

**PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ENGENHARIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA**  
**GERAÇÃO**

São Paulo  
2013

**CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA**

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA  
GERAÇÃO**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação final do curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de Concentração: Energia

Orientadora: Professora Suani T. Coelho

São Paulo  
2013

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

Ficha Catalográfica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Oliveira, Carlos Eduardo

Análise energética de etanol de primeira e segunda geração. Carlos Eduardo de Oliveira; orientadora Suani T. Coelho -- São Paulo, 2013.

73 p.

Monografia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Etanol. 2. Hidrólise enzimática. 3. Eletricidade. 4. Cogeração. 5. Biomassa. I. Coelho, Suani T. II. Título. III. Título: Análise energética de etanol de primeira e segunda geração.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: OLIVEIRA, Carlos Eduardo

Título: Análise energética de etanol de primeira e segunda geração.

Monografia apresentada ao Curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética do Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aprovada em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José R. Simões

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo      Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Patrícia Matai

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo      Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Suani T. Coelho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo      Assinatura: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa **Renata C. V. de Oliveira** e minha filha **Maria Eduarda C. V. de Oliveira**, pela compreensão às minhas ausências nos finais de semana e noites dedicadas durante todo o curso.

Ao engenheiro **Celso Procknor** pela indicação do tema, pelo incentivo ao estudo e por todas orientações durante a fase preliminar do trabalho.

À engenheira **Érika Rapacci Peloso** pela parceria durante todo o curso e pela participação ativa nas discussões e simulações deste trabalho.

Ao engenheiro **Marcelo Severi** e toda equipe da **TGM Turbinas** pelo material gentilmente cedido e por todas discussões técnicas que permitiram elevar o nível deste trabalho.

Ao engenheiro **Sérgio Luiz Ferreira**, especialmente, pela ajuda, pelas discussões sobre o tema e principalmente por toda orientação e ajuda na obtenção de fontes de dados para pesquisa. Sem sua ajuda, não seria possível obter os resultados encontrados.

À minha orientadora **Suani Teixeira**, por acreditar em minha capacidade e por contribuir de forma incisiva no resultado final deste trabalho.

Ao prof. **Dr. José R. Simões** pela atenção constante, pela luta em elevar o nível do curso e do aprendizado, e pela excelente abordagem sobre os princípios da Termodinâmica no início do curso.

A toda equipe do **PECE**, colaboradores e professores, pela organização do curso e qualidade no atendimento prestado durante toda sua duração.

## RESUMO

OLIVEIRA, C.E., **Análise energética de etanol de primeira e segunda geração**. 2013. 73p. Monografia – Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

O objetivo deste trabalho é avaliar a inclusão da produção de etanol celulósico - o etanol de segunda geração ou etanol 2G - em usinas que produzem etanol e eletricidade a partir de cana-de-açúcar. Para o propósito deste trabalho, como uma linha de base, foi utilizado o perfil de produção e processo mais comum de uma destilaria de etanol, como as usinas de processamento de cana recentemente implementadas ou propostas na região centro-sul do Brasil, com a produção de eletricidade com bagaço excedente e palha adicional. A linha de base considera a palha adicional proveniente do campo, a partir da cana colhida mecanicamente e sem queimar, e as eficiências tecnológicas atuais e consistentes com a realidade tecnológica das plantas de processamento de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. A produção de etanol 2G leva em conta apenas o processamento de hexoses, o que é considerado tecnicamente viável no momento presente. A inserção da produção de etanol 2G em usinas de processamento de cana deve promover uma competição entre os atuais subprodutos bagaço e palha como matéria-prima para a produção de energia elétrica e / ou etanol. Como a produção de etanol e energia elétrica em usinas de cana-de-açúcar têm caráter renovável e compete diretamente na matriz energética com os combustíveis fósseis e não renováveis, os resultados das produções de etanol e energia elétrica, bem como suas comparações, foram convertidos em toneladas de petróleo equivalente, a fim de avaliar o potencial de substituir os combustíveis fósseis no energético brasileiro por energia renovável.

Palavras-chave: Etanol. Hidrólise enzimática. Eletricidade. Cogeração. Biomassa.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, C.E., **Analysis of ethanol energy of first and second generation**. 2013. 73p. Monograph – Specializing in Renewable Energy, Distributed Generation and Energy Efficiency – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013

The objective of this work is to evaluate the inclusion of cellulosic ethanol production - second generation ethanol or 2G ethanol - in mills that already produce ethanol and electricity from sugar cane. For the purpose of this work, as a baseline, we used the production profile and most common process of an ethanol distillery, as the sugarcane processing plants recently implemented or proposed in the region south-central Brazil, with electricity production using the bagasse surplus and the additional straw available. The baseline adopted here considers the additional straw from the field, from the green cane harvested mechanically, and the current technological efficiencies corresponding to the current situation of the sugarcane mills in Central-South Brazil. The production of 2G ethanol takes into account only the hexoses processing, which is considered technically feasible nowadays. The insertion of 2G ethanol production in sugarcane mills will promote a competition between current byproducts bagasse and straw as raw material to produce electricity and/or ethanol. As the production of ethanol and electricity in sugar cane mills can be considered renewable and competes directly in the energy matrix with fossil fuels, which are and non-renewable, the results obtained for the ethanol/ electricity productions, as well as the corresponding comparisons, were converted into tonnes of oil equivalent (toe), in order to evaluate the potential to replace fossil fuels by renewable energy in the Brazilian energy matrix.

Keywords: Ethanol. Enzymatic hydrolysis. Electricity. Cogeneration. Biomass.

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 – Crescimento da oferta de energia primária no Brasil.....                               | 27 |
| Tabela 3.2 – Produção de etanol anidro e hidratado no Brasil.....                                   | 28 |
| Tabela 4.1 – Composição calculada do bagaço de cana .....                                           | 31 |
| Tabela 5.1 – Base de dados para estudo comparativo .....                                            | 38 |
| Tabela 5.2 – Dados para balanço de massa.....                                                       | 50 |
| Tabela 5.3 – Geração e exportação de energia elétrica - 67 bar / 520°C .....                        | 54 |
| Tabela 5.4 – Geração e exportação de energia elétrica - 87 bar / 520°C .....                        | 54 |
| Tabela 5.5 – Geração e exportação de energia elétrica - 100 bar / 540°C .....                       | 54 |
| Tabela 5.6 – Comparação do incremento do excedente de energia elétrica.....                         | 55 |
| Tabela 5.7 – Fatores de conversão para energia.....                                                 | 56 |
| Tabela 5.8 – Coeficientes de equivalência médios para combustíveis líquidos .....                   | 56 |
| Tabela 5.9 – Capacidade energética total da usina avaliada. ....                                    | 57 |
| Tabela 5.10 – Capacidade de exportação de energia da usina avaliada.....                            | 57 |
| Tabela 6.1 – Conversões adotadas para produção d etanol 2G.....                                     | 58 |
| Tabela 6.2 – Cálculo de biomassa disponível .....                                                   | 60 |
| Tabela 6.3 – Produção de etanol 2G.....                                                             | 60 |
| Tabela 6.4 – Cálculos para consumo de vapor .....                                                   | 62 |
| Tabela 6.5 – Demanda elétrica .....                                                                 | 62 |
| Tabela 6.6 – Comparação do incremento do excedente de energia elétrica no caso<br>da hidrólise..... | 63 |
| Tabela 6.7 – Resumo da produção do caso hidrólise.....                                              | 64 |
| Tabela 6.8 – Capacidade energética total da usina – caso hidrólise.....                             | 64 |
| Tabela 6.9 – Capacidade de exportação de energia total da usina – caso hidrólise                    | 64 |
| Tabela 7.1 – Avaliação de receitas totais por safra.....                                            | 69 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Concentração da cultura de cana-de-açúcar no Brasil.....                                                  | 16 |
| Figura 3.1 – Área cultivada e expansão potencial da cana-de-açúcar no Brasil .....                                     | 18 |
| Figura 3.2 – Configuração energética típica de usina de cana-de-açúcar .....                                           | 19 |
| Figura 3.3 – Configuração energética recente de usina de cana-de-açúcar .....                                          | 20 |
| Figura 3.4 – Diferença de conceito entre unidade consumidora e unidade<br>cogeradora.....                              | 21 |
| Figura 3.5 – Faixas médias de razão potência / calor em ciclos térmicos.....                                           | 22 |
| Figura 3.6 – Exportação de energia elétrica para rede pelas usinas.....                                                | 23 |
| Figura 3.7 – Quantidade de usinas em operação e construção no Centro-Sul do<br>Brasil .....                            | 25 |
| Figura 3.8 – Produtividade agrícola (Tonelada de cana / hectare) no Centro-Sul do<br>Brasil .....                      | 26 |
| Figura 3.9 – Produtividade agrícola (tonelada de cana / hectare) x Produção de<br>Etanol no Centro-Sul do Brasil ..... | 26 |
| Figura 3.10 – Consumo final de energia no Brasil - 2011 .....                                                          | 29 |
| Figura 4.1 – Arranjo típico da parede celular vegetal.....                                                             | 32 |
| Figura 4.2 – Representação da cadeia linear da celulose formada por várias<br>unidades consecutivas de celobiose ..... | 32 |
| Figura 4.3 – Açúcares que compõe as unidades de hemicelulose.....                                                      | 33 |
| Figura 4.4 – Precursores primários da lignina.....                                                                     | 34 |
| Figura 4.5 – Efeito do pré-tratamento sobre a estrutura do material lignocelulósico                                    | 35 |
| Figura 5.1 – Esquema simplificado de caldeira para biomassa.....                                                       | 40 |
| Figura 5.2 – Esquema simplificado de caldeira de grelha rotativa para bagaço de<br>cana. ....                          | 41 |
| Figura 5.3 – Esquema simplificado de caldeira de leito fluidizado borbulhante.....                                     | 42 |
| Figura 5.4 – Maquete 3D de turbina de contrapressão de alta pressão.....                                               | 43 |
| Figura 5.5 – Maquete 3D de turbina de condensação.....                                                                 | 44 |
| Figura 5.6 – Aumento do trabalho em um ciclo Rankine, obtido com o aumento da<br>pressão da caldeira. ....             | 45 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.7 – Processamento de cana em destilaria autônoma com a inserção da hidrólise enzimática..... | 49 |
| Figura 7.1 – Comparação de energia total .....                                                        | 65 |
| Figura 7.2 – Ccomparação de energia exportada. ....                                                   | 66 |
| Figura 7.3 – Comparação de energia equivalente - tep.....                                             | 66 |
| Figura 7.4 – Comparação da produção de etanol. ....                                                   | 67 |
| Figura 7.5 – Comparação de energia elétrica exportada MWh. ....                                       | 67 |

## SUMÁRIO

|           |                                                                        |           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                 | <b>12</b> |
| <b>2.</b> | <b>SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL .....</b>                                | <b>15</b> |
| <b>3.</b> | <b>SITUAÇÃO ATUAL DA COGERAÇÃO COM BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....</b> | <b>17</b> |
| <b>4.</b> | <b>HIDRÓLISE ENZIMÁTICA.....</b>                                       | <b>30</b> |
| 4.1       | COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA....              | 30        |
| 4.1.1     | <b>Celulose.....</b>                                                   | <b>32</b> |
| 4.1.2     | <b>Hemicelulose.....</b>                                               | <b>33</b> |
| 4.1.3     | <b>Lignina.....</b>                                                    | <b>34</b> |
| 4.2       | ASPECTOS GERAIS DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA .....                          | 34        |
| <b>5.</b> | <b>APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....</b>                            | <b>37</b> |
| 5.1       | GERAÇÃO TERMELÉTRICA UTILIZANDO BAGAÇO DE CANA .....                   | 38        |
| 5.1.1     | <b>Caldeiras para biomassa.....</b>                                    | <b>39</b> |
| 5.1.2     | <b>Turbinas de contrapressão.....</b>                                  | <b>42</b> |
| 5.1.3     | <b>Turbinas de condensação.....</b>                                    | <b>43</b> |
| 5.2       | MÁXIMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....                                | 44        |
| 5.3       | MÁXIMA PRODUÇÃO DE ETANOL .....                                        | 46        |
| 5.4       | A INSERÇÃO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA NA FABRICAÇÃO DE ETANOL .....       | 46        |
| 5.5       | CASO BASE - MÁXIMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....                   | 49        |
| 5.5.1     | <b>Cálculo do combustível para queima .....</b>                        | <b>50</b> |
| 5.6       | CÁLCULO DO MÁXIMO ETANOL HIDRATADO - 1ª GERAÇÃO .....                  | 51        |
| 5.7       | CÁLCULO DA MÁXIMA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....                   | 52        |
| 5.8       | CAPACIDADE ENERGÉTICA TOTAL - CASO BASE .....                          | 55        |
| <b>6.</b> | <b>CASO HIDRÓLISE ENZIMÁTICA .....</b>                                 | <b>58</b> |
| 6.1       | CÁLCULO DO ETANOL HIDRATADO - 1ª GERAÇÃO .....                         | 58        |
| 6.2       | CÁLCULO DO COMBUSTÍVEL DISPONÍVEL PARA QUEIMA .....                    | 59        |

|           |                                              |           |
|-----------|----------------------------------------------|-----------|
| 6.3       | ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ETANOL 2G .....    | 60        |
| 6.4       | CONSUMO DE VAPOR .....                       | 61        |
| 6.5       | DEMANDA ELÉTRICA .....                       | 62        |
| 6.6       | GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....            | 63        |
| 6.7       | RESUMO DE PRODUÇÃO DO CASO HIDRÓLISE .....   | 63        |
| <b>7.</b> | <b>COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES FINAIS .....</b> | <b>65</b> |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>      | <b>71</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o *apagão* elétrico sofrido pelo Brasil no ano 2000, o tema eletricidade está em evidência nos meios de comunicação. Aumentando a concentração de atenção no consumo energético do país, veio também o advento do carro *flex*, no ano de 2003, provocando um novo impulso à produção de etanol no Brasil, fato este que não ocorria desde o extinto ProAlcool nos anos 70. O tema energia sempre vem à tona nos momentos de crise, por ser um bem essencial ao funcionamento de qualquer sociedade no mundo, seja para necessidades básicas como iluminação, cocção e aquecimento de água, por exemplo, até as mais complexas como transportes e produção industrial.

Em função do constante aumento da demanda de energia no mundo, a necessidade de aumento da produção sempre esteve concentrada em recursos não renováveis, estando o petróleo no centro deste cenário mundial, ou seja, a garantia de fornecimento de energia sempre foi dada pelo aumento da queima de combustíveis fósseis, expondo sempre a comunidade mundial à volatilidade do preço do petróleo.

O Brasil possui hoje a matriz energética mais limpa e baseada em recursos renováveis do mundo, o que garante uma posição de destaque e até mesmo de conforto no cenário mundial, quando avaliamos o fator custo de geração em R\$/MWh. Vale a pena ressaltar que, diferente da maioria dos países do mundo, somos privilegiados pelo fato de termos variedade e complementaridade entre as fontes energéticas, e que grande parte da geração de energia elétrica é proveniente de recursos hídricos, fato este que no passado sempre garantiu a mínima queima de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica, ajudando a diminuir o custo de geração. Atualmente, com a necessidade de evitar o déficit de eletricidade no país, a queima de combustíveis fósseis tem aumentado com a maior utilização das termelétricas, reduzindo a participação das fontes renováveis que até então caminhavam em crescimento quase constante.

A matriz energética brasileira também conta com um importante aliado em comparação a outros países do mundo que é a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. O Brasil dispõe de condições especiais em termos mundiais, tais como

área cultivável disponível, clima adequado e pleno domínio da tecnologia de produção do etanol combustível.

Desde o surgimento do carro *flex*, a demanda por etanol voltou a crescer muito no país e deu incentivo à construção de novas plantas processadoras de cana-de-açúcar. A oportunidade de integrar as usinas de cana-de-açúcar ao sistema elétrico nacional, trabalhando com o regime de exportação da energia elétrica excedente modificou a concepção destes projetos, onde anteriormente o bagaço da cana-de-açúcar era considerado unicamente como um incômodo resíduo que devia ser apenas incinerado em caldeiras de baixa eficiência, utilizando o excedente deste resíduo para finalidades como produção de ração animal e compostos celulósicos para indústria madeireira e de papelão. Os projetos de usinas de cana-de-açúcar tiveram alteração significativa em seu sistema de geração termelétrica, adotando caldeiras de alta pressão e temperatura, com melhores taxas de eficiência, além de instalar novas turbinas com alta eficiência. O setor desde então, vem trabalhando com vigor na eletrificação de suas plantas, fato este que garante maior eficiência no aproveitamento do combustível utilizado, no caso, o bagaço da cana-de-açúcar. Esta mudança de panorama nacional alterou completamente a utilização do bagaço, que antes era tratado como resíduo de difícil administração e logística, para um combustível relativamente barato para geração termelétrica e de disponibilidade simultânea com a produção açúcar e etanol. A possibilidade de gerar energia excedente e exportar para o sistema elétrico nacional desencadeou a implantação de projetos mais econômicos no consumo de vapor de processo de produção do açúcar e etanol, gerando mais bagaço excedente por tonelada de cana processada, fato este que propiciou a utilização ciclos de condensação utilizando o bagaço excedente como combustível, até então nunca utilizados em uma usina de cana-de-açúcar no Brasil. A utilização destes ciclos térmicos nas usinas então despertou a necessidade de eletrificação das plantas e criou projetos que priorizaram desde então a máxima eficiência elétrica das plantas. A análise proposta neste trabalho irá comparar um novo cenário do setor sucroenergético, com a possibilidade de produção do etanol celulósico a partir do bagaço excedente. Os números encontrados após os estudos irão possibilitar a avaliação da competitividade econômica e industrial entre uma planta projetada para a máxima eficiência elétrica e uma planta projetada para a máxima eficiência térmica, com o intuito de mínimo

consumo de combustível para geração de vapor, utilizando o excedente para produção de etanol. De forma geral, poderemos comparar quanto conseguimos produzir de energia total (elétrica + térmica + etanol) em cada uma das situações avaliadas.

As premissas adotadas para elaboração do estudo comparativo são:

- Capacidade de processamento de cana: 2.500.000 t / ano.
- Fibra da cana: 13%
- POL da cana: 13%
- Impureza vegetal: 8%
- Impureza mineral: 1%
- Palha adicional trazida do campo: 5%
- Aproveitamento industrial: 85%
- Calendário de safra: 200 dias efetivos

Os valores adotados acima são frutos de várias análises em estudos e projetos de clientes da Procknor Engenharia LTDA, que é uma empresa dedicada à elaboração e a implantação de projetos industriais, e ao desenvolvimento de equipamentos e de processos para a indústria da cana-de-açúcar, seja para produção de açúcar, de etanol ou para a geração de energia elétrica a partir de biomassa (<http://www.procknor.com.br>).

Os números utilizados como premissas acima, provêm de avaliações de usinas já operantes no Centro-Sul do Brasil e implantadas no período de 2005 a 2011, localizadas principalmente no sul de Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, e no noroeste do estado de São Paulo, e condizem com a realidade tecnológica de usinas novas e com boas condições de modernização, operação e manutenção.

## 2. SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

A sustentabilidade ambiental é um tema tratado em praticamente todos os assuntos abordados hoje em dia. Desde a produção de alimentos até a produção de bens de consumo, este tema percorre discussões em todo o mundo. Após muitos anos de exploração dos recursos naturais sem preocupações específicas com os impactos que a atividade humana causaria ao meio ambiente, as últimas duas décadas marcaram a história por uma conscientização aparentemente global sobre os efeitos nocivos da atividade humana e da piora expressiva em itens como qualidade do ar e da água, aquecimento global, além do uso inadvertido de recursos naturais não renováveis.

Quando se aborda o tema sustentabilidade ambiental, tópicos polêmicos sempre são discutidos como, por exemplo, a competição de espaço nas terras agricultáveis entre a produção de alimentos ou de matéria-prima para produção de combustíveis. No Brasil, este tema chamou mais a atenção da mídia durante o início da nova expansão da fronteira agrícola da cana-de-açúcar durante os anos de 2006 e 2007, onde chegou-se a cogitar que o cultivo da cana-de-açúcar para a produção de etanol iria aumentar significativamente o custo dos alimentos no Brasil, em função de uma possível diminuição de área cultivável disponível para outras culturas, como a soja, milho e trigo, dentre outras que tem sua produção concentrada no Centro-Sul do Brasil.

Na realidade, atualmente a cana tem avançado sobre novas fronteiras, com crescimento expressivo nos estados de Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás, mas não de forma a alterar o cenário produtivo de alimentos, visto que o Brasil tem quebrado quase que regularmente recordes de produção de grãos.

Além das dúvidas sobre o avanço da cana-de-açúcar sobre as áreas utilizadas para o cultivo de grãos, também existem debates a respeito de um possível avanço sobre áreas da floresta amazônica. Esta hipótese, é bastante remota, uma vez que o cultivo da cana-de-açúcar tem melhores resultados em regiões o mais próximas possíveis dos trópicos, além das dificuldades logísticas de escoamento da produção em virtude das dimensões do Brasil. Existe uma distância relativamente grande entre o centro do principal polo produtor de cana-de-açúcar e o

perímetro da região amazônica, algo em torno de 2500 km (UNICA, 2013). A Figura 2.1 ilustra a concentração do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, bem como as distâncias de suas fronteiras com a região amazônica.

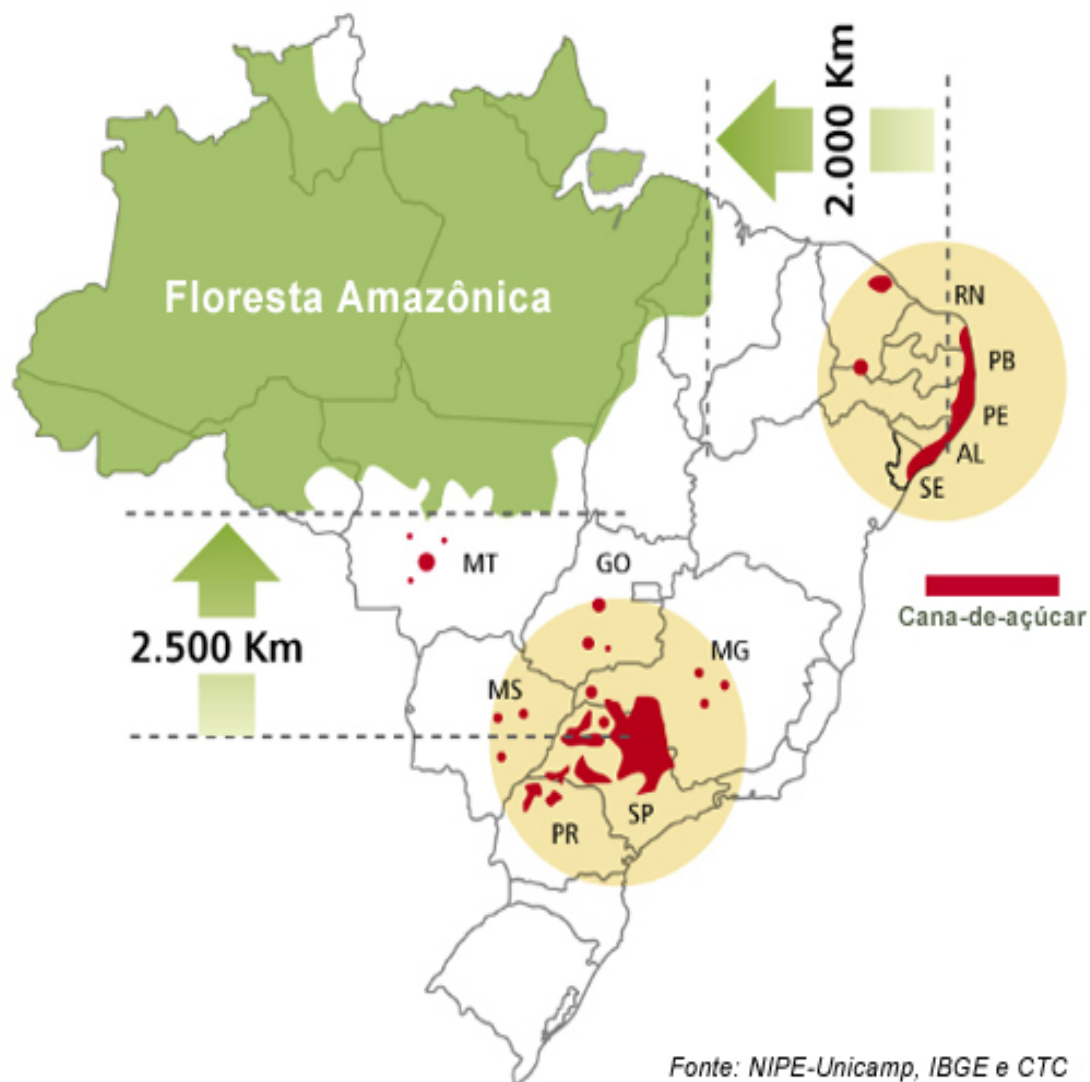


Figura 2.1 – Concentração da cultura de cana-de-açúcar no Brasil  
Fonte: NIPE-Unicamp, IBGE e CTC, 2009; citado por UNICA, 2013

### 3. SITUAÇÃO ATUAL DA COGERAÇÃO COM BIOMASSA DE CANA-DE-AÇÚCAR

O setor sucroalcooleiro no Brasil dispõe de aproximadamente 430 usinas processadoras de cana-de-açúcar, distribuídas em sua grande maioria no centro-sul do país. Comparado aos demais países do mundo que produzem cana-de-açúcar, o Brasil tem três pontos que o diferem muito dos demais:

- A maior parte da cana produzida é de propriedade das indústrias, ou com grande incentivo e controle das mesmas, e o padrão internacional ao contrário, mantém separadas as atividades industrial e agrícola. Este modelo de organização de cultivo e indústria está relacionado à grande disponibilidade de terra cultivável e a uma tradição agrária forte do país;
- A diversidade de produtos oriundos da cana-de-açúcar no Brasil, e de resíduos sólidos e líquidos, desde os tempos do império, sempre criaram um mercado singular no mundo com a divisão da destinação do caldo de cana para açúcar e etanol;
- A existência da frota de veículos *flex* com possibilidade de utilizar etanol e/ou gasolina em qualquer proporção, cria um cenário único em todo o mundo, com um mercado muito grande para a comercialização de combustíveis.

De qualquer forma, o setor é expressivo no país e possui uma dimensão atípica no mundo, e ainda apresenta muito potencial de crescimento para a produção de açúcar, etanol, energia elétrica e demais derivados da cana-de-açúcar. Apesar de ter havido expressivo crescimento nos últimos dez anos, ainda existe espaço para o crescimento da cultura de cana-de-açúcar em boa parte do país, vide Figura 3.1.

Ainda que o setor de cana-de-açúcar brasileiro tenha toda a tradição e diferenciação do restante dos produtores mundiais, ainda falta muito para avançar. Avaliando todo o parque industrial das usinas no país, a grande maioria é formada por usinas pequenas, antigas e com baixa eficiência energética. No estado de São

Paulo onde está a concentrada a maior densidade de usinas antigas do país, existem possibilidades muito grandes de melhoria das eficiências, principalmente avaliando a possibilidade de troca de caldeiras antigas e de baixa eficiência, por caldeira modernas, robustas e eficientes, além da troca de muitos acionamentos de simples estágio a vapor por motores elétricos modernos de alto rendimento. Este tipo de investimento, além de melhorar a eficiência energética da indústria, ainda permite a geração de energia elétrica excedente.



Figura 3.1 – Área cultivada e expansão potencial da cana-de-açúcar no Brasil  
Fonte: IBGE e CTC (2010)

A maioria das usinas existentes no Brasil (geralmente, usina com baixo nível de modernização), possui caldeiras de baixa pressão (21 bar), turbogeradores de contrapressão ineficientes e sem aproveitamento energético do condensado. Com este tipo de configuração, o bagaço é praticamente *incinerado* nas caldeiras, gerando apenas o vapor necessário para manter o processamento da cana na usina, e mesmo assim com baixo rendimento do ciclo térmico. A configuração tradicional da central termelétrica de uma usina existente no Centro-Sul e Nordeste, pode ser visualizada na Figura 3.2.

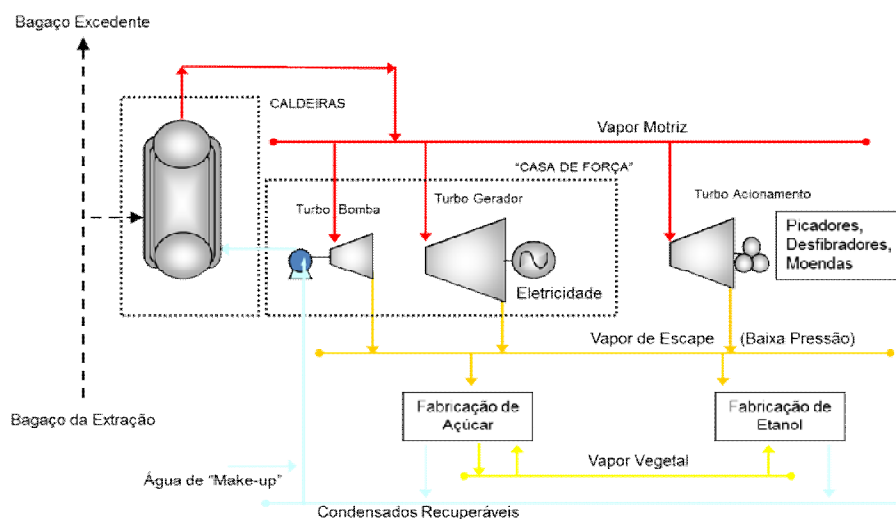


Figura 3.2 – Configuração energética típica de usina de cana-de-açúcar .  
Fonte: Oliveira, C.E. (2011)

De qualquer forma, as novas usinas construídas recentemente, apresentam configurações bem diferentes, com várias inovações tecnológicas, melhorias de processo e eficiência. As novas construções tem primado pelo bom aproveitamento da matéria-prima, focando não só na transformação em açúcar e etanol, mas também aproveitado o potencial energético da cana.

A tendência atual é que a procura por melhorias visando o máximo aproveitamento da cana-de-açúcar e de seus derivados, tais como a vinhaça, o bagaço, a palha, a torta e a água residual do processo. Isto tem se tornado possível com a adoção de novas tecnologias na indústria e com estudos na área agrícola para melhoria da matéria-prima. Dentre as tecnologias adotadas nas novas plantas, a instalação de caldeiras novas e a eletrificação dos diversos acionamentos são os pontos que fazem as usinas novas tornarem-se muito mais eficientes do ponto de vista energético. Como a exportação de energia elétrica nas novas unidades acabou transformando-se em uma importante fonte de receita para os novos empreendimentos, os estudos sobre as melhorias possíveis no ciclo de cogeração das usinas de açúcar tornou-se obrigatório. A configuração típica das novas unidades construídas desde meados de 2005 pode ser visualizada na Figura 3.3.

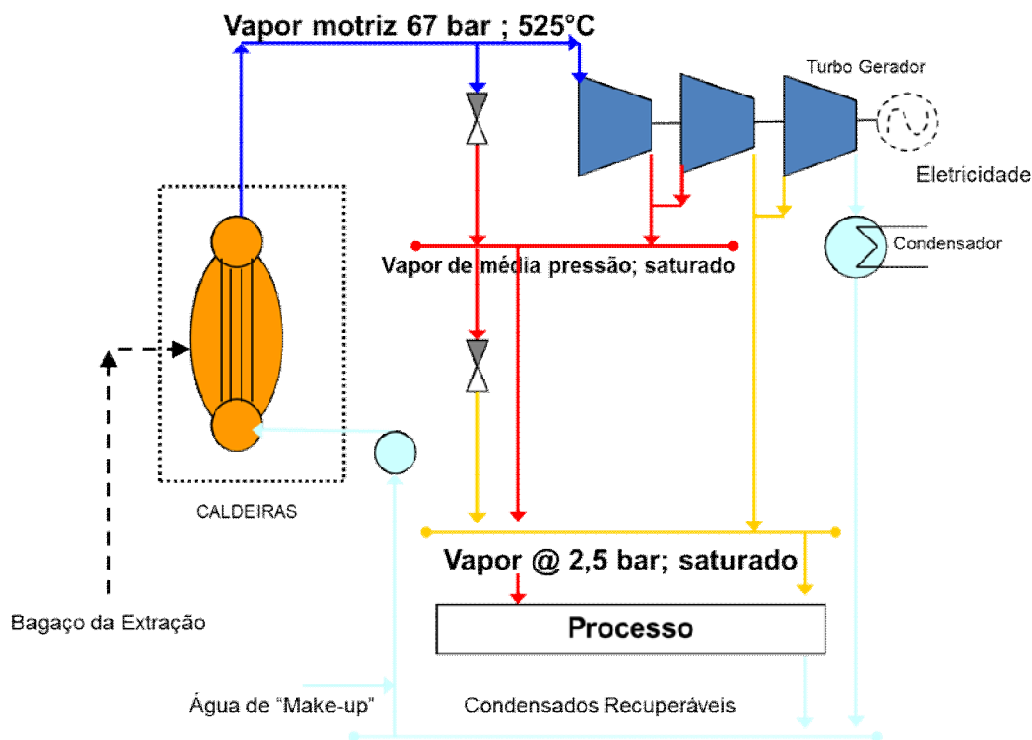


Figura 3.3 – Configuração energética recente de usina de cana-de-açúcar  
Fonte: Oliveira, C.E. (2011)

Apesar de muito se dizer na atualidade que as usinas de cana-de-açúcar, estão *cogera*do energia, vale a pena voltar aos critérios de definição de cogeração.

Cogeração é a produção combinada de energia elétrica e/ou mecânica e térmica a partir de uma única fonte primária.

Na verdade, as usinas de cana-de-açúcar sempre trabalharam em regime de cogeração de energia, pois sempre utilizaram o bagaço como fonte primária (combustível) para a produção de energia elétrica e de vapor de processo (energia térmica). A grande diferença para os dias atuais, é que antigamente as usinas eram autônomas e/ou consumidoras de energia elétrica do sistema nacional e hoje algumas continuam sendo autônomas, porém com geração de energia elétrica excedente para o sistema elétrico nacional. A diferença entre uma unidade cogeneradora e uma unidade convencional pode ser compreendida com a Figura 3.4.

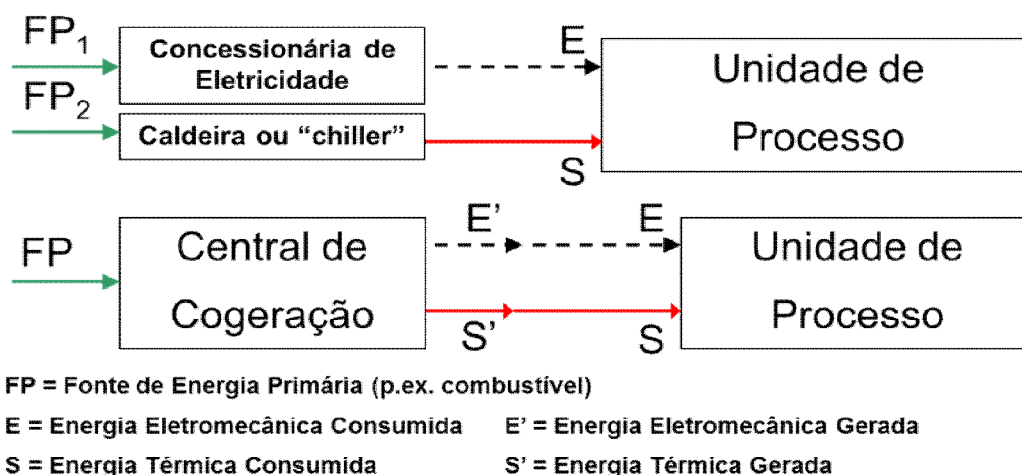
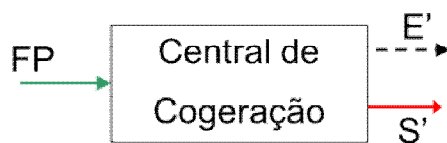


Figura 3.4 – Diferença de conceito entre unidade consumidora e unidade cogeneradora  
 Fonte: Procknor Engenharia (2008)

Dentre os ciclos termodinâmicos indicados para o processo de cogeração (ciclo a vapor, ciclo a gás, ciclo combinado e ciclo diesel), as usinas de cana-de-açúcar trabalham normalmente com o ciclo a vapor de contrapressão. Este ciclo no regime *topping* é escolhido pela razão entre a potência elétrica gerada e a potência térmica gerada ( $E' / S'$ ), onde no caso das usinas temos uma demanda de energia elétrica de aproximadamente 28 kWh/t de cana e demanda de energia térmica de 330 kWh/t de cana, o valor de  $E/S$  é igual a 0,085 (REIN, P., 2007). Ou seja, a demanda elétrica é muito menor do que a demanda térmica em uma usina de cana-de-açúcar, e isto propicia um bom aproveitamento de um ciclo de cogeração com turbinas de contrapressão e acionamentos eletrificados. A demanda térmica ainda pode ser otimizada com sistemas de regeneração de calor, aproveitando condensados, vinhaça, caldo e água, além da possibilidade de instalações de ciclos regenerativos que melhoram ainda mais a eficiência geral do ciclo. As faixas das razões de potência / calor para escolha em ciclos *topping* podem ser identificadas na Figura 3.5.



$E'$  ... potência elétrica gerada, [kW]

$S'$  ... potência térmica gerada, [kW]

| Faixas médias de razão potência / calor em ciclos térmicos - regime "topping" ( $E'/S'$ ) |             |                 |              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|--------------|
| Ciclo a Vapor                                                                             | Ciclo a Gás | Ciclo Combinado | Ciclo Diesel |
| 0,10 a 0,30 - Contrapressão                                                               | 0,30 a 0,80 | 0,60 a 1,50     | 0,80 a 2,40  |
| 0,40 a 1,5 - Condensação                                                                  |             |                 |              |

Figura 3.5 – Faixas médias de razão potência / calor em ciclos térmicos

Fonte: Procknor Engenharia (2008)

A configuração atual das centrais termelétricas, das usinas de cana-de-açúcar, difere das usinas antigas principalmente nos pontos abaixo esclarecidos:

- Unidades de cogeração cada vez mais eficientes, que são tratadas hoje como parte do processo produtivo, e com foco na geração de excedentes de energia elétrica;
- As caldeiras são novas, eficientes e automatizadas, e em alguns casos são estudadas hipóteses de utilização de caldeiras de leito fluidizado pela questão de maior eficiência (menor consumo de combustível), e também existe maior controle na emissão dos gases e particulados ao ar;
- Os acionamentos das moendas, desfibradores e outros equipamentos movidos por turbinas a vapor, foram substituídos por motores elétricos de alto rendimento;
- Existe grande preocupação das indústrias com a eficiência energética das plantas, seja na geração ou no uso da energia;
- Conexão e exportação de energia elétrica existente para o sistema elétrico interligado, o que demanda mais tecnologia de monitoramento e controle.

É evidente que ainda que o cenário nacional das usinas de cana-de-açúcar esteja em um patamar que a maioria dos técnicos do setor considera irrelevante perante o potencial existente, o avanço foi grande na última década, principalmente quando avaliada a questão do aproveitamento energético de usinas novas e de sua conexão com o sistema interligado nacional, e talvez por isto cause alguma

incerteza quando olhamos o cenário atual e não conseguimos enxergar o mesmo progresso ocorrido entre os anos de 2005 e 2010, conforme gráfico da Figura 3.6 abaixo:

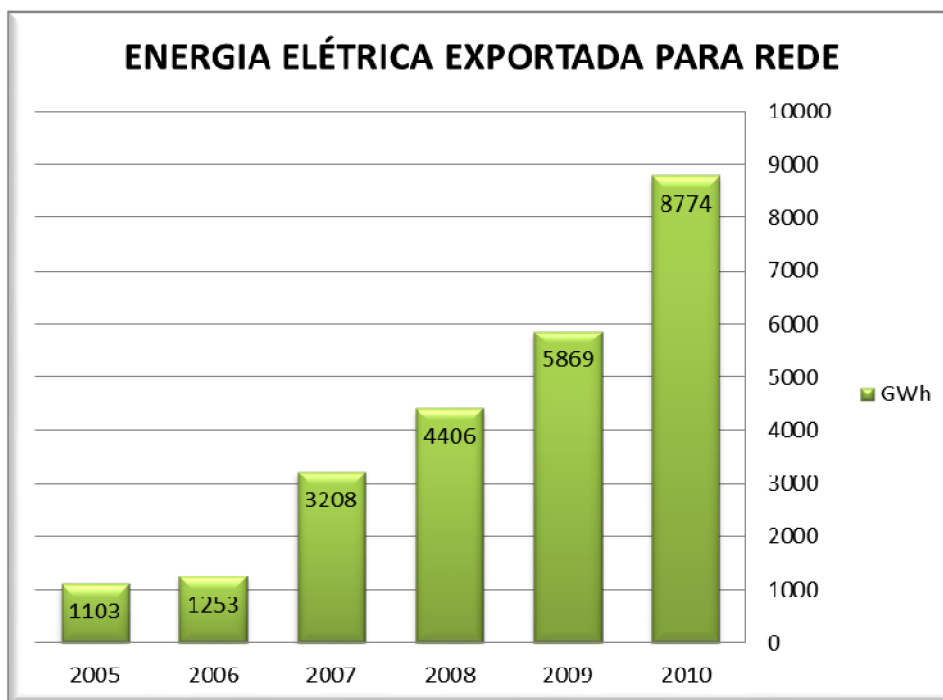


Figura 3.6 – Exportação de energia elétrica para rede pelas usinas  
Fonte: UNICA e MME (2011)

Mesmo com a crescente necessidade de aumento de oferta de energia elétrica no Brasil, o mercado brasileiro de cogeração de energia elétrica à partir de biomassa de cana-de-açúcar tem passado por um momento de dúvida e incerteza sobre a política energética que deve ser estabelecida no país para os próximos anos. As empresas deste setor vivem um dilema sobre onde, quando e quanto investir por não haver transparência nos planos de atendimento do aumento da demanda de energia elétrica, principalmente no que tange à energia renovável, como eólica, solar, pequenas centrais hidrelétricas e biomassa. Os leilões para fornecimento de energia a partir destas fontes as tornam concorrentes entre si, quando deveriam ser complementares. Em um ano como o de 2013, onde temos baixos níveis de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas (principal fonte de geração no país), podemos entender com facilidade a necessidade da criação de fontes alternativas consistentes na geração de energia elétrica no país.

Um fato que pode ser constatado nos últimos leilões de energia, é que as usinas de cana-de-açúcar tem tido muito menos competitividade no quesito preço, e também muito menos destaque no cenário nacional de energia. É notável o potencial de expansão do fornecimento de energia elétrica à partir da cana-de-açúcar, a principal fonte de biomassa hoje no país, porém mesmo com este grande potencial, o cenário de eletrificação das usinas existentes, as melhorias de performance e o efetivo fornecimento de energia elétrica à rede ainda não é o que se espera do setor, que neste momento ainda carece de mais investimentos, crédito e principalmente estudos sobre desoneração fiscal do etanol combustível.

As usinas brasileiras passam por um período de transição importante na gestão do agronegócio. O setor sucroalcooleiro sempre foi dominado por empresas familiares e de capital privado, caracterizado por diversas empresas autônomas, com baixa capacidade financeira e sem foco de expansão do setor como uma alternativa nacional de diversificação da matriz energética brasileira. Desde aproximadamente os anos de 2002 e 2003, o setor foi tomado por uma nova onda de investimentos, oriundos em grande parte pela popularização dos automóveis com tecnologia *flex* em 2003 e pelo PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - para a geração de energia utilizando biomassa e outras fontes renováveis em 2002. O crescimento do setor ocorreu em larga escala, influenciado principalmente pela entrada de grandes corporações oriundas de outros setores, tais como *Bunge*, *Cargill* e *Louis Dreyfus* do setor de grãos, *Odebrecht* do setor de engenharia e construção, *Shell* e *British Petroleum* do setor petroquímico, *Dow Chemical* e *Braskem* do setor de plásticos, além de diversos fundos internacionais de investimentos dirigidos pelas mais diversas especialidades, onde era possível expandir e/ou criar novas unidades industriais com custo relativamente baixo e com bom acesso a crédito.

Estas novas empresas focaram seus investimentos principalmente no ganho de escala, melhores tecnologias e ganhos de eficiência das novas unidades industriais, o que resultou em projetos de grande relevância e tamanho, inclusive quando comparados a grandes usinas já existentes no Brasil. A implantação de novas unidades no Brasil se deu em ritmo acelerado, quase que com predominância de instalação no Centro-Sul do país, com grande concentração nas regiões sul do estado de Goiás, noroeste do estado de São Paulo, oeste de Minas Gerais e um

pouco mais dispersa no estado de Mato Grosso do Sul. Este último, conta hoje com aproximadamente 24 usinas, em sua grande maioria implantadas nos últimos 6 anos. O gráfico da Figura 3.7 ilustra o crescimento e o atual declínio da construção de novas usinas no Centro-Sul do Brasil.

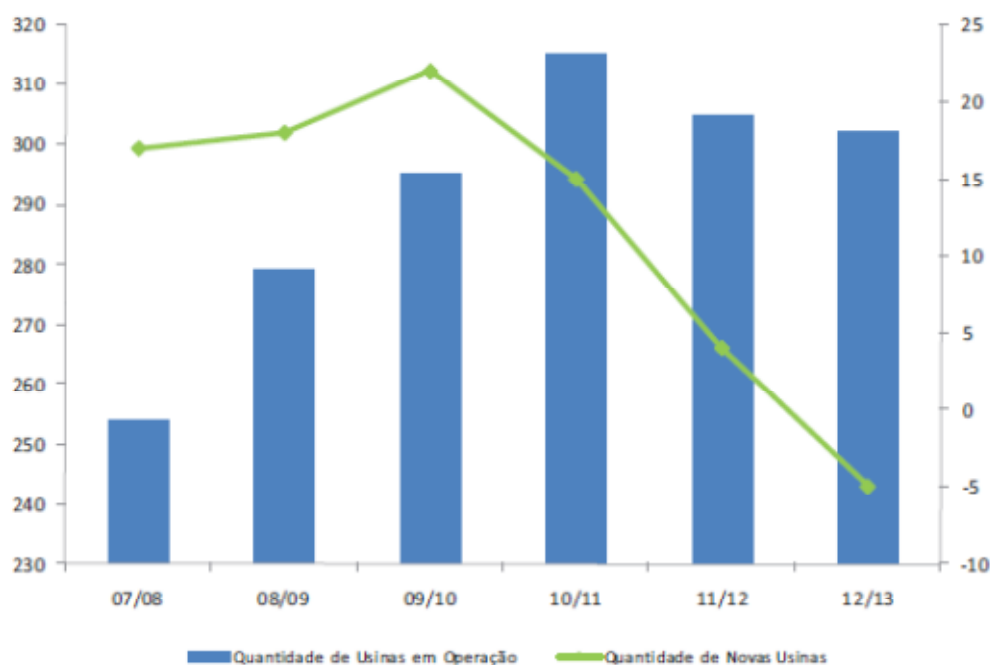


Figura 3.7 – Quantidade de usinas em operação e construção no Centro-Sul do Brasil  
Fonte: ITAU - BBA (2012)

Mesmo com todo este cenário de incerteza no Brasil, o setor de cana-de-açúcar ainda se demonstra expressivo em números, ainda que no ano de 2011 tenha sido averiguado um decréscimo na produção total de cana. O Brasil produziu no ano de 2011 a marca de aproximadamente 565 milhões de toneladas de cana, número este, quase 10% menor que o ano de 2010 que foi de 627 milhões de toneladas (UNICA 2012). Esta queda de produção nos canaviais ocorreu em parte por fatores climáticos e em grande parte pela falta de renovação dos canaviais, que durante os últimos cinco anos não resistiram e foram preteridos na disputa pelos investimentos com a indústria. É necessário avaliar a grandeza destes números no cenário nacional, e o quanto isto significa em questões energéticas para o país, além de mensurar quais são as perdas pelo não investimento no setor, e concentrando atenção no crescimento da cana-de-açúcar pelo menos nos últimos dez anos, comparando isto com a evolução da matriz energética nacional. A oscilação da

produtividade dos canaviais brasileiros e da produção de etanol pode ser avaliada nos gráficos abaixo.

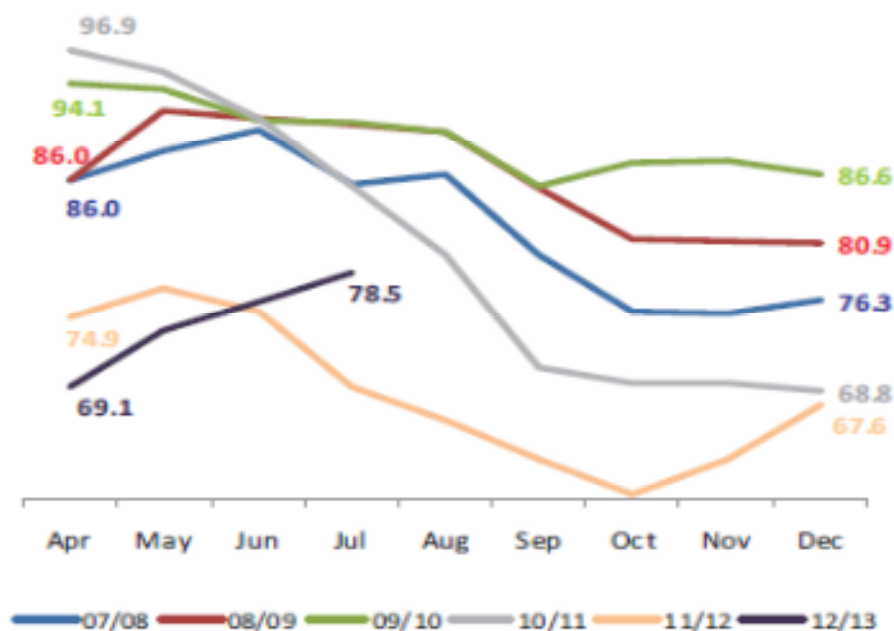


Figura 3.8 – Produtividade agrícola (Tonelada de cana / hectare) no Centro-Sul do Brasil  
Fonte: ITAU - BBA / CTC / UNICA (2012)

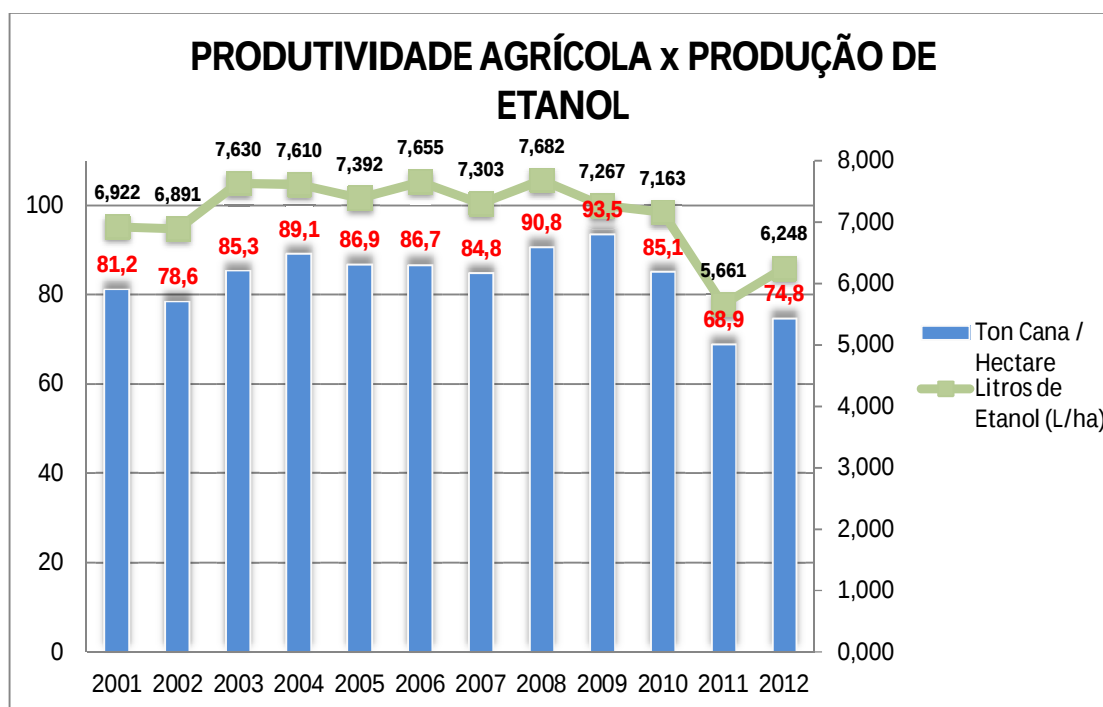


Figura 3.9 – Produtividade agrícola (tonelada de cana / hectare) x Produção de Etanol no Centro-Sul do Brasil  
Fonte: ITAU - BBA / CTC / UNICA (2012)

É possível comparar na Tabela 3.1 o crescimento total da produção de energia primária no Brasil desde o ano de 2002 até o ano de 2011, com o crescimento somente da cana-de-açúcar. Enquanto a produção total de energia primária do Brasil cresceu 47,33% em dez anos, a produção de energia primária à partir da cana-de-açúcar cresceu 71,17% no mesmo período, ou seja, enquanto houve investimento no setor, o crescimento da oferta de energia primária tendo como base a cana-de-açúcar se deu a taxas muito maiores que as médias nacionais de outras fontes de energia.

Tabela 3.1 – Crescimento da oferta de energia primária no Brasil

| 10 <sup>3</sup> tep (toe)               |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                                         |
|-----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------------|
| FONTES                                  | 2002           | 2003           | 2004           | 2005           | 2006           | 2007           | 2008           | 2009           | 2010           | 2011           | SOURCES                                 |
| <b>NÃO RENOVÁVEL</b>                    | <b>95.677</b>  | <b>97.474</b>  | <b>99.216</b>  | <b>105.667</b> | <b>111.421</b> | <b>114.761</b> | <b>122.009</b> | <b>127.409</b> | <b>133.201</b> | <b>139.112</b> | <b>NON-RENEWABLE ENERGY</b>             |
| PETRÓLEO                                | 74.927         | 77.225         | 76.641         | 84.300         | 89.214         | 90.765         | 94.000         | 100.918        | 106.559        | 108.976        | PETROLEUM                               |
| GÁS NATURAL                             | 15.416         | 15.681         | 16.852         | 17.575         | 17.582         | 18.025         | 21.398         | 20.983         | 22.771         | 23.888         | NATURAL GAS                             |
| CARVÃO VAPOR                            | 1.936          | 1.785          | 2.016          | 2.348          | 2.200          | 2.257          | 2.494          | 1.913          | 2.104          | 2.104          | STEAM COAL                              |
| CARVÃO METALÚRGICO                      | 63             | 38             | 137            | 135            | 87             | 92             | 167            | 167            | 0              | 0              | METALLURGICAL COAL                      |
| URÂNIO (U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) | 3.335          | 2.745          | 3.569          | 1.309          | 2.338          | 3.622          | 3.950          | 3.428          | 1.767          | 4.143          | URANIUM - U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> |
| <b>RENOVÁVEL</b>                        | <b>78.583</b>  | <b>86.267</b>  | <b>91.022</b>  | <b>94.855</b>  | <b>100.380</b> | <b>108.947</b> | <b>114.553</b> | <b>112.460</b> | <b>119.973</b> | <b>117.628</b> | <b>RENEWABLE ENERGY</b>                 |
| ENERGIA HIDRÁULICA                      | 24.604         | 26.283         | 27.589         | 29.021         | 29.997         | 32.165         | 31.782         | 33.625         | 34.683         | 36.837         | HYDRAULIC                               |
| LENHA                                   | 23.645         | 25.965         | 28.187         | 28.420         | 28.496         | 28.618         | 29.227         | 24.609         | 25.997         | 26.322         | FIREWOOD                                |
| PRODUTOS DA CANA-DE-AÇÚCAR              | 25.279         | 28.357         | 29.385         | 31.094         | 35.133         | 40.458         | 45.019         | 44.775         | 48.852         | 43.270         | SUGAR CANE PRODUCTS                     |
| OUTRAS RENOVÁVEIS                       | 5.055          | 5.663          | 5.860          | 6.320          | 6.754          | 7.705          | 8.526          | 9.450          | 10.440         | 11.200         | OTHERS                                  |
| <b>TOTAL</b>                            | <b>174.260</b> | <b>183.742</b> | <b>190.238</b> | <b>200.522</b> | <b>211.802</b> | <b>223.708</b> | <b>236.562</b> | <b>239.869</b> | <b>253.174</b> | <b>256.740</b> | <b>TOTAL</b>                            |

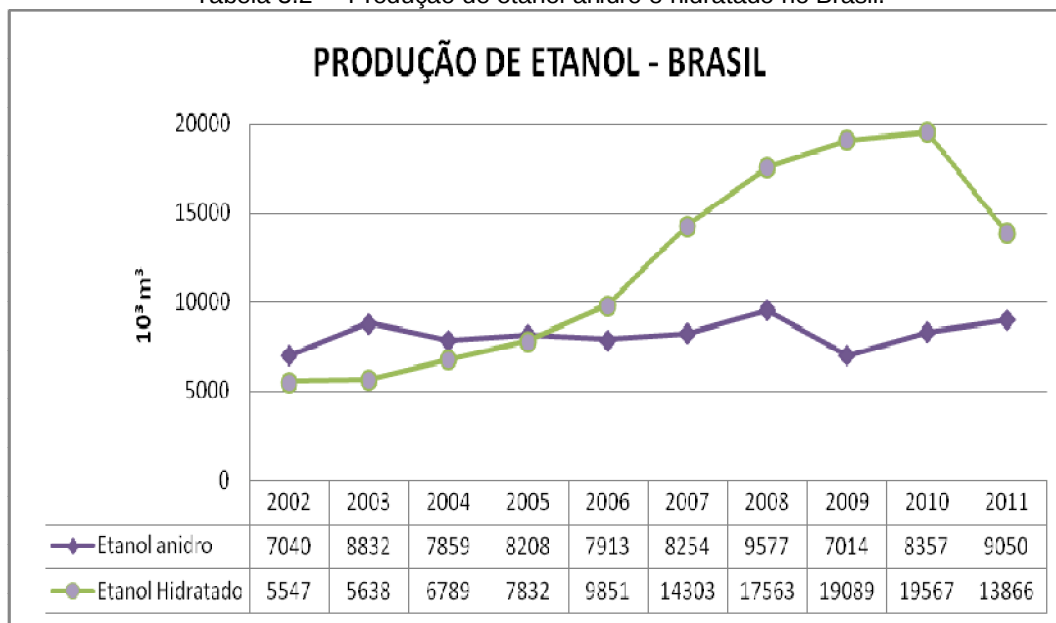
Fonte: EPE - BEN (2011).

É importante avaliar a participação cana-de-açúcar dentro do cenário energético nacional, isoladamente na produção de energia elétrica e também na produção de combustíveis líquidos. Considerando a atual demanda de combustíveis, o etanol mostra-se como uma opção viável e econômica para o país, com a vantagem de menores índices de poluição na cadeia de produção e consumo, além da criação de empregos que são mantidos para a produção rural e industrial e

contribuição para a melhoria da urbanização e qualidade de vida em regiões muito carentes e com pouca atividade industrial no país, tal como o centro-oeste brasileiro.

Um fator que pode revolucionar o mercado de combustíveis, e também o da agricultura, é a possibilidade de produzir em larga escala o etanol de segunda geração, também chamado de etanol 2G, a partir de hidrólise enzimática do bagaço de cana. Este processo pode aumentar em muito a produtividade do etanol por tonelada de cana processada. Este aumento de produção em escala maior, pode melhorar muito o cenário de biocombustíveis no Brasil, aumentando a capacidade de produção sem necessariamente aumentar a área de terra cultivada para a mesma cultura. A Tabela 3.2 e o gráfico da Figura 3.10 permitem avaliar a evolução da produção de etanol, e a participação do etanol e do bagaço de cana na matriz energética brasileira.

Tabela 3.2 – Produção de etanol anidro e hidratado no Brasil.



Fonte EPE - BEN 2011

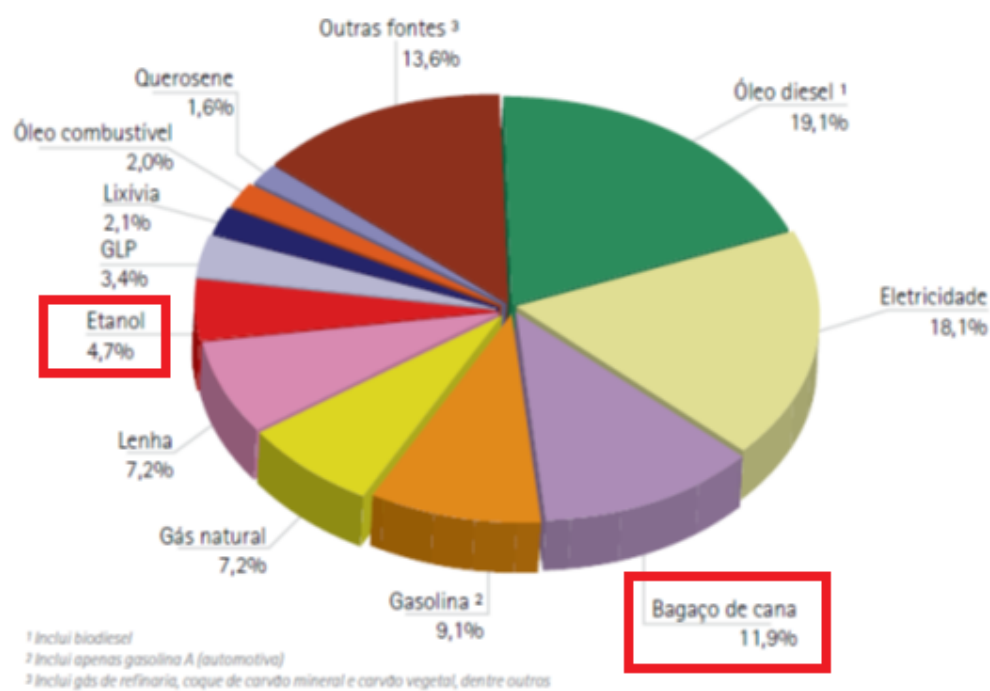


Figura 3.10 – Consumo final de energia no Brasil - 2011  
 Fonte: EPE (2011)

## 4. HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

### 4.1 COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

A produção de etanol de segunda geração tem sido estudada por duas rotas diferentes: a rota termoquímica (gás de síntese, síntese catalítica ou fermentação) e a rota bioquímica (pré-tratamento, hidrólise e fermentação). Atualmente, a tecnologia que parece estar mais próxima de resultados concretos e com provável viabilidade econômica é a rota bioquímica. Existem muitos estudos sobre o assunto que tem figurado como uma grande saída para aumentar a produção de combustível líquido (etanol) sem necessariamente aumentar a área de plantio da cana-de-açúcar. Esta condição de melhor aproveitamento da matéria-prima para a produção de etanol pode gerar um incremento muito interessante do ponto de vista econômico para as empresas produtoras e uma segurança que chega a ser estratégica para o país, por potencializar uma estrutura já existente e operante na produção de etanol combustível, sem necessariamente fazer avanços desnecessários no cultivo de terras disponíveis (CGEE, 2009). A principal dificuldade existente, ainda consiste em obter uma escala de produção economicamente viável, uma vez que a produção e aquisição de enzimas representa um dos principais entraves. Embora a fermentação de hexoses não ofereça maiores problemas, a fermentação de pentoses ainda constitui um desafio para a indústria, particularmente no que diz respeito à fermentação alcoólica. Isto se deve principalmente ao seu baixo rendimento em etanol, geralmente atribuído à coprodução de xilitol e ácido acético e à baixa tolerância dos micro-organismos ao produto gerado (PARISI, 1989).

A hidrólise enzimática da biomassa, de forma simplificada, é a quebra das moléculas de polissacarídeos em mono e dissacarídeos, que são açúcares fermentescíveis. O bagaço oriundo da moagem da cana-de-açúcar, pelo fato de não ser uma biomassa homogênea, apresenta variações em sua composição, bem como na sua estrutura morfológica, fatos estes decorrentes dos procedimentos de plantio, cultivo, colheita e processamento na usina. As alterações de sua composição dependem significativamente de fatores como:

- Colheita manual com queimada ou colheita mecanizada de cana crua;
- Procedimentos de colheita e carregamento da cana, com maior ou menor arraste de resíduos minerais e vegetais;
- Tipos de solo utilizados para o cultivo (latossolos, solos arenosos, outros), influenciam muito nas características do bagaço, bem como na quantidade de impureza mineral;
- Procedimentos de recepção, limpeza e preparo da cana nas usinas.

A composição da biomassa da cana-de-açúcar, basicamente, consiste a predominância de holocelulose seguida de lignina. A composição padrão calculada está expressa na Tabela 4.1. A estrutura típica da parede vegetal da cana está representada na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Composição calculada do bagaço de cana

| <b>COMPONENTES</b> | <b>%</b> |
|--------------------|----------|
| Glicose            | 19,50    |
| Xilose             | 10,50    |
| Arabinose          | 1,50     |
| Galactose          | 0,55     |
| Lignina            | 9,91     |
| Organossolúveis    | 2,70     |
| Açúcares redutores | 1,85     |
| Ácidos Urônicos    | 1,91     |
| Cinzas             | 1,60     |
| Umidade            | 50,00    |
| Hexoses totais     | 20,04    |
| Pentoses totais    | 12,00    |

Fonte: CGEE (2009)

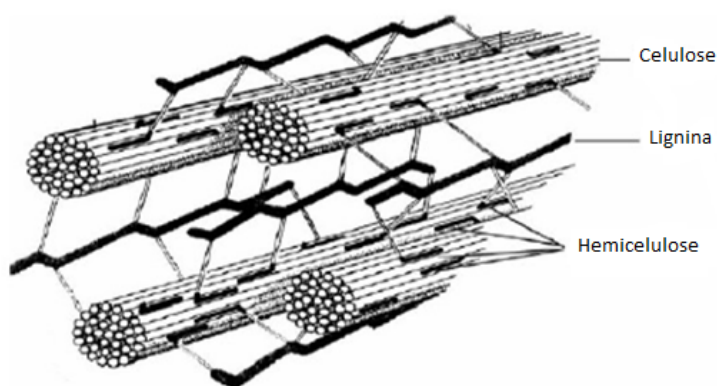


Figura 4.1 – Arranjo típico da parede celular vegetal  
Fonte: PECE (2013)

#### 4.1.1 Celulose

A celulose é um homopolissacarídeo linear composto por unidade de glicose unidas por ligações glicosídicas do tipo  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) que tem seu tamanho determinado pelo grau de polimerização.

Como as cadeias de glicose são muito longas e combinadas, formam microfibrilas com diâmetro entre 4 - 10 nm, e tornam a celulose muito resistente. As microfibrilas de celulose são revestidas por hemicelulose e embebidas em lignina.

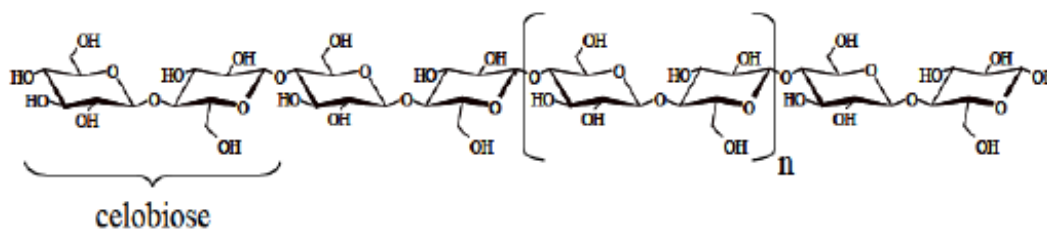


Figura 4.2 – Representação da cadeia linear da celulose formada por várias unidades consecutivas de celobiose

Fonte: KLOCK, U. et al. (2005) - adaptado

### 4.1.2 Hemicelulose

A hemicelulose é formada principalmente pela xilose, que é um heteropolissacarídeo formado por pentoses, hexoses e ácidos urônicos. A xilose como maior constituinte da hemicelulose, faz parte de um complexo de carboidratos poliméricos incluindo a xilana, cuja a estrutura corresponde a um polímero de D-xilose unidas por ligações  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4). Os monossacarídeos constituintes da hemicelulose pode ser observados na Figura 4.3.

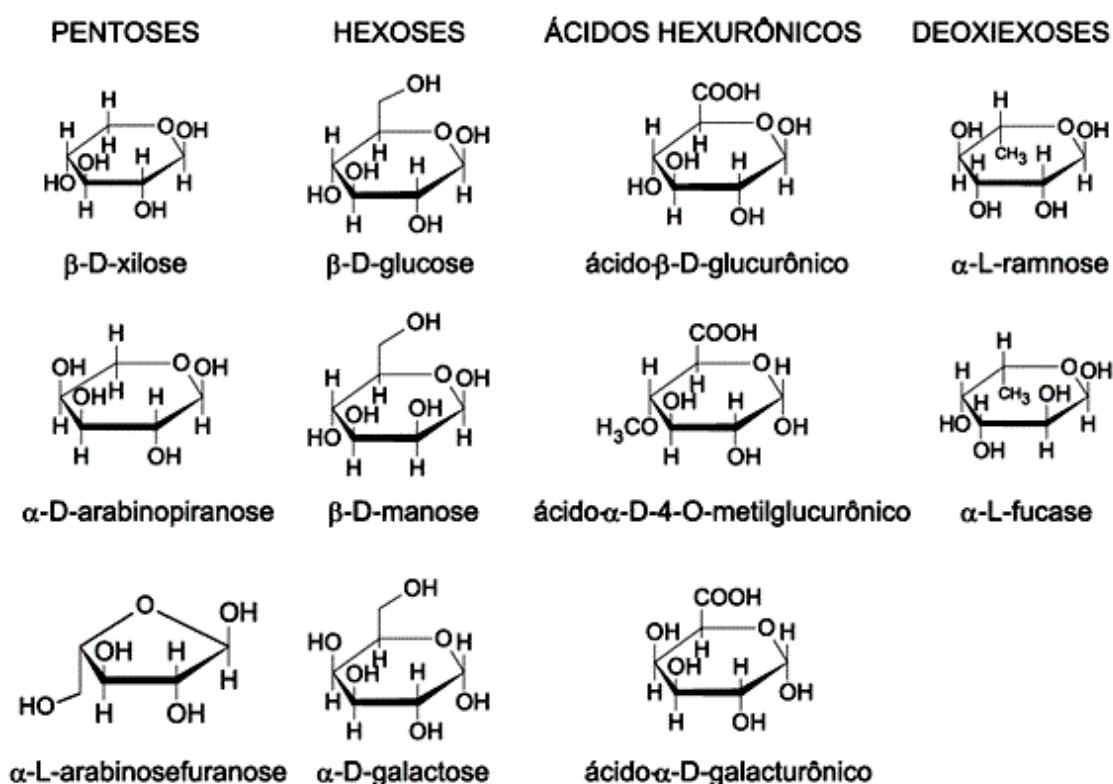


Figura 4.3 – Açúcares que compõe as unidades de hemicelulose  
 Fonte: SANTOS, J. B. dos, (2010)

### 4.1.3 Lignina

A lignina é o mais importante componente não-carbohidratado do bagaço e da palha da cana. É um polímero derivado de grupos fenilpropanóides repetidos de forma irregular, originados na polimerização desidrogenada do álcool coniferílico. Estes polímeros são altamente condensados e altamente resistentes à degradação, fato este que gera a grande dificuldade de separação no processo de pré-tratamento da hidrólise.

A lignina é formada à partir de três precursores básicos: álcool p-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico. Este heteropolímero amorfo é constituído por unidades de fenilpropano (ácido coniferílico ou ferrúlico, ácido sinapílico e ácido pcumarílico) conectadas por diferentes ligações moleculares.

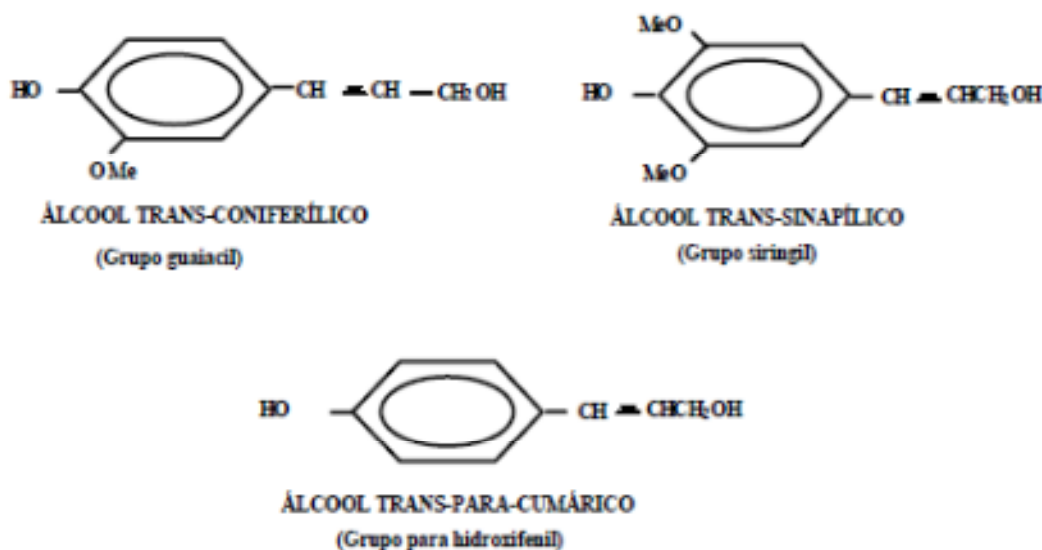


Figura 4.4 – Precursores primários da lignina  
Fonte: KLOCK, U. et al., (2005)

## 4.2 ASPECTOS GERAIS DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

As enzimas são proteínas utilizadas na catálise de reações biológicas. Praticamente todas as reações que caracterizam o metabolismo celular são

catalisadas por enzimas, que por sua vez aceleram a velocidade de uma reação, sem, no entanto participar dela como reagente ou produto.

A produção de etanol utilizando enzimas como catalisadores para a hidrólise de amido, já é conhecida e com embasamento tecnológico sustentável, porém a produção à partir de bagaço e palha da cana-de-açúcar é um pouco mais complexa, pois a celulose contida na fibra é protegida por outros materiais resistentes ao ataque químico como a lignina e hemicelulose. Para a quebra destes materiais existem os chamados pré-tratamentos que possibilitam e melhoram a eficiência do processo de hidrólise. Os processos de pré-tratamento de materiais lignocelulósicos podem ser térmicos, químicos, físicos, biológicos ou ainda uma combinação de todos estes. Neste trabalho, trabalharemos com foco no pré-tratamento por explosão a vapor, por ser um dos principais métodos empregados para hidrólises de materiais lignocelulósicos como é o caso da biomassa de cana-de-açúcar.

Neste processo, a biomassa é previamente triturada e submetida a uma explosão a vapor com pressão e temperaturas que oscilam nas faixas de 8/10 bar (a) e 180/240°C. A diminuição de pressão e temperatura seguinte a este processo causa a ruptura nas ligações da lignina, hemicelulose e celulose. O pré-tratamento quebra a forte ligação existente entre a celulose, hemicelulose e lignina, e seu objetivo é remover a lignina e hemicelulose, reduzir a cristalinidade da celulose e aumentar a porosidade das partículas, desorganizando assim a estrutura da biomassa e beneficiando assim o trabalho das enzimas que atuam na conversão de carboidratos em açúcares, como representado na Figura 4.5.

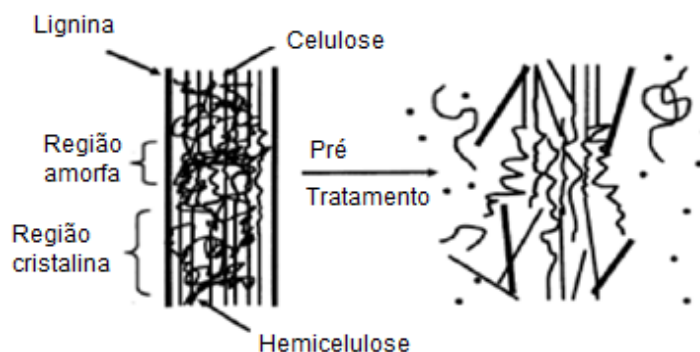


Figura 4.5 – Efeito do pré-tratamento sobre a estrutura do material lignocelulósico  
Fonte: SANTOS, J. B. dos, (2010).

O bagaço apresenta partículas disformes, separando-se em uma porção esponjosa e outra com fibras de elevada relação de esbeltez. A divisão destas frações pode ser denominada entre casca, fibra e medula.

A palha da cana-de-açúcar, quando separada na colheita mecanizada, é de certa forma semelhante a composição do bagaço, no que diz respeito à hemicelulose e celulose, porém apresenta menor conteúdo de lignina. Apesar de não existirem números oficiais sobre a forma e tamanho das partículas da palha, com um breve exame visual é possível notar grande heterogeneidade, muito provavelmente pelo fato da palha ser oriunda de diversas partes da planta e também por não ter sido submetida a nenhum processo de preparo.

## 5. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo proposto neste trabalho irá avaliar a eficiência de duas configurações distintas de usinas de cana-de-açúcar visando comparar qual a melhor solução sob o ponto de vista do aproveitamento energético da cana. O estudo irá comparar duas usinas com capacidade de moagem de 2.500.000 toneladas de cana por safra, para produção de etanol hidratado e exportação de energia excedente para a rede. O caso base avaliará a produção de etanol hidratado e a usina será configurada para a máxima exportação de energia elétrica. O caso comparativo avaliará uma usina com a mesma capacidade horária de moagem, também com produção de etanol hidratado, porém com a máxima eficiência térmica e utilizando o excedente de bagaço para a produção de etanol de segunda geração ao invés da priorização da energia elétrica.

Em resumo, a comparação permitirá avaliar a produção energética final de cada caso convertendo os valores encontrados de MWh e volume de etanol hidratado, em tep (toneladas equivalentes de petróleo) obtidos por tonelada de cana processada em usinas de mesma capacidade e com focos diferentes de aproveitamento da energia primária oriunda da cana-de-açúcar. Do ponto de vista estritamente termodinâmico esta comparação deveria ser feita em termos de exergia, de forma a comparar dois tipos de energia (térmica e elétrica) com disponibilidades diferentes. Entretanto, será adotada a metodologia do BEN transformando em tep as duas formas de energia. A Tabela 5.1 demonstra os valores base para a comparação dos dois casos:

Tabela 5.1 – Base de dados para estudo comparativo

| <b>BASE DE COMPARAÇÃO</b>   |           |      |
|-----------------------------|-----------|------|
| Canas processadas por safra | 2.500.000 | t    |
| Dias de calendário          | 235       | dias |
| Aproveitamento de tempo     | 85        | %    |
| Dias efetivos               | 200       | dias |
| Horas trabalhadas/safra     | 4800      | h    |
| Moagem horária              | 521       | tc/h |
| Fibra da cana               | 13        | %    |
| Palha adicional             | 5         | %    |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 5.1 GERAÇÃO TERMELÉTRICA UTILIZANDO BAGAÇO DE CANA

A geração termelétrica utilizando biomassa, ou mais especificamente bagaço de cana-de-açúcar como combustível, utiliza ciclos de potência a vapor. O ciclo termodinâmico utilizado é um ciclo semelhante ao ciclo Rankine, com diferenças em relação a um ciclo convencional das termelétricas, pois o vapor de escape da turbina (de contra pressão), a uma pressão acima da atmosférica é enviado ao processo e condensado nos evaporadores de caldo e não em um condensador específico logo abaixo da turbina como em plantas termelétricas de grande capacidade que utilizam combustíveis fósseis (turbinas de condensação com condensador a vácuo).

Os principais equipamentos utilizados nas usinas em questão, atualmente trabalham normalmente com a seguinte configuração:

- Caldeira de grelha inclinada ou rotativa, com pressão de 67 bar (a), temperatura de 520° C e capacidades que variam na ordem de 150 - 300 t/h de vapor.
- Turbinas de contrapressão com vapor de admissão de 67 bar (a), temperatura de 520° C e vapor de extração com pressão de 2,5 bar (a), temperatura de 140°C e eficiência de aproximadamente 87%.
- Turbinas de condensação com vapor de admissão de 67 bar (a), temperatura de 520° C e vapor de condensação com pressão de 0,12 bar

(condensador a vácuo) (a), temperatura de 49°C e eficiência de aproximadamente 87%.

A caldeira e as turbinas são os principais equipamentos de uma central de geração termelétrica e suas eficiências influenciam diretamente a geração de energia térmica e elétrica. A caldeira é o equipamento que realiza a combustão de um determinado combustível disponível, gerando calor que é utilizado para a produção de vapor de alta pressão, que quando enviado a uma turbina produz potência mecânica ao girar o rotor da turbina, e por consequência também gira o eixo do gerador acoplado, transformando a potência mecânica em potência elétrica. A eficiência da caldeira está associada diretamente a quantidade de calor do combustível que é possível aproveitar no processo de combustão. A turbina, por sua vez, trata-se de uma máquina rotativa que transforma a energia térmica do vapor, medida pela sua entalpia, em energia cinética devido à sua expansão através de seus bocais, e posteriormente em energia mecânica nas pás da turbina que giram o eixo do gerador transformando esta em energia elétrica. A eficiência deste ciclo termodinâmico (rendimento da transformação do calor em trabalho mecânico) resulta em maior ou menor capacidade de geração de energia elétrica.

### **5.1.1 Caldeiras para biomassa**

A indústria canavieira utiliza caldeiras aquatubulares, tipicamente com grelhas fixas ou rotativas. As pressões e temperaturas de trabalho são bastante variadas e oscilam desde 21 bar / 300° C nas caldeiras antigas do setor e 100 bar / 540° C nas novas unidades construídas recentemente. Atualmente, nas centrais termelétricas construídas nas usinas existe uma certa predominância da configuração com 67 bar / 520° C.

As caldeiras de grelha possuem algumas limitações com relação à qualidade do combustível, sendo bastante sensíveis à umidade, com perda considerável de eficiência na combustão com um pequeno incremento na umidade do bagaço. De qualquer forma, as caldeiras de grelha hoje fabricadas no país alcançaram

tamanhos e vazões consideráveis, chegando a trabalhar com vazões de até 350 t/h de vapor. A eficiência destas caldeiras também melhorou bastante e hoje na média os fabricantes nacionais garantem 85 % de eficiência. Um esquema simplificado de uma caldeira de grelha é apresentado nas Figuras 5.1 e 5.2.



Figura 5.1 – Esquema simplificado de caldeira para biomassa.  
Fonte: Adaptado de BRUMAZI (2013)

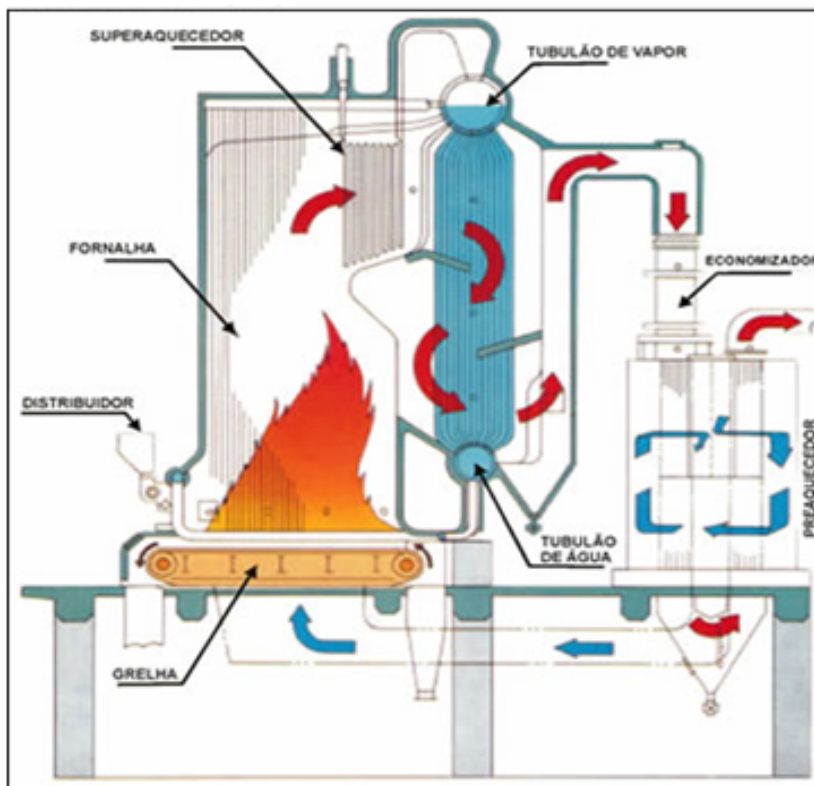


Figura 5.2 – Esquema simplificado de caldeira de grelha rotativa para bagaço de cana.  
Fonte: BRUMAZI (2013)

Com a procura pelo aumento do rendimento dos ciclos termodinâmicos nas usinas, e com a possibilidade de queimar outros tipos de combustíveis, as caldeiras de leito fluidizado borbulhante estão ganhando mais atenção e devem começar a aparecer em novas centrais termelétricas, mesmo consumindo mais energia elétrica quando comparadas as caldeiras de grelha, porém compensando este gasto adicional com uma melhor eficiência de queima, além de ser menos sensível as variações de umidade e características básicas do combustível. Os custos operacionais são maiores, em virtude da circulação constante do leito que separa constantemente os rejeitos e consequentemente existe a necessidade de reposição da areia no leito. Porém, o ganho de eficiência na faixa de 3 - 6% em relação às caldeiras de grelha significam muito no quesito consumo de combustível e principalmente sobre a quantidade de sólidos não queimados. Em um país como o Brasil, onde o valor da energia elétrica sinaliza não remunerar os investimentos em fontes alternativas, como o caso da biomassa, em função da menor escala quando comparadas com a produção de energia elétrica pelas usinas hidrelétricas e pelas térmicas a gás, óleo ou carvão, ganhos de eficiência como este são sempre fatores

importantes na aferição final de resultados da geração efetiva de vapor e energia. A Figura 5.3 ilustra uma caldeira de leito fluidizado borbulhante.

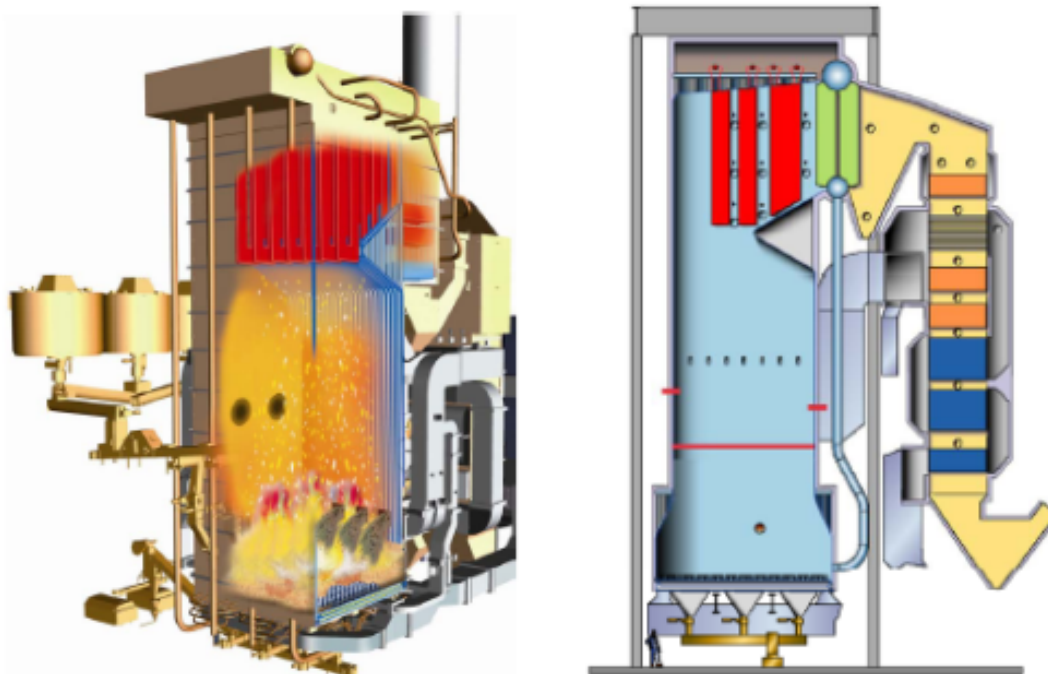


Figura 5.3 – Esquema simplificado de caldeira de leito fluidizado borbulhante.  
Fonte: METSO – 2013

### 5.1.2 Turbinas de contrapressão

As turbinas de contrapressão são utilizadas em toda a indústria canavieira pela necessidade da utilização de vapor de processo com baixa pressão - 2,5 bar (a). Turbina a vapor é um motor térmico rotativo no qual a energia térmica do vapor, medida pela sua entalpia, é transformada em energia cinética devido a expansão do vapor pelos bocais. A energia cinética é transformada em energia mecânica de rotação pela ação do vapor sobre as palhetas do rotor. As turbinas de contrapressão (Figura 5.4) tem esta denominação porque seu vapor de escape tem pressão superior à pressão atmosférica e elas podem ser utilizadas basicamente para duas finalidades:

- Acionamento mecânico: sendo utilizadas como acionador de grandes ventiladores de tiragem, picadores, desfibradores, bombas, compressores, até mesmo como propulsores de navios e outros grandes equipamentos rotativos. Estes sistemas normalmente operam entre 900 e 10.000 rpm e com potências na faixa de 500 kW a 10 MW;
- Acionamento elétrico: sendo utilizadas para acionar um gerador elétrico para atender a demanda local de energia elétrica e/ou exportar energia para as linhas de transmissão. Podem operar com velocidade síncrona (1800 ou 3600 rpm), ou maiores quando acopladas a sistemas de redução de velocidade, normalmente com faixas de potência de 15 a 1300 MW.

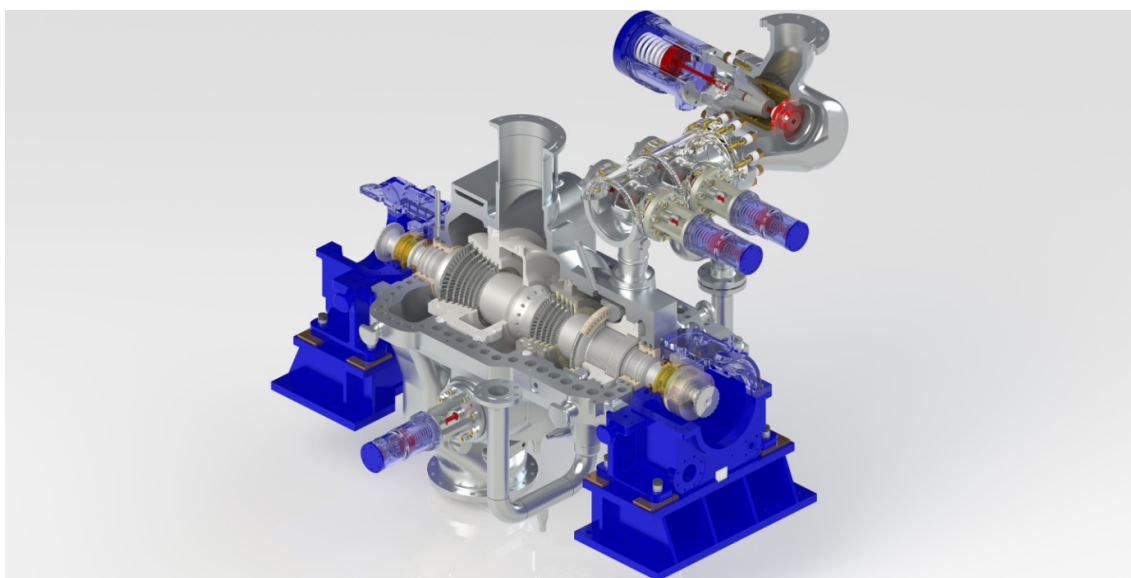


Figura 5.4 – Maquete 3D de turbina de contrapressão de alta pressão.  
Fonte: TGM Turbinas (2013)

### 5.1.3 Turbinas de condensação

As turbinas de condensação (Figura 5.5) são largamente empregadas na maioria das centrais termelétricas a vapor. Seu funcionamento segue o mesmo princípio das turbinas de contrapressão, porém a entrega do vapor de escape ocorre à pressões menores que a atmosférica, ou seja em condição de vácuo. Apesar disto, turbinas de condensação também podem ter tomadas de extração para utilização

como vapor de processo ou reaquecimento de condensado em ciclos regenerativos, o que é muito comum no setor de processamento de cana-de-açúcar, em virtude da necessidade de vapor de processo.

Como a entrega do vapor ocorre normalmente em alto vácuo, a eficiência térmica do ciclo é maior devido a maior queda entálpica, porém o rendimento total ainda é menor que o ciclo de contrapressão, já que uma parte da energia do vapor é dissipada através da água de resfriamento necessária para a condensação.

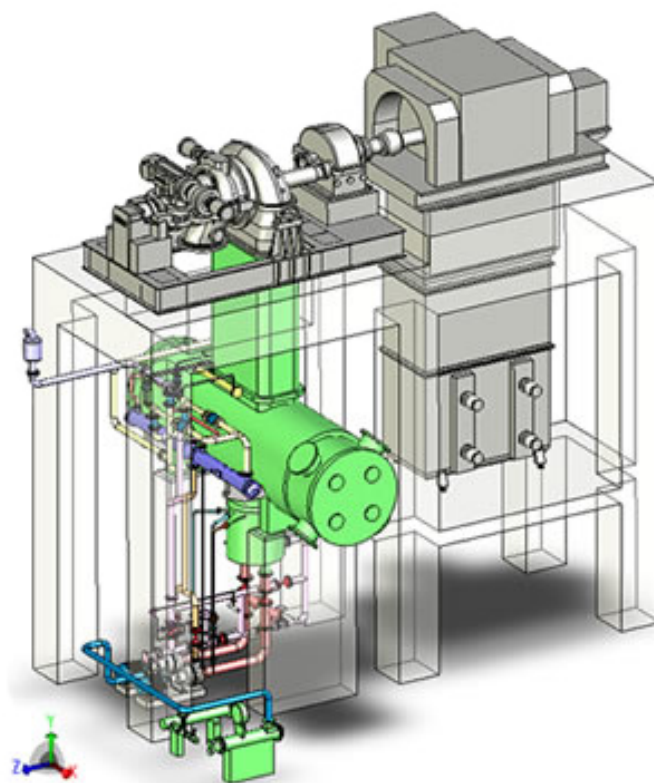


Figura 5.5 – Maquete 3D de turbina de condensação  
Fonte: Base sólida energia. (2013)

## 5.2 MÁXIMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica utilizando ciclos de potência a vapor está ligada diretamente à diferença de entalpia dos vapores de admissão e escape das turbinas utilizadas no processo. Em uma usina processadora de cana-de-açúcar, a pressão de escape das turbinas de contrapressão, é normalmente mantida na faixa de 2,5

bar (a) em função da temperatura de evaporação do caldo na evaporação. Desta forma, como já temos a pressão do vapor de saída previamente determinada pelas condições de processo requeridas, só podemos aumentar o salto entálpico com a melhoria de eficiência do ciclo termodinâmico - que trata-se de uma condição muito difícil neste caso - ou aumentando a pressão e temperatura do vapor produzido pelas caldeiras. Um fato importante para avaliar no atual cenário brasileiro é que muitos estudos partem da ótica que quanto maior a pressão e a temperatura do vapor, maior será a exportação de energia, e isto deve ser avaliado juntamente com outros fatores importantes como o incremento real na geração de energia, diferença nos custos das instalações, e consumo de energia parasita. De qualquer forma, analisando isoladamente, é fato que o caminho natural atualmente seja subir ainda mais os patamares de pressão e temperatura do vapor motriz. O ganho no ciclo termodinâmico pode ser confirmado na Figura 5.6 pelo aumento da área indicada de forma hachurada.

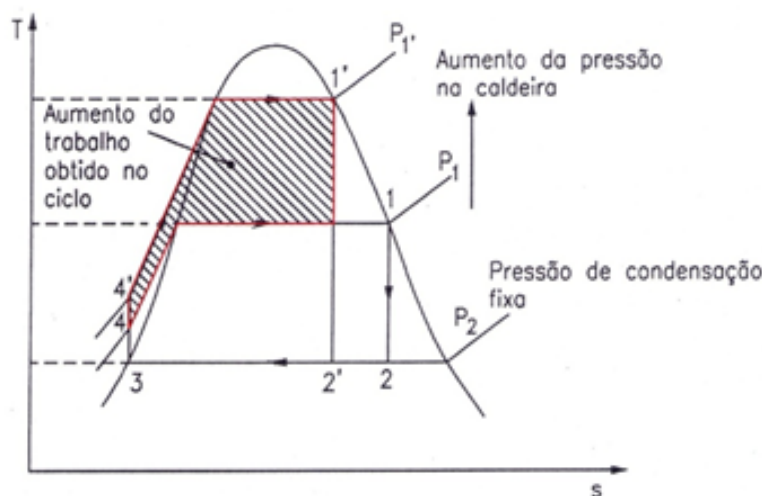


Figura 5.6 – Aumento do trabalho em um ciclo Rankine, obtido com o aumento da pressão da caldeira.

Fonte: Adaptado de LORA, E.E.S. (2004)

Assim como o aumento de pressão das caldeiras contribuem para o aumento do trabalho no ciclo, a eficiência das turbinas completa a melhoria no rendimento. Atualmente nas novas unidades instaladas no Brasil, já são estudados ciclos regenerativos nas centrais termelétricas com a finalidade de aumentar o rendimento térmico e economizar ainda mais combustível.

### 5.3 MÁXIMA PRODUÇÃO DE ETANOL

A maximização da produção de etanol em uma usina que processa cana-de-açúcar passa não somente pelas diversas melhorias de processo já conhecidas como diminuição de perdas indeterminadas, maior extração do açúcar e melhorias de eficiência de forma geral, mas também, no cenário atual pela produção de etanol de segunda geração. É imprescindível para o setor melhorar a produtividade industrial da matéria-prima, permitindo aumentar a produção de combustíveis sem necessariamente avançar novas fronteiras agrícolas.

De qualquer forma, a utilização do bagaço e da palha da cana para a produção de etanol, concorre diretamente com a produção de energia elétrica, que já se encontra em fase bastante consolidada do ponto de vista tecnológico e de resultados, apesar de faltar investimentos concretos neste tipo de geração no momento atual. A utilização da biomassa excedente para produção de etanol, tende a decretar um fim na utilização das turbinas de extração / condensação que se tornaram populares nas indústrias recentes pela possibilidade de maior geração de excedentes de energia elétrica, reduzindo o tempo ocioso da central termelétrica destas plantas podendo operá-las nos dias de chuva e estender o número de horas efetivas no ano em regime de exportação de energia elétrica excedente.

### 5.4 A INSERÇÃO DA HIDRÓLISE ENZIMÁTICA NA FABRICAÇÃO DE ETANOL

A utilização de biomassa para a produção de etanol deve alterar a forma e os métodos de processamento da cana-de-açúcar, principalmente na maneira como são tratados o bagaço e a palha da cana. Analisando o setor sucroenergético desde um passado recente, o bagaço da cana era tratado na maioria dos casos como um resíduo, não havendo preocupação nenhuma com seu aproveitamento. A sobra de bagaço em várias unidades industriais do Brasil chegou a ser tratada como problema, pois como as usinas antigas trabalhavam com caldeiras de baixa pressão,

o bagaço produzido não era totalmente consumido, fator que também explica a falta de preocupação com a eficiência das caldeiras.

A palha também não era aproveitada até 2002, pois não havia colheita mecanizada e o canavial era submetido à queimadas para aumentar a eficiência do corte manual da cana. Desta forma, todo o poder energético da palha era desperdiçado e ainda contribuía com emissões de gases poluentes provenientes destas queimadas.

No estado de São Paulo, em 19 de setembro de 2002 foi promulgada a lei nº 11.214, que regulamentou a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar no período pré-colheita, reduzindo inicialmente em 20% a área de queima, com objetivo de redução de 100% da área de queima até 2021.

O advento da colheita mecanizada e da possibilidade de exportação de energia elétrica excedente pelas usinas trouxe a tona à situação descrita acima e exigiu mudanças drásticas no setor. As principais foram a inserção da colheita mecanizada, acabando com a necessidade das queimadas, a substituição das caldeiras antigas e ineficientes por caldeiras de alta pressão e temperatura com alta eficiência, a eletrificação de acionamentos que criavam alta demanda térmica, com baixa eficiência, e a inserção de turbo geradores de grande capacidade, alta eficiência, além da inserção do ciclo de condensação em novas unidades para maximizar a exportação de energia elétrica. Novamente, o setor sucroenergético se encontra com a possibilidade de quebrar paradigmas e melhorar ainda mais a eficiência no processamento da cana-de-açúcar. As grandes oscilações de preço do açúcar e do etanol, derivadas da movimentação do mercado consumidor interno e externo, aliadas às variações climáticas cada vez mais constantes e com consequências cada vez mais severas à produtividade agrícola, exigem do setor uma reflexão sobre a necessidade de melhoria da eficiência, e da possibilidade de maximizar a extração dos três principais produtos da cana (açúcar, etanol e energia) no médio e longo prazo, lutando contra dificuldade de aumentar a área cultivada, em função da realidade de falta de investimento no setor agrícola e também do crescente aumento de preço da terra no Brasil.

A possibilidade de produção do etanol de segunda geração em escala industrial obrigará os engenheiros, produtores, investidores e governo a pensarem em diversos elos sensíveis da cadeia de produção do etanol no Brasil, tais como:

- Custo do transporte da palha da cana, que apesar do alto poder energético, trata-se de um elemento com baixa densidade, e conseqüentemente com alto custo de transporte;
- Produção em maior escala de caldeiras de leito fluidizado, que o Brasil dispõe de pouquíssimas opções nacionais, porém já são utilizadas no setor de papel e celulose há algum tempo;
- Atendimento da demanda das indústrias de bem de capital, que hoje no Brasil passa por diversas dificuldades;
- A construção de novas usinas no interior do Brasil, cria ainda mais dificuldades para os problemas de infraestrutura já conhecidos como a dificuldade de escoamento da Produção, bem como a falta de linhas de transmissão de energia elétrica;
- Produzir as enzimas necessárias a custo competitivo e que possibilitem retorno econômico dos investimentos.

As usinas que decidirem produzir etanol de segunda geração, deverão se preocupar especificamente com a composição da matéria-prima, com itens importantes e muito variáveis na colheita, como a quantidade de palha a ser trazida e deixada no campo, a eficiência da separação de palha na recepção da usina, bem como a eficiência nos processos de limpeza para retirada de material mineral. De forma resumida, o processamento de cana-de-açúcar em uma destilaria autônoma, com a inserção da hidrólise enzimática para a produção de etanol 2G pode ser compreendido na Figura 5.7.

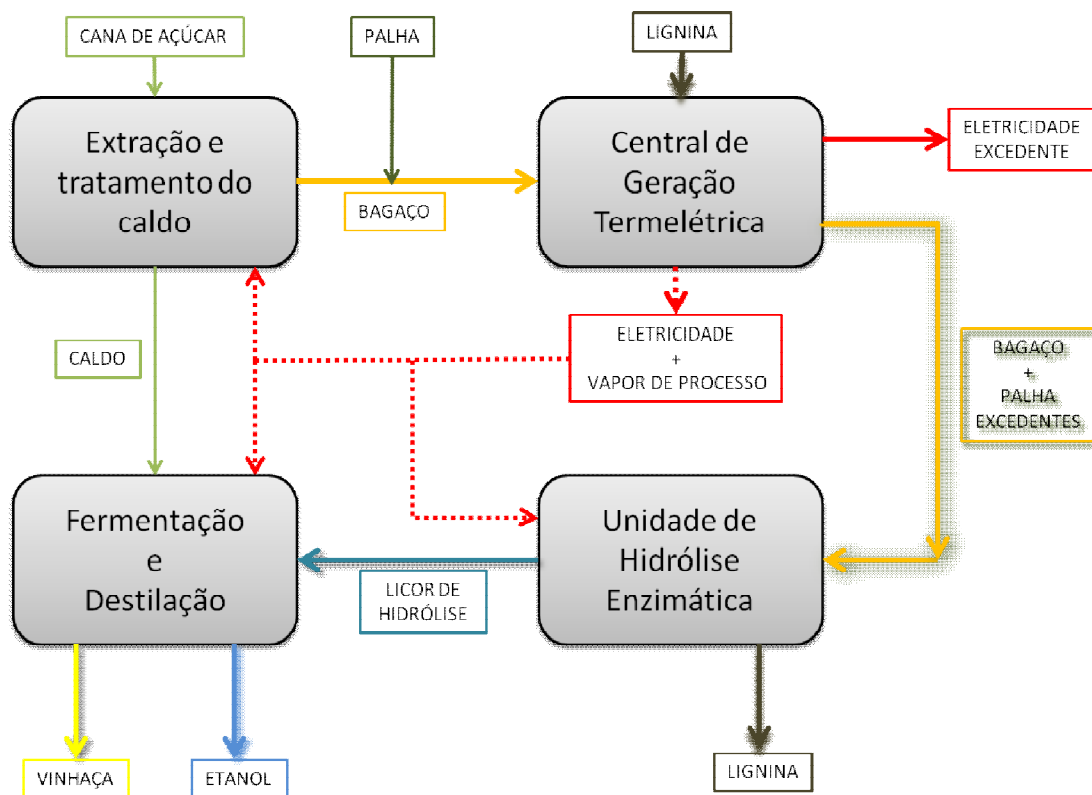


Figura 5.7 – Processamento de cana em destilaria autônoma com a inserção da hidrólise enzimática.  
Fonte: Elaboração própria - Notas de aula Coelho, S.T (2012)

## 5.5 CASO BASE - MÁXIMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O estudo do caso base para a máxima geração de energia elétrica determinará os consumos de vapor e energia que servirão para a base de cálculo dos incrementos ou decréscimos resultantes do inserção do processo do etanol 2G.

Nos tópicos seguintes estão demonstrados o balanço de massa da matéria-prima, bem como as eficiências de separação e limpeza da palha, determinando assim a quantidade de combustível disponível, a máxima produção horária de etanol hidratado na configuração de destilaria autônoma e a máxima geração de energia elétrica, para consumo e para exportação.

### 5.5.1 Cálculo do combustível para queima

Tabela 5.2 – Dados para balanço de massa

| <b>OPERAÇÃO</b>                            |           |         |     |
|--------------------------------------------|-----------|---------|-----|
| Safra                                      | 2.500.000 | t/safra |     |
| Dias calendário                            | 235       |         |     |
| Eficiência                                 | 85%       |         |     |
| Dias efetivos                              | 200       |         |     |
| Moagem diária                              | 2.500     | t/d     |     |
| Horas efetivas                             | 4.800     | h       |     |
| Moagem horária                             | 521       | t/h     |     |
| <b>PREMISSAS DA MATÉRIA-PRIMA</b>          |           |         |     |
| Fibra s/ cana total (base seca)            | 13,0%     | 67,7    | t/h |
| Impurezas Vegetais                         | 8,0%      | 41,7    | t/h |
| Impurezas Minerais                         | 1,5%      | 7,8     | t/h |
| Palha adicional trazida do campo           | 5,0%      | 26,0    | t/h |
| <b>BALANÇO DE MASSA - MATÉRIA-PRIMA</b>    |           |         |     |
| Palha Adicional                            |           | 26,0    | t/h |
| Umidade                                    | 30,0%     | 7,8     | t/h |
| Fibra                                      | 70,0%     | 18,2    | t/h |
| Impureza Vegetal na Cana                   |           | 41,7    | t/h |
| Umidade                                    | 40,0%     | 16,7    | t/h |
| Fibra                                      | 60,0%     | 25,0    | t/h |
| Palha Total a Separar                      |           | 67,7    | t/h |
| Umidade                                    | 36,2%     | 24,5    | t/h |
| Fibra                                      | 63,8%     | 43,2    | t/h |
| Terra a Separar                            |           | 7,8     | t/h |
| <b>LIMPEZA A SECO E SEPARAÇÃO DE PALHA</b> |           |         |     |
| Eficiência de Separação                    |           |         |     |
| Palha                                      | 60,0%     |         |     |
| Terra                                      | 50,0%     |         |     |
| Palha Separada                             |           | 40,6    | t/h |
| Terra Separada                             |           | 3,9     | t/h |
| Palha Total - Preparo                      |           | 40,6    | t/h |
| Terra Total - Preparo                      |           | 3,9     | t/h |
| Palha Total - Moenda                       |           | 27,1    | t/h |
| Terra Total - Moenda                       |           | 3,9     | t/h |
| Separação de Terra - Peneira               |           |         |     |
| Eficiência de Separação                    |           |         |     |
| Palha                                      | 0,5%      | 0,2     | t/h |
| Terra                                      | 70,0%     | 2,7     | t/h |
| Descarte total                             |           | 2,9     | t/h |

Continua...

**PALHA DISPONÍVEL PARA QUEIMA**

|                     |       |          |         |
|---------------------|-------|----------|---------|
| Palha (fibra úmida) |       | 40,4     | t/h     |
| Umidade             | 35,1% | 14,6     | t/h     |
| Fibra               | 62,0% | 25,8     | t/h     |
| Terra               | 2,8%  | 1,2      | t/h     |
| Palha para Caldeira |       | 41,6     | t/h     |
| PCI                 |       | 2.512,1  | kcal/kg |
|                     |       | 10.517,8 | kJ/kg   |

**BALANÇO DE MASSA - BAGAÇO**

|                            |        |         |           |
|----------------------------|--------|---------|-----------|
| Fibra - Cana               |        | 42,7    | t/h       |
| Fibra - Impurezas vegetais |        | 17,3    | t/h       |
| Fibra - Total              | 11,52% | 60,0    | t/h       |
| Terra                      |        | 3,9     | t/h       |
| Açúcares (RDS)             | 1,0%   | 1,3     | t/h       |
| Umidade                    | 50,0%  |         |           |
| Cinzas                     | 1,5%   | 1,9     | t/h       |
| Bagaço produzido           |        | 126,3   | t/h       |
| Bagaço s/ cana             | 24,25% |         |           |
| Fibra s/ bagaço            | 47,5%  |         |           |
| PCI                        |        | 1.807,0 | kcal / kg |
|                            |        | 7.565,5 | kJ / kg   |

**BIOMASSA DISPONÍVEL PARA QUEIMA**

|                                 |        |         |         |
|---------------------------------|--------|---------|---------|
| Estoque de segurança - Partidas | 5,0%   | 6,3     | t/h     |
| Estoque de segurança - Safra    |        | 30.316  | t/safra |
| Bagaço líquido                  | 74,0%  | 120,0   | t/h     |
| Bagaço total - Safra            |        | 576.000 | t/safra |
| Palha Separada                  | 26,0%  | 41,6    | t/h     |
| Total de biomassa disponível    | 100,0% | 161,6   | t/h     |
| PCI Bagaço                      |        | 7565,5  | kJ / kg |
| PCI Palha                       |        | 10517,8 | kJ / kg |
| PCI Médio                       |        | 8325,4  | kJ / kg |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 5.6 CÁLCULO DO MÁXIMO ETANOL HIDRATADO - 1ª GERAÇÃO

Para o cálculo da máxima produção de etanol, admitimos a simplificação e estipulamos um número médio coerente com as médias de produção no Centro-Sul do Brasil. A produtividade de etanol hidratado por tonelada de cana processada foi

estipulada para fins de cálculo e comparação neste trabalho como 85 l/tc (CGEE, 2009).

Desta forma temos a seguinte produção de etanol hidratado estimada para a usina em questão:

- Produção horária:

$$521 \frac{tc}{h} \times 85 \frac{l}{tc} = 44.285 \frac{l}{h}$$

- Produção diária:

$$44,28 \frac{m^3}{h} \times 24h = 1062 \frac{m^3}{dia}$$

- Produção da safra:

$$1062 \frac{m^3}{dia} \times 200 \text{ dias efetivos} = 212.400 m^3$$

## 5.7 CÁLCULO DA MÁXIMA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O cálculo da máxima geração de energia elétrica levou em consideração três possibilidades de pressão e temperatura utilizadas no setor canavieiro e comparou o incremento de energia em cada uma das opções. As três condições de produção de vapor motriz, estão descritas abaixo:

- Opção 1: Vapor motriz com pressão de 67 bar (a), 520° C produzido em caldeira de grelha rotativa e utilizado em 2 turbinas, sendo uma de contrapressão e outra de condensação, com pressão de admissão de 65 bar (a) e temperatura de admissão de 515° C.

- Opção 2: Vapor motriz com pressão de 87 bar (a), 520° C produzido em caldeira de grelha rotativa e utilizado em 2 turbinas, sendo uma de contrapressão e outra de condensação, com pressão de admissão de 85 bar (a) e temperatura de admissão de 515° C.
- Opção 3: Vapor motriz com pressão de 100 bar (a), 540° C produzido em caldeira de grelha rotativa e utilizado em 2 turbinas, sendo uma de contrapressão e outra de condensação, com pressão de admissão de 98 bar (a) e temperatura de admissão de 535° C.

Além da verificação da opção com maior capacidade de geração de energia elétrica, foram consideradas as seguintes premissas de instalação de equipamentos na usina:

- Acionamentos elétricos para preparo de palha, preparo de cana e moenda.
- A bomba de emergência da caldeira é elétrica e a usina dispõe de gerador diesel de emergência.
- O consumo elétrico para o processo da usina foi estimado em 12 kWh/tc.
- O consumo elétrico total da usina foi estimado em aproximadamente 42 kWh/tc

As premissas adotadas acima, foram definidas com base em vários estudos de caso e entrevistas com clientes da Procknor Engenharia, que é uma empresa focada em desenvolvimento de processos e projetos para o setor de cana-de-açúcar, e disponibilizou seu acervo de dados técnicos dos últimos seis anos, contando com aproximadamente 20 projetos (entre plantas para produção de etanol, açúcar e geração termelétrica com biomassa), desenvolvidos e já em operação no Centro-Sul do Brasil.

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 mostram as capacidades de produção e exportação de energia elétrica em cada uma das faixas de pressão e temperaturas adotadas, durante todo o período de operação no ano:

Tabela 5.3 – Geração e exportação de energia elétrica - 67 bar / 520°C

| OPÇÃO 1     | ENERGIA GERADA |         | ENERGIA EXCENDENTE |         | BAGAÇO EXCENDENTE |
|-------------|----------------|---------|--------------------|---------|-------------------|
|             | MW             | MWh     | MW                 | MWh     | t                 |
| Safra       | 76,2           | 365.959 | 55,1               | 264.622 | 80.409            |
| Safrinha    | 37,2           | 29.445  | 33,9               | 26.826  | 29.580            |
| Entressafra | 37,2           | 15.422  | 33,9               | 14.050  | 0                 |
| Total       | -              | 410.827 | -                  | 305.498 | -                 |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

Tabela 5.4 – Geração e exportação de energia elétrica - 87 bar / 520°C

| OPÇÃO 2     | ENERGIA GERADA |         | ENERGIA EXCENDENTE |         | BAGAÇO EXCENDENTE |
|-------------|----------------|---------|--------------------|---------|-------------------|
|             | MW             | MWh     | MW                 | MWh     | t                 |
| Safra       | 78,7           | 377.744 | 57,2               | 274.530 | 85.426            |
| Safrinha    | 38,0           | 30.059  | 34,6               | 27.439  | 34.964            |
| Entressafra | 38,0           | 18.744  | 34,6               | 17.110  | 0                 |
| Total       | -              | 426.547 | -                  | 319.080 | -                 |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

Tabela 5.5 – Geração e exportação de energia elétrica - 100 bar / 540°C

| OPÇÃO 3     | ENERGIA GERADA |         | ENERGIA EXCENDENTE |         | BAGAÇO EXCENDENTE |
|-------------|----------------|---------|--------------------|---------|-------------------|
|             | MW             | MWh     | MW                 | MWh     | t                 |
| Safra       | 82,0           | 393.772 | 60,3               | 289.300 | 76.952            |
| Safrinha    | 39,2           | 31.073  | 35,9               | 28.453  | 25.870            |
| Entressafra | 39,2           | 14.163  | 35,9               | 12.969  | 0                 |
| Total       | -              | 439.008 | -                  | 330.722 | -                 |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

Como é possível avaliar nas Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 existe um incremento interessante de excedente de energia elétrica com a adoção da pressão de 100 bar e 540° C. Utilizando a configuração de 67 bar / 520° como base da comparação temos o cenário favorável à adoção da opção de 100 bar / 540° C conforme Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Comparação do incremento do excedente de energia elétrica

| OPÇÕES           | ENERGIA<br>GERADA | ENERGIA<br>EXCEDENTE | KWH / TC  | VARIAÇÃO |
|------------------|-------------------|----------------------|-----------|----------|
|                  | MWh               | MWh                  | excedente | %        |
| 67 bar / 520° C  | 410.827           | 305.498              | 122,2     | -        |
| 87 bar / 520° C  | 426.547           | 319.080              | 127,6     | 4,45%    |
| 100 bar / 540° C | 439.008           | 330.722              | 132,3     | 8,26%    |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

A diferença na geração de energia excedente pode ser ainda aumentada com a maior utilização da palha, avaliando devidamente o custo de transporte do combustível com baixa densidade.

## 5.8 CAPACIDADE ENERGÉTICA TOTAL - CASO BASE

Para uniformizar os fluxos obtidos de balanços de energia é importante adotar uma única unidade de medida na agregação de diversas variáveis. Neste trabalho a unidade adotada será a tep (tonelada equivalente de petróleo), uma vez que a mesma está relacionada diretamente com um componente importante da matriz energética mundial, além de expressar um valor físico. A metodologia aqui adotada segue o padrão adotado pela EPE - Empresa de Pesquisa Energética, expressa no BEN 2012 (Balanço Energético Nacional – 2012 Ano base 2011), onde o petróleo de referência possui 10000 kcal/kg e todos os fatores de conversão são determinados pelo poder calorífico inferior das fontes de energia.

Os coeficientes de equivalência teóricos estão expressos nas Tabelas 5.7 e 5.8 extraídas das páginas 213 e 214, respectivamente do BEN 2012 (Balanço Energético Nacional - 2012 Ano base 2011).

Tabela 5.7 – Fatores de conversão para energia

| Multiplicar por<br>de            | para  | J                   | BTU                    | cal                | kWh                     |
|----------------------------------|-------|---------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|
| Joule                            | (J)   | 1                   | $947,8 \times 10^{-6}$ | 0,23884            | $277,7 \times 10^{-9}$  |
| Unidade Térmica Britânica        | (BTU) | $1,055 \times 10^3$ | 1                      | 252                | $293,07 \times 10^{-6}$ |
| Caloria                          | (cal) | 4,1868              | $3,968 \times 10^{-3}$ | 1                  | $1,163 \times 10^{-6}$  |
| Quilowatt-hora                   | (kWh) | $3,6 \times 10^6$   | 3412                   | $860 \times 10^3$  | 1                       |
| Tonelada equivalente de petróleo | (tep) | $41,87 \times 10^9$ | $39,68 \times 10^6$    | $10 \times 10^9$   | $11,63 \times 10^3$     |
| Barril equivalente de petróleo   | (bep) | $5,95 \times 10^9$  | $5,63 \times 10^6$     | $1,42 \times 10^9$ | $1,65 \times 10^3$      |

Fonte: EPE – BEN 2011

Tabela 5.8 – Coeficientes de equivalência médios para combustíveis líquidos

| Multiplicar por<br>De m³ | para | giga-caloria | tep(toe)<br>(10 <sup>9</sup> kcal/kg) | bep(boe) | tec(tec)<br>(7000 kcal/kg) | giga-joule | 10 <sup>6</sup> BTU |
|--------------------------|------|--------------|---------------------------------------|----------|----------------------------|------------|---------------------|
| Petróleo                 |      | 8,90         | 0,890                                 | 6,27     | 1,271                      | 37,25      | 35,300              |
| Óleo diesel              |      | 8,48         | 0,848                                 | 5,97     | 1,212                      | 35,52      | 33,660              |
| Óleo combustível         |      | 9,59         | 0,959                                 | 6,75     | 1,370                      | 40,15      | 38,050              |
| Gasolina automotiva      |      | 7,70         | 0,770                                 | 5,42     | 1,099                      | 32,22      | 30,540              |
| Gasolina de aviação      |      | 7,63         | 0,763                                 | 5,37     | 1,090                      | 31,95      | 30,280              |
| GLP                      |      | 6,11         | 0,611                                 | 4,30     | 0,872                      | 25,56      | 24,220              |
| Nafta                    |      | 7,65         | 0,765                                 | 5,39     | 1,093                      | 32,05      | 30,370              |
| Querosene iluminante     |      | 8,22         | 0,822                                 | 5,79     | 1,174                      | 34,40      | 32,600              |
| Querosene de aviação     |      | 8,22         | 0,822                                 | 5,79     | 1,174                      | 34,40      | 32,600              |
| Alcool etílico anidro    |      | 5,34         | 0,534                                 | 3,76     | 0,763                      | 22,35      | 21,190              |
| Alcool etílico hidratado |      | 5,01         | 0,510                                 | 3,59     | 0,728                      | 21,34      | 20,220              |
| Gás de refinaria         |      | 6,55         | 0,655                                 | 4,61     | 0,936                      | 27,43      | 26,000              |

Fonte: EPE – BEN 2011

A capacidade energética total (etanol hidratado + energia elétrica total gerada) por safra da usina avaliada e a capacidade de exportação de energia (etanol hidratado + energia elétrica excedente), convertidas em toneladas equivalentes de petróleo estão ilustradas nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9 – Capacidade energética total da usina avaliada.

| UNIDADE DE ENERGIA  |         |                | tep            | %           |
|---------------------|---------|----------------|----------------|-------------|
| Eletricidade Gerada | 439.008 | MWh            | 37.748         | 26,18%      |
| Etanol hidratado    | 212.400 | m <sup>3</sup> | 106.412        | 73,82%      |
| <b>Total =</b>      |         |                | <b>144.160</b> | <b>100%</b> |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

Tabela 5.10 – Capacidade de exportação de energia da usina avaliada

| UNIDADE DE ENERGIA |         |                | tep            | %           |
|--------------------|---------|----------------|----------------|-------------|
| Eletricidade       | 330.722 | MWh            | 28.437         | 21,09%      |
| Etanol hidratado   | 212.400 | m <sup>3</sup> | 106.412        | 78,91%      |
| <b>Total=</b>      |         |                | <b>134.849</b> | <b>100%</b> |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 6. CASO HIDRÓLISE ENZIMÁTICA

O estudo do caso com hidrólise enzimática avaliou o potencial máximo de produção de etanol hidratado, somando a produção do etanol de primeira geração à produção de etanol de segunda geração, obtido através de material lignocelulósico. A configuração da usina foi escolhida para que a utilização de todo excedente de bagaço fosse consumido durante os dias efetivos de safra. Esta configuração difere da adotada no caso base, onde em virtude da instalação de uma turbina de condensação, o período de operação da central termelétrica foi estendido para aproveitamento total do bagaço e palha excedentes durante o ano.

O potencial de transformação de do bagaço em etanol de segunda geração foi estipulado de acordo com números abaixo, utilizados pelo CGEE (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos) de 2009:

Tabela 6.1 – Conversões adotadas para produção d etanol 2G.

| CONVERSÕES PREVISTAS     | ETANOL<br>HEXOSES | ETANOL<br>PENTOSES | ETANOL<br>2G |
|--------------------------|-------------------|--------------------|--------------|
|                          | (l/t de bagaço)   | (l/t de bagaço)    | total        |
| Hexoses: 80%             |                   |                    |              |
| Fermentação hexoses: 89% | 97                | 0                  | 97           |
| Pentoses: 70%            |                   |                    |              |
| Fermentação pentoses: 0% |                   |                    |              |
| Destilação: 99,5%        |                   |                    |              |

Fonte: CGEE (2009)

### 6.1 CÁLCULO DO ETANOL HIDRATADO - 1ª GERAÇÃO

A produtividade de etanol hidratado por tonelada de cana processada manteve para fins de cálculo a mesma premissa do caso base, utilizando o valor de 85 l/tc (CGEE, 2009).

Desta forma temos a seguinte produção de etanol hidratado estimada para a usina em questão:

- Produção horária:

$$521 \frac{tc}{h} \times 85 \frac{l}{tc} = 44.285 \frac{l}{h}$$

- Produção diária:

$$44,28 \frac{m^3}{h} \times 24h = 1062 \frac{m^3}{dia}$$

- Produção da safra:

$$1062 \frac{m^3}{dia} \times 200 \text{ dias efetivos} = 212.400 m^3$$

## 6.2 CÁLCULO DO COMBUSTÍVEL DISPONÍVEL PARA QUEIMA

Para avaliar a quantidade de combustível disponível para a queima, as características da matéria-prima utilizadas são exatamente iguais as do caso base e foram utilizados os seguintes parâmetros de cálculo:

- Otimização do consumo do vapor de processo para 38% contra 40% aplicado no caso base
- Utilização de caldeira de leito fluidizado com eficiência de 91% contra caldeira de grelha rotativa com eficiência de 87% no caso base.
- Queima da lignina proveniente do bagaço hidrolisado com PCI médio de 1988,5 kJ/kg, e na proporção de 400 kg/ tonelada de bagaço hidrolisado, com 50% de umidade.
- Utilização apenas de turbina de contrapressão com eficiência isoentrópica de 85%.
- Operação apenas no período de safra com 200 dias efetivos.

Os valores de biomassa disponível para queima estão expressos abaixo:

Tabela 6.2 – Cálculo de biomassa disponível

| <b>BIOMASSA DISPONÍVEL PARA QUEIMA</b> |       |           |           |
|----------------------------------------|-------|-----------|-----------|
| Estoque de segurança - Partidas        | 5,00% | 6,32      | t/h       |
| Estoque de segurança - Safra           |       | 30.315,79 | t / safra |
| Bagaço líquido                         | 74%   | 120,00    | t/h       |
| Bagaço total - Safra                   |       | 606.316   | t / safra |
| Palha Separada                         | 26%   | 41,59     | t/h       |
| Total de biomassa disponível           | 100%  | 161,59    | t/h       |
| Biomassa para Hidrólise                |       | 89,7      | t/h       |
| Lignina pós hidrólise                  |       | 35,88     | t/h       |
| Biomassa para queima                   |       | 107,77    | t/h       |
| PCI Bagaço                             |       | 7.565,55  | kJ / kg   |
| PCI Palha                              |       | 10.517,79 | kJ / kg   |
| PCI Lignina                            |       | 8.325,45  | kJ / kg   |
| PCI Médio                              |       | 8.802,93  | kJ / kg   |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

### 6.3 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE ETANOL 2G

A produção de etanol 2G foi estimada com base no potencial de conversão das hexoses, conforme apresentado na Tabela 6.3, e demonstrado nos números abaixo:

Tabela 6.3 – Produção de etanol 2G

| <b>PRODUÇÃO DE ETANOL 2G</b>       |       |                |
|------------------------------------|-------|----------------|
| Biomassa disponível para hidrólise | 89,70 | t/h            |
| Produção de etanol estimada        | 97,00 | l / t biomassa |
| Produção de etanol horária         | 8,70  | m³/h           |

Fonte: CGEE (2009)

- Produção diária

$$8,70 \frac{m^3}{h} \times 24h = 208,80 \frac{m^3}{dia}$$

- Produção da safra

$$208,80 \frac{m^3}{dia} \times 200 \text{ dias efetivos} = 41.760 m^3$$

#### 6.4 CONSUMO DE VAPOR

A produção de etanol de segunda geração gera um incremento considerável no consumo de vapor da planta. O acréscimo do consumo de vapor é resultante da necessidade de vapor de média pressão para o pré-tratamento da hidrólise e também pelo aumento da produção de etanol.

Segundo a literatura consultada, o consumo de vapor de média pressão para o pré-tratamento da hidrólise, por explosão à vapor, consome de 0,55 a 0,65 kg de vapor / kg de biomassa (PALACIOS-BERECHE, R, 2012). Neste trabalho, adotamos o valor intermediário de 0,60 kg de vapor / kg de biomassa a hidrolisar.

O consumo de vapor de processo da usina foi estimado em 38% sobre a cana (consumo para processar a mesma vazão do caso base), adicionando o consumo de 2,6 kg de vapor / litro de etanol destilado.

Tabela 6.4 – Cálculos para consumo de vapor

| <b>CONSUMO DE VAPOR</b>            |     |                       |
|------------------------------------|-----|-----------------------|
| Moagem horária                     |     | 521 t/h               |
| Consumo de vapor processo          | 38% | 198 t/h               |
| Biomassa disponível para hidrólise |     | 89,70 t/h             |
| Consumo vapor pré-tratamento       |     | 0,60 kg / kg biomassa |
| Consumo vapor pré-tratamento       |     | 53,82 t/h             |
| Produção de etanol 2G              |     | 8,16 m³/h             |
| Consumo vapor etanol 2G            |     | 2,60 kg / l etanol    |
| Consumo vapor etanol 2G            |     | 22,62 t/h             |
| Consumo de vapor total             |     | 274,44 t/h            |
| Consumo de vapor % total           |     | 52,67 %               |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 6.5 DEMANDA ELÉTRICA

A demanda elétrica utilizada no caso base, é incrementada neste caso pelo consumo da caldeira de leito fluidizado, neste caso considerada em 9,38 KWh/ tc contra 8,54 kWh/ tc da caldeira de grelha.

O consumo elétrico da planta de hidrólise foi considerado como 18 kWh/ tc (PALACIOS-BERECHE, R. 2012).

Tabela 6.5 – Demanda elétrica

| <b>DEMANDA ELÉTRICA</b>               |        |          |
|---------------------------------------|--------|----------|
| Moagem horária                        | 521    | tc / h   |
| Consumo específico processo           | 12     | kWh / tc |
| Consumo processo                      | 6252   | kWh      |
| Consumo específico caldeira           | 9,38   | kWh / tc |
| Consumo caldeira                      | 4887   | kWh      |
| Consumo específico preparo e extração | 15     | kWh / tc |
| Consumo preparo e extração            | 7815   | kWh      |
| Consumo específico hidrólise          | 18     | kWh / tc |
| Consumo hidrólise                     | 9378   | kWh      |
| Consumo total                         | 28.332 | kWh      |
| Consumo específico                    | 54,38  | kWh / tc |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 6.6 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração de energia elétrica é sensivelmente diminuída quando comparada ao caso base. A queda na produção deve-se principalmente ao fato da exclusão de uma turbina de condensação, utilizada para consumir o vapor proveniente do excedente de combustível. Neste caso, a geração de energia elétrica considerada, deve atender a demanda elétrica de toda a planta e ainda assim gerar algum excedente de energia para exportação.

A comparação do consumo específico das caldeiras permitiu manter a mesma configuração de pressão e temperatura do caso base (100 bar / 540°C), pois com a utilização da caldeira de leito fluidizado que é mais eficiente que a caldeira de grelha, a diferença de consumo específico de combustível não é significativa perante o incremento de energia elétrica alcançado comparando as condições de pressão e temperatura de 65 bar / 520°C versus 100 bar / 540°C, conforme ilustrado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Comparação do incremento do excedente de energia elétrica no caso da hidrólise

| OPÇÕES           | ENERGIA<br>GERADA | ENERGIA<br>EXCEDENTE | kWh / TC  | VARIAÇÃO |
|------------------|-------------------|----------------------|-----------|----------|
|                  | MWh               | MWh                  | excedente | %        |
| 67 bar / 520° C  | 216.813           | 84.614               | 33,8      | -        |
| 100 bar / 540° C | 240.563           | 104.630              | 41,9      | 23,66%   |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 6.7 RESUMO DE PRODUÇÃO DO CASO HIDRÓLISE

A produção total de energia gerada pela usina no caso hidrólise, é dada pela produção total de etanol de primeira geração, que é exatamente a mesma produção do caso base, acrescida pela produção do etanol de segunda geração e do excedente de energia elétrica, onde os resultados obtidos, encontram-se resumidos na Tabela 6.7:

Tabela 6.7 – Resumo da produção do caso hidrólise

**RESUMO DE PRODUÇÃO - CASO HIDRÓLISE**

|                               |         |            |
|-------------------------------|---------|------------|
| Etanol hidratado 1ª geração   | 212.400 | m³/safra   |
| Etanol hidratado 2ª geração   | 41.760  | m³/safra   |
| Energia elétrica total gerada | 240.563 | MW.h/safra |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

A capacidade energética total (etanol hidratado 1ª e 2ª geração + energia elétrica total gerada) por safra da usina avaliada e a capacidade de exportação de energia (etanol hidratado 1ª e 2ª geração + energia elétrica excedente), convertidas em toneladas equivalentes de petróleo estão ilustradas nas Tabelas 6.8 e 6.9

Tabela 6.8 – Capacidade energética total da usina – caso hidrólise.

| UNIDADE DE ENERGIA          |         |     | tep            | %           |
|-----------------------------|---------|-----|----------------|-------------|
| Eletricidade                | 240.563 | MWh | 20.685         | 13,94%      |
| Etanol hidratado 1ª Geração | 212.400 | m³  | 106.412        | 71,71%      |
| Etanol hidratado 2ª Geração | 41.760  | m³  | 21.297         | 14,35%      |
| <b>Total=</b>               |         |     | <b>148.394</b> | <b>100%</b> |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

Tabela 6.9 – Capacidade de exportação de energia total da usina – caso hidrólise

| UNIDADE DE ENERGIA          |         |     | tep            | %           |
|-----------------------------|---------|-----|----------------|-------------|
| Eletricidade                | 104.630 | MWh | 8.997          | 6,58%       |
| Etanol hidratado 1ª Geração | 212.400 | m³  | 106.412        | 77,84%      |
| Etanol hidratado 2ª Geração | 41.760  | m³  | 21.297         | 15,58%      |
| <b>Total=</b>               |         |     | <b>136.706</b> | <b>100%</b> |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

## 7. COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES FINAIS

A comparação dos dois casos analisados permitiu avaliar as diferenças de produção total de energia, bem como a quantidade máxima de energia exportada. A comparação classifica e converte a produção de etanol hidratado e energia elétrica para tep (tonelada equivalente de petróleo) para possibilitar a comparação da capacidade energética das duas opções apresentadas em uma única unidade equivalente.

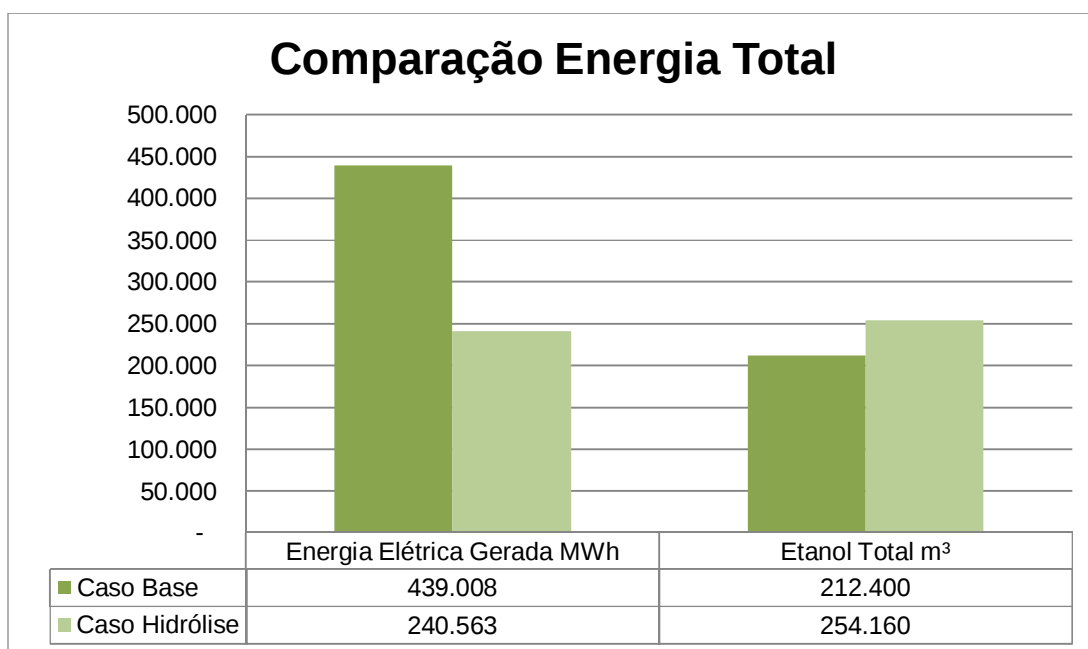


Figura 7.1 – Comparação de energia total  
Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

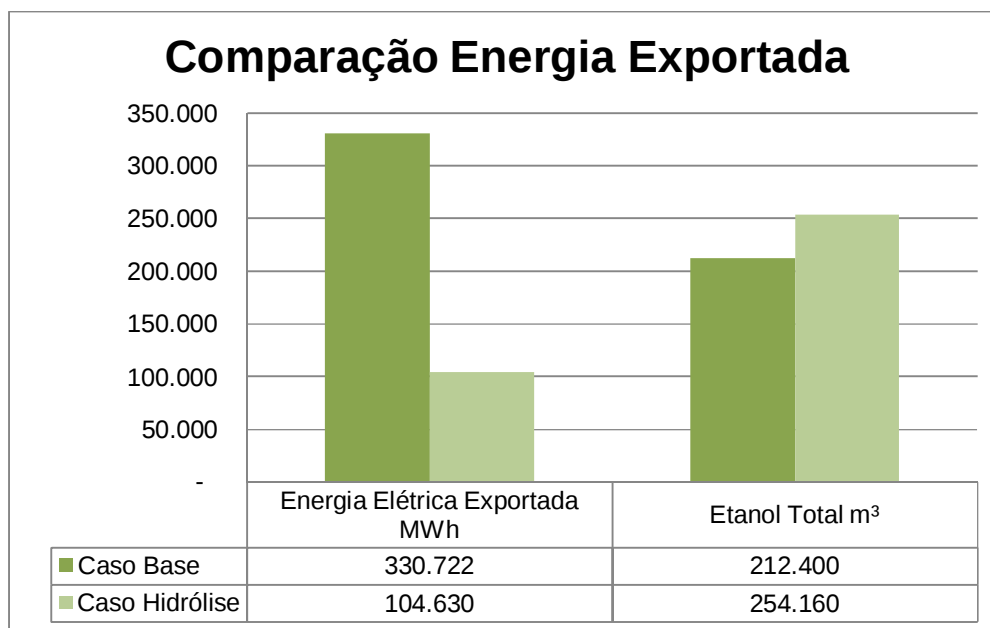


Figura 7.2 – Comparação de energia exportada.  
Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

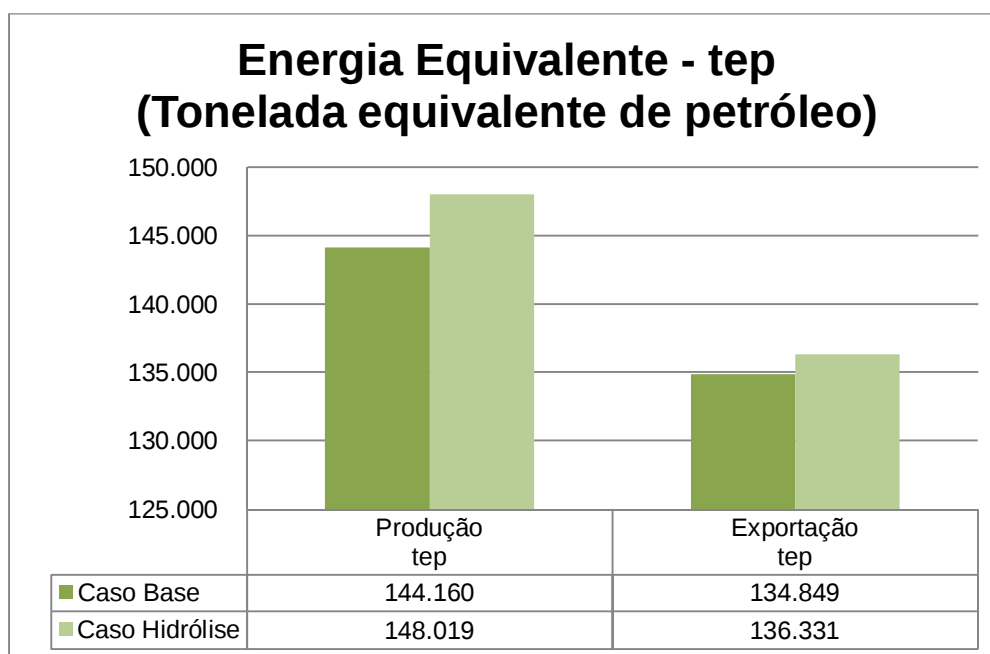


Figura 7.3 – Comparação de energia equivalente - tep  
Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

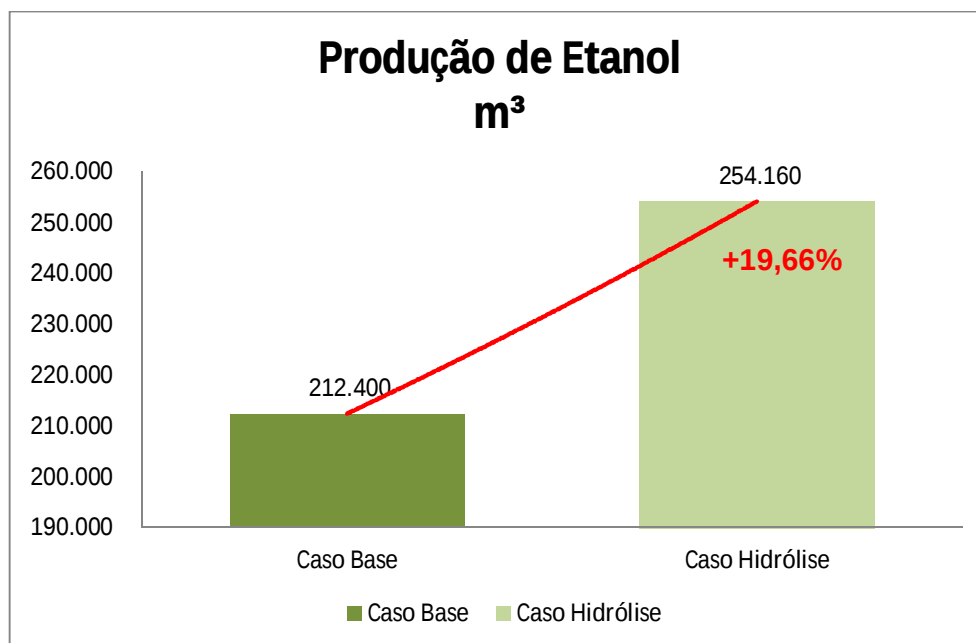


Figura 7.4 – Comparação da produção de etanol.  
Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

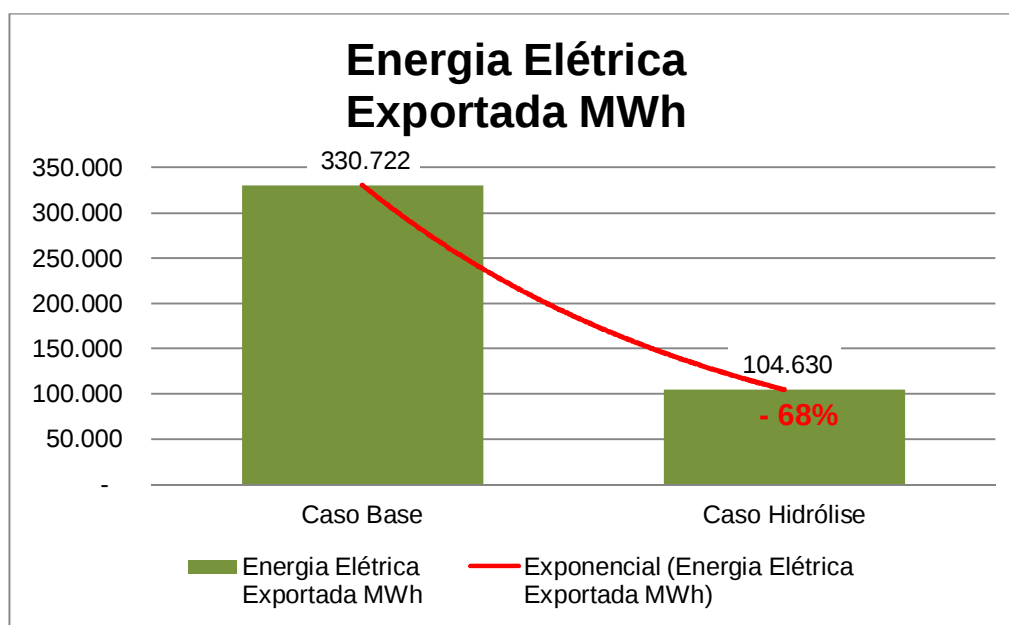


Figura 7.5 – Comparação de energia elétrica exportada MWh.  
Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

A conclusão deste estudo de caso nos mostra que apesar da usina com uma planta de hidrólise anexa e produção de etanol 2G apresentar maior produção total de energia (avaliando o número em tep), o aumento da quantidade energia líquida para exportação é praticamente insignificante, em função do aumento de consumo de vapor e energia elétrica na planta. Mesmo com ciclos termodinâmicos para geração de vapor mais eficientes, utilizando-se caldeiras de leito fluidizado, o incremento na produção de etanol (acréscimo de 19,66%) não é substancial quando comparado ao decréscimo na produção de energia elétrica excedente (decréscimo de 68%). Desta forma, podemos concluir que a viabilidade dos projetos para implantação de etanol de segunda geração serão muito sensíveis as variações de preço da energia elétrica versus o do etanol. Esta conclusão nos remete a avaliar a questão dos leilões de energia elétrica atuais, pois do ponto de vista de investimento, a produção de energia elétrica pode ser mais segura financeiramente para o produtor, pois os contratos de fornecimento de energia elétrica efetuados a partir dos leilões tem caráter de longo prazo, e logo, sofrem menos com a volatilidade dos preços de mercado, diferentemente do etanol, que apesar de representar a maior parcela do faturamento da usina, tem seu preço ditado pela oscilação do preço da gasolina, que sofre forte intervenção estatal.

A decisão pela aumento de produção de etanol via hidrólise enzimática ou de aumento de capacidade de exportação de energia elétrica, deverá ser influenciada nos próximos anos, principalmente pelos fatores indicados abaixo:

- Preço da gasolina;
- Preço da energia elétrica;
- Elevação do custo de produção da cana de açúcar;
- Custo da logística do transporte de palha adicional;
- Custo das enzimas para hidrólise;
- Separação dos leilões de energia elétrica de fontes renováveis;
- Importação de gasolina x exportação de etanol.

A melhoria da tecnologia existente para produção de etanol 2G, bem como a possibilidade de conversão das pentoses serão determinantes para aumentar a escala de produção e assim diminuir o custo unitário do litro do etanol produzido na

tentativa de viabilizar economicamente este tipo de investimento. Os cenários aqui estudados (usina com máxima geração termelétrica e usina com planta de hidrólise anexa) também mostram que a proporção de palha adicional de 5% trazida do campo, talvez não seja suficiente para a migração para uma nova rota na produção de etanol pelo baixo incremento de receitas gerado com a produção de etanol 2G, utilizando somente as pentoses como fonte fermentescíveis.

A tabela abaixo simula as receitas dos dois casos estudados utilizando valores do m<sup>3</sup> de etanol hidratado conforme site da UNICA - União da Indústria da Cana-de-açúcar, na data de 06/06/2013, e preço da energia elétrica conforme leilão de energia A-5 / 2011, disponível no site da EPE - Empresa de pesquisa energética em 20/12/2011.

Tabela 7.1 – Avaliação de receitas totais por safra

| <b>CASO BASE</b> |        |                | <b>R\$/unid.</b> | <b>R\$</b>            | <b>%</b>    |
|------------------|--------|----------------|------------------|-----------------------|-------------|
| Eletricidade     | 330722 | MWh            | 102,18           | 33.793.173,96         | 12,71%      |
| Etanol hidratado | 212400 | m <sup>3</sup> | 1092,22          | 231.987.528,00        | 87,29%      |
| <b>Total=</b>    |        |                |                  | <b>265.780.701,96</b> | <b>100%</b> |

| <b>CASO HIDRÓLISE</b>       |        |                | <b>R\$/unid.</b> | <b>R\$</b>            | <b>%</b>    |
|-----------------------------|--------|----------------|------------------|-----------------------|-------------|
| Eletricidade                | 104630 | MWh            | 102,18           | 10.691.093,40         | 3,71%       |
| Etanol hidratado 1ª Geração | 212400 | m <sup>3</sup> | 1092,22          | 231.987.528,00        | 80,47%      |
| Etanol hidratado 2ª Geração | 41760  | m <sup>3</sup> | 1092,22          | 45.611.107,20         | 15,82%      |
| <b>Total=</b>               |        |                |                  | <b>288.289.728,60</b> | <b>100%</b> |

Fonte: OLIVEIRA, C.E. (2013)

É possível notar um pequeno incremento na receita total da ordem de 8%, que aparentemente não seria suficiente para cobrir os investimentos em uma tecnologia nova e sem concorrência nacional. A eletricidade excedente no caso hidrólise tem singela participação de apenas 3,71% da receita total.

Como o etanol naturalmente consiste a maior parcela do faturamento, é muito provável que seja viável o investimento para trazer cada vez mais material celulósico do campo. Os resultados do estudo de caso utilizando 5% de palha adicional à cana, demonstram a necessidade de aumentar a proporção de palha trazida para a indústria para que a produção de etanol de segunda geração tenha ganho de escala economicamente viável. O transporte da palha adicional, no entanto, merece estudo específico em função da baixa densidade do material e consequentemente dos custos que esta característica impõe em virtude do transporte se utilizar na grande

maioria das vezes veículos que queimam derivados de petróleo. A discussão sobre a maior utilização da palha que hoje é deixada no campo, ainda deve estar presente em debates sobre a quantidade ideal de palha para recobrimento do solo pós-colheita, que depende de fatores como localização geográfica, tipo de solo, umidade, dentre outros fatores agronômicos e técnicos.

Outro fator de extrema importância e que merece estudo dedicado é o manejo da vinhaça, que com a maior produção de etanol irá consequentemente exigir novos esforços e soluções para concentração, transporte e aplicação. Estudos complementares para análise da concentração ou da biodigestão para geração de biogás serão obrigatórios para analisar os impactos deste possível incremento na produção obtido através do etanol de segunda geração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASE SÓLIDA ENERGIA. Sistemas de geração de energia. Disponível em: <<http://www.basesolidaenergia.com.br>>. Acesso em: 28 abr 2013.

BAJAY, Sergio V., Calle, Frank Rosillo, Rothaman, Harry. (organização); Tradutores: Rocha, José D., Rocha, Maria Paula G. D.. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**, Editora da Unicamp, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. **Boletim Mensal dos Combustíveis Renováveis**, nº 17, jan. 2011.

BRUMAZI. Caldeira - Experiência e tecnologia aplicadas ao setor. Disponível em: <<http://www.brumazi.com.br/caldeira>>. Acesso em: 12 mai 2013.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil**. Brasília, DF, 2009.

COELHO, S. T. **Uso de biomassa, biodigestores e biogás**. São Paulo, Universidade de São Paulo. Notas de aula, São Paulo, 2012

CORTEZ, Luís A. B., et al., 2008. **Biomassa para Energia**, Editora da Unicamp.

DIAS, M.O.S., et al., **Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems**, Energy (2010), doi:10.1016/j.energy.2010.09.024

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Análise de conjuntura dos bio-combustíveis**, Janeiro 2010 – Dezembro 2010. Mai. de 2011.

FERNANDES, Antonio Carlos, 2003. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**, 2ª Ed. STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil.

KLOCK, U. et al., 2005. **Química da madeira**, Universidade Federal do Paraná, Setor de ciências agrárias. Curitiba.

LAMONICA, H. M., 2010. **Determinação da eficiência elétrica das usinas brasileiras para produção exclusiva de açúcar e/ou etanol.**

LORA, E.E.S., et al., **Geração Termelétrica: planejamento, projeto e operação**, Interciência, 2004. 2 volumes (1296 p.).

METSO. Tecnologia de combustão de leito fluidizado borbulhantes. Disponível em: <<http://www.metso.com>>. Acesso em: 30 mar 2013.

PALACIOS-BERECHE, R., et al, **Ethanol production hydrolysis from sugarcane biomass - the integration with the conventional process.** In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering, CPOTE 2012, 18-20 September 2012, Gliwice, Poland. Institute of Thermal Technology

PARISI, F. (1989), **Advances in lignocellulosics hydrolysis and in the utilization of the hydrolysates.** In: Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology, vol. 38, ed. A. Fiechter. Springer-Verlag, Berlin, pp. 53-87

REIN, P., 2007. **Cane Sugar Engineering**, Verlag Dr Akbert Bartens KG: Berlin.

SANTOS, J. B. dos, **Processo de solubilização e degradação de celulose e derivados em presença de catalisadores metálicos a base de Sn (IV)**, Universidade Federal de Alagoas, 2010.

SEABRA, J.E.A., et al., 2010. **A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering.** Biomass and Bioenergy 34, 1065-1078.

SEABRA, J.E.A., MACEDO, I.C., 2010. **Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil.** Energy Policy 39 (2011), 421 -428

TGM. Disponível em: <<http://www.grupotgm.com.br>>. Acesso em: 28 abr 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR – UNICA. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/mapa-da-producao>>. Acesso em: 15 fev 2013