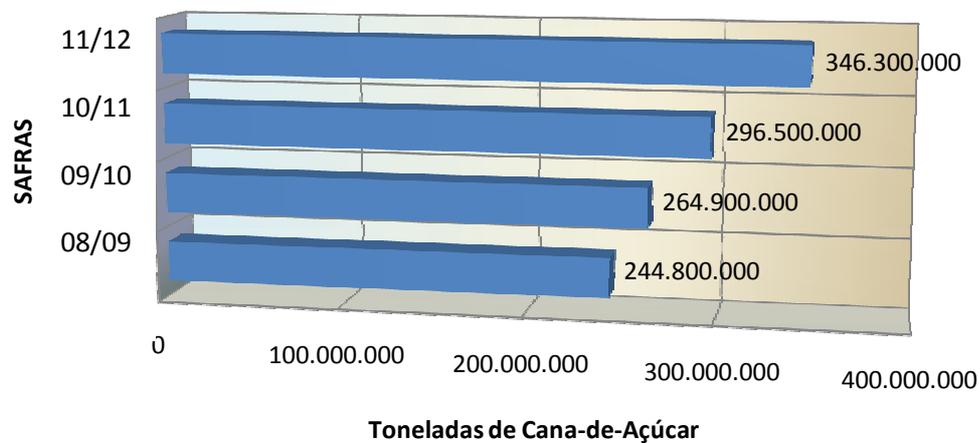
Fonte UDOP, “*Biblioteca Virtual*”,

## **2.1. O setor sucroalcooleiro paulista**

O setor canavieiro do Brasil ocupa lugar de destaque na fabricação e exportação de açúcar, na produção de álcool e na cogeração de energia a partir do bagaço de cana. É um setor que faturou US\$ 60 bilhões na safra 2011 / 2012, e que tem crescido significativamente, segundo dados da UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar.

Esse setor compreende aproximadamente 414 usinas de açúcar e destilarias de álcool no país, sendo 169 apenas no Estado de São Paulo, e gera em torno de 1,28 milhões de empregos diretos, sendo mais de 500.000 deles em São Paulo, e aproximadamente 4,29 milhões de empregos entre diretos e indiretos, sendo dois milhões apenas em São Paulo. Devido à produção do álcool combustível que é misturado na gasolina, o setor canavieiro vem garantindo uma economia anual de cerca de US\$ 2 bilhões com importação de petróleo.

Segundo informações disponíveis no site da UNICA, na última safra (2011/2012) o setor produziu 17% a mais do que na safra anterior, motivado pelas 29 novas unidades produtoras que entraram em operação no Brasil, principalmente nos estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. O Estado de São Paulo é hoje o maior produtor de açúcar, álcool e cogeração de energia elétrica, do país, e a moagem de cana nas usinas paulistas vem crescendo nas últimas safras, como mostra o gráfico 1 a seguir.



**Gráfico 1** – Crescimento da moagem de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

**Fonte:** Elaboração própria com base de dados em site da UNICA - 08/07/2012

Como se pode ver, nas últimas 4 safras o crescimento médio foi de aproximadamente 12,5%, e a expectativa do setor é que a safra 2009/2010 seja em torno de 7% superior a safra anterior, devido as condições financeiras e principalmente as climáticas, das usinas, onde muitas não conseguiram executar os tratos culturais mínimos nos canaviais para a manutenção dos rendimentos médios de tc/ha e pela ocorrência de chuvas excessivas em períodos incomuns causando diminuição do tempo útil de operação, respectivamente.

Porém o setor sucroalcooleiro tem características que o distinguem dos outros segmentos energéticos do país. Em primeiro lugar, é um dos poucos que pode ser considerado como auto-suficiente em termos de geração de energia elétrica para consumo próprio. Isto porque a grande maioria das usinas de açúcar e álcool produz a eletricidade que é consumida nos seus processos. Em segundo lugar, é o setor que pode gerar maiores excedentes de energia.

E essa geração de excedentes vem crescendo, principalmente no Estado de São Paulo. Segundo dados da ANEEL e da COGEN-SP, no ano de 2003, a comercialização chegou a 110 MW, 140 MW em 2004, 184 MW a partir de 2005, atualmente o potencial de comercialização está em torno de 2.200 MW de excedentes com as usinas sucroalcooleiras paulistas.

Na tabela a seguir são apresentadas as usinas geradoras de bioeletricidade, e os respectivos montantes produzidos, no ano de 2012.

**TABELA 1** – Ranking de Geração de Bioeletricidade – São Paulo - março 2012

Atualmente há empreendimentos utilizando o bagaço da cana - Operação					
#	Usina	Potência (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
1	<a href="#">Alta Mogiana</a>	60.000	PIE	<a href="#">100% para Usina Alta Mogiana S/A Açúcar e Álcool</a>	São Joaquim da Barra - SP
2	<a href="#">Barralcool</a>	23.000	PIE	<a href="#">100% para Usina Barralcool S/A</a>	Barra do Bugres - MT
3	<a href="#">Batatais</a>	3.900	REG	<a href="#">100% para Usina Batatais S/A - Açúcar e Álcool</a>	Batatais - SP
4	<a href="#">Caeté</a>	35.800	PIE	<a href="#">100% para Usina Caeté S/A</a>	São Miguel dos Campos - AL
5	<a href="#">Colombo</a>	105.500	PIE	<a href="#">100% para Usina Colombo S/A Açúcar e Álcool</a>	Aranha - SP
6	<a href="#">Corona</a>	18.000	APE	<a href="#">100% para Usina da Barra S/A Açúcar e Álcool</a>	Guariba - SP
7	<a href="#">Ester</a>	46.400	PIE	<a href="#">100% para Usina Açucareira Ester S/A.</a>	Cosmópolis - SP
8	<a href="#">Central Energética Ribeirão Preto (Ex. Galo Bravo)</a>	9.000	APE-COM	<a href="#">100% para Central Energética Ribeirão Preto, Açúcar e Álcool Ltda</a>	Ribeirão Preto - SP
9	<a href="#">Galvani</a>	11.500	APE	<a href="#">100% para Galvani Indústria Comércio e Serviços S/A</a>	Paulínia - SP
10	<a href="#">Iracema</a>	14.000	PIE	<a href="#">100% para São Martinho S/A</a>	Iracemópolis - SP
11	<a href="#">Virgolino de Oliveira - Itapira</a>	5.800	APE	<a href="#">100% para Virgolino de Oliveira S/A Açúcar e Álcool</a>	Itapira - SP

Fonte: ANEEL/UNICA, pesquisado no site da UDOP em 20/07/2012.

## 2.2. Tendências tecnológicas

No mundo, estão se produzindo mudanças descontínuas no desenvolvimento da produção industrial, resultantes principalmente das inovações tecnológicas, sob a influência da microeletrônica, a informática, as comunicações, os novos materiais e os novos conceitos em práticas, que colocam como principal recurso o conhecimento e a informação.

Uma parte dos produtos fabricados atualmente tem cada vez menor valor, quanto a materiais e matérias-primas, enquanto crescem na sua composição os custos de *design*, apresentação ou inovação, criando valores pela sua forma de engarrafamento, publicidade, comercialização, serviços, pós-venda e outros.

Os sinais que caracterizarão a indústria nos próximos anos serão: sua sustentabilidade, a coleta de informação, uma alta flexibilidade para a mudança, a permanente inovação

tecnológica e o conhecimento como o elemento central e mais importante. Estas serão as verdadeiras vantagens comparativas que o mundo terá.

Fonte: Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo –ÚNICA.

Assim estas tendências tecnológicas abalaram a estrutura da antiga Indústria Açucareira, a qual teve que aproveitar a vantagem de ser uma indústria auto-energética, capaz de não precisar de nenhum combustível externo para seu processo, para fazer surgir a nova Indústria Bioenergética, na qual a energia utilizada teve que ser redirecionada, para otimizar o seu uso, e aproveitando os excedentes de bagaço e palha para aumentar a obtenção de produtos derivados e a geração de excedentes de eletricidade e bioetanol.

### **2.3. A usina diversificada**

As características fundamentais da nova Indústria Bioenergética diversificada seriam as seguintes:

1. A indústria deverá produzir utilizando ao máximo as instalações e as tecnológicas disponíveis, que serão adequadas aos novos propósitos. Da mesma forma, devem ser aproveitados o solo destinado à cana e feita uma exploração do mesmo, levando em conta novos produtos e formas de produção na indústria.
2. Os processos tecnológicos adotados, devem permitir além da produção de açúcar, a obtenção de mais méis enriquecidos, sucos diluídos, bagaço em excesso, palha limpa e picada, etanol a partir da celulose, água potável através de estações de tratamento além de excedentes de energia elétrica. Tudo isso concebido em forma de esquemas flexíveis que permitam dirigir a produção de um produto ou outro, segundo a conveniência do mercado, os preços dos produtos e a estratégia de comercialização da empresa.
3. Devem ser consideradas como preferência para a reestruturação, aquelas indústrias que estejam próximas de fábricas de derivados consumidoras de bagaço, ou indústrias que possam assimilar bagaço e palha para as suas termoelétricas.
4. As produções primárias obtidas (produtos e subprodutos) deverão ser convertidas com maior valor acrescentado possível, para que a rentabilidade da nova empresa seja ainda mais vantajosa.

5. As devem ser feitas de forma sustentável, compatível com o meio ambiente, para que todos os resíduos e residuais da indústria e da agricultura possam ser reciclados na própria unidade, na cultura da cana ou em novas produções.

6. A gerência e a estrutura de direção deverão ser adequadas às características de flexibilidade e de integração produtiva que terá a indústria bioenergética.

7. O objetivo estratégico que deve nortear as ações de reestruturação é o de conseguir a maior eficiência econômica através de custos de produção ínfimos, maior valor acrescentado das produções e menor consumo energético.

8. Um incremento substancial do bagaço e palha excedente, pode-se dedicar simultânea ou indiscriminadamente as fábricas de derivados, para alimento animal, bioetanol ou para geração elétrica.

9. A co-geração ou geração de energia elétrica, os créditos de carbono e a obtenção de bioetanol a partir da celulose farão crescer significativamente, além de trazer opções de maior rentabilidade para a Indústria Bioenergética a poderá tornar uma empresa mais flexível e sustentável.

10. A cana deve ser manipulada como a cultura principal, mas não excluir a possibilidade de utilizar leguminosas e outras gramíneas que sejam usadas como forragem para a alimentação animal. As opções de alternância e rotação de culturas principalmente devem ser levadas em conta.

Fonte: Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo –ÚNICA.

### 3. BAGAÇO

O bagaço é um resíduo lignocelulósicos fibroso, remanescente dos colmos da cana-de-açúcar, obtido na saída da última moenda da indústria bioenergética e constitui um conjunto heterogêneo de partículas de diferentes tamanhos, que oscilam entre 1 e 25 mm de comprimento, apresentando um tamanho médio de 20 mm.

A granulometria do bagaço depende fundamentalmente do trabalho dos equipamentos de preparação da cana em menor triangulação dos rolos das moendas e do percentual fibroso da variedade de cana.

A obtenção do bagaço, deixando de lado as especificações para a indústria de derivados, pode trazer como consequência os seguintes aspectos:

- Diminuição da eficiência do desfibramento ou incremento excessivo das perdas;
- Dificuldades no bombeamento e mistura do bagaço em suspensão aquosa;
- Dificuldades na impregnação do bagaço com produtos químicos na produção de polpa e de papel.

Nos últimos anos surgiu a tendência de aumentar o grau de preparação da cana, com o objetivo de lhe extrair a maior quantidade de açúcar. Esta prática também pode ser útil para as indústrias consumidoras de bagaço, se o tratamento mecânico que se der a este for desfibramento e não o corte de fibras permitirá maior desprendimento do miolo ou medula, e separará de forma mais eficiente na etapa de desmiolamento, sem provocar maiores alterações à longitude média das fibras.

Fonte: Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo –ÚNICA.

#### 3.1. Composição química

O bagaço é composto de celulose, hemicelulose e lignina, como principais polímeros naturais. Também apresentam pequenas quantidades de outros compostos classificados conjuntamente como componentes estranhos. Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

A celulose é um polímero linear de alto peso molecular formada de unidades de glicose unidas por ligações 1-4 de carbono e podem aparecer como material altamente

cristalino. Em sua estrutura duas unidades de glicose adjacentes são ligadas pela eliminação de 1 molécula de H<sub>2</sub>O entre seus grupos hidroxílicos no carbono 1 e carbono 4.

As hemiceluloses diferem da celulose por apresentarem várias unidades de diferentes açúcares (pentoses, hexoses, ácidos hexurônicos e deoxi-hexoses) que formam polímeros de cadeia mais curta e ramificada. A estrutura ramificada da hemicelulose diminui as energias de ligações e também a cristalinidade tornando-a mais facilmente hidrolisada que a celulose.

A lignina é um polímero que possui uma estrutura polifenólica complexa, formada principalmente de unidade de fenilpropano oxigenado, que no processo de hidrólise permanece inalterada; assim a lignina é um resíduo sólido que pode ser separado dos açúcares.

**TABELA 2** – Composição média do bagaço de cana-de-açúcar.

<b>Componente</b>	<b>Teor (%)</b>
Composição química média	
<i>Carbono</i>	39,7 – 49
<i>Oxigênio</i>	40 – 46
<i>Hidrogênio</i>	5,5 – 7,4
<i>Nitrogênio e cinzas</i>	0 – 0,3
Propriedades físico-químicas	
<i>Umidade</i>	50
<b><i>Fibra</i></b>	<b>46</b>
<i>Brix</i>	2
<i>Impurezas minerais</i>	2
Composição média da fibra do bagaço	
<i>Celulose</i>	26,6 – 54,3
<i>Hemicelulose</i>	14,3 – 24,4
<i>Lignina</i>	22,7 – 29,7

**Fonte:** Mello Jr., C. A., Efeito do tratamento a pressão de vapor no bagaço de cana de açúcar sobre a sua degradação in vitro e digestibilidade in vivo, *Livestock Research for Rural Development* vol. 1, nº 1, novembro 1989.

**Quadro 1** – Composição química aproximada do bagaço integral, fração fibra e medula para diferentes regiões geográficas em percentagem (calculado sobre o bagaço seco).

<i>Origem</i>	<i>Tipo</i>	<i>Celulose</i>	<i>Lignina</i>	<i>Polioses</i>	<i>Cinzas</i>
EUA (Louisiana)	Integral	58,40	21,30	29,40	2,90
	Fibra	61,40	20,70	30,00	2,00
	Medula	54,60	21,30	29,90	4,60
Filipinas	Integral	56,80	22,30	31,80	2,30
	Fibra	62,90	21,80	31,20	1,20
	Medula	55,40	22,50	33,20	2,60
Porto Rico	Integral	50,90	18,10	29,60	3,90
	Fibra	59,90	19,80	31,60	1,20
	Medula	53,90	18,80	31,90	3,20
África do Sul	Integral	45,30	22,10	24,10	1,60
	Integral	0,00	27,6-28,4	19,4 - 21,6	1,3 - 2,0
	Fibra	0,00	25,8-27,3	20,0 - 22,0	0,6 - 0,8
	Medula	0,00	27,6 - 28,8	19,3 - 21,5	1,8 - 2,4
Havaí	Integral	46,60	20,70	25,20	2,60
	Fibra	47,00	19,50	25,10	1,40
	Medula	41,20	21,70	26,00	5,50
Brasil (São Paulo)	Integral	49,10	20,30	27,80	1,60
	Fibra	51,10	20,80	26,70	0,80
	Medula	47,50	20,20	28,50	3,00

Fonte: RODRIGUES, Fábio de Ávila, “Avaliação da tecnologia de hidrólise ácida de bagaço de Cana” p. 32.

### 3.2. Desmiolamento do bagaço

O desmiolamento do bagaço consiste em enriquecer a fração fibrosa extraíndo uma percentagem rica em medula. O desenvolvimento dos equipamentos e sistemas de desmiolamento e, em geral, as diferentes variantes de sistemas para desfibrar o bagaço podem ser classificadas de acordo com a umidade do material, nas formas seca, que se realiza entre 20 e 40% de umidade, empregando peneiras, coadores e moinhos de martelo e na forma úmida, na qual se efetuará a separação do miolo ou medula, com umidade de 48 a 50%, na saída das moendas da indústria. Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

### 3.3. O armazenamento do bagaço

A produção do bagaço está única e exclusivamente disponível na época de safra, que na maioria dos países dura 7 ou 9 meses. Por essa razão, as usinas que utilizam bagaço como matéria-prima se vêem obrigadas a armazenar grandes quantidades para garantir sua operação o ano todo.

Os métodos desenvolvidos para armazenamento do bagaço podem ser classificados em duas grandes divisões: compactados e a granel. Até a poucos anos, os métodos de armazenamento em forma compactada foram praticamente o único sistema utilizado em fábricas de polpa de papel, de tabuleiros e painéis, de furfuro e outros. Recentemente, foram desenvolvidos e postos em prática novos métodos a granel e de pré-secagem do bagaço.

O armazenamento a granel resolveu muitas das desvantagens dos métodos compactados, ao se eliminar em grande medida a decomposição química do bagaço, o perigo de incêndios e dispor de maior área, sobretudo na indústria da celulose e do papel. Ainda se mantém a tendência de utilizar o armazenamento em pacotes, naquelas tecnologias que se referem matéria-prima seca perto da fábrica.

Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

### 3.4. Utilização do bagaço

O crescente desenvolvimento da indústria dos derivados e o tradicional compromisso energético do bagaço começam a adquirir uma relevante significação econômica.

O bagaço tem sido usado historicamente como combustível na antiga indústria açucareira, embora seu valor calórico seja relativamente baixo ao ser comparado com a palha. Mas, sem dúvida, constitui um valioso potencial energético para a nova indústria bioenergética, sobretudo para aqueles países que não têm disponibilidades significativas de combustível e são grandes produtores de açúcar de cana.

Por outro lado, a existência cada vez menor de materiais fibrosos para ser utilizados como matéria-prima na indústria dos derivados e seu caráter renovável, estimulou, nas últimas décadas, um processo acelerado de desenvolvimento na utilização do bagaço nas produções de polpa, papel, bioetanol e produtos aglomerados. Tem relevante importância na alimentação animal e pode se tornar, potencialmente, a matéria-prima que garanta o desenvolvimento de diversas produções, como furfurool, carvão ativado, produtos moldados e outros.

### 3.4.1. Geração de energia elétrica

A indústria da cana, do ponto de vista energético, aplicou durante o seu desenvolvimento alguns esquemas nos quais o bagaço é utilizado como combustível no processo, instalando-se modelos que consomem todo esse resíduo sem deixar nada sobrando. Dessa forma, evita-se o uso de combustíveis externos e se dispõe de todo o bagaço produzido, o que é uma consequência lógica das condições econômicas e tecnológicas predominantes na indústria.

As reservas de energia que o processo tem, quanto a possíveis excedentes de bagaço, são de cerca de 50% quando se faz um desenho ótimo com esses fins, enquanto que as reservas que tem do ponto de vista da co-geração são superiores a 100 kWh/t de cana.

#### a) Geração e uso do vapor em processo

A grande incidência do uso de vapor na fabricação do açúcar pode ser vista no índice de utilização entre 4,0 e 7,0 Kg de vapor em cada kg de açúcar produzido, dependendo do esquema energético. Esta área de geração de vapor arca com as maiores perdas de energia de uma usina bioenergética, sendo em torno de 20% da energia liberada pelo combustível no melhor dos casos, que em muitas fábricas aumenta para 30%, chegando a 50% em usinas nas quais estas instalações são deficientes pelo desenho, pelo estado técnico e pela operação.

A eficiência se define como o calor liberado pelo combustível menos as perdas; esta diferença se expressa como um percentual do calor liberado sobre a base do vapor calórico baixo (VCB) ou o alto (VCA) do combustível, o que deve ficar bem claro quando se vai especificar a eficiência na geração do vapor. Por exemplo, a melhor eficiência nas caldeiras de bagaço que existem na prática, expressas segundo o VCB, são de 80%, que correspondem a 65%, quando são expressas sobre a base do VCA.

As perdas fundamentais que fazem diminuir a eficiência das caldeiras são: perdas em calor sensível dos gases da chaminé, perdas por radiação e por convecção.

As perdas na fornalha, ou por combustão incompleta, são provocadas pelo arraste das partículas não totalmente queimadas e pelo grau de avanço da reação de formação do CO<sub>2</sub>, influenciadas ambas pelas características aerodinâmicas da instalação e pelo excesso de ar que é preciso aplicar por cima do índice teórico para conseguir uma combustão adequada. Ar

abaixo do mínimo requerido em excesso ou acima dessa quantidade mínima implica necessariamente a formação de monóxido de carbono.

Com vista a conseguir os objetivos de uma boa mistura do ar com o combustível e uma boa distribuição da geração de calor em todo o espaço da fornalha e ao mesmo tempo manter o passo na exigência de caldeiras cada vez maiores, com parâmetros de geração mais intensos, as fornalhas foram desenvolvidas passando por três pontos de vista. Estes são: fornalha de ferradura ou pilha, as de grade com lançamento e as de suspensão, que foram aparecendo nessa mesma ordem. A diferença quanto à eficiência nesses três tipos de fornalha é relativamente grande devido às fortes exigências de ar em excesso, de 60 a 100% nas fornalhas de ferradura, de 30 a 50% nas fornalhas de grade de lançamento e de 20 a 30% nas fornalhas de suspensão.

Quanto à recuperação do calor sensível dos gases, os elementos comumente utilizados são o economizador ou pré-aquecedor da água de alimentação e o pré-aquecimento do ar. Estes equipamentos foram-se incorporando aos diferentes tipos de desenhos de fornalhas de vapor, nos últimos trinta anos, na própria medida em que aumentou a exigência de energia para o processo e, às vezes, para outros fins. Ainda na década de 50, instalavam-se caldeiras sem esses elementos, pois a sua incorporação, além de aumentar os custos de investimentos, em geral significava excesso de bagaço, com as consequentes despesas em sua disposição.

Um elemento que surgiu, nos últimos vinte anos, é o secador de bagaço, instalado depois das superfícies recuperativas convencionais e que diminui a temperatura dos gases até valores da ordem de 120 a 130° C. Existem duas variantes de equipamentos para isso; o de tambor rotatório e o de arraste, que foi o que conseguiu maiores avanços em sua ampliação, embora a sua utilização não tenha sido muito estendida. Os promotores deste equipamento argumentam que é possível aumentar a eficiência de uma caldeira até 15 pontos. A manipulação dos gases para conduzir o bagaço através do secador, ao mesmo tempo em que seca, implica um incremento na exigência de energia no transporte dos gases, que se estima em 4.5 a 5.3 *kW/h* por tonelada de bagaço secado.

Na tabela 3.4.1, a seguir, mostra-se, para instalações que operem estavelmente, conforme se comportam, de forma combinada, a eficiência na geração de vapor e o uso eficiente do vapor no processo, quando a geração de energia mecânica e elétrica é somente para satisfazer as exigências do processo, isto é, da ordem de 35 kWh por tonelada de cana e, naturalmente, as condições de geração de vapor são mínimas para isso. Os valores que

aparecem na tabela constituem a porcentagem de bagaço em excesso ou sobranço. É conveniente lembrar que em caldeiras em bom estado técnico, com fornalhas de pilha (ferradura) e que não tenham economizador nem aquecedor de ar, a sua eficiência, no melhor dos casos, é de apenas 60%. A incorporação das grades pode elevar a eficiência em até 70%, e a de elementos de recuperação de calor sensível dos gases, isto é, economizador e aquecedor de ar, até 80%. Igualmente, é conveniente lembrar que o esquema convencional de usinas açucareiras sem mudanças substanciais para poupança de vapor em processo, implica consumos da ordem de 55% de cana e que o melhor que foi conseguido nesse sentido é da ordem de 37%.

**Quadro 2** Bagaço em excesso para diferentes combinações de eficiência de caldeira e consumo de vapor no processo

<b>Exigência de Vapor %</b>	<b>Eficiência</b>	<b>de Caldeira</b>	<b>de Cana</b>
30	58%	68%	78%
35	41%	49.0%	57.0%
40	32.5%	41.5%	50.4%
45	24.2%	34.2%	43.8%
50	15.8%	25.3%	37.2%
55	7.4%	19.4%	30.5%
60	1.0%	12.1%	24.0%

Fonte: ALBUQUERQUE, L.C., "Manual dos Derivados da Cana-de-açúcar", Ed. ABIPTI, p.459, 1999.

### **b) Conversão de energia térmica em mecânica e utilização eficiente de sua disponibilidade**

Tornaram-se evidentes as reservas energéticas que mostram a geração de vapor e a forma de utilização do vapor no processo, resta ver as reservas de geração de potência, de acordo com um melhor aproveitamento da disponibilidade de conversão de energia térmica em mecânica, isto é, mediante uma co-geração eficiente associada ao uso eficiente do vapor no processo.

Os principais consumidores de energia mecânica e elétrica na usina são: preparação da cana, moagem, bombas de água e de injeção a condensadores e de rejeição, bombas de caldo misto e clarificado, e de maceração, bombas em vácuo, bombas de produtos intermédios, centrifugas, movimentos de cristalizadores e cozedores, manipulação por esteiras de produtos a granel, ventiladores e bombas de injeção em caldeiras, iluminação e outros.

A energia exigida para estas operações tem sido estudada muitas vezes pelos engenheiros da usina, reportando-se alguns indicadores, como a exigência total para a

preparação mais a moagem, são da ordem de 17 kWh/t de cana e de 18 kWh/t de cana para o resto das operações, perfazendo um total de 35 kWh por tonelada de cana para a operação da unidade. É interessante que essa quantidade não ultrapasse 8% do total da energia consumida.

São identificadas duas classes, para aproveitamento da disponibilidade de conversão de energia térmica em mecânica, uma completamente provada na prática, segundo o enfoque do tradicional Ciclo de Rankine. Este ciclo, testado em milhares de instalações bioenergéticas, pode ser levado a parâmetros de vapor próximos do limite do que permitem os materiais em instalações convencionais, obtendo-se incrementos substanciais na conversão da energia térmica em mecânica.

A segunda classe que se considera, ainda não suficiente testada em biomassa, e sim com outros combustíveis fósseis, incluindo carvão, é a do chamado Ciclo Combinado, formado ao mesmo tempo por dois ciclos; um o chamado de Ciclo Brayton ou turbinas de gás; e o outro, o convencional Rankine.

Quando se fala sobre perdas de energia em caldeiras por diferentes motivos, tanto de desenho quanto de operação, não se faz referência às perdas de disponibilidade de conversão de energia térmica em mecânica, segundo o convencional Ciclo Rankine, devido à queda de temperatura não útil entre os gases de combustão e a água na caldeira. Na fornalha pode chegar a haver, em caldeiras eficientes, temperaturas de 1150° C, enquanto que a temperatura do vapor produzido, na maior parte das fábricas, não passa de 350° C.

As condições técnicas estão preparadas, por ter sido, inclusive, provada na prática a geração de vapor com bagaço para demonstrar que se pode trabalhar de forma mais eficiente e segura em instalações de geração de vapor com temperaturas de 500° C, sob pressões da ordem de 80 kg/cm<sup>2</sup>, o que permite uma geração de energia mecânica e elétrica, de 120 kWh por tonelada de cana.

Isso é independente do aproveitamento que se possa fazer no processo e que conduza à poupança de bagaço, isto é, melhoria só na co-geração. A poupança pelo uso mais eficiente do vapor no processo, que de acordo com o que observamos em aspectos anteriores conduz à poupança de bagaço que se poderia queimar adicionalmente, implica já a condensação do vapor em gerador elétrico, isto é, o emprego de turbinas de extração-condensação, pois não haveria possibilidade de condensação nos equipamentos de processamento.

Na tabela 3, a seguir, dão-se valores de bagaço em excesso (%) e de energia (kWh) marginais, quando a geração de energia elétrica e mecânica se faz sob condições ou

parâmetros superiores aos valores mínimos e sem utilizar máquinas de extração-condensação. Considera-se uma eficiência na caldeira de 78%.

**TABELA 3** – Bagaço em excesso e energia elétrica marginal para diferentes exigências de vapor no processo e duas condições de geração.

Vapor no processo	Pressão/Temperatura 18 kg/cm <sup>2</sup> 343° C		Pressão/Temperatura 42 kg/cm <sup>2</sup> 400° C	
	Bagaço em excesso, %	Energia à rede, kWh/tc	Bagaço em excesso, %	Energia à rede, kWh/tc
30	55	0	52	10
40	40	10	38	22
50	28	18	24	34
60	12	27	9	46

Fonte: ALBUQUERQUE, L.C., “Manual dos Derivados da Cana-de-açúcar”, Ed. ABIPTI, p.461, 1999.

Se todo bagaço fosse queimado para gerar eletricidade para incorporar à rede elétrica nacional, utilizando agora turbinar de extração-condensação, obter-se iam, valores como os da tabela 4, onde os parâmetros de eficiência da caldeira, tal como na situação anterior, são considerados igualmente a 78%.

**TABELA 4** – Geração de eletricidade marginal com turbinas de extração-condensação, para diferentes condições de vapor.

Vapor no processo % de cana	18 kg/cm <sup>2</sup> 343° C	28 kg/cm <sup>2</sup> 400° C	42 kg/cm <sup>2</sup> 400° C	58 kg/cm <sup>2</sup> 454° C
30	63	72	79	86
40	55	63	70	75
50	47	55	61	68
60	38	47	53	59

Fonte: ALBUQUERQUE, L.C., “Manual dos Derivados da Cana-de-açúcar”, Ed. ABIPTI, p.461, 1999.

Cabe salientar que, em qualquer combinação de poupança de bagaço e de geração elétrica, um aspecto inevitável que deve ser considerado é o caráter estacional que mostra a produção de açúcar de cana, que obriga a considerar o que se faria no tempo em que não houvesse safra: gerar com bagaço armazenado, gerar com algum combustível fóssil ou não gerar. O armazenamento de bagaço ou de resíduos sólidos é custoso, o uso de combustíveis fósseis é afetado pela economia em escala e parar a usina elétrica também é contrário à economia.

Hoje em dia, em muitas áreas canavieiras onde se considera a possibilidade de gerar energia para a rede elétrica nacional, estuda-se a possibilidade de utilizar a chamada cana energética, uma cana de alto teor de fibra, mais resistente e forte, que permitiria operar com bagaço, ainda que não todo, mas com uma boa parte do ano.

### **b.1) Utilização das reservas de energia através do ciclo combinado.**

O ciclo Combinado é o resultado da combinação do ciclo Brayton, ou da turbina de gás, com o ciclo Rankine. A fonte de calor no ciclo da turbina de gás é o combustor ou câmara onde é queimado o combustível, a uma temperatura, no caso dos combustíveis fósseis usuais para ela, da ordem dos 1250° C, e uma temperatura suficientemente alta para recuperar parte da sua entalpia, passam ao ciclo convencional de Rankine, isto é, a uma caldeira onde se gera vapor que vai para os turbogeradores.

A geração máxima de vapor que se pode realizar é de 300 Kg de vapor por tonelada de cana da qual uma parte deve ser utilizada no gaseificador, embora ainda não esteja claro quanto deva ser.

A eficiência deste ciclo, neste último caso de utilização do vapor de escape em processo, quando a turbina de vapor é de contrapressão, isto é, não há condensação, pode ter 80 % de eficiência, além de chegar a gerar, no caso do esquema açucareiro, até o dobro da energia elétrica do Ciclo de Rankine sozinho, devido à pouca perda de disponibilidade de conversão que mostra em comparação com ele. Enquanto neste há uma queda de temperatura inútil na caldeira, no melhor dos casos, de 1150 para 450° C, a entrada dos gases à turbina no Ciclo Combinado é de 1200° C, saindo a 550° C quando entra no Ciclo Rankine, saindo os gases a vapor, com temperaturas entre 160 e 200° C, e o vapor da turbina a 130° C. Isto é, enquanto a geração de energia mecânica, no Ciclo Rankine, é a partir de 450 até uma temperatura de 130° C, no Ciclo Combinado a queda de temperatura na geração de energia mecânica é de 1200 até 130° C. Enquanto no Rankine a eficiência ideal, de acordo com o segundo princípio da Termodinâmica, é de 44,26 e para o Combinado é de 72,64, embora seja necessário assinalar que a turbina de gás tem um alto consumo interno de energia mecânica em compressão do ar para a combustão.

O Ciclo Combinado foi testado suficientemente, há vários anos, com derivados do petróleo como combustível e mais recentemente com carvão pulverizado. Quanto a biomassa, tem elementos a apurar, como a purificação do gás e a alimentação do combustível ao

gaseificador cuja pressão é superior à atmosférica, no qual está se trabalhando muito, dedicando suficientes recursos, para resolver esse problema no mais breve espaço de tempo.

No caso do bagaço, a gaseificação é a parte crítica no uso do Ciclo Combinado, embora haja questões que sejam analisadas na turbina, como é a capacidade calórica do gás produzido, o que é menor que o dos combustíveis sólidos.

A gaseificação consiste essencialmente na combustão incompleta de um combustível, o qual se consegue com o fornecimento de ar abaixo do nível teórico requerido, utilizando-se, eventualmente, vapor. Esta combustão com ar limitado faz com que a reação de equilíbrio anidro, monóxido, oxigênio se desloque para zona de alta presença de monóxido. Por razões similares, também se encontram hidrogênio e metano. E, naturalmente, nitrogênio, vapor de água e outros.

Em geral, os gaseificadores são câmaras onde existe um leito através do qual passa ar ou uma mistura de ar mais vapor.

Um aspecto fundamental na conversão da biomassa ao estado gasoso para ser utilizada na turbina de gás é a sua purificação, pois deve ficar praticamente livre de partículas. Em geral com alguma variante nos chamados filtros de cerâmica espera-se resolver o quantidade de vapor de água. É provável que sempre haja uma limpeza prévia com separadores de ciclone.

Fonte: UDOP, "*Biblioteca Virtual*".

### **3.4.2. Obtenção de etanol lignocelulósico**

Diferentemente do etanol convencional, o bioetanol é feito com base em materiais da biomassa celulósica ou, mais rigorosamente, lignocelulósica. Os esquemas de produção de etanol a partir da biomassa lignocelulósica são referidos como uma segunda geração de biocombustíveis, cujo processamento é uma das mais promissoras tecnologias em fase de desenvolvimento.

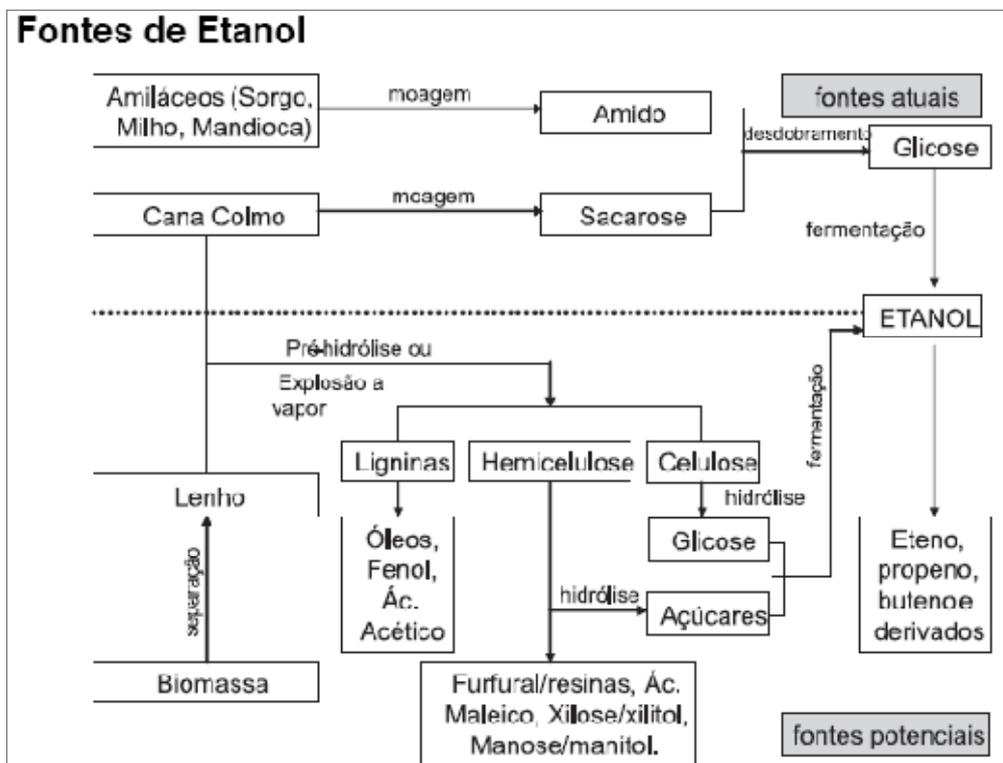
Essas novas tecnologias de processamento do etanol são fundamentais principalmente nos países desenvolvidos, em que as matérias-primas hoje utilizadas competem com a produção de alimentos e os custos de produção são ainda altos em comparação com o petróleo ou o etanol da cana. Sua importância decorre, também, do fato de o etanol celulósico ter potencial de extrair pelo menos duas vezes mais combustível da mesma área de terra e da

disponibilidade da biomassa, uma matéria-prima praticamente sem valor. A produção de etanol lignocelulósico emerge, assim, como um novo paradigma mundial.

Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

A fabricação do etanol com base nessas fontes é possível, mas exigirá o domínio de processos e tecnologias ainda não completamente dominados e desenvolvidos no mundo, no nível comercial. A conversão da celulose e da hemicelulose em etanol é possível, mas os processos são caros e complexos. Essas tecnologias correspondem aos processos de hidrólise ácida (processo químico) ou enzimática (processo biotecnológico), para chegar aos açúcares e, depois, por fermentação, produzir o etanol propriamente dito (figura 1).

**FIGURA 1** – Fontes de etanol



Fonte: Bastos D., Valéria *Etanol, Alcoolquímica e Biorrefinaria*, p.26 – 2006.

O processo de hidrólise destina-se a quebrar as moléculas de celulose ou hemicelulose, por meio da adição de ácido sulfúrico aos resíduos, no caso da hidrólise ácida, ou pela ação de enzimas (catalisadores orgânicos), no caso da hidrólise enzimática. Essa última reproduz o processo existente na natureza, em que a quebra das longas cadeias das moléculas de celulose em açúcares é feita por enzimas (chamadas celulasas, secretadas por fungos ou bactérias, microrganismos que se alimentam de matéria orgânica, alterando-a e formando substâncias químicas) e a fermentação, por leveduras, dos açúcares em etanol. O processo de hidrólise

enzimática requer o desenvolvimento de microrganismos capazes de quebrar a celulose, fermentar o açúcar, tolerar altas concentrações de etanol e produzir exclusivamente o etanol (sem subprodutos indesejáveis). Os esforços de criação de tal microrganismo concentram-se em modificar geneticamente um determinado microrganismo existente, com a remoção de características genéticas indesejadas e o acréscimo de genes (de outro microrganismo), incorporando características que permitam redução do número de etapas do processo de conversão, redução de custos e aumento da competitividade do produto. Existem esforços também no sentido de desenvolver um microrganismo sintético pela construção quase integral de um genoma. Diversos resultados já foram alcançados por grupos de pesquisas no exterior, que esbarram ainda no obstáculo do custo ainda elevado das enzimas.

O processo de hidrólise enzimática, compreende em um tratamento prévio do material lignocelulósico através de explosão com vapor, o desenvolvimento de uma enzima (linhagem mais produtiva da celulase) com base na modificação genética de um fungo tropical (o *Trichoderma reesei*), com vistas a hiper produzir suas enzimas que digerem a celulose.

Em nível comercial, os principais resultados no desenvolvimento da tecnologia de hidrólise enzimática foram alcançados pela IOGEN, empresa canadense de biotecnologia, mas que tem ampliado recursos para pesquisas em virtude do estabelecimento de parcerias com empresas como a Shell Global Solutions (braço tecnológico da gigante do petróleo) e a PetroCanada, além de recursos do governo canadense.

Uma planta de demonstração consome apenas 30 toneladas de biomassa e tem capacidade de produção de 1 milhão de galões/ano. Uma planta economicamente viável deveria consumir 1.500 toneladas de biomassa/dia e ter capacidade de produção em torno de 45 milhões de galões/ano.

Segundo especialistas, há vantagens e desvantagens em cada uma das duas rotas tecnológicas de hidrólise. O processo químico, de hidrólise ácida, tem a vantagem de envolver uma tecnologia mais conhecida, mas apresenta a desvantagem de (por usar um ácido como “catalisador”) envolver dificuldades de controle de modo a evitar reações paralelas indesejáveis. Na hidrólise enzimática, um processo que contempla subsídios da biotecnologia moderna, a quebra da molécula de celulose/hemicelulose é feita por enzimas; ou seja, por uma molécula biológica, que promove reações em meio específico, com a máxima eficiência, mas de forma mais lenta e mais propensa a bloqueios e inibições.

Essa última envolve maior complexidade por requerer conhecimentos de áreas pertinentes à biotecnologia moderna, engenharia genética e pesquisa biológica fundamental, construídas sobre os avanços da chamada revolução da biologia molecular, para o desenvolvimento da enzima. Mas essas novas técnicas abrem perspectivas e potencialidades para a química do etanol, da mesma forma como vêm revolucionando indústrias como a farmacêutica.

Embora nenhuma iniciativa tenha ainda alcançado estágio de viabilidade comercial – as barreiras são os elevados custos do complexo enzimático, a baixa taxa de conversão da celulose em açúcares, a necessidade de pré-tratamento para conseguir conversões eficientes, a tecnologia de hidrólise enzimática apresenta grande potencial em virtude de características como a especificidade da reação, ausência de reações secundárias (que levariam à perda de rendimento), ausência da formação de produtos secundários (inibidores da fermentação alcoólica) e reação em condições suaves que não requerem altas pressões e temperaturas ou ambientes corrosivos para os equipamentos.

A decisão de usar um ou outro processo de hidrólise depende também do tipo de material lignocelulósico empregado. Na hidrólise da hemicelulose (que ocorre em condições mais brandas do que no caso da celulose), a estratégia tem sido a utilização de ácido sulfúrico diluído. No caso da celulose, como a hidrólise química requer condições de alta severidade (elevadas temperaturas, grandes tempos de exposição e altas concentrações de ácido), pela maior resistência ao ataque hidrolítico, o uso da hidrólise enzimática seria mais indicado (pela ausência de condições severas). Tal estratégia tecnológica difere da concepção de processos antigos em que se buscava a hidrólise química conjunta da celulose e da hemicelulose, pois são polissacarídeos com diferentes suscetibilidades ao ataque hidrolítico.

As apostas norte-americanas e européia no etanol lignocelulósico têm recaído no desenvolvimento dos processos de hidrólise enzimática, enquanto no Brasil o interesse das empresas parece mais voltado para a hidrólise ácida – ainda que muita pesquisa acadêmica seja realizada nas duas áreas. No Brasil, duas iniciativas são frequentemente mencionadas: o projeto Dedini Hidrólise Rápida (DHR) e, mais recentemente, a iniciativa da Oxiteno S.A.

A primeira iniciativa brasileira envolve um tradicional fabricante de equipamentos para o setor sucroalcooleiro que em parceria com o CTC, a FAPESP e um produtor de açúcar e álcool, que ao longo de 20 anos desenvolveu tecnologia de hidrólise, com patentes depositadas e instalação de uma unidade de demonstração da tecnologia (em operação desde

2004, com capacidade de 5 mil litros/dia, a partir de 50 t/dia de biomassa lignocelulósica da cana). Para alcançar o rendimento e a rentabilidade adequados, a unidade industrial apresenta capacidade dez vezes maior porém requer aperfeiçoamentos na otimização energética e no desenvolvimento de equipamentos, periféricos, automação e sistemas de segurança, a serem desenvolvidos nos próximos anos, a fim de possibilitar o desenvolvimento de um “pacote” de tecnologia/equipamento a ser entregue na mão do cliente. A segunda iniciativa, mais recente, envolve uma empresa petroquímica que está buscando parcerias para não apenas desenvolver plenamente a tecnologia de hidrólise ácida (da biomassa proveniente do bagaço e palha da cana), mas a implantação efetiva de uma biorefinaria e o desenvolvimento de processo de hidrogenólise para substituição de fonte de matéria-prima de produto da nafta pelo etanol.

A Tabela 5 resume as principais características dos processos de hidrólise ácida e enzimática. Os dois processos são atualmente conhecidos, mas apresentam rendimentos ainda ruins, investimentos elevados e ainda sem viabilidade econômica.

**TABELA 5 – Hidrólise Ácida e Enzimática de Biomassa Lignocelulósica para produção de Etanol.**

<b>Hidrólise Ácida e Enzimática de Biomassa Lignocelulósica para Produção de Etanol</b>	
<b>HIDRÓLISE ÁCIDA</b>	<b>HIDRÓLISE ENZIMÁTICA</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quebra da celulose/hemicelulose por adição de ácido (sulfúrico) O ácido precisa ser muito controlado para evitar reações paralelas indesejáveis</li> <li>• Tecnologia mais simples (base científica conhecida)</li> <li>• Prazo mais curto para desenvolvimento da tecnologia</li> <li>• Em tese, menores riscos, mas menor retorno</li> <li>• Desafio em termos de inovação está centrado no desenvolvimento de equipamentos (com base em materiais mais resistentes à corrosão)</li> <li>• Foco de empresas brasileiras (Dedini e Oxiteno)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quebra da celulose/hemicelulose por enzimas Necessidade de manipulação genética de microrganismos para produção de enzimas capazes de reduzir etapas e, conseqüentemente, custos do processo.</li> <li>• Tecnologia mais complexa (bases científicas da biotecnologia moderna, menos conhecidas)</li> <li>• Prazo mais longo para desenvolvimento da tecnologia</li> <li>• Possivelmente, maiores riscos, mas também maior retorno</li> <li>• Desafio centrado no desenvolvimento de enzimas a custo competitivo</li> <li>• Foco de empresas e programas de governo dos Estados Unidos e da União Européia (Programa de Biomassa do US DoE e projetos prioritários do Programa de Biomassa da União Européia)</li> </ul>

**Fonte:** Bastos D., Valéria *Etanol, Alcoolquímica e Biorrefinaria*, p.29 – 2006.

Especialistas brasileiros acreditam na possibilidade de um modelo diferente para o Brasil, em relação a outros países, justificado pelo fato de a matéria-prima (proveniente do resíduo da cana, o bagaço) estar quase pronta para entrar em hidrólise (foi passada por faca de corte e desfibradores, quando da moagem da cana, que já reduziram o tamanho das

moléculas). O setor sucroalcooleiro gera aproximadamente 120 milhões de toneladas de bagaço de cana excedente e 76 milhões de toneladas de palha, cuja utilização permitiria decuplicar a produção brasileira de etanol. O desperdício de material celulósico corresponde a dois terços da área plantada da cana (o bagaço e a palha são hoje usados na geração de energia, queimados ou deixados no campo) e, atualmente, apenas um terço da biomassa contida na planta é aproveitado para produção de etanol ou açúcar. Consideram, ademais, que o diferencial brasileiro estaria na integração existente dentro da própria usina – integração da produção, facilitando emissão de efluentes, energia e processos, e logística para distribuição interna e externa, como estocagem, transporte e escoamento.

Isso permite atender ao requisito de substancial balanço energético positivo, o que não ocorre hoje, por exemplo, com o milho, que não é auto-energético e exige o uso de combustível fóssil na produção de etanol. No etanol da cana, o resíduo da produção é transformado em energia empregada na própria produção, dispensando energia fóssil. Com efeito, essa vantagem específica da cana em termos energéticos frente a outras fontes de matérias-primas para o etanol deve contribuir para a definição de um modelo específico para o Brasil.

Por fim, conforme analisado em CGEE (2005), além dos processos de hidrólise comentados, as pesquisas em etanol têm sido orientadas, também, para uma terceira tecnologia, o processo de sacarificação e fermentação alcoólica simultânea (SSF), que combina em uma só etapa a hidrólise enzimática e a fermentação alcoólica dos açúcares. O foco principal é o desenvolvimento de leveduras termotolerantes, com base no melhoramento genético de linhagens de *Saccharomyces* e *Kluyveromyces* e por meio do emprego da celulase do *Trichoderma reesei*. Os resultados alcançados são ainda modestos, com rendimentos e produtividade baixos, em especial por exigir pré-tratamento do material lignocelulósico, não apresentando perspectivas concretas no curto prazo.

Fonte: Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo –ÚNICA.

### **3.4.3. Outros derivados do bagaço**

- Polpa química para papel: obtém-se mediante ao processo de cocção ou deslignificação e posteriormente de branqueamento através de reativos químicos como hidróxido de sódio. São usados para fabricação de diferentes tipos de papel de imprensa e de escrever.

- Polpa absorvente: consiste numa pasta de celulose de uma folha ou lâmina de grosso calibre e baixa densidade. Comercialmente é empregada na produção de fraldas descartáveis, fraldas para adultos com problemas de incontinência urinária, artigos de uso feminino e outros produtos sanitários.
- Papel de jornal: resultantes da mistura da polpa quimiomecânica de bagaço em tanque com aditivos químicos já prontos. Possui um uso versátil na produção de meios de comunicação como jornais, revistas, livros baratos, cadernos, folhetos de baixa qualidade e outros materiais.
- Celulose microcristalina: é um produto de elevada pureza química, provido a partir de plantas fibrosas, possuindo propriedades que o tornam muito adequado em diferentes indústrias, como a de cremes, cosméticos e detergentes .
- Tabuleiros de partículas de bagaço: elaborado em forma de painéis a partir de partículas de bagaço unidas organicamente com certas condições de temperatura e pressão. Atualmente a indústria de móveis é a maior consumidora de tabuleiros de partículas no mundo.
- Polpa quimiomecânica de bagaço:
- Produtos moldados de bagaço: são elementos com partículas de materiais lignocelulósicos aglomerados, com colas orgânicas prensadas em calor, em moldes de diferentes formas. Podem ser produzidas armações para rádios, televisores e gravadores, mobílias, assentos, mesas, portas de armário, etc.
- Bagacilho hidrolisado: obtido mediante o tratamento com vapor do bagacilho, com o objetivo de aumentar a digestibilidade até 60%, para seu emprego como alimento animal.

Fonte: Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo –ÚNICA.

### **3.5. Impactos ambientais na geração de energia elétrica com o bagaço de cana**

Impacto ambiental é "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem a saúde, a segurança e o bem estar da

população, as atividades sociais e econômicas, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade ambiental” (Resolução CONAMA 001/86).

Na geração termelétrica com bagaço de cana, a poluição atmosférica é a principal decorrência ambiental da queima do bagaço, embora outras formas de poluição possam estar presentes, tal como os efluentes líquidos da limpeza dos gases de combustão.

É importante destacar que o impacto ambiental na geração de energia pode se dar em três níveis, a saber: local, regional e global.

A poluição local é a primeira a ser sentida pela população local, pois prejudica a qualidade do ar no local do empreendimento, devido às emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), bem como à emissão de particulados originários da combustão do bagaço na caldeira.

A poluição regional é aquela que se desloca para outros locais além do local onde o poluente está sendo emitido, pois os mesmos são arrastados pelos ventos. Decorre daí as chuvas ácidas e a formação de ozônio, que comprometem a qualidade do ar na região.

Já a poluição global é aquela na qual a atmosfera é afetada pelos gases causadores do efeito estufa e, por isso, não importa de qual região do planeta venham as emissões, elas prejudicam a atmosfera de maneira global.

O uso do bagaço e a palha da cana para geração de eletricidade não contribui para a poluição global, pois as emissões de carbono decorrentes do uso do bagaço não contribuem para o efeito estufa, desde que sua utilização seja acompanhada de equivalente reposição de matéria prima, pois o processo de fotossíntese retira da atmosfera a quantidade correspondente de carbono liberada na combustão, além da ausência de enxofre na composição da biomassa, não emitindo SOx na combustão.

Já o material particulado emitido pelas chaminés das caldeiras provoca impacto local. O material particulado refere-se às cinzas formadas durante o processo de combustão do bagaço nas caldeiras, que são arrastadas pelo fluxo de gases para a chaminé e lançadas para a atmosfera. Esse particulado afeta o meio ambiente pelos efeitos causados pela sua deposição nos bens imóveis, no sistema respiratório de pessoas e animais, em plantas e vegetais, na sua ação sobre a visibilidade atmosférica e nas instalações elétricas.

Os óxidos de nitrogênio (NOx) são formados durante o processo de combustão do bagaço na caldeira, dependendo da temperatura, da forma de combustão e do tipo das caldeiras, e são os grandes responsáveis pelos impactos regionais, prejudicando a qualidade

do ar. O NO<sub>x</sub> deriva do nitrogênio existente no combustível e do ar utilizado para a combustão e em altas concentrações, o NO<sub>x</sub> ataca as vias respiratórias. Além disso, o NO<sub>x</sub>, em presença de luz solar, provoca formação de ozônio troposférico (O<sub>3</sub>), que é o ozônio presente na atmosfera, prejudicando a qualidade do ar.

As altas concentrações de ozônio na atmosfera são hoje uma preocupação para os órgãos ambientais do estado de São Paulo (CETESB, 2000). O ozônio é um poluente formado na atmosfera através da reação entre compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, NO<sub>x</sub>. Por não ser emitido diretamente das fontes, o controle de ozônio é complexo, uma vez que deve ser feito através de programas de redução de seus formadores, tal como o NO<sub>x</sub>. Assim, é necessária a adoção de ações de controle de emissões de NO<sub>x</sub> para que se possa reverter o quadro atual. Essas ações são necessárias porque a legislação brasileira para fontes estacionárias de combustão, elaborada pelo CONAMA (Resolução n° 008 de 06/12/90), define limites de emissão apenas para SO<sub>x</sub> e particulados, não havendo limitações para o NO<sub>x</sub>.

Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

### **3.6. Aspectos econômicos**

Na produção de derivados, o bagaço foi considerado tradicionalmente o substituto do petróleo, não só pelos aspectos ambientais como principalmente os econômicos. Matéria-prima para obtenção de inúmeros produtos, a possibilidade de obter bagaço em excesso nas usinas tornou-se uma alternativa atraente para a indústria dos derivados, com o objetivo de dispor da matéria-prima, a um menor custo. Isso pode ser conseguido, melhorando a eficiência energética da indústria, mediante a instalação de equipamentos com melhores eficiências e dispondo de material sobrando em até 40%. Nesse caso, o custo do bagaço diminuirá apreciavelmente, pois somente haveria que considerar os custos de manipulação e de transporte e, por conseguinte, diminuiria o custo de fabricação dos derivados.

Porém, deve-se ter em conta os volumes de bagaço de cada produção, pois, se uma não é capaz de fornecer o bagaço sobrando requerido, é necessário trazê-lo de outras usinas, e então, dependendo das quantidades e da distância, os custos de transporte podem aumentar, eliminando a vantagem econômica que representa o seu emprego.

Com relação à geração de energia elétrica, as vantagens somente apresentam significado prático a partir de uma análise do ponto de vista, do co-gerador, da concessionária ou da sociedade. Em alguns casos existe outra parte interessada, os investidores, que podem

associar-se aos co-geradores e que apresentam pontos de vista muito semelhantes em termos econômicos.

Entretanto, para a concessionária de energia elétrica nem sempre um projeto de co-geração apresenta interesse, já que corresponde a uma redução de seu mercado, a não ser que este seja demandante, e eventualmente, imposições de caráter normativo para a interconexão e intercâmbio de energia com um auto-produtor. Ainda assim, muitas vezes é possível identificar-se vantagens econômicas associadas à co-geração para concessionárias, por exemplo em função da postergação de investimentos em capacidade e melhoras na confiabilidade, na coordenação das atividades de e no fator de carga.

Para a execução de um projeto de co-geração dessa magnitude, são determinantes os aspectos econômicos do ponto de vista do auto-produtor, pois é quem em definitivo empreende a atividade. Neste sentido, para o estudo de casos específicos, os procedimentos usualmente adotados são a determinação dos indicadores convencionais de viabilidade, como o valor presente e taxa interna de retorno e, em alguns casos, a determinação do custo do kWh co-gerado. Neste sentido, em uma análise econômica, trata-se inicialmente dos custos de capital em sistemas de co-geração, e, em seguida, das relações para estudo de viabilidade, ao nível de co-gerador para estes sistemas, concluindo com uma discussão sobre a determinação dos custos do kWh co-gerado.

Para a obtenção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica, as iniciativas nacionais contemplam o desenvolvimento de novas tecnologias, mas dentro de um enfoque e de uma estratégia própria decorrente da especificidade da cana em termos de custos e balanço energético positivo.

A busca em tornar o etanol de cana ainda mais competitivo agrega-se a possibilidade do aumento da produção sem precisar aumentar, na mesma proporção, a área plantada de cana-de-açúcar. Estudos atuais financiados pelo governo federal apontam que uma destilaria que produz hoje um milhão de litros de etanol por dia do caldo da cana poderia inicialmente, com a tecnologia de hidrólise, gerar um adicional de 150 mil litros de etanol do bagaço. Em 2025, com a técnica aperfeiçoada, a mesma produção poderia ter um acréscimo de 400 mil litros provenientes do bagaço recuperado.

Porém não é somente o aumento da produção de etanol, sem aumentar a área de cana-de-açúcar plantada a tecnologia precisa reduzir custos a ponto de compensar a mudança do uso, já eficiente, que se faz hoje do bagaço de cana, baseado na queima para gerar eletricidade.

Para chegar a um processo economicamente viável, há dois gargalos que necessitam ser superados. O primeiro deles tem a ver com o pré-tratamento do bagaço e da palha, na qual há necessidade de rápida decomposição. Um segundo gargalo tem a ver com os catalisadores usados para decompor a celulose, pois no caso da hidrólise ácida, é preciso melhorar a eficiência do processo, que não permite um controle tão preciso da quebra das ligações químicas, porque enquanto o ácido sulfúrico destrói parte do açúcar formado, o ácido clorídrico, mais eficiente, tem um problema ligado à corrosividade, exigindo ligas de metal de custos elevados para a fabricação e manutenção dos equipamentos.

Já no caso do processo de hidrólise enzimática, o entrave é o custo das enzimas, além da quantidade delas necessárias para provocar o desdobramento da celulose em glicose. Um dos desafios dos pesquisadores é encontrar microrganismos capazes de produzir enzimas mais produtivas a um menor custo, para tentar viabilizar o processo de obtenção de bioetanol a partir do material lignocelulósico.

Fonte: UDOP, "*Biblioteca Virtual*".

## **4. PALHA**

A presença das colheitadeiras nos canaviais está se tornando cada vez mais forte nos, até porque, pelo menos em São Paulo, a legislação ambiental definiu um cronograma para que, em médio prazo, a queima antes da colheita seja uma prática completamente abolida.

Um dos resultados diretos desta nova realidade é o grande volume de palha, as folhas de cana que eram queimadas e agora ficam sobre o campo após a colheita. Ou seja, já estão sendo “produzidas”, graças à não queima, cerca de 8 milhões de toneladas de palha verde atualmente, considerando-se que a cada tonelada de cana colhida sobram 140 quilos de palha. O que fazer com o novo resíduo vem sendo objeto de muitos estudos e experiências em um setor que, nos últimos anos, destacou-se pela capacidade de transformar restos em subprodutos valorizados. E em vários aspectos se verifica que o maior volume de palha pode ser uma solução a mais, podendo tanto ser aproveitado para aumentar a produção de energia, como contribuir para o rendimento agrícola e a proteção do solo.

Com um teor calorífico ainda maior do que o do bagaço, a palha poderia ser um acréscimo bem-vindo como combustível nas caldeiras das usinas. Atualmente, usando só o bagaço, a maior parte das usinas consegue produzir, com o vapor das caldeiras, energia suficiente para acionar todo seu processo industrial, e ainda eletricidade excedente para vender.

### **4.1. Composição da palha**

A palha da cana, constituída pela bainha e pelas folhas secas, tem uma estrutura muito diferente da do palmito. A composição da palha é muito, parecida com a do bagaço, à exceção de que a primeira não contém açúcares possui uma umidade natural inferior a do bagaço.

Para os fins de alimentação animal, a palha com as bainhas constitui a fração menos assimilável, mas é a mais atraente do ponto de vista de utilização energética.

Em qualquer opção, a sua eficiência pode ser aumentada por meio de pré-tratamentos mecânicos adequados, com o fim de reduzir o tamanho das partículas e facilitar a sua manipulação.

O emprego da palha para a produção de energia, pelas suas vantagens com recurso renovável, tem sido sempre uma preocupação de pesquisadores e especialistas e constitui um

tema latente de pesquisas. A utilização de resíduos como combustível é aplicada atualmente em vários países, embora ainda seja de forma isolada.

Para o processamento mecânico dos resíduos da colheita, estão sendo empregados com determinado sucesso, equipamentos originalmente utilizados na colheita de forragens, tais com ceifeiras e empacotadoras, com leves modificações, que podem ser colocadas com caráter estacionário nas próprias estações de limpeza a seco.

A intensidade do tratamento mecânico, fundamentalmente o que se à redução granulométrica, depende, em grande medida, do uso que se vai dar aos resíduos, acrescentando mais nos casos em que sejam destinados à alimentação animal. Com o fim de incrementar o valor natural destes resíduos, pode ser implementada a sua classificação em frações (secas e verdes, de acordo com o uso) e oferecer consequentemente um adequado tratamento físico ou químico, além de misturá-los com outros produtos para incrementar o seu valor nutricional.

Um aspecto importante que se deve ter em conta nos países produtores de cana-de-açúcar e com deficiência na obtenção de massa verde para a alimentação animal consiste em que se pode obter por essa via, em plena etapa de seca, grandes quantidades de matéria verde capaz de ser assimilada pelo gado e evitar a depauperação do mesmo, nesse período.

Uma opção economicamente atraente é a utilização da palha da cana para a obtenção de um substrato na cultura de cogumelos e, no fim do processo, contar com uma forragem beneficiada e enriquecida para o gado. Para essa opção são particularmente importantes as frações secas, nas quais são mais moderados os processos fermentativos, que poderiam concorrer com a cultura que se inocula na massa vegetal. De fato, entende-se com caráter imprescindível o envelhecimento do substrato antes de ser incorporado à produção, o que se consegue com técnicas de armazenamento controlado.

## **4.2. Utilização da palha**

Não é apenas em seu uso energético que a palha vem sendo estudada. Os efeitos agronômicos da permanência das folhas da cana no solo têm sido um dos objetos de pesquisas no centro da CTC. Um estudo feito no ano 2000 levantou os principais benefícios e problemas resultantes da manutenção da palha como cobertura verde. Entre os efeitos benéficos estariam a proteção da superfície do terreno contra a ação erosiva de chuvas e ventos, a redução da variação térmica do solo, já que a palha impede a incidência direta dos raios

solares, o incentivo ao aumento da atividade biológica na terra, a maior disponibilidade de água para a cultura devido à redução da evaporação e o controle de plantas daninhas, o que possibilitaria reduzir ou eliminar o uso de herbicidas, entre outros benefícios.

De acordo com estudos do CTC, a determinação da quantidade de palha que proporciona o melhor controle sobre as plantas daninhas é importante, “até para poder liberar melhor o excedente para ser utilizado na co-geração de energia elétrica”. Verificou-se nos ensaios feitos, por exemplo, que quantidades de palha entre 7,5 e 9 toneladas por hectare de matéria seca, quando uniformemente distribuídas sobre o solo, controlaram eficazmente as espécies anuais de plantas daninhas. Por outro lado, a incidência da praga da cigarrinha é um impedimento para o uso da cobertura com palha em áreas com clima mais ameno.

Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

## **5. PROJETO EFICIENTE DE COGERAÇÃO – O CASO DA UTE PIONEIROS**

Para ilustrar um projeto eficiente de cogeração de energia, é utilizado o caso da Unidade Termelétrica da Usina Pioneiros (UTE Pioneiros), localizada no município de Sud Mennucci (SP), que iniciou sua operação comercial em maio de 2006. É considerado o projeto mais eficiente de todo o setor sucroalcooleiro, devido ao aproveitamento de forma eficiente do vapor produzido.

Outro ponto de destaque é que este projeto foi o primeiro do Brasil a operar com o acionamento de preparo e moagem de cana-de-açúcar totalmente eletrificada.

Os principais sistemas que compõem a configuração da UTE Pioneiros são: uma linha de transmissão de 138 kV, subestação elevatória 13,8/138 kV, um conjunto de turbos geradores e caldeira. Além dos sistemas principais da UTE, também se destacam o sistema eletrificado de moagem da cana-de-açúcar e a distribuição de energia elétrica da usina, abrangendo outros setores ligados a produção de açúcar e álcool.

### **5.1. Linha de transmissão de 138 kV**

A linha de transmissão da UTE Pioneiros promove sua conexão com o sistema interligado nacional. Possui uma extensão de aproximadamente 21 km, sendo sua energia transmitida em tensão de 138 kV, com uma conexão do tipo derivação em tap simples na Linha de Transmissão Ilha Solteira – Jales, através de uma chave seccionadora manual, de abertura centralizada. Esta linha é composta de 46 estruturas metálicas e 47 estruturas de concreto. O seu traçado é relativamente simples, passando em sua grande maioria por terrenos planos, sem impactos ambientais, com alguns cruzamentos com rede de distribuição básica de 13,8 kV, cruzamentos com rodovias (SP 310) e também cruzamento com duas linhas de transmissão 440 kV. Apesar da linha tronco ser em circuito duplo, o ramal da UTE é em circuito simples. Porém, as estruturas já estão preparadas para circuito duplo. Futuramente, será ampliada sua cogeração, sendo necessário apenas o lançamento do segundo circuito para atender as necessidades.

A linha de transmissão Ilha Solteira – Jales 138 kV, e as subestações conectadas nela, sofreram, a inclusão da UTE Vale do Paraná e aguardam as ampliações da geração de termelétricas a biomassa de cana (UTE Pioneiros I e UTE Interlagos), o que pode causar uma série de problemas de instabilidades do sistema. O plano de expansão da concessionária

proprietária desta Linha Transmissão Ilha Solteira – Jales recapitou a mesma a partir de janeiro de 2008.

## **5.2. Subestação 13,8/138 kV da UTE**

A UTE possui um *bay de entrada da Subestação elevatória de 13,8/138 kV*, composta dos seguintes equipamentos: conjunto de para-raios entrada, chave seccionadora com lâmina terra, disjuntor principal 138 kV SF6, conjunto de TP e TC 138 kV, transformador de força 1x25/31,25 MVA, sistema de medição e sistema de proteção composto por um conjunto de relés (proteção de linha principal e retaguarda, proteção sobre corrente e proteção diferencial do transformador).

O projeto de expansão da geração da UTE prevê a instalação de um segundo bay, com as mesmas características. Para entrada em operação comercial, foi assinado o “Acordo Operativo” entre a UTE Pioneiros (proprietária SE 138 kV), Elektro (concessionária de distribuição energia) e CTEEP (proprietária da Linha de Transmissão Ilha Solteira-Jales). Neste “Acordo Operativo”, foram descritos todos os procedimentos de operação normais e de emergência na subestação e linha de transmissão e também as tratativas entre as partes, quando ocorrer algum tipo de intervenção no sistema, com a finalidade de garantir a segurança operativa do pessoal, equipamentos e instalações envolvidas.

Fonte: UDOP, “*Biblioteca Virtual*”.

## **5.3. Turbogeneradores**

A UTE possui licença de instalação para 64 MW de potência, sendo que, atualmente, possui instalado 42 MW, divididos em um turbogerador de 32 MW e outro turbogerador 10 MW. As principais diferenças entre os turbogeradores estão na concepção da turbina, ou seja, tem-se uma turbina de alta eficiência, com extração controlada e condensação, acionando um gerador de 32 MW, e outra turbina, de 10 MW de contrapressão, acionando um gerador de 10 MW. As principais características dos conjuntos turbogeradores podem ser verificadas na Tabela 6.

**TABELA 6** – Características de Turbogeneradores

<b>CARACTERÍSTICAS DE TURBOGERADORES</b>			
<b>TURBINA A VAPOR</b>	<b>TG 01</b>	<b>TG 02</b>	<b>Unidade</b>
Fabricante	Siemens/Alstom	TGM	
Modelo	VE32	TM 15000	
Sistema de condensação	sim	não	
Potencia Bomes Gerador*	32400	12100	KW
Pressão Vapor Entrada	70	70	kgf/cm2
Temperatura Vapor	530	530	°C
Vazão vapor de entrada	128000	67500	kg/h
Consumo específico	4,5	5,67	kg/kWh
<b>GERADOR ELÉTRICO</b>	<b>TG 01</b>	<b>TG 02</b>	<b>Unidade</b>
Fabricante	Alstom	WEG	
Potencia Nominal	40000	12500	kVA
Numero de Polos	4	4	
Tensão Nominal	13800	13800	V
Frequência Nominal	60	60	Hz
Corrente Nominal	1673	523	A
Fator de Potencia	0,8	0,8	
Tipo de Excitação	brushless	brushless	
Contrato de venda de energia	PROINFA	não	

\*potencia considerada no ponto de operação

**Fonte:** Dados coletados em pesquisa de campo na própria usina.

Complementando o conjunto de turbogeneradores, existem os painéis de manobra dos geradores, proteção e excitação, painéis de surto e neutro, painel de acionamento da turbina, painel de sincronismo e painel de exportação, além do sistema auxiliar que comporta um gerador a diesel, sistema de retificador e banco de baterias, sistema de óleo e refrigeração. Todos os sistemas mencionados anteriormente estão automatizados. O sistema de controle destes turbogeneradores é formado por equipamentos que trabalham de forma coordenada utilizando a filosofia mestre escravo.

O primeiro equipamento deste sistema de controle é um conversor que recebe impulsos elétricos e o transforma em pressão de óleo para abertura da válvula de admissão do vapor. Outro conversor atua no controle da válvula de extração do vapor de escape. Este conversor recebe sinal proveniente do regulador de velocidade da turbina, que tem a função de controle, responsável pela sincronização do gerador na barra. A partir daí, todo o controle do gerador é feito neste equipamento que, ao receber um comando de aumento de energia ativa, emite um sinal para o regulador da turbina que, por sua vez, atua no conversor que, ao atuar na válvula de admissão, aumenta a entrada de vapor na máquina.

#### **5.4. Caldeiras**

Para funcionamento da UTE, foi instalada uma caldeira de alta eficiência com alta pressão e temperatura, do tipo aquatubular, com dois balões, capacidade máxima de produção de vapor de 150 T/h, a uma pressão de 70 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de 530°C. A temperatura da água de alimentação da caldeira é de 105 °C. A temperatura de saída dos gases de combustão é de 180 °C, sendo que os mesmos, antes de serem liberados para atmosferas, passam por um lavador de gases, com o objetivo de reter o material particulado. Esta caldeira encontra-se, atualmente, no seu limite máximo de regime de trabalho. Ou seja, quando for instalado outro turbogerador, deverá ser instalada também outra caldeira. Assim como no caso dos turbogeradores, uma série de sistemas auxiliares faz parte do sistema de geração de vapor, como esteiras metálicas para transporte do combustível (bagaço), sistema de alimentação de água, sistema de desmineralização de água, etc.

#### **5.5. Eletrificação da moenda**

O processo de acionamento elétrico da moenda da UTE foi instalado em fevereiro de 2006, sendo iniciada sua operação em abril do mesmo ano. O sistema de moagem da cana-de-açúcar na Usina Pioneiros foi o primeiro a operar totalmente eletrificado, desde o preparo da cana (picador nivelador, picador e desfibrador), até a moagem (1º ao 6º ternos). Ao substituir o acionamento convencional a vapor por acionamento elétrico, obtém-se um ganho no potencial de exportação de energia, devido ao aumento da eficiência no acionamento da moenda, além da utilização do vapor em turbinas de alta eficiência.

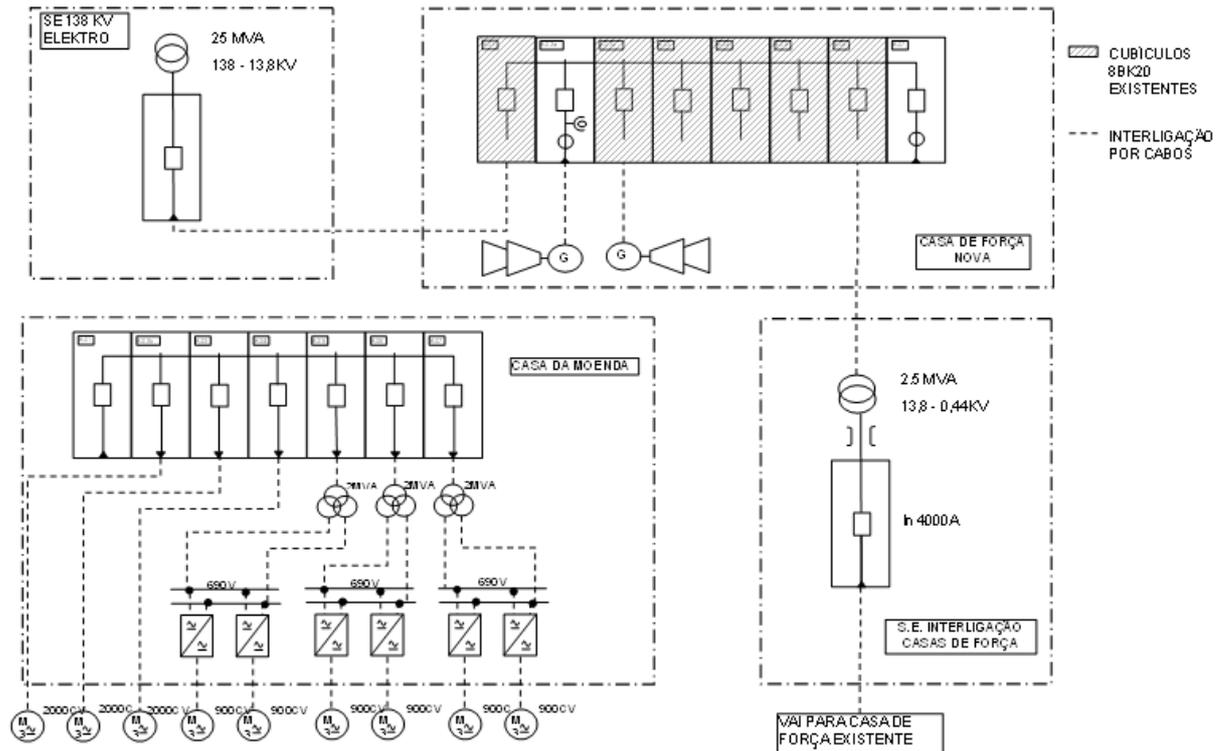
Este aumento, de aproximadamente 23%, elevou o montante da energia gerada, de 81.125 MWh/ano (previsto em contrato PROINFA) para aproximadamente 100.000 MWh/ano.

A filosofia adotada neste projeto de eletrificação do sistema de moagem de cana foi à instalação de motores de media tensão (13,8 kV) para o preparo de cana, com sistema de acionamento realizado a partir de partida direta. O acionamento dos ternos é feito de forma única, centralizada, sendo provido de um motor elétrico, cujo acionamento é realizado por inversores de frequência, com uma tensão de saída de 690 V, operando de forma individualizada.

## 5.6. Distribuição interna e energia – circuito de 13,8 kV

Com a implantação da UTE e a possibilidade de geração em níveis de tensão mais elevados, toda a distribuição interna de energia, que antes era feita em baixa tensão (440 V), foi substituída por uma distribuição em média tensão (13,8 kV). Com isso, os centros de comandos de motores (CCM's) transformaram-se em verdadeiras subestações unitárias de energia, sendo composto, basicamente, de um painel de proteção/seccionamento, transformadores e o próprio CCM. Na usina, têm-se, instaladas, as subestações unitárias da caldeira, os serviços auxiliares da casa de força, o sistema de refrigeração a água (spray), a fábrica de açúcar, o preparo de caldo/fermentação e a moenda. Cada uma destas subestações unitárias é energizada por um alimentador exclusivo, que tem origem no barramento principal da casa de força. Além das subestações unitárias, existe também um alimentador que energiza uma rede primária de distribuição interna, que interliga os pontos mais distantes da usina, como captação de água e os prédios administrativos e de apoio. Na Figura 2, é ilustrado o diagrama unifilar simplificado da distribuição interna da UTE.

**FIGURA 2** – Diagrama Unifilar integrado da UTE – Pioneiros



Fonte: Figura demonstrativa obtida na própria usina.

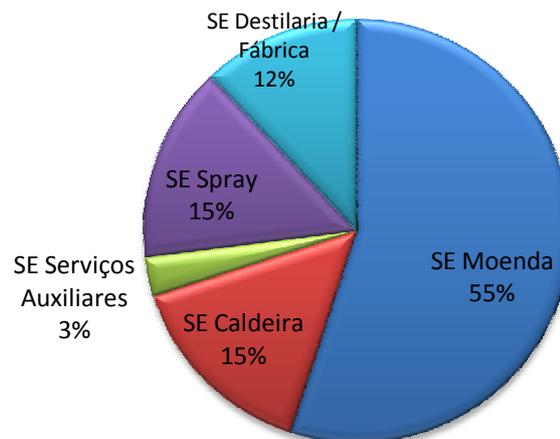
## 5.7. Consumo de energia da UTE

No projeto da UTE, também foi instalado um sistema de gerenciamento de energia e controle de demanda. Este sistema é capaz de quantificar o montante de energia consumida pelos principais processos da usina, servindo também para identificar a evolução do consumo de energia de cada um deles. Através dos dados armazenados neste sistema, foi levantados o perfil de geração e consumo nos dois primeiros anos de operação da UTE.

Segundo pode-se analisar, no período compreendendo de setembro de 2006 a novembro de 2007, o volume total de energia gerada pelos dois turbogeradores foi de aproximadamente 226.000 MWh, sendo que 65.500 MWh corresponderam ao consumo total do processo durante este período. Ou seja, aproximadamente 29% do total gerado são consumidos internamente e o restante, 160.500MWh, estaria disponível para ser exportado atendendo ao contrato PROINFA (turbogerador 32 MW). Como se pode perceber, pela variação na energia produzida ao longo dos meses, é difícil que uma usina termelétrica a bagaço de cana mantenha sua geração constante durante o período de safra, como alguns agentes de distribuição gostariam que fosse, pois o processo de geração está atrelado a outro processo de produção, estando sujeito a diversos tipos de problemas, como quebra de equipamentos, falta de matéria prima devido às chuvas, variações no mix de produção de açúcar e álcool, problemas de conexão, etc.

Devido a sua característica sazonal, a geração em usinas termelétricas a biomassa de cana possui seu potencial máximo de geração nos meses de junho a outubro, ou seja, no período seco, época em que os reservatórios de água das usinas hidrelétrica estão em seus níveis mais baixos.

Portanto, seria muito interessante uma complementação das fontes renováveis de PCH's e termelétricas durante o ano, despachando a geração de PCH's durante o período úmido (quando as termelétricas a biomassa estarão no período da entre safra na região centro-sul). Do perfil de consumo medido pode-se verificar que, a partir da eletrificação do processo de preparo e moagem, este passou a ser o setor de maior consumo na usina, seguido dos setores de caldeira, spray e destilaria/fábrica de açúcar. O gráfico 2 mostra o percentual correspondente de consumo de cada setor da usina.



**Gráfico 2** – Perfil de consumo dividido percentualmente entre os setores da usina

**Fonte:** Dados coletados em pesquisa de campo na própria usina.

A partir das medições verificadas, e conhecendo o perfil de consumo e sua representatividade no montante total, é possível ainda obter uma redução de consumo interno com alguns investimentos que proporcionem um aumento na eficiência e produtividade do projeto. O primeiro deles, e o principal, é o investimento na redução do consumo de vapor interno do processo. Outros investimentos poderiam ser feitos também como a substituição dos motores industriais antigos e de baixa eficiência por motores novos e mais eficientes, comercialmente conhecidos como motores de alto rendimento, além de investimentos que insiram a variação de velocidade no controle de vazão e pressão.

Fonte: Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo –ÚNICA.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou alguns aspectos dos subprodutos do bagaço da cana-de-açúcar e o setor bioenergético, e assim conclui-se que o crescimento desse setor pode ser viável, desde que existam políticas adequadas. Se levarmos em consideração as vantagens estratégicas, ambientais e sociais deste tipo de obtenção de bioenergia, conclui-se que é de extrema importância a implementação de políticas adequadas que viabilizem os processos de cogeração de energia elétrica e bioetanol, a partir da biomassa, em larga escala. São verificadas ainda inúmeras barreiras institucionais (legislação inadequada, comportamento do setor elétrico e certificação de qualidade do etanol), barreiras econômicas (acertos quanto à tarifa, viabilização da venda de excedentes, incentivos a pesquisa de novas tecnologias e incentivos a um estoque regulador nacional do etanol) que impedem a execução desse programa no país.

No caso do setor elétrico, este atravessou momentos delicados no início da década. Em 2001, ocorreu um racionamento de eletricidade, e mais uma vez colocou-se em questão a matriz energética brasileira, dando um impulso a cogeração a partir de bagaço de cana, inclusive com financiamentos específicos e vantajosos. Em 2009, o país atravessou um período de aparente abundância de eletricidade, uma vez que foram introduzidos novos hábitos de consumo, o aumento da utilização de equipamentos mais eficientes com menores consumos, desde lâmpadas mais eficientes até eletrodomésticos e motores industriais, além de alguns projetos de termoelétricas, após o grande “apagão” elétrico do país.

Ocorre que esse aparente excesso de energia é temporário, pois na medida em que ocorre a retomada do crescimento econômico, tal como anunciada atualmente pelo fim da grande crise financeira de 2008, na qual retardou o ritmo de crescimento acelerado que o mundo atravessava, esse excesso de energia será logo absorvido, pois muitas obras do setor elétrico apesar de estarem em andamento através do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) são constantemente paradas pelos mais diversos motivos, desde manifestações indígenas como até ambientais ou administrativas nos novos investimentos como as usinas de Belo Monte/Pará e Madeira/Roraima. O PAC exige um acréscimo de 12,3 mil MW de energia na rede nacional, uma alternativa para que o país não acabe voltando à situação anterior de falta de eletricidade, seria a recuperação e repotencialização das usinas com mais de 20 anos de operação, na qual estudos já realizados pela Universidade de São Paulo constataram um acréscimo em 8 mil MW somente com essas atualizações tecnológicos nas usinas existentes, sendo uma alternativa muito mais rápida e mais barata economicamente para esse aumento de oferta de energia elétrica.

Para o setor bioenergético, a opção estratégica de usar um resíduo de seu processo de fabricação de açúcar e etanol, produzindo-se energia excedente e obter uma nova fonte de receita é perfeitamente viável, nos dias de hoje com as atuais tecnologias desenvolvidas e melhorias tecnológicas dos processos de fabricação. Ocorre que a co-geração de energia a partir de bagaço e da palha de cana continua a enfrentar muitas barreiras.

A falta de legislação específica para esse setor ainda impõe uma série de dificuldades ao empreendedor. Um dos problemas hoje é a falta dos procedimentos para a distribuição. Não existem regras que estabeleçam as condições para o acesso à rede pelos produtores independentes, e cada concessionária faz sua própria regra, impondo condições ao empreendedor, sem que ele tenha condições de discutir essas regras. Assim, quando não há definição por parte dos agentes reguladores de condições mínimas para essas conexões, as concessionárias acabam possuindo um poder restritivo, podendo dificultar o acesso à sua rede, se assim o desejar.

O licenciamento ambiental é essencial para o interesse público e para o equilíbrio ecológico, mas seu aspecto burocrático não pode se tornar um obstáculo para a viabilização de empreendimentos necessários ao desenvolvimento do país. Por outro lado, não se pode abrir mão do rigor técnico nas análises ambientais somente para que a avaliação de alguns projetos possa ser agilizada. A questão ambiental não pode ser minimizada. Entretanto, não é uma tarefa fácil a busca deste equilíbrio. Progressos estão sendo feitos nesta área, com a simplificação de alguns processos necessários ao licenciamento, e criação de grupos de trabalho para normatizar a questão de emissão de poluentes.

Os projetos em andamento para obter etanol da biomassa lignocelulósica somam-se a outros conduzidos nos últimos anos, por universidades, institutos de pesquisa e empresas, que resultaram em um grande avanço tecnológico para o setor, porém ainda com tímidos resultados para escala comercial dos processos, tanto pela via hidrolisada ácida, como para a via hidrolisada enzimática.

Nesse novo panorama de consolidação do etanol, emerge como aspectos centrais das ações de empresas e de políticas públicas, a oportunidade de debates sobre a ampliação do aproveitamento da produção de biocombustíveis, produtos bioquímicos e bioenergia, nesse contexto a ênfase dos governos apresenta indicar um caminho sem volta.

Cabe lembrar, também, que o etanol brasileiro de cana-de-açúcar não tem sido somente objeto de um crescente interesse de investidores internacionais e do mercado de capitais, como

abrindo perspectivas promissoras de captação de recursos via emissão de valores mobiliários, além da possibilidade de captação de recursos por meio da comercialização de créditos de carbono, mas também pelas expressivas vantagens comparativas de custo de produção, sendo de 30% a 50% inferior ao custo do etanol do milho (norte-americano) e três quartos do etanol de beterraba (europeu), podendo ofertar um grande percentual desse produto para o mundo.

Para finalizarmos são importante que sejam definidas políticas energéticas direcionadas para projetos que proporcionem maiores benefícios globais ao país, integrando-se aos objetivos de maior eficiência bioenergética, de redução de perdas e de custos, de elevação dos níveis de competitividade da indústria brasileira bioenergética, de estímulo à participação de um número crescente de novos empreendedores e investidores e de incentivo à geração de maiores oportunidades de negócios e empregos. Assim, o país pode continuar a crescer, de forma sustentada.

## Referências

ALBUQUERQUE, L.C., “*Manual dos Derivados da Cana-de-açúcar*”, Instituto Cubano de Pesquisa dos Derivados da Cana-de-Açúcar Ed. ABIPTI, p.474, 1999.

BASTOS, Valéria D. “*Etanol, Alcoolquímica e Biorrefinarias*” Departamento de Economia do BNDES, BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 25, p. 5-8 mar. 2007. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Tipo/BNDES\\_Setorial/200703\\_3.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Tipo/BNDES_Setorial/200703_3.html)>. Acesso em 21.08.2009.

BIOTECH BRASIL, Álcool de Celulose: Biotecnologia Agrícola <<http://www.biotechbrasil.bio.br/2007/04/03/alcool-de-celulose>>, publicado em 3 de Abril de 2007. Acesso em 10.09.2009.

CGEE. “*Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo*”. Relatório final, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE-Nipe/Unicamp, dezembro de 2005.

INOVAÇÃO UNICAMP. “*Pré Tratamento e Hidrólise*”. 30.01.2007. III Workshop Tecnológico sobre Hidrólise para produção de etanol. Disponível em: <[http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/docs-IIIworkshop\\_hidrolise.php](http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/docs-IIIworkshop_hidrolise.php)>. Acesso em: 13.07.2009.

INOVAÇÃO UNICAMP. “*Viabilidade comercial da produção de etanol de celulose passa por engenharia de organismos*”; 4.9.2006. Disponível em: <<http://www.inovacao.unicamp.br/report/le-etanol-techreview.html>>. Acesso em: 9.9.2009.

MARTINES-FILHO, João, BURNQUIST, Beatriz L., VIAN, Carlos E. F. “*Bioenergy and the rise of sugarcane-based ethanol in Brazil*”. Choices, 21 (2), 2nd quarter 2006 (publicação da American Agricultural Economic Association). Disponível em: <[www.choicesmagazine.org](http://www.choicesmagazine.org)>. Acesso em 20/06/2009.

MILANEZ, Artur Y.; FILHO, Paulo S.C.F.; ROSA, Sérgio E.S. da “*Perspectivas para o etanol brasileiro*” Departamento de Biocombustíveis da Área Industrial do BNDES, BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 27, p. 21-38, mar. 2008. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta\\_Expressa/Setor/Complexo\\_Quimico/200803\\_3.html](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Complexo_Quimico/200803_3.html)>. Acesso em 08.08.2009

NILE – New Improvements for Lignocellulosic Ethanol. <<http://www.nile-bioethanol.org/>>.

ROCHA, G.J.M. “*Deslignificação de bagaço de cana de açúcar assistida por oxigênio*”. Campinas: Instituto de Química de São Carlos-USP, 2000, 136p. Tese (Doutorado).

RODRIGUES, Fábio de Ávila, “*Avaliação da tecnologia de hidrólise ácida de bagaço de Cana*” Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2007 p.13-25. Tese Mestrado.

SMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, “*Licenciamento Ambiental de Usinas Termelétricas e Padrões de Emissão de NOX em São Paulo e no Brasil*”, Grupo de Trabalho sobre NOX, Coordenadora: Suani Teixeira Coelho, São Paulo, SMA, 2004.

SOUSA, Eduardo L.; MACEDO, Isaias C. “*Etanol e Eletricidade - A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética*”, Publicação União da Agroindústria Canavieira de São Paulo - UNICA, p. 7 - 43, out. 2009. Disponível em: <[www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica](http://www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica)>, Acesso em 13.12.2009.

UDOP, “*Biblioteca Virtual*”, <<http://www.udop.com.br>>, Acesso em 22.06.2009.

União da Agroindústria Canavieira, “*Única em ação*”, <<http://www.portalunica.com.br/acao/cana.jsp>>, Acesso em 22.06.2009.

## **ANEXOS**

**ANEXO A** Dados Comparativos Bagaço vs. Palha de Cana de Açúcar

**ANEXO B** Relação Kgf de Palha / Kgf de Bagaço para geração da mesma “Energia”

## ANEXO A

## DADOS COMPARATIVOS BAGAÇO VS. PALHA DE CANA DE AÇÚCAR

	Umidade	Poder Calorífico	Densidade (solto)	Densidade (transportado)
	%	Kcal / Kgf	Kgf / m <sup>3</sup>	Kgf / m <sup>3</sup>
<b>Bagaço</b>	50	1700	125 a 150	250
<b>Palha</b>	15	3100	50 a 70	100

## ANEXO B

### **Relação Kgf de PALHA / Kgf de BAGAÇO para geração da mesma “energia”**

Podemos escrever que com 1,0 Kgf de palha geramos 3100 Kcal.

Então para se gerar essa mesma energia, que quantia precisamos queimar de bagaço?

Pode-se escrever:

$$3100 \cdot 1,0 = Q \cdot 1700$$

$$Q = 1,82 \text{ Kgf de bagaço}$$

Portanto a relação é:

$$R = 1 / 1,82 = 0,55 \text{ Kgf de palha por Kgf de bagaço}$$

Com a relação acima se pode prever a quantidade a ser transportada em função das densidades indicadas na tabela. Há de se considerar que a densidade bem menor da palha transportada em relação ao bagaço, implicará em uma maior quantidade de viagens para se “gerar” uma mesma quantidade de energia.