

## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

# **CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO ENTRE A PRODUÇÃO DE ETANOL CELULÓSICO E A COGERAÇÃO APARTIR DO BAGAÇO DE CANA**

Por  
**Luiz Claudio Costa Ferreira**

**Brasília, 05 de julho de 2012**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
Faculdade de Tecnologia

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DO POTENCIAL  
ENERGÉTICO ENTRE A PRODUÇÃO DE  
ETANOL CELULÓSICO E A COGERAÇÃO  
APARTIR DO BAGAÇO DE CANA**

POR

**Luiz Cláudio Costa Ferreira**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Armando Caldeira-Pires, UnB/ ENM  
(Orientador)

---

Profa. Ms. Silvia Palmas Rojas (Co-orientador)

---

Profa. Dra. Sandra Luz, UnB/ ENM

---

Prof. Dr. Mario Benjamim B. de Siqueira, UnB/ ENM

---

**Brasília, 05 de julho de 2012**

**Dedicatória**

*Para minha família, que muito me apoiou nesta etapa da minha vida.*

*Luiz Cláudio Costa Ferreira*

## **Agradecimentos**

*Agradeço aos meus pais e a todos aqueles que me apoiaram nessa etapa da minha vida.*

*Luiz Cláudio Costa Ferreira*

A preocupação atual com a preservação e proteção do meio ambiente aumentam a demanda por pesquisas sobre novas fontes de energia para a produção de combustível e geração de energia que não agridam o meio ambiente e que possam sustentar o consumo existente e o crescimento econômico. Assim, os resíduos de biomassa agrícola aparecem como uma importante alternativa de matéria-prima para energia renovável e biocombustíveis. O crescimento do setor agrícola no Brasil tem um papel importante na economia. Somente em 2010, um dos quatro produtos no mercado do agronegócio mundial era brasileiro. Esta situação é baseada na grande produção agrícola no país, por exemplo, em 2009/2010 foram produzidas mais de 648.973.000 de toneladas de cana, 59.012.000 toneladas de milho, e 57.857.000 de toneladas de soja. Como consequência, a grande disponibilidade de resíduos agrícolas, além da infra-estrutura existente agrícola, coloca o Brasil em uma posição importante em tecnologias de energia avançadas. O bagaço obtido da produção de cana em 2009/2010 foi de cerca de 181.353.900 toneladas, dando um potencial de produção de cerca de 25,93 bilhões de litros de etanol derivado do bagaço, e 196.383 GWh de energia elétrica renovável.

Este trabalho tem como objetivo apresentar um resultado de energia comparativo entre a análise de equilíbrio de energia, avaliação da relação entre o consumo de energia do produto e a produção de energia, de duas tecnologias diferentes de energia, utilizando bagaço de cana como matéria-prima, o etanol de hidrólise enzimática, e bioeletricidade usando turbina com ciclo Rankine com extração e condensação.

Após análise dos resultados os fluxos de energia de ambas as tecnologias de energia potencial, a eficiência energética da planta de cogeração foi de cerca de 51,84%, e a eficiência energética da planta potencial do etanol de segunda geração foi 30,83%. Estes resultados mostram que o uso de bagaço para gerar a electricidade é mais vantajoso do que a produção energética bagaço etanol derivado. No entanto, se uma central de cogeração é acoplada à fábrica de etanol, tirando vantagem da lignina obtida a partir do processo de hidrólise e uma percentagem de excedente de bagaço, a eficiência da fábrica de etanol seria de cerca de 64,81%.

Conclusão Esta análise comparativa de energia irá ilustrar as diferenças de resultados e o alcance entre as duas técnicas energéticas análises amplamente utilizados em estudos de engenharia.

**Palavras chaves:** Biocombustíveis, fluxo de energia, bagaço de cana-de-açúcar, cogeração.

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>1. CENÁRIO PANORÂMICO DE BIOMASSA NO BRASIL.....</b>	<b>14</b>
<b>2. BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA.....</b>	<b>19</b>
<b>3. BIOMASSA PARA COMBUSTÃO E GASEIFICAÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>4. TRANSFORMAÇÃO DA BIOMASSA.....</b>	<b>23</b>
4.1. PLATAFORMA BIO-QUÍMICA.....	26
4.1.1. Pré-tratamento.....	27
4.1.2. Hidrólise da celulose.....	32
4.1.3. Fermentação.....	35
4.1.4. Dificuldades encontradas para a plataforma bioquímica.....	37
4.1.5. Usinas bioquímicas no mundo.....	37
4.2. PLATAFORMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	39
4.2.1. Ciclo Rankine.....	40
4.2.2. Ciclo Brayton.....	41
4.2.3. Ciclo Combinado.....	43
4.2.4. Ciclo Otto e Diesel.....	43
4.2.5. Gaseificação.....	46
4.2.6. Pirólise.....	52
4.2.7. Dificuldades encontradas para o uso do bagaço de cana para geração de eletricidade.....	53
4.2.8. Usinas existentes pelo mundo.....	54
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico da produção agrícola brasileira.....	13
Figura 2. Oferta brasileira de energia – ano base 2011. ....	15
Figura 3. Matriz elétrica brasileira. ....	15
Figura 4. Complementaridade da hidroeleticidade com o setor sucroenergético.....	16
Figura 5. Biomassa lignocelulósica. ....	18
Figura 6. Plataformas bioquímica e termoquímica.....	22
Figura 7. Plataforma bioquímica. ....	23
Figura 8. Processos da plataforma termoquímica. ....	24
Figura 9. Processos da plataforma bioquímica. ....	25
Figura 10. Efeito do pré-tratamento numa biomassa lignocelulósica. ....	26
Figura 11. Plataforma termoquímica. ....	38
Figura 12. Ciclo Rankine.....	39
Figura 13. Turbina a vapor contrapressão. Fonte: Basquerotto (2010).....	40
Figura 14. Turbina a vapor condensação. Fonte: Basquerotto (2010). ....	40
Figura 15. Ciclo Brayton. ....	41
Figura 16. Ciclo combinado.....	42
Figura 17. Cogeração com motor alternativo.....	43
Figura 18. Gaseificador de leito fixo contracorrente.....	46
Figura 19. Gaseificador concorrente.....	48
Figura 20. Gaseificador de leito fluidizado.....	49
Figura 21. Funcionamento de um leito fluidizado. ....	50
Figura 22. Ciclo combinado com gaseificação. ....	52
Figura 23. Planta de hidrólise combinada a uma planta de etanol.....	56
Figura 24. Fluxo energético da usina de etanol celulósico com cogeração do artigo de Walter e Ensinas (2010).....	58
Figura 25. Fluxo energético do bagaço de cana na usina de etanol celulósico. ....	59
Figura 26. Representação do ciclo Rankine da planta de geração de eletricidade do artigo de Seabra e Macedo. ....	60
Figura 27. Fluxo energético da usina termoelétrica (CEST).....	61
Figura 28. Fluxo de energia do bagaço de cana para usina termoelétrica.....	62
Figura 29. Comparação do retorno do investimento em função do custo da biomassa. ....	62

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Capacidade de geração de energia elétrica no Brasil. ....	16
Tabela 2. Estimativa de oferta da biomassa de cana até o ano de 2030 (em milhões de toneladas). ....	17
Tabela 3. Percentual típico dos componentes de diferentes fontes de materiais lignocelulósicos.....	19
Tabela 4. Poder calorífico de materiais. ....	20
Tabela 5. Comparação entre os métodos de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica. ....	30
Tabela 6. Características de cada tipo de hidrólise celulósica.....	32
Tabela 7. Empresas que utilizam a hidrólise no mundo.....	37
Tabela 8. Comparação entre as tecnologias. ....	44
Tabela 9. Características das tecnologias de conversão. ....	45
Tabela 10. Usinas que utilizam a gaseificação. ....	54
Tabela 11. Dados de entrada e saída da planta de hidrólise enzimática. ....	56
Tabela 12. Dados de operação da planta de cogeração da usina de etanol celulósico.....	57
Tabela 13. Características da biomassa disponível. ....	58
Tabela 14. Dados de operação da planta de cogeração para produção de energia elétrica. ....	60

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Siglas

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
CFB	Leito Fluidizado Circulante
BFB	Leito Fluidizado Borbulhante
BIG-GT	Biomass Integrated Gaseification Gas Turbine
BIG-STIG	Biomass Integrated Gaseification Steam Injected Gas Turbine
BIG-ISTIG	Biomass Integrated Gaseification Intercooled Steam Injected Gas Turbine
BIG-GTCC	Biomass Integrated Gaseification Gas Turbine Combines Cycles
BTL	Biomass to Liquid
CEST	Turbinas de Condensação e Extração
SSF	Sacarificação e Fermentação Simultânea
SHF	Hidrólise e Fermentação Separadas
SSCF	Sacarificação e Cofermentação Simultânea
CBP	Bioprocessamento Consolidado
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPFL	Companhia Paulista de Forças e Luz
CTC	Centro Tecnológico Canavieiro
OECD	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNICA	União da Indústria da Cana-de-Açúcar
UNICAMP	Universidade de Campinas

# INTRODUÇÃO

A preocupação atual com a preservação e a proteção do meio ambiente tem provocado uma grande demanda por pesquisas de novas fontes de energia e tecnologia que podem gerar energia sem prejudicar o meio ambiente e que consigam sustentar o consumo existente. A energia de materiais orgânicos de plantas e animais é uma das principais alternativas energéticas da atualidade. A bioenergia é toda e qualquer forma de energia associada a formas de energia química acumulada mediante processos fotossintéticos. Os recursos naturais que dispõem de bioenergia denominam-se, geralmente, biomassa, que podem ser processadas para a obtenção de formas mais elaboradas para o aproveitamento humano (BNDES; CGEE, 2008).

A biomassa tem sido utilizada como fonte de calor ou de geração de eletricidade, e, embora tenha sido o primeiro vetor energético empregado pela humanidade e ainda hoje seja uma fonte energética de grande importância, a geração de energia elétrica a partir da biomassa ainda é muito restrita (PRADO, 2007). O domínio do uso da biomassa para produção de energia foi até meados do século XIX, nos anos subsequentes, a participação da biomassa na matriz energética mundial foi reduzida em decorrência do grande aumento da demanda total de energia a partir do carvão, gás natural, óleos combustíveis e energia nuclear (GÓMEZ, 1996).

Como exemplos de aproveitamento da bioenergia, têm-se a produção de combustíveis e a geração de energia mediante fontes de biomassa. A biomassa, que representa a quarta fonte de energia em nível global e constitui o principal combustível para 75% da população mundial (COUTO et al., 2004), significando 85% do consumo mundial de energia, pode produzir a partir dela combustíveis sólidos, líquidos e gasosos (COUTO et al., 2004).

Os biocombustíveis disponíveis no mercado são o etanol derivado da cana-de-açúcar, do milho e da beterraba e o biodiesel derivado da soja e do girassol. Outro método de aproveitamento da biomassa é utilizá-la na geração de energia elétrica. De acordo com Macedo Júnior et al. (2010), já existem 360 usinas de produção de energia elétrica que utilizam a biomassa para gerar eletricidade, conseguindo alcançar 6.403.460 kW.

Na utilização de biomassa para geração de energia elétrica, usinas de cana-de-açúcar utilizam a cogeração para conseguir redução em seus custos operacionais. Cogeração são os processos de produção combinados de calor útil e potência, com uso sequencial da energia liberada pela queima de uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico empregado (ROMÃO JÚNIOR, 2009). Dependendo do ciclo termodinâmico utilizado, podem-se obter diferentes rendimentos e um melhor aproveitamento da matéria-prima.

O Brasil possui um competente parque industrial para fornecimento de equipamentos e sistemas de geração a partir de resíduos de madeira, agrícolas e industriais (KINTO et al., 2002). Com a ajuda do governo, por meio de políticas e programas de incentivo coordenados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o país tenta garantir investimentos em pesquisas tecnológicas para conseguir a diversificação de sua matriz energética, garantindo maior confiabilidade e segurança no abastecimento nacional (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

As principais vantagens da cogeração na geração de energia elétrica são maior proteção do meio ambiente, maior eficiência na geração de energia, redução de gastos de transporte e de distribuição e melhor adequação entre a oferta e a procura de energia (UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA, 2010; CLEMENTE, 2003). Tendo em vista o fato de que haveria uma descentralização de geração e aproximação dos pontos de carga – já que não seria mais necessário localizarem-se em rios –, com equipamentos e combustível nacional (resíduos de processos), a biomassa passaria a ser ótima opção estratégica de energia para o país (MARCON, 2005).

Na perspectiva de produção de biocombustíveis, os Estados Unidos da América (EUA) e o Brasil são os principais produtores de etanol de primeira geração, e a União Europeia (UE), especialmente a Alemanha, é o principal produtor de biodiesel de primeira geração (GOLDEMBERG, 2009). Entende-se como biocombustível de primeira geração aquele produzido a partir dos açúcares retirados do caldo de cana, do amido do milho e da beterraba.

No caso das culturas que armazenam os açúcares em forma de amido, como, por exemplo, o milho, é necessário que este passe por processos enzimáticos a altas temperaturas, para que o amido seja quebrado e convertido em açúcares (BNDES; CGEE, 2008). Para a cana-de-açúcar e a beterraba, o processo é mais simples, tendo em vista possuir uma etapa a menos, já que os açúcares estão disponíveis na biomassa, ou seja, só é necessária uma extração dos açúcares por meio de moagem ou de difusão, podendo seguir diretamente para a fermentação (BNDES; CGEE, 2008).

Entretanto, a produção de biocombustível de primeira geração recebe algumas críticas expostas no trabalho feito pelo BNDES e CGEE (2008) e por outros pesquisadores. Entre elas, pode-se citar a contribuição no aumento do preço dos alimentos, o aumento no desflorestamento e a possível redução na biodiversidade (OEA/EIA, 2010), ou mesmo um possível deslocamento da produção de alimentos das populações para geração e exportação de energia (GOLDEMBERG, 2009).

Surgem, nesse contexto, os biocombustíveis de segunda geração, que utilizam os resíduos de plantações e das indústrias para a produção de bioetanol. Os biocombustíveis de segunda geração permitem aumentar a produção de etanol sem a necessidade de aumentar a área

plantada, o que, desse modo, resolveria um dos problemas (OECD/IEA, 2008). Trata-se do aproveitamento de biomassa da agropecuária ou dos resíduos de outros processos, como bagaço de cana, palha de cereais, farelo de trigo, casca de arroz e sabugo de milho. Essa produção de etanol utilizando a celulose de resíduos ainda está em nível de laboratório e plantas piloto, tendo obstáculos tecnológicos e econômicos a superar, entretanto, sua produção, mesmo pequena, é por volta de 0,1% da produção total do etanol (OECD/IEA, 2008).

Cada tipo de biomassa possui características diferentes, incluindo o local e a maneira que a reserva energética está armazenada. O tipo de vegetal e a maneira em que essa reserva está armazenada determinam qual a tecnologia utilizada para a geração de energia elétrica ou de combustível (BNDES; CGEE, 2008).

A diferença entre os biocombustíveis de primeira e segunda geração é justamente o tipo de matéria-prima utilizada nos processos de obtenção do etanol. Os de primeira geração utilizam a sacarose encontrada nos colmos da cana-de-açúcar e no amido do milho, e os de segunda geração utilizam a celulose dos materiais lignocelulósicos (BNDES; CGEE, 2008). Para os biocombustíveis desses materiais, uma das dificuldades é no momento da quebra da estrutura de proteção da celulose, em que é necessário o processo de hidrólise, que pode ser ácida ou enzimática (BUCKERIDGE et al., 2010).

Os tipos de quebra da estrutura de proteção da celulose ainda apresentam custos elevados que dificultam economicamente a produção em larga escala. Entretanto, empresas brasileiras como a Dedini e empresas de outras nacionalidades pesquisam métodos de melhorar a hidrólise para obter o melhor aproveitamento do material lignocelulósico com um mais preço viável.

A demanda de biocombustíveis aumenta em grandes proporções devido especialmente às políticas energéticas de países como EUA e membros da UE (OEA/EIA, 2010), como fonte alternativa de combustível para o setor de transporte e fonte com melhor desempenho ambiental, especialmente na redução de emissões de gases que aumentam o efeito estufa.

De acordo com Goldemberg (2009), cerca de 4.000 Terawatts atingem plantações existentes no mundo. Estimando que as tecnologias existentes conseguissem obter uma eficiência de 1% na conversão dessa energia, seriam gerados 40 Terawatts de fluxo de energia.

Este trabalho tem como objetivo realizar o balanço energético de biocombustível celulósico derivado do bagaço de cana-de-açúcar e o balanço energético da produção de energia pela mesma fonte energética, o bagaço de cana-de-açúcar. Mediante os resultados referentes aos balanços energéticos, faz-se uma análise comparativa das eficiências energéticas das duas tecnologias disponíveis para a utilização dessa biomassa.

# 1 CENÁRIO PANORÂMICO DE BIOMASSA NO BRASIL

A biomassa está disponível em base renovável por meio de processos naturais ou como subproduto das atividades humanas. Exemplos desses subprodutos da atividade humana são a produção agrícola e a silvicultura, que produzem resíduos que podem ser aproveitados para a geração de energia elétrica e a produção de biocombustíveis de segunda geração.

No Brasil, a utilização de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de biocombustíveis ou mesmo de energia elétrica vem sendo largamente discutida, um dos motivos é a grande quantidade de bagaço que sobra dos processos de fermentação do etanol de cana-de-açúcar ou mesmo da extração de açúcar, como demonstrado na Figura 1).

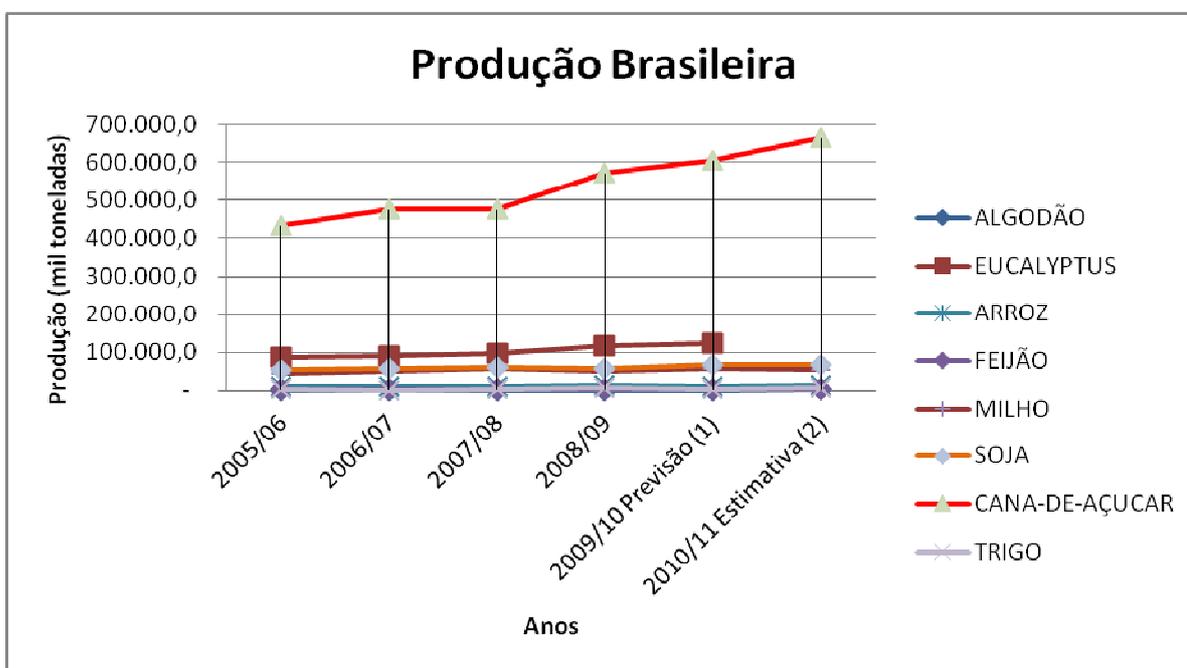


Figura 1. Gráfico da produção agrícola brasileira.

Fonte: Elaboração própria com base em dados da Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2011) e da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – Abrap (2010).

No aproveitamento da biomassa de resíduos da silvicultura, existem muitas pesquisas e indústrias de celulose que os aproveitam para a geração de energia elétrica ou mesmo de carvão vegetal. Os resíduos de madeira são gerados ao longo de todo o seu processo industrial, desde o corte das árvores até a manufatura de seus derivados, com um aproveitamento total de 30% a 40% (GALVÃO JÚNIOR, 2003), ou seja, esses processos podem gerar até 70% de resíduos que são reaproveitados como carvão vegetal na produção de energia.

De acordo com os dados da Conab (2011) e da Abrap (2010), demonstrados na Fig. (1), no período de 2005-2011, as principais culturas da agricultura brasileira foram a cana-de-açúcar, o milho e a soja, cujas produções das safras dos anos 2009/2010 foram respectivamente

604.513.600 toneladas métricas, 52.723.600 toneladas métricas e 68.688.200 toneladas métricas. Na silvicultura, o eucalipto teve uma produção, em 2009/2010, de 124.363.000 toneladas métricas. Para chegar a tal cálculo de produção, utilizou-se que, para cada metro cúbico (m<sup>3</sup>), tem-se 0,68 toneladas de eucalipto numa área plantada; para 2008 e 2009, de 4,3 milhões de hectares e 4,52 milhões de hectares, respectivamente.

A existência de uma infraestrutura e da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar torna a utilização do resíduo bagaço da cana-de-açúcar a matéria-prima mais atrativa para a produção de biocombustível de segunda geração. Os resíduos da produção de soja são considerados um dos menos atrativos, pois, de acordo com a literatura, a produção de resíduos é relativamente pequena se comparada com as demais culturas; além de possuir uma degradação rápida, como mencionado anteriormente e demonstrado na Fig. (1).

A Figura (1) demonstra que a produção de cana-de-açúcar vem crescendo e que no intervalo dos anos 2007/2008 a 2008/2009 houve um aumento significativo, de aproximadamente 100.000 toneladas. Isso se deve à expansão no consumo global de etanol principalmente no Brasil, que possui programas de substituição do uso de veículos movidos apenas a gasolina por automóveis movidos a etanol ou *flex* (gasolina e álcool) (COSTA, 2008). Esse aumento da produção, de acordo com a previsão da Conab (2011), tende a continuar nos próximos anos na mesma taxa, com o intuito de acompanhar o consumo do etanol.

O bagaço de cana-de-açúcar, que é o objeto de estudo deste trabalho, é um dos subprodutos da indústria da cana que apresenta uma produção que atinge cifras vultosas, sendo o aproveitamento desse resíduo uma necessidade nacional, com potencial para se desenvolverem atividades mais nobres do que a geração direta de energia por combustão ou gaseificação (CORAL, 2009).

De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (2008), em novembro de 2008 existiam 302 termelétricas movidas a biomassa no país, que correspondia a um total de 5,7 MW (megawatts) instalados. Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro (resíduo da celulose) com potência total de 944 MW; 27 por madeira (232 MW); 3 por biogás (45 MW); 4 por casca de arroz (21MW) e 252 por bagaço de cana (4 mil MW).

Assim, pode-se observar que o bagaço de cana-de-açúcar já vem sendo utilizado por usinas para cogeração de energia necessária ao processamento da cana, produzindo uma sobra que varia entre zero e 10% (COSTA, 2008). Embora não haja a cogeração de produção de energia para venda, a biomassa conseguiu ser a segunda principal oferta de energia interna, com aproximadamente 16%, só perdendo para o petróleo e seus derivados, como mostra a Fig. (2).

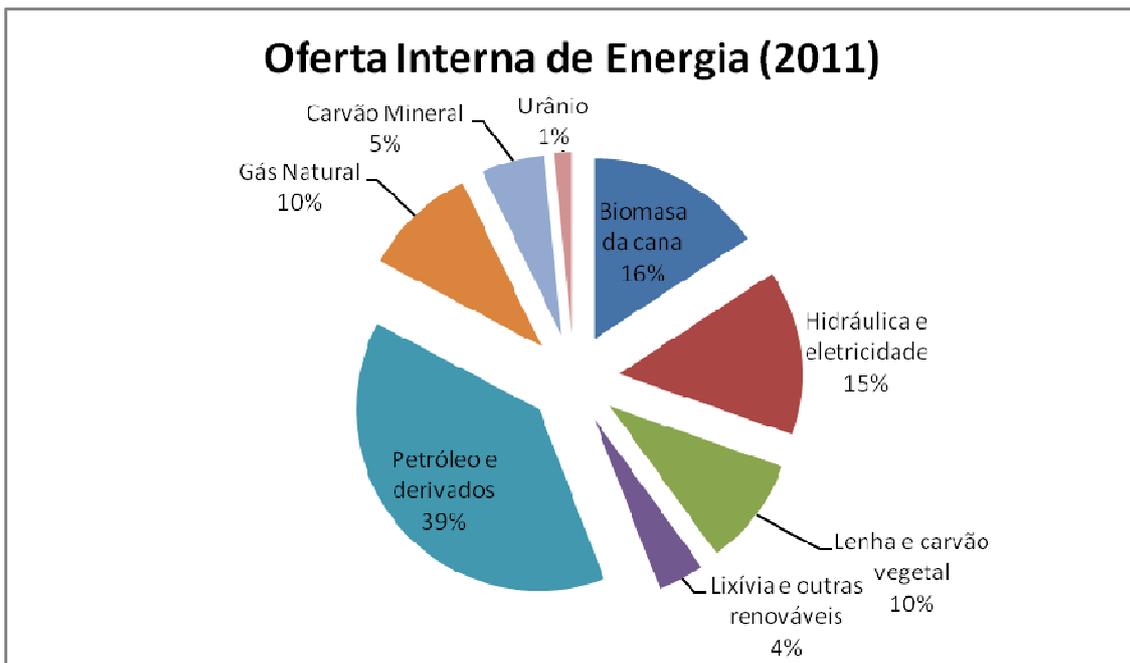


Figura 2. Oferta brasileira de energia – ano base 2011.  
 Fonte: Elaboração própria com dados do MME (2012).

Na geração de energia elétrica, o uso da biomassa também ficou na segunda posição, com 6,5% da matriz energética, apenas perdendo para a hidráulica, como representado na Fig. (3). Essa porcentagem poderia ser aumentada se houvesse um programa organizado de aproveitamento dessa fonte energética, atraindo médias e pequenas usinas para a produção de energia elétrica e melhorando o aproveitamento total do coeficiente energético contido no bagaço (CONAB, 2011).

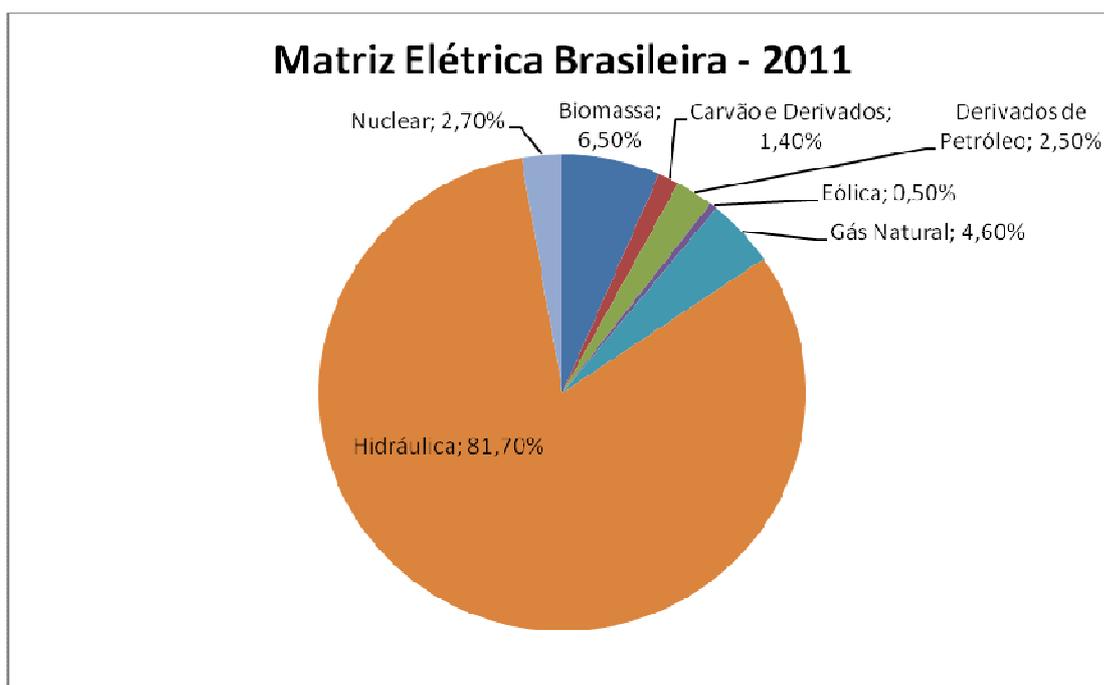


Figura 3. Matriz elétrica brasileira.  
 Fonte: Elaboração própria com base nos dados do MME (2012).

No Estado de São Paulo, existem 131 usinas e destilarias que utilizam o bagaço de cana para gerar energia para o consumo na produção de álcool e de açúcar, e muitas destas produzem excedente, que pode ser utilizado para uso doméstico das cidades. Exemplo do aproveitamento desse excedente é a Companhia Paulista de Forças e Luz (CPFL), que, em 2001, possuía contrato de compra de eletricidade excedente com nove usinas de São Paulo (CGEE, 2001).

A geração de energia elétrica das usinas e destilarias de cana possui uma parcela ainda muito pequena na matriz energética se for levado em consideração o seu potencial. Na Tabela (1), está representada a porcentagem da oferta de energia elétrica do setor sucroalcooleiro no ano de 2009 e de seu potencial. Este é praticamente o dobro do que existe atualmente.

Tabela 1. Capacidade de geração de energia elétrica no Brasil.

<b>Tipo de Empreendimento</b>	<b>Total em Megawatts</b>	<b>Participação no total</b>
Total da capacidade do país	106.569	100%
Potência instalada de Itaipu	14.000	13,1%
Potência instalada observada do setor sucroalcooleiro	5.915	5,6%
Potencial do setor sucroalcooleiro	13.346	12,5%

Fonte: Conab (2011).

Uma das vantagens em utilizar o bagaço de cana é que o período de safra coincide com o período que há pouca chuva, em que os rios e as hidroelétricas estão com níveis mais baixos (UNICA, 2010). A Figura (4) demonstra a complementaridade da hidroeletricidade com o setor sucroenergético no Brasil, levando em consideração a moagem de cana no Centro-Sul.

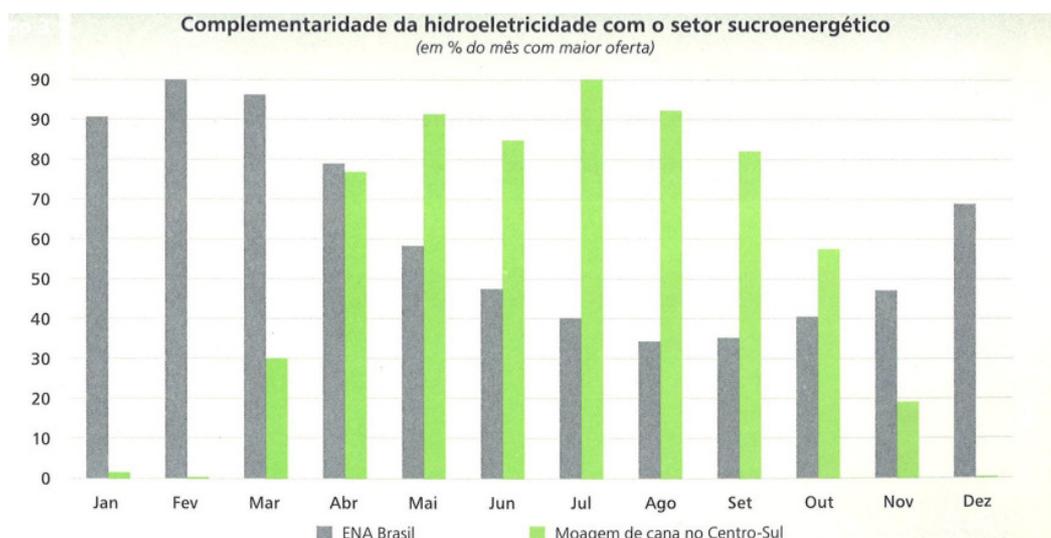


Figura 4. Complementaridade da hidroeletricidade com o setor sucroenergético.  
Fonte: Unica (2010).

O MME estima que nos próximos anos o bagaço de cana será utilizado em grande escala para a geração de eletricidade por meio da cogeração. Fazendo uma estimativa para o ano de 2030, uma produção de bagaço de cana será de 153,9 milhões de toneladas, como colocado na Tab. (2) (DANTAS, 2010). Do total da biomassa produzida de cana a destinação, de acordo com o MME, seriam 167,1 milhões de toneladas para a geração de eletricidade e 18,7 milhões de toneladas para a produção de bioetanol de segunda geração (DANTAS, 2010).

Tabela 2. Estimativa de oferta da biomassa de cana até o ano de 2030 (em milhões de toneladas).

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

Fonte: Dantas (2010).

## 2 BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

A biomassa lignocelulósica representa a fração mais expressiva da biomassa vegetal, sendo a maior fonte de compostos orgânicos da biosfera (PINTO, 2010). A biomassa lignocelulósica é composta basicamente de carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina e uma pequena parte de extrativos, ácidos, sais e minerais (CORAL, 2009). A dificuldade de converter esses materiais em insumos químicos se dá pelas características morfológicas existentes entre as três principais componentes da parede celular: celulose, hemicelulose e lignina (PITARELO, 2007).

A celulose é um polímero linear de celobiose (glicose – dímero de glicose). As orientações dos enlaces de hidrogênio adicional fazem com que o polímero torne-se rígido e de difícil fragmentação (CORAL, 2009). A celulose é quebrada no processo de hidrólise em moléculas de monossacarídeos (glicose), mediante a adição de água.

Em sua estrutura supramolecular, a celulose está dividida em regiões altamente ordenadas, denominadas regiões cristalinas, onde são estabilizadas por ligações de hidrogênio, e regiões menos ordenadas ou amorfas, onde as cadeias apresentam uma orientação randomizada. Autores sugerem que a celulose amorfa é mais suscetível à hidrólise enzimática, devido à sua maior área de contato (PITARELO, 2007).

As estruturas microfibrilares de celulose encontram-se embebidas em uma *matrix* composta por hemicelulose e lignina, que tem como objetivo fazer uma barreira que impede a degradação por enzimas e/ou por microbiana (PITARELO, 2007), como demonstra a Fig. (5).

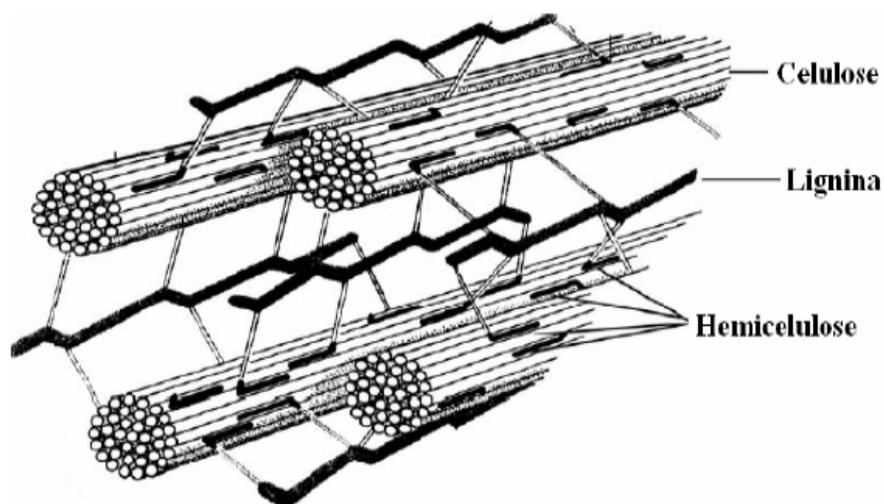


Figura 5. Biomassa lignocelulósica.  
Fonte: Bernardo Neto (2009).

A hemicelulose é constituída por pequenas cadeias ramificadas de vários açúcares, em especial, de xilose (C5), arabinose (C5), galactose, glicose e manose (C6). A hemicelulose, por possuir uma natureza amorfa e ramificada, que permite uma área maior de contato, é relativamente fácil de hidrolisar (PINTO, 2010).

A estrutura da hemicelulose é mais parecida com a da celulose do que a lignina. Ela possui ramificações e cadeias laterais que interagem facilmente com a celulose, dando estabilidade e flexibilidade (PITARELO, 2007). Possui uma quebra maior com o uso da hidrólise ácida do que a celulose, por possuir maior acessibilidade aos ácidos minerais que são utilizados como catalisador.

A natureza química da hemicelulose varia de acordo com o tecido vegetal e o tipo de planta, por isso, na plataforma bioquímica, deveria ser feita uma análise da matéria-prima para melhor selecionar o tipo de processo a ser tomado.

Em qualquer tipo de produção de bioetanol haverá lignina como resíduo, já que ela está presente em todas as biomassas lignocelulósicas. A lignina é um polímero muito complexo de fenilpropano e grupos metoxílicos, uma substância polifenólica sem carboidratos que cobre as paredes celulares (PINTO, 2010).

As ligninas presentes nos vegetais diferem entre si pelo grau de metoxilação, proporção de grupos carboxílicos que estão presentes na forma esterificada dos monômeros, e pelo grau de ligação carbono-carbono entre eles (PITARELO, 2007). Possui uma difícil degradação, podendo ser feita apenas por alguns micro-organismos, como ácidos orgânicos, fenóis e vanilina.

A seguir, a Tabela (3) apresenta as porcentagens de lignina, celulose e hemicelulose em diferentes tipos de culturas. A quantidade de cada um desses componentes influencia na escolha do método para a conversão da biomassa lignocelulósica em biocombustíveis, tendo em vista que, dependendo do arranjo desses três componentes, o processo de quebra para a obtenção de açúcares fica mais complexo.

Tabela 3. Percentual típico dos componentes de diferentes fontes de materiais lignocelulósicos.

<b>Fonte</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>
Palha de cevada	40-44	28-30	20-22
Madeira	44-50	20-26	17-30
Bagaço	31-44	12-26	23-28
Ferragem de milho	36	23	17
Palha de trigo	33	25	23
Palha de arroz	34	25	23

Fonte: Bernardo Neto (2009) e Pinto (2010).

### 3 BIOMASSA PARA COMBUSTÃO E GASEIFICAÇÃO

Após ser feita uma análise química da biomassa, com o objetivo de utilizá-la na rota bioquímica para a produção de biocombustível, é necessário fazermos uma análise dessa biomassa para o aproveitamento pela rota termoquímica, para geração de energia elétrica por uma central termoelétrica.

Para o aproveitamento da biomassa numa central termoelétrica, é necessário conhecer seu poder calorífico inferior (PCI), que só pode ser determinado se forem conhecidos seu poder calorífico superior e a relação entre as quantidades de átomos de hidrogênio-carbono (H/C) existentes. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão efetua-se a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado dessa condensação é recuperado (QUIRINO et al., 2005).

O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação de água (QUIRINO et al., 2005). Na Tabela (4), estão os valores do poder calorífico inferior de alguns materiais.

Tabela 4. Poder calorífico de materiais.

<b>Combustível</b>	<b>PCI</b>
Álcool de cana	5.500 kcal/l
Aparas vinilo	6.300 kcal/kg
Bagaço de cana (35% água)	2.525 kcal/kg
Bagaço de cana (50% água)	1.800 kcal/kg
Bambu (10% água)	3.700 kcal/kg
Casca de arroz (12% água)	3.300 kcal/kg
Casca de algodão	3.000 kcal/kg

Fonte: Paoliello (2006); Aalborg Industries.

No processo de gaseificação, uma das grandes preocupações quanto à biomassa que será utilizada é a respeito do seu teor de umidade, massa de água contida na biomassa (MME, 2008). Se a biomassa possuir uma umidade muito elevada, será necessária uma quantidade maior de energia para iniciar o processo, e a energia fornecida pelo processo de combustão da biomassa no gasificador não será suficiente (MME, 2008).

Isso ocorre porque, quanto maior a presença de água no processo, maior será a energia requerida para vaporizá-la, e menos energia estará disponível para as reações endotérmicas do

processo da gaseificação responsáveis pela produção de H<sub>2</sub> e CO (MME, 2008; QUIRINO et al., 2005).

De acordo com Quirino et al. (2005), a composição química, dimensões, forma e arranjo dos elementos anatômicos acarretam uma diferenciação nas características energéticas, sendo que o poder calorífico, com a umidade da biomassa, está muito influenciado pela composição química, principalmente pela presença da lignina e de extrativos (resinas, óleos, matérias graxas). Browning (1963), citado por Quirino et al. (2005), afirma que o poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, porque estes contêm menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na celulose e hemicelulose.

## 4 TRANSFORMAÇÃO DA BIOMASSA

Neste capítulo, introduzem-se as tecnologias utilizadas para a conversão da biomassa lignocelulósica em energia elétrica e biocombustível, sendo apresentados os conceitos de rotas bioquímicas e termoquímicas para obtenção de biocombustíveis de segunda geração.

As tecnologias de aproveitamento da biomassa atualmente estão divididas em duas categorias: as termoquímicas, como gaseificação e pirólise, e as bioquímicas, como hidrólise, como ilustrado na Fig. (6). Esses dois métodos diferenciam-se na maneira pela qual é efetuada a quebra da estrutura do material, seja por enzimas ou por outras substâncias químicas (plataforma bioquímica), seja pelo uso de energia térmica (plataforma termoquímica) para a obtenção de açúcares ou mesmo de gás síntese, o qual pode ser catalisado para energia elétrica, metanol, diesel, entre outros produtos (BERNARDO NETO, 2009).

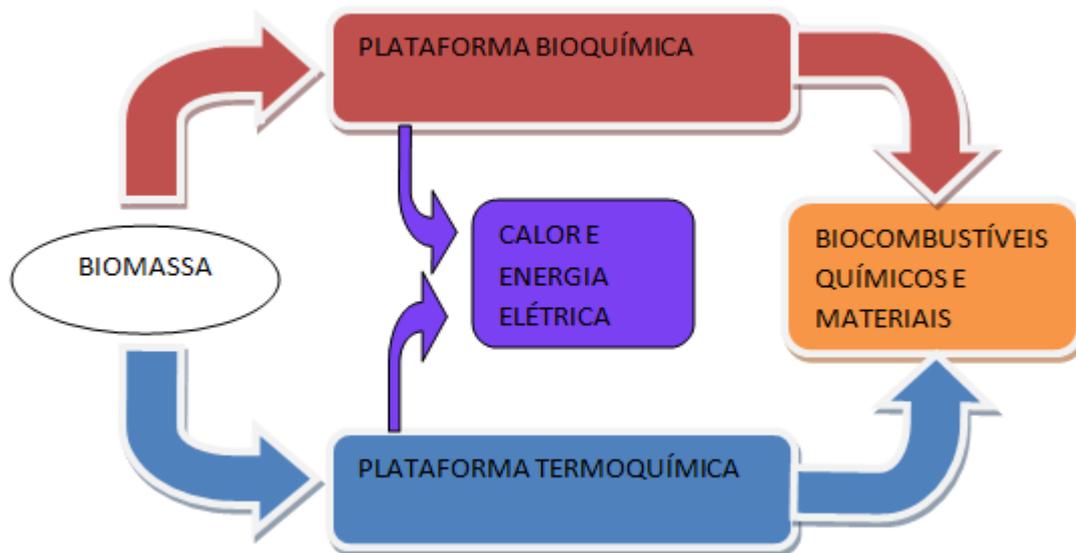


Figura 6. Plataformas bioquímica e termoquímica.  
Fonte: Bernardo Neto (2009).

Para os métodos da plataforma bioquímica, a análise da composição química e estrutural da biomassa é necessária para a escolha da melhor enzima ou ácido para a quebra da celulose (BERNARDO NETO, 2009). A existência de fortes ligações específicas entre os monômeros de açúcar tornam a quebra da celulose muito difícil, sendo assim necessário um tipo específico de substância para conseguir fragmentar a estrutura. Poucos sistemas naturais de bactérias conseguem fazer essa quebra, tornando-se uma das grandes dificuldades do método da hidrólise enzimática (OECD/IEA, 2008). Tendo em vista essa dificuldade, os métodos dessa plataforma para o processamento das matérias lignocelulósicas são muito mais complexos e mais caros do que o processamento de biocombustíveis de primeira geração.

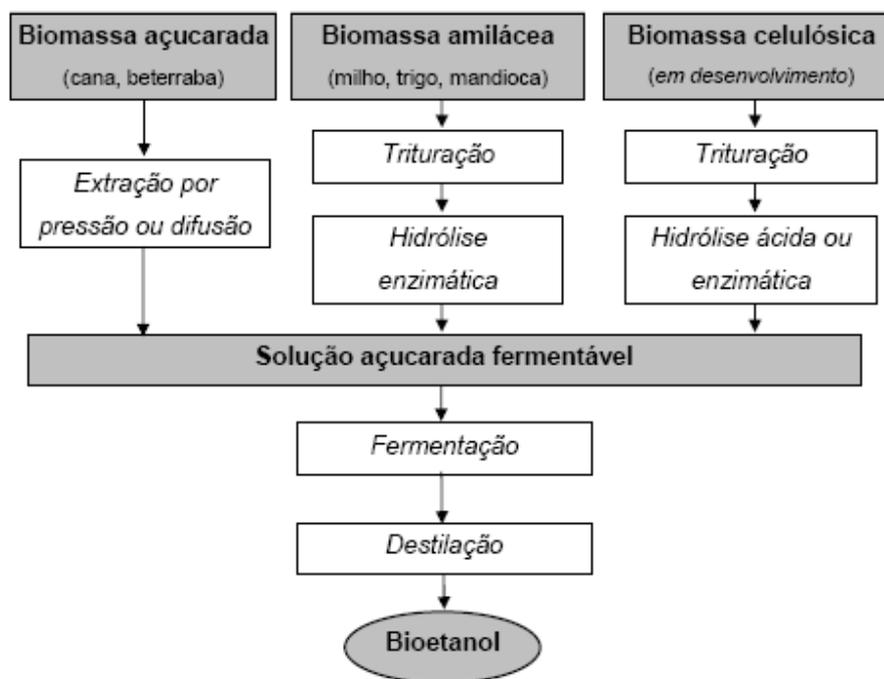


Figura 7. Plataforma bioquímica.  
Fonte: Prado (2007).

No caso da plataforma termoquímica, não é necessário um estudo da composição química nem de sua estrutura em qualquer tipo de biomassa. Atualmente, a gaseificação é muito utilizada na indústria de carvão para obtenção de energia elétrica, e muitas usinas de cana-de-açúcar utilizam as tecnologias termoquímicas para fazer a cogeração e assim ter um aumento em seus rendimentos energéticos, além de vender o excedente de energia elétrica produzida.

A plataforma termoquímica pode fazer o trabalho sozinho ou complementar à bioquímica na produção, tendo em vista que não possui o empecilho da estrutura química da biomassa. O objetivo dessa plataforma é utilizar a pressão e o calor para realizar a conversão da celulose em carbonos, sendo que esses carbonos podem ser convertidos em biocombustível, energia elétrica e vapor (BERNARDO NETO, 2009). Já é utilizada principalmente nas cogerações nas usinas canavieiras.

Um dos produtos que a plataforma termoquímica possui é o gás de síntese (*syngas*), que é obtido pelo processo da gaseificação ou da pirólise da biomassa para a produção de biocombustíveis de segunda geração – um exemplo seria o biometanol. O gás de síntese é uma mistura de gás que contém quantidades variáveis de monóxido de carbono e hidrogênio (BAIOCO et al., 2007). No caso da plataforma termoquímica, há diferentes tipos de tecnologias para transformação da biomassa em energia.

Cada uma dessas tecnologias dá origem a determinados derivados e estes estão em diferentes níveis de avanço tecnológico, como demonstrado na Fig. (8). Por exemplo, na

combustão direta da biomassa para obtenção de calor, a queima da biomassa é feita em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia) e caldeiras, para a geração de vapor.

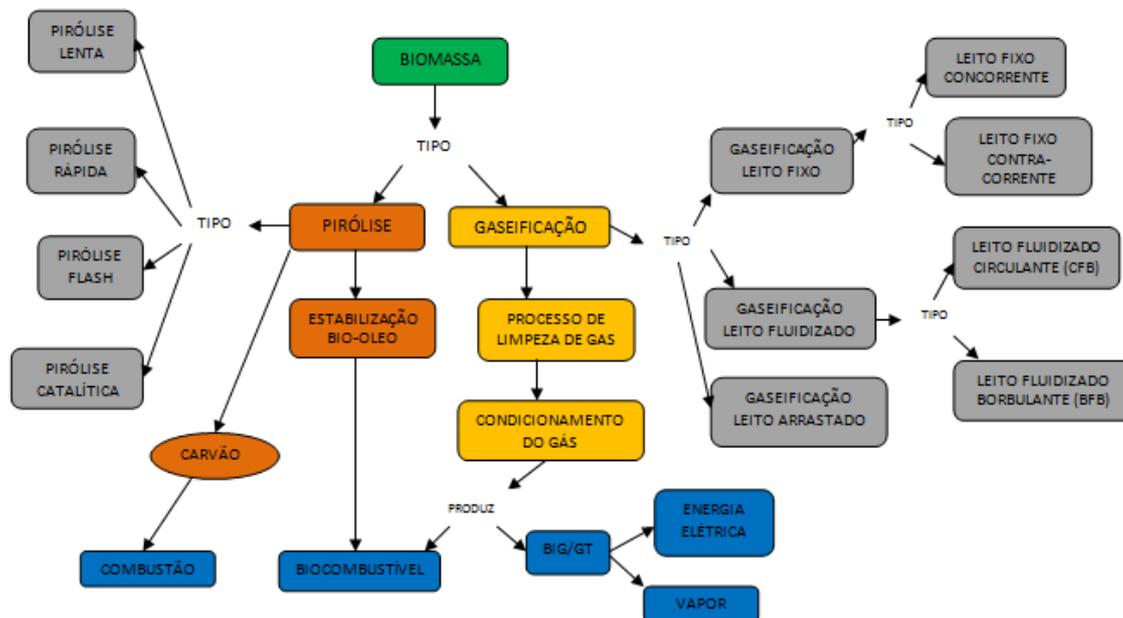


Figura 8. Processos da plataforma termoquímica.  
Fonte: Bernardo Neto (2009).

A plataforma termoquímica, por meio da pirólise, da gaseificação da biomassa ou mesmo da combustão direta da biomassa para a produção de vapor, passa pela obtenção de gases de combustão e, utilizando turbinas a gás, produz-se eletricidade. No caso da produção de gás síntese feita pela gaseificação ou pela pirólise, este passa por uma síntese catalítica ou da fermentação, que torna possível conseguir hidrocarbonetos, alcoóis, hidrogênio, amônia, gás natural sintético etc. Esses processos são conhecidos como processos BTL (*Biomass to Liquid*) (LORA et al., 2009).

Como também colocado na Fig. (8), a plataforma termoquímica possui dois processos, além da combustão direta, para a transformação de biomassa em biocombustível e energia elétrica: a pirólise e a gaseificação. A pirólise caracteriza-se pelo não uso de agentes oxidantes, e pode ser utilizada para produzir bio-óleo com uma eficiência de até 80%, dependendo do processo de pirólise utilizado – que pode ser lenta, rápida, *flash* e catalítica. Os produtos da pirólise também podem ser gaseificados para a obtenção de gás síntese.

De acordo com o Banco de Informações de geração da Aneel, em 2008 existiam 302 termelétricas movidas à biomassa no Brasil, que corresponde a um total de 5,7 mil MW instalados. Desse total, 252 usinas utilizavam o bagaço de cana como matéria-prima para as caldeiras (ANEEL, 2008).

Diversas empresas investem no desenvolvimento de novas tecnologias para a obtenção de biocombustíveis a partir da celulose, como a empresa Novozymes, Chevron, Shell e

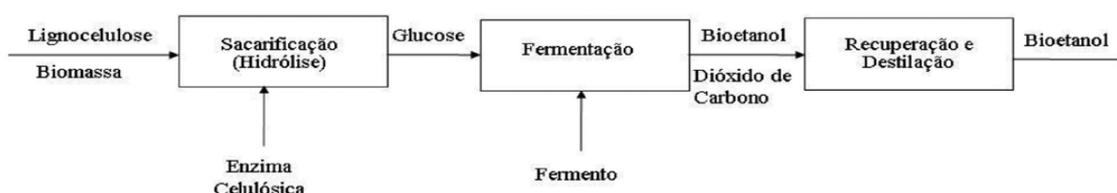
ConocoPhillips (OECD/IEA, 2008). Já existem várias tecnologias para a produção de biocombustíveis de segunda geração, porém, nenhuma delas comercialmente viável para ser implantada numa produção em massa.

No Brasil, país que possui tecnologia bastante avançada em biocombustíveis, empresas investem em novas tecnologias e em projetos pilotos de produção de biocombustíveis de segunda geração, como, por exemplo, a Petrobras, que tomou como uma de suas prioridades a produção de biocombustíveis de segunda geração, principalmente a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Outras empresas também possuem pesquisas e projetos nessa área, como o Centro Tecnológico Canavieiro (CTC), que possui um projeto piloto na cidade de Piracicaba-SP para a produção de biocombustível do bagaço da cana-de-açúcar; a Companhia de Engenharia Brasileira, a Dedini e a Amyris.

## 4.1 PLATAFORMA BIOQUÍMICA

Serão explicados com maiores detalhes os métodos da plataforma bioquímica. O processo bioquímico tem como base o uso de agentes biológicos, enzimas ou micro-organismos, para desconstruir a lignina e celulose em seus polímeros básicos e para quebrar a celulose e hemicelulose em açúcares, como, por exemplo, glicose e xylose.

Os processos de produção de bioetanol a partir de materiais lignocelulósicos geralmente podem ser divididos nas mesmas etapas: pré-tratamento das matérias-primas, hidrólise, fermentação e destilação. Pode-se também considerar mais uma etapa a produção de vapor utilizando os resíduos sólidos. Na Figura (9) está representada uma configuração ilustrativa da plataforma bioquímica.



**Fluxo do Bioetanol de Segunda Geração**

Figura 9. Processos da plataforma bioquímica.

Fonte: Bernardo Neto (2009).

### 4.1.1 Pré-tratamento

O pré-tratamento é necessário devido à forte ligação existente entre celulose, hemicelulose e lignina. O pré-tratamento refere-se a ações mecânicas e físicas que limpam e dimensionam a biomassa com o intuito de otimizar o seu aproveitamento na etapa da hidrólise, alterando ou

removendo a hemicelulose e/ou lignina. Assim, aumenta-se a área superficial e diminui-se o grau de polimerização e a cristalinidade da celulose, que torna a biomassa lignocelulósica mais acessível ao ataque de enzimas (PINTO, 2010). O processo de pré-tratamento também consegue minimizar a existência de inibidores que reduzem e/ou prejudicam a hidrólise da celulose e a fermentação.

A celulose da biomassa é naturalmente resistente ao ataque enzimático, deste modo, o pré-tratamento age por meio de reagentes ácidos e bases, quebrando ou solubilizando, e assim aumentando a porosidade da parede vegetal de lignina e hemicelulose existente ao redor da celulose que impede a interação de grandes moléculas (PINTO, 2010). Cada tipo de biomassa requer um tipo específico de pré-tratamento, que reduza a degradação do substrato e maximize o rendimento do açúcar (CORAL, 2009).

Na Figura (10), é representada de maneira esquemática a ação do processo de pré-tratamento numa biomassa lignocelulósica, a qual desorganiza a estrutura da biomassa, beneficiando o trabalho das enzimas que irão fazer a conversão de carboidratos em açúcares.

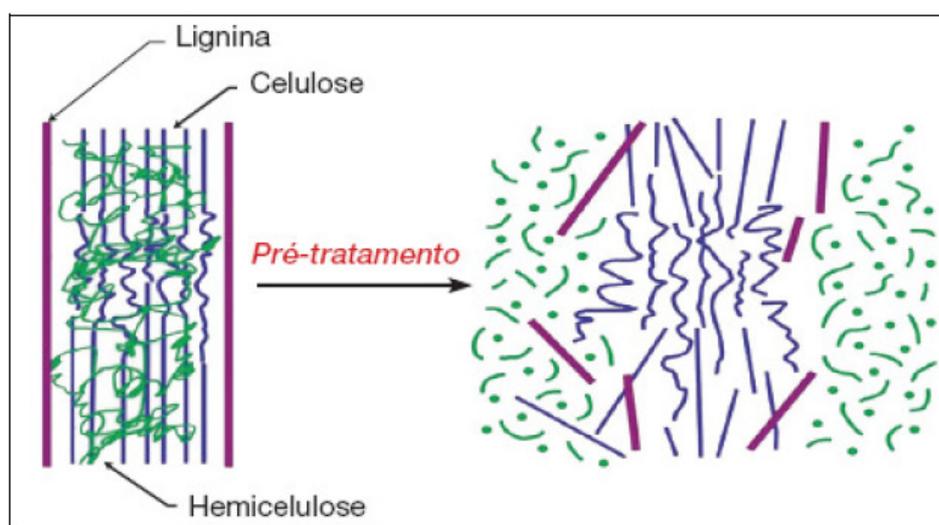


Figura 10. Efeito do pré-tratamento numa biomassa lignocelulósica.  
Fonte: Pinto (2010).

A literatura atual descreve vários tipos de pré-tratamento que podem ser classificados em biológicos (utilização de fungos que mudam a composição química da matéria), físicos, químicos (utilizam componentes químicos ácidos e bases) e combinações dos outros métodos. Os mais conhecidos são o emprego de álcali, hidrólise ácida, explosão a vapor, água quente, fluido supercrítico, amônia líquida e hidróxido de sódio, todos utilizados para desmanchar a estrutura da biomassa lignocelulósica.

#### 4.1.1.1 Tratamento mecânico

Este pré-tratamento é, de forma geral, a primeira etapa de qualquer tipo de tratamento, tanto para a produção de biocombustível de primeira geração quanto de segunda geração.

Nesse tipo de tratamento, a biomassa passa por um processo de limpeza e adequação mecânica para que haja uma boa eficiência nas etapas subsequentes, já que cada tecnologia possui uma caracterização geométrica específica, propriedades geométricas como esfericidade, densidade aparente, superfície específica (BERNARDO NETO, 2009).

Alguns dos métodos mecânicos ou físico são: moagem de bolas, cominuição (redução mecânica do tamanho de partículas da biomassa) e moagem por compressão. Em todos esses processos existe a desorganização do material a fim de se ter a destruição da estrutura celular e torná-la mais acessível para tratamentos posteriores, sejam eles químicos, físicos ou biológicos.

#### 4.1.1.2 Tratamentos físico-químicos

Os pré-tratamentos físicos (vapor de alta pressão ou água quente) e químicos (ácido diluído) possibilitam a remoção seletiva das hemiceluloses, produzindo soluções sacarídeas (pré-hidrolisados) com elevado teor de pentose e reduzido teor de lignina (CORAL, 2009). Os pré-tratamentos alcalinos tendem a promover maior dissolução da lignina e menor solubilização/fragmentação das hemiceluloses.

Pré-tratamentos como vapor de água, ácido sulfúrico diluído, amônia e hidróxido de cálcio estão surgindo como métodos promissores. Atualmente, os métodos utilizando álcalis ou ácidos estão apresentando custos relativamente razoáveis, entretanto, nenhum desses métodos pode ser utilizado de maneira genérica para diferentes tipos de matéria-prima, ainda sendo necessário um estudo de cada tipo de biomassa (CORAL, 2009).

A seguir, serão descritos alguns dos principais métodos de pré-tratamento físico e químico para biomassa lignocelulósica.

##### 4.1.1.2.1 Explosão a vapor

A explosão a vapor é um dos principais pré-tratamentos utilizados para hidrólise de materiais lignocelulósicos, tendo como finalidade solubilizar a hemicelulose de forma a facilitar a hidrólise de celulose e diminuir a formação de inibidores. Esse processo atua tanto química como fisicamente na transformação do material lignocelulósico e envolve o tratamento da biomassa, aquecendo-a rapidamente com vapor saturado, sem adição de agentes químicos, a temperaturas entre 160°C e 240°C durante um tempo de reação que varia de 2 a 30 minutos.

Nesse período, ocorre a hidrólise da hemicelulose, que se finaliza com uma descompressão explosiva (PITARELO, 2007).

Na explosão a vapor, a hemicelulose é hidrolisada mediante ácido acético e outros ácidos liberados durante esse pré-tratamento, em que ocorre também a auto-hidrólise das hemiceluloses, caracterizando o processo como autocatalítico (CORAL, 2009). Os carboidratos liberados das hemiceluloses podem sofrer degradação térmica e estes podem exercer efeito inibitório nas operações subsequentes.

Para aumentar a recuperação de açúcares hemicelulósicos, podem ser utilizados catalisadores ácidos ( $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e ácidos de Lewis ( $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ), que também facilitam a hidrólise da celulose nas etapas posteriores.

Esse tipo de pré-tratamento vem sendo abordado em muitos artigos como um tratamento promissor (GOUVEIA et al., 2009; PITARELO, 2007), embora a utilização do ácido diluído seja maior em indústria, por seu preço.

A empresa sueca Masonite utiliza esse método comercialmente para hidrolisar a hemicelulose na produção de aglomerado de madeira, e, no Brasil, a empresa Madeireira Sintética, em Alagoas, tem utilizado bagaço de cana na produção de aglomerados para a indústria moveleira. Além desses exemplos, esse pré-tratamento tem sido usado em plantas piloto como Iogen (Canadá), Souton (França) e Sekab (Suécia) (CORAL, 2009).

#### 4.1.1.2.2 Água quente ou termo-hidrólise

Este processo é similar ao de explosão a vapor, a diferença é que, enquanto um utiliza o vapor para a explosão, o termo-hidrólise utiliza água quente pressurizada. A biomassa fica em contato com a água comprimida durante 1 a 15 minutos sob temperatura entre  $170^\circ\text{C}$  e  $230^\circ\text{C}$ . Nessas temperaturas, a água promove a cisão das ligações hemiacetálicas dos carboidratos, liberando ácidos durante a hidrólise da biomassa. As partículas da biomassa tendem a romper-se ao contato com a água durante o processo de “cocção”, não sendo necessária, desse modo, a redução das partículas por um processo à parte (CORAL, 2009).

Para o pré-tratamento de água quente, a remoção da celulose cai de 4% a 22% e, durante o processo, uma grande quantidade de lignina pode ser removida – por volta de 35% a 60% (PITARELO, 2007). Uma das vantagens é que não necessita da adição de ácido, mas, quando um ácido é empregado como catalisador, 90% das hemiceluloses são recuperadas.

A desvantagem em utilizar esse tratamento é que ele proporciona a formação de produtos de degradação de açúcares como furfural, mas isso pode ser minimizado fazendo-se um controle do pH da água quente, adicionando bases como hidróxido de potássio (PINTO, 2010).

Existem três tipos de configurações de reatores para o processo de água quente: fluxo cruzado, contracorrente em batelada, concorrentes em batelada. No reator de concorrente, a mistura composta de biomassa e água é aquecida até a temperatura desejada, na qual é mantida em condições para que ocorra o pré-tratamento. Já no reator contracorrente, tem-se a movimentação da água e dos sólidos em direção oposta por meio do reator. No cruzado (transversal), a água quente passa por um leito fixo de biomassa, promovendo a hidrólise dos componentes lignocelulósicos, que são transportados para fora do reator (CORAL, 2009).

#### 4.1.1.2.3 Ácido diluído

O método usando ácido diluído é muito utilizado para a produção de furfural, configurando-se uma opção tecnológica para o tratamento de biomassa lignocelulósica. Os ácidos utilizados como agente hidrolítico são os ácidos nítrico, clorídrico, fosfórico e o sulfúrico, sendo o último mais usado para o pré-tratamento (CORAL, 2009).

O processo consiste em misturar o ácido com a biomassa, sendo essa mistura feita por espargido sobre a massa ou por processo mecânico. A mistura é aquecida num reator a temperaturas que variam de 140°C a 200°C, e, nesse processo, as hemiceluloses, cerca de 80% a 90%, são recuperadas na forma de monômeros (PITARELO, 2007). O aquecimento dessa mistura de solução ácida e biomassa pode ser feito de maneira indireta, no reator, ou direta, por injeção de vapor parecido com o método de explosão a vapor (CORAL, 2009). As reações provocam alterações radicais na estrutura da parede celular permitindo uma acessibilidade para a hidrólise celulose subsequente.

Apesar de possuir um excelente rendimento de produção de açúcares das hemiceluloses e uma alta digestibilidade da celulose com baixos teores de ácido, a utilização de ácidos corrosivos demanda que os reatores sejam construídos com materiais especiais e que haja uma neutralização antes do processo de fermentação para que não ocorra a inibição (BERNARDO NETO, 2009). Além dessa desvantagem, há também a grande quantidade de energia e água requerida para o pré-tratamento e a recuperação do produto (CORAL, 2009).

#### 4.1.1.2.4 Explosão da fibra de Amônia – *Ammonia Fiber explosion* (Afex)

Este método é a versão alcalina do processo de pré-tratamento de explosão a vapor. No método da explosão da fibra de amônia, ou, em inglês, *Ammonia Fiber Explosion* (Afex), a biomassa é submetida à ação de amônia líquida a 160°C-180°C, sob pressão de 9 a 17 bar e por um período de 10 a 20 minutos com injeções de amônia (5% a 15%), em seguida, ocorre o resfriamento e a descompressão rápida da solução.

Basicamente, ocorre o incremento da reatividade da fração celulósica devido ao seu “inchamento”, combinando com hidrólise das hemiceluloses e desintegração da fibra (CORAL, 2009). Esse método aumenta a área superficial da biomassa, diminuindo a cristalinidade da celulose, além de remover a lignina.

Entre as vantagens desse método estão a elevada reatividade da fibra, a geração mínima de inibidores de fermentação, além da facilidade na recuperação da amônia (PITARELO, 2007). Entretanto, não promove uma elevada solubilização das hemiceluloses, como nos processos ácidos, além de ocorrer a degradação dos açúcares, o que reduz a eficiência para as próximas etapas (BERNARDO NETO, 2009).

#### 4.1.1.2.5 Alcalino

O processo de pré-tratamento alcalino ocorre em condições moderadas de operação, em termos de temperaturas e pressões, se comparadas com o pré-tratamento utilizando ácidos. Esse processo consiste na remoção da lignina da biomassa, promovendo maior reatividade da fibra (CORAL, 2009). O álcali (geralmente soda ou cal) provoca um “inchamento” da biomassa, de modo que a cristalinidade da celulose decresce, enquanto ocorre um inchamento da superfície específica de contato e da sua porosidade (CORAL, 2009).

Com a adição de oxigênio ou ar (oxidação úmida alcalina), é possível remover praticamente toda a lignina, cerca de 80%, e parte da hemicelulose. Entretanto, esses processos produzem hidrolisados com elevado teor de lignina, que podem passar por um processo de separação lignina-carboidrato, de modo a recuperar hemicelulose. Os principais agentes de hidrólise e deslignificação são o hidróxido de sódio, o hidróxido de cálcio e o carbonato de sódio, embora também se possa utilizar o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) sob temperatura que varia de 30°C a 70°C e período que varia de duas a oito horas (PITARELO, 2007).

Pré-tratamentos alcalinos oxidativos produzem polpas com elevada reatividade da fibra, em virtude da acessibilidade da matriz celulósica às enzimas. Entretanto, uma grande quantidade de lignina é oxidada e solubilizada durante esses processos, de modo que ela não pode ser utilizada em combustível, além de ocorrer a formação de alguns inibidores que prejudicam as etapas subsequentes (CORAL, 2009). Outra desvantagem é o tempo requerido para executá-lo, já que leva em média dias e semanas para ocorrer todo o processo.

Na Tabela (5), estão representados alguns dos pré-tratamentos utilizados com suas respectivas características, como tempo de reação, temperatura e pressão de trabalho, os reagentes utilizados para fazer o pré-tratamento e o modo pelo qual interfere na produção de xilose e na hidrólise enzimática.

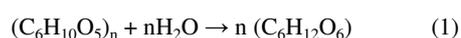
Tabela 5. Comparação entre os métodos de pré-tratamento da biomassa lignocelulósica.

Método de Pré-tratamento	Reagentes	T(°C)/ P(bar)	T. de reação (min)	Produção de xilose (%)	Hidrólise enzimática (%)
Hidrólise com ácido diluído	Ácido	>160°C	2-10	75-90	<85
Hidrólise alcalina	Base			60-75	55
Explosão a vapor não catalisada	-	160-260°C	2	45-65	90
Explosão a vapor com ácido	Ácido	160-220°C			88 (2 estágios)
Hidrotermólise	Nenhum	230°C	4min 45s	88-98	>90
Processo AFEX	Amônia	90°C	30		50-90 (2 estágios)
Explosão com CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	56,2 bar			75 (2 estágios)

Fonte: Coral (2009).

#### 4.1.2 Hidrólise da celulose

A hidrólise da celulose é a conversão da celulose e da hemicelulose em açúcares simples, como a glicose e a xilana. A hidrólise tem seu rendimento melhorado se antecedida de um processo de pré-tratamento – cerca de 90%. Caso este não ocorra, o rendimento é menor do que 20% (BERNARDO NETO, 2009). Isso ilustra como a existência de um pré-tratamento é importante para um processo mais rentável. A Equação (1) demonstra a quebra da celulose em polímeros de açúcar.



A diferença nos processos de obtenção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica usualmente é advinda do tipo de substância utilizado para fazer a hidrólise, a qual pode ser classificada em dois tipos: hidrólise enzimática e hidrólise ácida. No primeiro caso, a destruição da celulose e hemicelulose é feita usando como elemento catalisador as enzimas (denominadas de celulasas), que não causam muitos danos aos açúcares. No segundo caso, a destruição é feita utilizando-se uma solução ácida. Estudos apresentam que o custo da hidrólise enzimática é menor que o da ácida, pois a produção de produtos tóxicos às leveduras é menor (PINTO, 2010).

Na Tabela (6), foram colocadas as características de cada tipo de hidrólise enzimática, com sua capacidade de sacarificação, o tempo de reação, sua temperatura de reação e o material consumível. Nela, pode-se observar que o método de hidrólise enzimática possui um rendimento mais elevado do que os dois outros métodos, além de trabalhar com uma

temperatura menor do que o método que utiliza ácido diluído. Este, por sua vez, possui o menor tempo de sacarificação.

Tabela 6. Características de cada tipo de hidrólise celulósica.

<b>Tecnologia</b>	<b>Consumíveis</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Sacarificação (%)</b>
Ácido diluído	~1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	180	45	82
Ácido concentrado	70% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50	60	88
Enzimático	Celulase	50	60	95

Fonte: Bernardo Neto (2009).

#### *4.1.2.1 Hidrólise ácida*

O que caracteriza a hidrólise ácida, como o próprio nome já coloca, é o uso de ácidos para a transformação da celulose em açúcares. A hidrólise ácida subdivide-se em ácidos diluídos e ácidos concentrados. Tanto as hidrólises concentradas como as diluídas podem ocorrer em dois estágios, tendo em vista as diferenças entre a hemicelulose e a celulose. No primeiro estágio, ocorre a hidrólise da hemicelulose nas condições do pré-tratamento, já no segundo são utilizadas temperaturas mais altas buscando otimizar a hidrólise da fração celulósica.

Na hidrólise ácida diluída, as temperaturas de trabalho são muito elevadas, o que prejudica os açúcares, tendo um rendimento de 45% a 50% (BERNARDO NETO, 2009). Nessa hidrólise, a primeira reação hidrolisa a celulose para glicose, enquanto a segunda transforma os açúcares em outras substâncias químicas. As condições que favorecem a primeira também favorecem a segunda, com isso, as moléculas de celulose hidrolisam a glicose e esta se degrada, principalmente a furfural. Essa degradação não só prejudica o rendimento do processo, mas, com a produção de furfural e de outros produtos que são tóxicos para os micro-organismos fermentadores, prejudica as etapas subsequentes.

No processo de hidrólise com ácido concentrado, a matéria-prima deve ser seca, com vistas na obtenção de um teor de umidade de 10%, para evitar a diluição do ácido no estágio da hidrólise (CORAL, 2009). Usualmente, a hidrólise ocorre em um só estágio, a baixa temperatura, geralmente abaixo de 35°C, e com tempos de residência entre 5 e 60 min (CORAL, 2009). Este processo possui uma eficiência elevada, porém, a sua desvantagem é ser muito mais caro, devido ao custo de manutenção de seus equipamentos e ao risco de acidentes (CANILHA et al., 2010), o que impossibilita o uso comercialmente.

#### *4.1.2.2 Hidrólise enzimática*

Em comparação com os processos descritos anteriormente que utilizam ácidos para fazer a hidrólise, a hidrólise enzimática apresenta muitas vantagens, como observado anteriormente na Tab. (6). Conseguindo atingir altos rendimentos de produção sob condições moderadas de

trabalho, a hidrólise enzimática diferencia-se pelo uso de complexos enzimáticos para efetuar a quebra da celulose.

A utilização de enzimas para a obtenção de etanol da hidrólise do amido já é um processo muito antigo e conhecido, porém, para conseguir etanol a partir da celulose, o processo teve de se tornar mais complexo, tendo em vista que a lignina e a hemicelulose que protegem a celulose possuem uma resistência a ataques químicos, sendo a quebra desses polímeros a principal dificuldade para o processo de hidrólise (SILVA, 2010).

As enzimas são adicionadas ao bagaço em pressão normal e em temperaturas moderadas na faixa de 40°C a 50°C. As enzimas celulase são uma mistura complexa de enzimas que trabalham juntas sinergeticamente para atacar partes típicas da fibra celulose, na qual demoram de um a dois dias para fazer a hidrólise. Em conjunto com a enzima celulase, há outras enzimas que limpam a fibra, aumentando assim a eficiência do processo, facilitando o acesso da celulase à celulose (PINTO, 2010). Existe também uma inibição das enzimas celulases pela celobiose e glicose, e essa inibição tem sido motivo de diversas pesquisas.

A mistura de enzimas é constituída por três componentes enzimáticos majoritários, as endoglucanases, as celobiohidrolases (exoglucanases) e as  $\beta$ -glucosidases. A hidrólise enzimática pode ser dividida em três etapas e cada componente enzimático ficaria responsável por uma etapa, como demonstrado na representação a seguir:

- Etapa 1  
Celulose nativa  $\rightarrow$  (endoglucanase)  $\rightarrow$  Celulose ativa
- Etapa 2  
Celulose ativa  $\rightarrow$  (exoglucanase)  $\rightarrow$  Celobiose
- Etapa 3  
Celobiose  $\rightarrow$  ( $\beta$ -glucosidase)  $\rightarrow$  Glicose

As endoglucanases atuam randomicamente ao longo da molécula de celulose, gerando um decréscimo significativo de seu grau de polimerização (PITARELO, 2007). Sua atuação expõe as microfibrilas ao ataque subsequente de outras enzimas, além de aumentar o número de oligossacarídeos com terminações susceptíveis ao ataque das exoglucanases (SILVA, 2010). Em seguida, é a vez das celobiohidrolases, cuja ação catalítica é capaz de hidrolisar preparações celulósicas microcristalinas e de atuar nas regiões terminais das moléculas de celulose, promovendo a sua despolimerização gradativa por meio da remoção de unidades de celobiose terminais. E, por fim, as  $\beta$ -glucosidases hidrolizam celobiose a glicose, reduzindo assim o efeito inibidor da celobiose sobre as endo e exoglucanases (PITARELO, 2007).

Após a celulose, a hemicelulose é um dos polissacarídeos mais abundantes da natureza, sendo constituída principalmente por xilama. Para que a hidrólise enzimática tenha um bom rendimento, é necessária a quebra da hemicelulose em xilama, o que se dá pela ação de uma variedade de enzimas hidrolíticas, entre elas o complexo xilanolítico (SILVA, 2010).

Embora apresente rendimentos elevados, a hidrólise enzimática tem acarretado algumas incertezas a respeito de sua viabilidade econômica na produção de etanol a partir da biomassa (PINTO, 2010), o que se deve pelo elevado custo das enzimas. Porém, especialistas acreditam que haverá uma evolução nessa tecnologia e que seu custo será reduzido, tornando a plataforma bioquímica competitiva para ser inserida no mercado.

### 4.1.3 Fermentação

A fermentação é utilizada desde a antiguidade pela humanidade na produção de vinho, cerveja, queijo. Esse processo consiste em converter os açúcares em álcool com uso de bactérias, fungos ou leveduras. Existe uma grande quantidade de micro-organismos que conseguem fazer fermentação dos carboidratos em bioetanol sob condições livres de oxigênio. Embora o processo de fermentação seja bem conhecido, apenas a fermentação dos açúcares C-6 (hexoses) é bem desenvolvida, sendo que a dos açúcares C-5 (pentose) necessita ainda de avanços e de pesquisas para a obtenção de um método mais eficaz.

A conversão dos açúcares C-5 é muito importante para a eficiência e economia do processo. Atualmente, não existe nenhum micro-organismo natural que consiga fermentar os dois açúcares, e os processos para fermentação por micro-organismos criados em laboratório possuem uma sensibilidade muito grande aos inibidores, o que prejudica o produto final e se torna inviável comercialmente.

Um dos micro-organismos mais eficientes para a produção de bioetanol é a levedura *Saccharomyce cerevisiae*, que consegue ter uma alta produção de bioetanol a partir de hexoses e possui uma alta tolerância ao bioetanol e a outros componentes inibidores nos hidrolisados ácidos de biomassa lignocelulósica. Porém, não consegue fermentar a pentose (CORAL, 2009).

A bactéria *Zymomonas mobilis* é um dos micro-organismos mais promissores para a fermentação do licor de hidrólise. Esta possui forte tolerância ao bioetanol e aos inibidores e, além disso, uma alta produtividade de fermentação; sua desvantagem é que consegue fermentar apenas uma pequena quantidade de substratos, glicose e frutose (CORAL, 2009). A modificação genética dessa bactéria é uma das mais promissoras para que seja possível realizar a fermentação da pentose.

As bactérias *Escherichia coli* e *Klebsiella* estão sendo estudadas como alternativas para fermentação alcoólica, tendo em vista que conseguem metabolizar a pentose na ausência de oxigênio (CORAL, 2009).

De acordo com Coral (2009), embora quase metade do peso da glicose se perca na forma de dióxido de carbono, cerca de 96% do calor de combustão da celulose são preservados no bioetanol produzido, desse modo, os processos de fermentação e de hidrólise conseguem, de maneira eficiente, converter a biomassa lignocelulósica sólida em uma forma líquida.

A hidrólise e a fermentação podem ser integradas de modo a eliminar alguns problemas, como, por exemplo, o acúmulo de açúcares que inibem as enzimas celulase e prejudicam que se chegue a altas taxas e a altas produções de bioetanol. São quatro tipos de arranjos, sendo eles: sacarificação e fermentação simultânea (SSF), hidrólise e fermentação separadas (SHF), sacarificação e cofermentação simultânea (SSCF) e bioprocessamento consolidado (CBP).

Na combinação SSF, a hidrólise da celulose e a fermentação da glicose são realizadas no mesmo reator, mas a fermentação das pentoses continua sendo em reatores separados. A presença das leveduras, juntamente com as enzimas, minimiza o acúmulo de açúcares no reator, pois a glicose liberada é concomitantemente fermentada. A presença do bioetanol faz com que a mistura seja menos vulnerável à invasão de micro-organismos não desejáveis (CORAL, 2009). Desse modo, com essa combinação, têm-se maiores taxas, produções e concentrações de bioetanol com menores cargas de enzimas, além de tempo de processo reduzido e reatores menores.

As desvantagens desse arranjo são que a presença do bioetanol pode inibir a atividade da celulase e que há diferentes temperaturas ótimas para os processos de sacarificação e fermentação.

A combinação SSCF diferencia-se do método SSF pelo fato de que as fermentações da pentose e da glicose são feitas no mesmo reator, o que permite reduzir o número de reatores e evita problemas com a inibição da hidrólise gerada pela presença de glicose e xilose. Também consolida a hidrólise da celulose e xilana, produzindo glicose e xilose com fermentação direta (SILVA, 2010).

No caso da combinação SHF, o processo possui etapas distintas, em que a hidrólise da celulose e hemicelulose e a subsequente fermentação da glicose e pentose são realizadas em reatores diferentes. Essa combinação permite, por ocorrer em reatores diferentes, que a hidrólise e a fermentação ocorram em condições máximas. Porém, pelo acúmulo de açúcares, as enzimas celulase são inibidas e reduz-se a conversão final de glicose.

O CBP, ou conversão direta pelo micro-organismo (CDM), combina a produção de enzimas, a hidrólise da celulose e a fermentação dos açúcares em um único estágio. O processo CDM baseia-se na utilização de mono ou cocultivos de micro-organismos que fermentam celulose em bioetanol. Geralmente, utilizam-se dois tipos de bactérias para produzir as enzimas celulose e fermentar os açúcares formados a partir da decomposição da celulose e hemicelulose em etanol (CORAL, 2009). A desvantagem desse método é a produção de uma série de produtos adicionais à produção de bioetanol e rendimentos de produção muito menores que os atingidos nos processos anteriores.

#### **4.1.4 Dificuldades encontradas para a plataforma bioquímica**

As principais dificuldades encontradas para uma produção em larga escala de bioetanol pela plataforma bioquímica são, de acordo com Pinto (2010): o desenvolvimento de sistemas de pré-tratamento que possam ser utilizados para diferentes tipos de biomassa; o desenvolvimento de novas enzimas capazes de aumentar a produção sem aumentar o custo; desenvolvimento de configurações que integram os processos de hidrólise e fermentação e o desenvolvimento de processos de fermentação que consigam fermentar tanto açúcares C6 quanto C5.

Outra grande dificuldade encontrada no método bioquímico é o preço para conseguir, de maneira eficiente, a quebra do material lignocelulósico e a duração para que se consiga essa quebra. A economia do processo depende da eficiência e rapidez das conversões de todos os açúcares presentes na celulose e hemicelulose da matéria-prima, já que esta representa mais de 40% do custo total do processo (LORA et al., 2009).

Além das dificuldades tecnológicas citadas, o processo bioquímico também deve enfrentar a concorrência da plataforma termoquímica, que já é utilizada em diversas usinas para geração de energia por meio da cogeração, utilizando o bagaço da cana-de-açúcar.

#### **4.1.5 Usinas bioquímicas no mundo**

Esta tecnologia vem sendo pesquisada em diversos lugares do mundo com o objetivo de conseguir resolver as dificuldades citadas anteriormente. Na Tabela (7) estão representadas algumas empresas que fazem pesquisas em relação à plataforma bioquímica, com o tipo de matéria-prima utilizado e a tecnologia usada para fazer a hidrólise celulósica.

Tabela 7. Empresas que utilizam a hidrólise no mundo.

Empresa	Localização	Tecnologia	Matéria-prima	Construção	Abertura
Abengoa	York	Hidrólise enzimática	Resíduo de milho, <i>Panicum virgatum</i> ( <i>switchgrass</i> ), sorgo, resíduo de madeira	2005	2007
Abengoa	Hugoton	Hidrólise enzimática	Resíduo de milho, palha de trigo, sorgo, palha	2008	2011
AE Biofuels	Butte	Hidrólise enzimática	<i>Panicum virgatum</i> ( <i>switchgrass</i> ), palha, caule de milho	2008	2008
BlueFire Ethanol	Lancaster	Hidrólise ácida concentrada	Resíduos de madeira, resíduos agrícolas, resíduos urbanos	2008	2009
BlueFire Ethanol	Southern California	Hidrólise ácida concentrada	Resíduos de jardim, resíduos de madeira	2008	2009
Colusa Biomass	Colusa	Hidrólise enzimática	Palha de arroz, casca de arroz	2006	2008
FPL Energy	Florida	Hidrólise enzimática	Casca de cítricos	2008	2010
Dedini S.A.	Pirassununga (Brasil)	Hidrólise ácida	Bagaço de cana	-	2008
Bioethanol Japan	Osaka (Japão)	Hidrólise ácida	Resíduos de madeira de construção	2008	2010
Sekab	Ornskoldsvik	Hidrólise enzimática ou ácida diluída	<i>Chips</i> de madeira	2002	2004

Fonte: Pinto (2010).

Como podemos observar na tabela, a Companhia de Engenharia Brasileira Dedini investe em uma hidrólise celulósica rápida e já possui uma usina piloto em Pirassununga que utiliza a tecnologia Hidrólise Rápida Dedini (DHR), tendo como matéria-prima o bagaço de cana. A empresa desenvolveu uma tecnologia de hidrólise com utilização de ácido e solvente, diferentemente de outras empresas que utilizam solvente orgânico e não ácido (SILVA, 2010).

O projeto da Dedini tem a capacidade de gerar 100 litros de álcool/dia e consiste em alimentar um reator com bagaço pela parte superior, recebendo pela parte de baixo uma mistura aquecida de água, ácido sulfúrico e um solvente de lignina, o etanol. Os fluxos se encontram no meio do reator, onde a mistura é retirada e imediatamente resfriada (*flash*) com uma solução levemente ácida com alto teor de açúcares. Em sequência, esta é neutralizada com cal. A lignina

é dissolvida nessa pressão, que permite recuperar os açúcares em aproximadamente 15 minutos com um alto rendimento; a sacarificação desse método chega a 88% (SILVA, 2010).

A empresa Amyris possuía planos de abrir uma planta piloto em Campinas que usaria a tecnologia de produção de hidrocarbonetos a partir da fermentação de açúcar por microorganismos (JAGGER, 2009). Existe também o Centro de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), que trabalha inicialmente em quatro grandes programas de pesquisas, sendo uma delas a planta piloto de hidrólise enzimática. As principais áreas dessa pesquisa são o desenvolvimento de processo de pré-tratamento para o bagaço e palha da cana-de-açúcar, caracterização da biomassa, produção de celulases e xilanases, aperfeiçoamento da hidrólise enzimática, fermentação para o etanol e otimização energética dos processos (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT, 2007).

## 4.2 PLATAFORMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As tecnologias para a transformação de biomassa em energia elétrica são uma combinação de dois processos. Os processos de conversão, no qual é feita a transformação da biomassa em um produto intermediário com melhores características para o aproveitamento, e os processos para transformar esse produto intermediário em energia elétrica, como representado na Fig. (11). Como processos de conversão, têm-se a combustão direta da biomassa, a pirólise e a gaseificação.

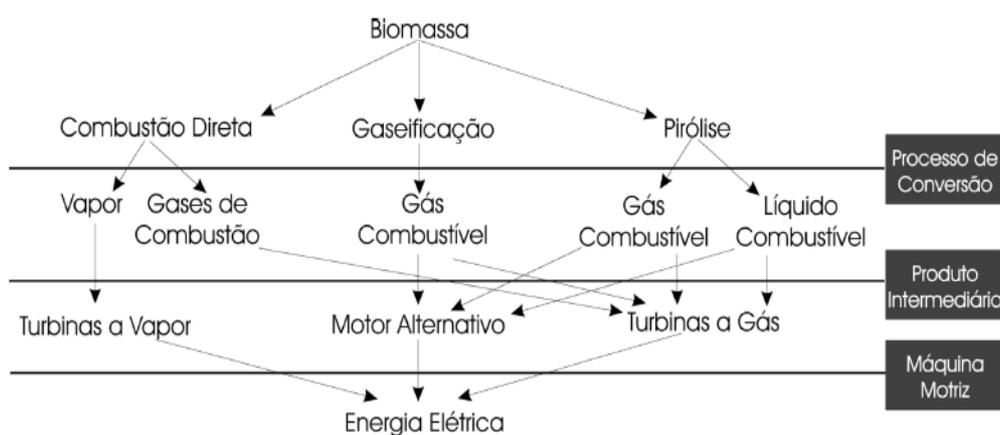


Figura 11. Plataforma termoquímica.  
Fonte: Prado (2007).

No processo de transformação do produto intermediário para energia, os métodos se diferenciam de acordo com o tipo de ciclo termodinâmico, e os principais ciclos utilizados numa central termelétrica são: o ciclo Rankine, o ciclo Brayton e o ciclo Combinado, havendo ainda

os ciclos Otto e Diesel. Seus rendimentos elétricos variam de 20% a 50%, aumentando de acordo com o aumento da potência.

Em todos esses ciclos, o calor rejeitado não transformado em potência mecânica pode ser reaproveitado para atender a demanda térmica, desde que as temperaturas disponíveis sejam compatíveis. Com isso, os ciclos com turbinas a vapor e a gás são os que tendem a melhor se ajustar aos requerimentos típicos de energia elétrica e térmica (PRADO, 2010). A seguir, será descrito cada ciclo.

#### 4.2.1 Ciclo Rankine

O ciclo de Rankine é baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente e o fluido de trabalho apresenta mudança de fase nos processos que ocorrem à pressão constante, como representado na Fig. (12). Utiliza-se o calor proveniente da queima de combustível para geração de vapor numa caldeira ou gerador de vapor (onde é feita a combustão direta da biomassa), sendo posteriormente enviado a uma turbina a vapor para geração mecânica/elétrica. Os gases de exaustão da turbina ou de extração numa turbina de condensação são utilizados como calor de processo, sendo que este calor encontra-se geralmente a uma baixa pressão (MARTINS, 2006).

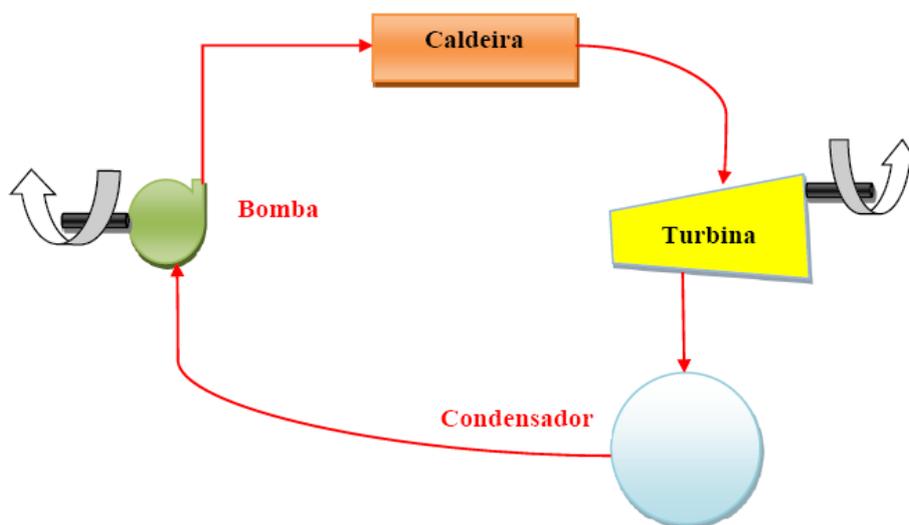


Figura 12. Ciclo Rankine.  
Fonte: Basquerotto (2010).

Tendo em vista suas características, é o ciclo mais utilizado em sistemas de cogeração e nas indústrias sucroalcooleiras (BASQUEROTTO, 2010). Existem diversas maneiras de aumentar o rendimento do ciclo Rankine como, por exemplo, a redução da pressão de saída, o aumento da pressão no fornecimento de calor e o superaquecimento do vapor. No último caso, colocando

um trocador de calor adicional na caldeira, denominado superaquecedor, aumenta-se a temperatura do vapor de fornecimento. Desse modo, a expansão do vapor na turbina se dá quase toda na condição de vapor seco que favorece as condições de escoamento (ROMÃO JÚNIOR, 2009). Praticamente todas as usinas termelétricas usam em suas plantas um superaquecedor.

Outro método utilizado para aumentar o rendimento é o aquecimento regenerativo progressivo e gradual da água de alimentação da caldeira, que é realizado mediante trocadores de calor que utilizam o vapor de diferentes pontos da turbina (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

As turbinas a vapor podem ser turbinas de contrapressão pura (Fig. 13) e turbinas de condensação e extração (Fig. 14), dependendo do seu uso. No primeiro caso, as turbinas fornecem integralmente a mesma vazão de vapor recebida para os trocadores de calor situados a jusante da turbina, submetendo-o a uma expansão desde a condição inicial, de alta pressão, até níveis de pressão da ordem de 0,2 a 1,0 MPa. No caso das turbinas de condensação e extração, esta recebe o vapor de alta pressão e de um ou mais pontos extrai-se vapor de processo com pressão pré-fixada conforme necessidade da unidade (BASQUEROTTO, 2010).

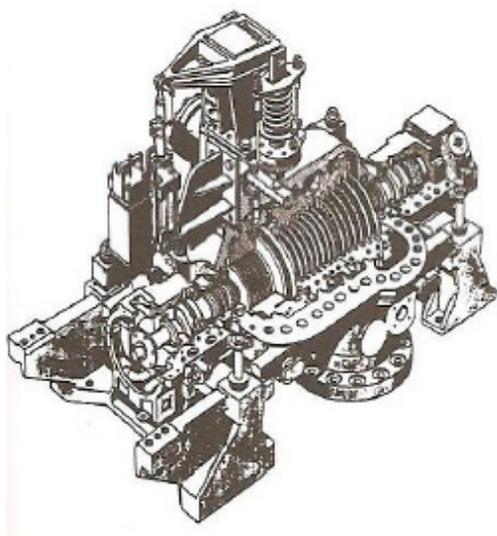


Figura 13. Turbina a vapor contrapressão. Fonte: Basquerotto (2010).

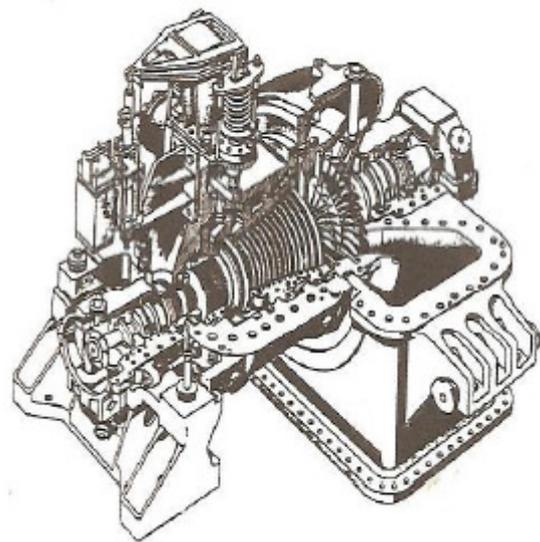


Figura 14. Turbina a vapor condensação. Fonte: Basquerotto (2010).

#### 4.2.2 Ciclo Brayton

O ciclo de Brayton é baseado num fluido de trabalho que não apresenta mudanças de fase no seu processo, ou seja, o fluido sempre está na fase vapor. O ciclo usa conjuntos de geradores acoplados, utilizando turbinas a gás, onde trocam energia com água para gerar vapor em caldeiras de recuperação nos processos que só admitem aplicações indiretas, por não poderem ser contaminados (BASQUEROTTO, 2010).

As turbinas a gás são constituídas basicamente de um compressor de ar, uma câmara de combustão e um expensor, como representado na Fig. (15). Inicialmente ocorre a admissão do ar na entrada do compressor, onde este se encontra a uma temperatura elevada devido à alta razão de compressão. Em seguida, ocorre a mistura do ar ao combustível na câmara de combustão, formando gases aquecidos que se expandem na turbina acionando o compressor e gerando potência para o gerador.

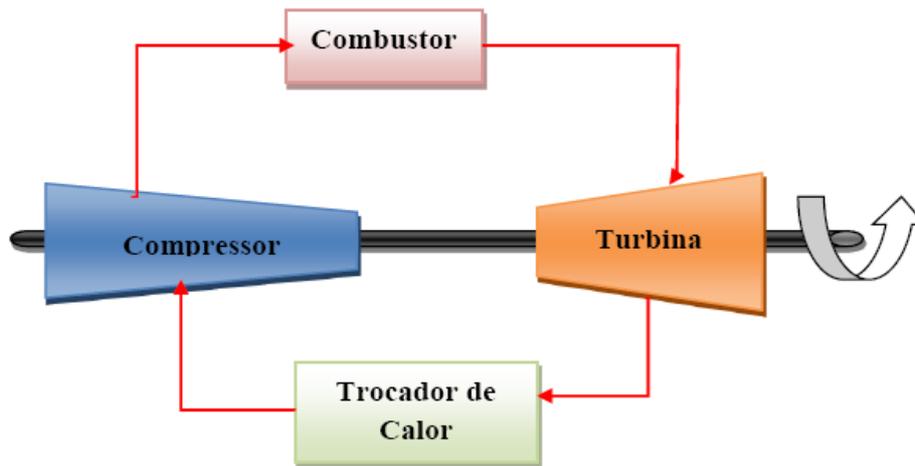


Figura 15. Ciclo Brayton.  
Fonte: Basquerotto (2010).

Diversas modificações podem ser feitas no ciclo Brayton simples para aumentar o seu desempenho, incluindo regeneração, resfriamento intermediário e reaquecimento, ou uma combinação dessas três modificações, denominada ciclo composto ou combinado (ROMÃO JÚNIOR, 2009). Esse ciclo alcança a maior eficiência nas relações de pressão mais elevada, mas há a necessidade de se ter uma maior quantidade de equipamentos para monitoramento e controle.

A regeneração é a recuperação da energia térmica dos gases de exaustão pelo ar comprimido antes de entrar no combustor. Esse processo auxilia na relação de pressões (quociente de pressão de descarga e a pressão de entrada), tendo em vista que, quanto maior for essa relação, menor será sua eficiência. No caso do resfriamento, este ocorre entre os estágios de compressão, em que o ar comprimido é resfriado permitindo um aumento no trabalho líquido com uma perda na eficiência. Colocando nesse processo uma regeneração, a eficiência e o trabalho líquido seriam melhorados.

### 4.2.3 Ciclo Combinado

Um ciclo combinado é constituído por dois ou mais ciclos termodinâmicos cascateados. Na Figura (16) é apresentada uma dessas combinações, na qual se combinam os ciclos Rankine com o ciclo Brayton. Esse arranjo possui rendimento superior aos dois ciclos separadamente. A entalpia ainda disponível nos gases de exaustão da turbina de gás é aproveitada para gerar vapor sob pressão na caldeira de recuperação de calor, o qual irá expandir-se numa turbina a vapor, produzindo mais energia. Possui um rendimento global de 90%, em que 38% são obtidos da turbina a gás e 52% pela turbina a vapor (BASQUEROTTO, 2010).

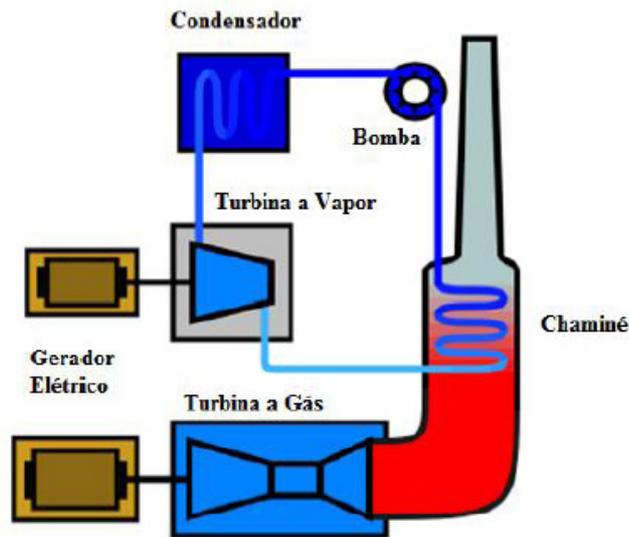


Figura 16. Ciclo combinado.  
Fonte: Basquerotto (2010).

### 4.2.4 Ciclos Otto e Diesel

Os dois ciclos são modelos de motores de combustão interna utilizados por muitas centrais de geração de energia elétrica para suprir sistemas em que a demanda não justifica a instalação de uma termelétrica a vapor (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

O ciclo Otto é utilizado para motores de combustão interna de ignição por centelha. Inicialmente, ocorre a compressão isoentrópica do ar, momento no qual o pistão se movimenta e, desse modo, o calor é transferido para o ar enquanto o pistão está momentaneamente em repouso; após, ocorre uma expansão isoentrópica e, por fim, a rejeição do calor do ar enquanto o pistão está no ponto inferior. Esse ciclo é o mais recomendado para operar com gás natural, embora o ciclo Diesel também possa operar com gás, desde que seja feita uma mistura com 3% a 5% de diesel.

Já o ciclo de ar Diesel é utilizado para motores de ignição por compressão, em que o calor é transferido ao fluido de trabalho à pressão constante. Como o gás expande durante a transferência de calor no ciclo padrão a ar, a transferência de calor é suficiente para manter a pressão constante. Na etapa seguinte, a transferência de calor cessa e o gás sofre uma expansão isoentrópica até que o pistão atinja o ponto morto inferior. A rejeição de calor, como no ciclo Otto, ocorre a volume constante e com o pistão no ponto morto inferior (ROMÃO JÚNIOR, 2009).

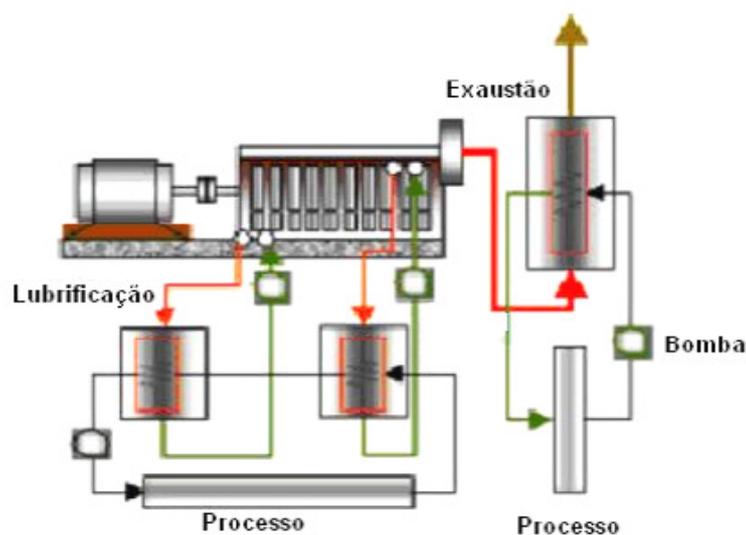


Figura 17. Cogeração com motor alternativo.  
Fonte: Romão Júnior (2009).

As principais combinações utilizadas atualmente, de acordo com a Aneel (2008), serão apresentadas a seguir.

*Ciclo a vapor com turbina de contrapressão*, em que a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção de vapor. O vapor gerado aciona as turbinas para a geração de energia elétrica e o trabalho mecânico para a usina. Esse processo está bastante maduro do ponto de vista comercial e é o mais disseminado atualmente.

Tradicionalmente, as usinas sucroalcooleiras utilizam esse ciclo de contrapressão apenas para garantir autossuprimento energético da usina. Essa postura das usinas se deve porque, anteriormente, o objetivo central das usinas que adotavam a tecnologia de contrapressão era maximizar a queima do bagaço da produção de cana-de-açúcar devido às dificuldades de estocagem deste. Desse modo, as tecnologias das usinas já existentes não são tão eficientes na produção de energia elétrica com poderiam ser se trocassem a tecnologia. Contudo, algumas modificações, entre as quais se destaca a utilização de caldeiras com maior pressão, permitiria um aumento na eficiência dessas plantas (UNICA, 2010; ROMÃO JÚNIOR, 2009).

*Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração*, que consiste na condensação total ou parcial do vapor ao final da realização do trabalho na turbina para atendimento às atividades mecânicas ou térmicas do processo. A principal diferença em comparação às turbinas de contrapressão, como descrito anteriormente, é a existência de um condensador na exaustão da turbina e de níveis determinados para aquecimento da água que alimentará a caldeira. Essas mudanças proporcionam maior flexibilidade de geração termelétrica e uma eficiência global do sistema.

Esse ciclo é a tecnologia que atualmente é adotada em diversos projetos *greenfield*, em que produz significativos excedentes de energia elétrica a baixos custos. Por ser uma tecnologia já dominada e viável economicamente, há grandes investimentos para introduzi-la nas Usinas sucroalcooleiras.

*Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa*, na qual a gaseificação realiza a conversão e produz gás combustível que pode ser utilizado em usinas que utilizam turbinas a gás para produção de energia elétrica. O desenvolvimento dessa tecnologia, que já é dominada do ponto de vista técnico, mas que ainda não é comercialmente viável, pode representar um grande salto na produção de bioeletricidade (UNICA, 2010).

Tabela 8. Comparação entre as tecnologias.

<b>Tecnologias</b>	<b>Geração de energia elétrica por tonelada de cana processada</b>
Ciclos de contrapressão	40 kWh
Ciclos de extração-condensação	96 kWh
Gaseificação da biomassa	270 kWh

Fonte: Unica (2010).

Com a Tabela (5), observa-se que o método que utiliza a gaseificação da biomassa é mais eficiente do que as duas outras tecnologias utilizadas atualmente. Os sistemas de Biomass Integrated Gaseification Gas Turbine Combines Cycles (BIG/GT-CC) ou mesmo ciclos combinados integrados aos sistemas de gaseificação de biomassa, como colocado pela Aneel, é um dos métodos em desenvolvimento para uma produção em larga escala, por oferecer um dos maiores índices de produção de energia elétrica por tonelada de cana processada, além de apresentar as maiores eficiências globais quando comparado com os sistemas convencionais (GOMÉZ, 1996; UNICA, 2010).

O método da gaseificação possui três tipos de gaseificadores (reatores nos quais acontece a conversão termoquímica) que são definidos de acordo com o movimento relativo da biomassa e do agente oxidante e a forma de fornecimento de calor ao reator (COELHO, 2002). A

gaseificação, como colocado anteriormente, produz gás de síntese que deve ser limpo e condicionado para a produção de biocombustíveis ou para a produção de energia elétrica. Um desses produtos da gaseificação é o biometanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), um composto químico pertencente à família dos alcoóis, que pode ser utilizado como combustível direto ou em misturas com outros combustíveis (etanol, combustíveis derivados do petróleo e biocombustíveis etc.) (CORAL, 2009).

#### 4.2.5 Gaseificação

A gaseificação pode ser descrita como um processo de conversão exotérmico de um material sólido ou líquido (que contenha carbono na sua composição) em um produto gasoso combustível (gás síntese), por meio da oxidação parcial a temperaturas elevadas, na faixa de  $800^\circ\text{C}$  a  $1100^\circ\text{C}$ , e em pressões atmosféricas ou maiores, até 33 bar (CORAL, 2009). Utilizam-se agentes gaseificadores ou agentes oxidantes, que podem ser ar, vapor de água, oxigênio ou uma mistura desses gases. Os sistemas de gaseificação operam de forma a limitar a oxidação completa do hidrogênio para a água e do monóxido de carbono para o dióxido de carbono.

Existem vários tipos de reatores de gaseificação como Leito Fluidizado Circulante (CFB), Leito Fluidizado Borbulante (BFB). A escolha do reator é feita de acordo com o calor específico do gás, a pressão necessária e a direção do movimento relativo da biomassa. Após o processo de gaseificação, os gases sínteses devem passar por uma filtragem para retirar as impurezas, o excesso de monóxido de carbono e ácidos. A Tabela (9) ilustra o tamanho de cada reator e suas aplicações com o tipo de limpeza necessária.

Tabela 9. Características das tecnologias de conversão.

<b>Gaseificação</b>	<b>Tamanho (MW)</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Sist. de limpeza requerido princ.</b>
Leito Fluidizado Circulante (CFB)	20-150	Caldeira, fornos	Ciclone, filtração
Leito Fluidizado Borbulante (BFB)	10-50	Caldeira, fornos	Reforma catalítica
Leito Fluidizado Borbulante (BFB)	10-50	Máquinas	Reforma catalítica
BFB e CFB pressurizado	50-300	Turbinas a gás	Filtração a $400^\circ\text{C}$ - $550^\circ\text{C}$
Gaseificação com vapor	100-500	Químicos, $\text{H}_2$ , Células de combustível	Reforma catalítica e condicionamento do gás

Fonte: Bernardo Neto (2009).

Após o processo de gaseificação, os gases sínteses devem passar por uma filtragem para retirar as impurezas, o excesso de monóxido de carbono e ácidos.

#### 4.2.5.1 Gaseificação de leito fixo

A maioria dos gaseificadores existentes no mundo é de gaseificação de leito fixo (COELHO, 2002). Isso se deve por serem relativamente fáceis de se projetar e operar, além de serem de pequeno porte. Nesse tipo de gaseificação, a matéria a ser gaseificada movimenta-se pela força da gravidade sendo sempre inserida pela parte superior. Os diferentes tipos de reatores de leito fixo são caracterizados pela direção relativa da movimentação dos sólidos e da corrente de gás, concorrente (*downdraft*), contracorrente (*updraft*) ou fluxo cruzado (*cross-flow*) (CORAL, 2009). A seguir, será explicado cada tipo de reator de leito fixo.

#### 4.2.5.2 Gaseificador contracorrente

Nos reatores de leito fixo contracorrente, o combustível é alimentado pelo topo do reator, que desce em sentido oposto ao do agente oxidante que é alimentado por grelhas pela parte inferior do gaseificador. Em razão disso, o movimento relativo do combustível, no caso da biomassa, está contracorrente do agente oxidante, que pode ser ar ou oxigênio, como representado na Fig. (18). Nessa figura, é possível identificar cada zona de reação de um reator de gaseificação contracorrente.

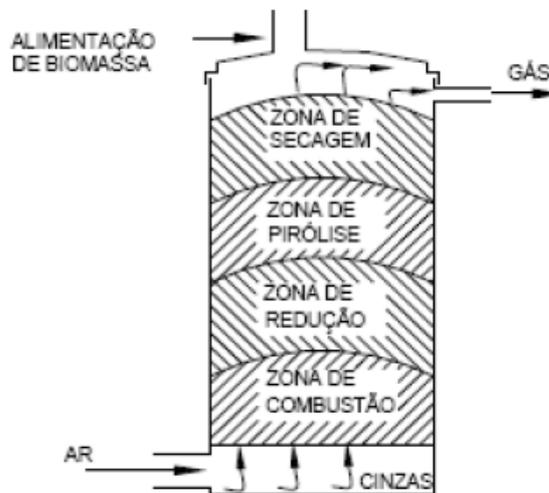


Figura 18. Gaseificador de leito fixo contracorrente.  
Fonte: Coelho (2002).

As primeiras camadas entram em combustão intensa, produzindo  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  a temperaturas elevadas, que posteriormente são reduzidas a  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$  conforme passam pela camada descendente de coque ou carvão, resfriando a temperaturas da ordem de  $750^\circ\text{C}$ . Com essa redução, as taxas de reações de gaseificação reduzem de maneira significativa, praticamente cessando. Os gases que continuam subindo e fazendo a troca de calor com a corrente de sólidos promovem a pirólise com liberação e incorporação de matéria volátil à corrente gasosa. Na

saída pelo topo do gaseificador, os gases saem frios e incorporados por materiais voláteis (COELHO, 2002).

Esses tipos de reatores possuem como vantagens a facilidade operacional, com uma capacidade de trabalhar com materiais com alto teor de água e materiais inorgânicos. Entretanto, o gás síntese produzido por esses reatores possui um alto teor de alcatrão, aproximadamente de 10% a 20%, o que prejudica o processo de geração de energia elétrica por turbinas e combustão interna, sendo necessário, assim, remover o alcatrão no processo de limpeza do gás.

#### *4.2.5.3 Gaseificador concorrente*

A diferença entre o reator concorrente e o contracorrente é o sentido em que o agente oxidante se movimenta dentro do reator em relação ao combustível. Como colocado anteriormente quanto ao reator contracorrente, o agente flui no sentido oposto ao da biomassa, mas, no caso do concorrente, este flui na mesma direção, permitindo assim a queima de aproximadamente 99,9% do alcatrão liberado pelo combustível, produzindo um gás mais limpo (COELHO, 2002).

O ar introduzido no gaseificador encontra primeiro a biomassa não queimada. A temperatura máxima não ocorre mais na fase sólida, mas sim na fase gasosa, na região da pirólise. O material sólido que se encontra na zona acima da zona de pirólise sofre um preaquecimento e secagem, por causa da radiação advinda da pirólise. No momento em que a biomassa alcança uma temperatura acima de 200°C, ela libera combustíveis voláteis que, ao entrarem em ignição por causa do fluxo do ar descendente, formam uma chama ao redor das partículas, que passam a queimar com mais intensidade (COELHO, 2002).

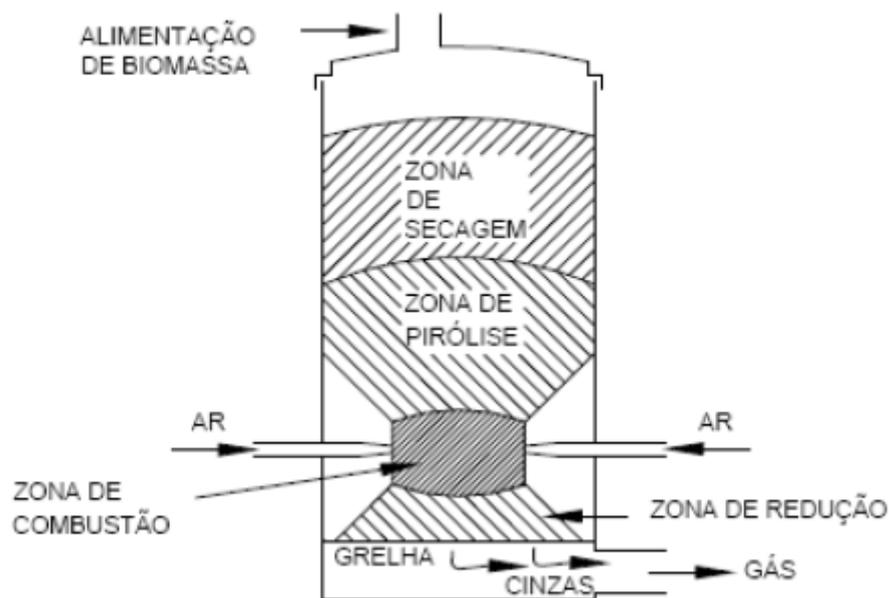


Figura 19. Gaseificador concorrente.  
Fonte: Coelho (2002).

Esse reator apresenta uma elevada eficiência, porém, não pode trabalhar com combustíveis com umidade acima de 20%, pois estes apresentam dificuldades de aquecimento e secagem que retardam ou até impedem a pirólise.

#### 4.2.5.4 Gaseificador de leito fluidizado

Para os gaseificadores de leito fluidizado, as zonas de reação não são definidas como nos reatores de leito fixo. Nesses reatores, o leito isotérmico opera na faixa de 700°C a 900°C e é classificado em leito borbulhante e leito circulante (CORAL, 2009). A principal diferença entre eles é que, no leito circulante, os sólidos são retornados para o fundo do reator, o que possibilita a queima desse material; isso não ocorre no leito borbulhante (BERNARDO NETO, 2009).

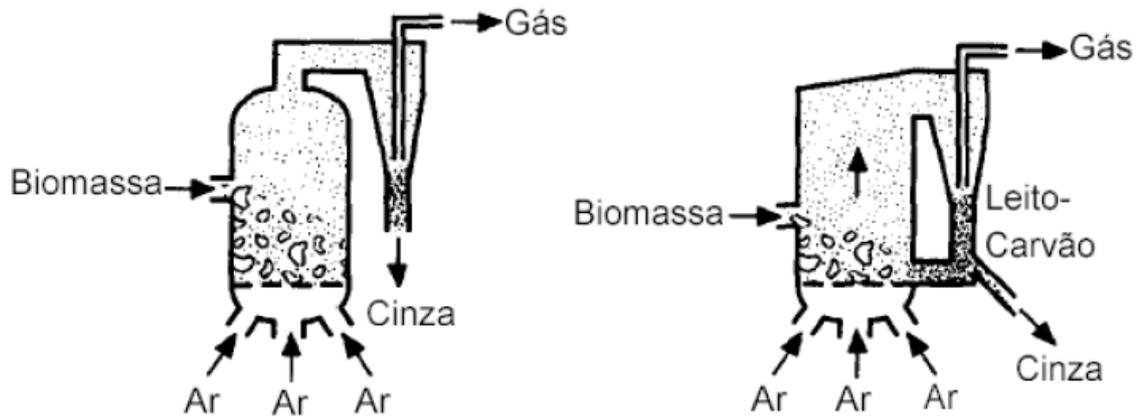


Figura 20. Gaseificador de leito fluidizado.  
 Fonte: Bernardo Neto (2009).

No processo de gaseificação em leito fluidizado circulante, as partículas são arrastadas pelo agente de fluidização no interior do reator e saem pelo topo do reator para serem enviadas de volta para o leito, como representado na Fig. (20), à direita. Em razão do tempo a mais que as partículas permanecem no reator, esse tipo de gaseificador possui uma maior conversão de carbono. Esses tipos de reatores são geralmente utilizados em aplicações em grande escala. Já no reator de borbulhante, as partículas não voltam para o reator, tendo suas aplicações em média escala. A seguir será descrito o processo que ocorre dentro de um leito fluidizado.

No reator de leito fluidizado, a vazão do gás é elevada com o intuito de aumentar a pressão até atingir uma velocidade, denominada velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ), na qual a força de arraste iguala-se à força peso das partículas. Com isso, as partículas se deslocam e ficam suspensas, tendo o comportamento igual ao de um fluido. Com um aumento da velocidade, formam-se duas fases dentro do gaseificador, uma constituída somente por gases e outra composta por gás e material particulado, denominada emulsão. Esse processo está representado na Fig. (21).

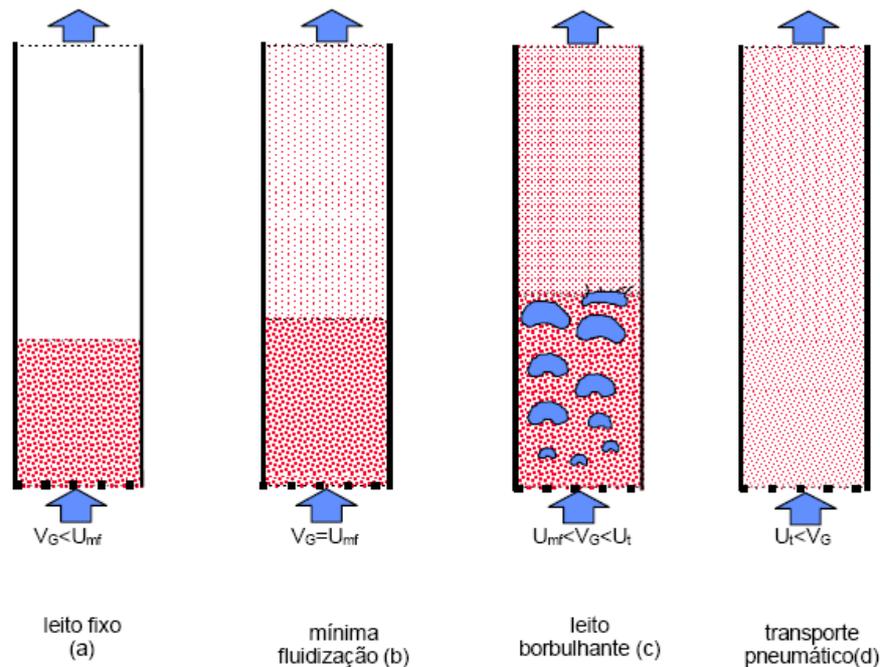


Figura 21. Funcionamento de um leito fluidizado.  
 Fonte: Coelho (2002).

As bolhas, ao subirem para o topo do gaseificador, arrastam grande quantidade de material particulado, sendo, desse modo, as grandes responsáveis pela circulação de sólidos no leito. Quando a velocidade do gás alcança a velocidade terminal das partículas ( $U_t$ ), começa a ter um arraste do material mais fino, diminuindo a altura do leito e a pressão em sua base. Quando há um ciclone ou outro dispositivo que coleta essas partículas retornando-as para o leito, ele é classificado como sendo de fluidizado circulante. Quando não há este retorno, ele é classificado como sendo de arraste.

Esses tipos de reatores não podem trabalhar em temperaturas muito elevadas, desse modo, o gás produzido nos gaseificadores de leito fluidizado possui um alto teor de alcatrão por terem que operar a baixas temperaturas, na faixa de 700°C a 900°C (CORAL, 2009).

#### 4.2.5.5 Ciclos de turbinas com a gaseificação

A combinação da gaseificação com os ciclos de turbinas está relacionada com mercados específicos, ou nichos de mercado, tais como: subprodutos economicamente atrativos, regiões que possuem custos elevados para o uso de combustíveis fósseis, áreas com disponibilidade de biomassa, seja de resíduos, seja de rejeitos (PRADO, 2007). As principais combinações são: Biomass Integrated Gaseification Gas Turbine (BIG-GT), Biomass Integrated Gaseification

Steam Injected Gas Turbine (BIG-STIG), Biomass Integrated Gaseification Intercooled Steam Injected Gas Turbine (BIG-ISTIG) e Biomass Integrated Gaseification Gas Turbine Combines Cycles (BIG-GTCC). Cada uma dessas combinações será explicada a seguir.

A geração de eletricidade a partir da biomassa integrando a gaseificação e turbinas a gás em ciclo simples é conhecida como BIG-GT. Este ciclo apresenta a menor eficiência e o menor custo de investimento inicial entre todas as combinações de gaseificação com turbinas a gás. Trata-se da biomassa ser gaseificada e o gás combustível ser utilizado para o acionamento de uma turbina a gás acoplada a um gerador elétrico, produzindo a energia elétrica (PRADO, 2007; COSTA, 2008).

As demais combinações são variações do método BIG-GT, uma delas é a utilização de turbinas a gás do tipo aeroderivadas, nas quais se utiliza a injeção de vapor no fluxo do fluido de trabalho e também o resfriamento intermediário do ar na compressão (PRADO, 2007). Essa injeção de vapor na turbina tem como objetivo aumentar a potência gerada na máquina e a redução das emissões de  $\text{NO}_x$ . Com o aumento na potência, a eficiência global atinge os 52% e a potência total a chega a ser 30% em comparação ao ciclo simples (COSTA, 2008). A desvantagem dessa variação é a degradação da turbina, sendo necessários sistemas complexos de tratamento de água, que inviabilizam sua utilização (PRADO, 2007).

Outra variação da combinação BIG-GT é o uso de um resfriador para reduzir a temperatura do ar que está sendo comprimido para alimentar a combustão, reduzindo a potência requerida para a sua compressão e elevando a potência disponível da turbina graças a maior taxa de elevação da temperatura de entrada dos gases no combustor, para elevar a eficiência termodinâmica do ciclo. Essa variação é denominada BIG-ISTIG (PRADO, 2007). Esse método possui as mesmas desvantagens do BIG-STIG, necessitando de água de qualidade para operar, pois a vida útil das turbinas é rígida (PRADO, 2007).

Por último, a combinação que, de acordo com alguns autores (LARSON; WILLIAMS, 2001; GÓMEZ, 1996; Aneel, 2008), possui melhores rendimentos e que possivelmente substituirá a tecnologia atual de cogeração de turbinas a vapor de contrapressão e condensação e extração é aquela que combina turbinas a gás e a vapor integradas a um gaseificador de biomassa para a produção de gás combustível (PRADO, 2007; COSTA, 2008).

Os gases de exaustão da turbina a gás do ciclo combinado são ricos em oxigênio devido à necessidade de ar para refrigeração, fazendo com que a quantidade de ar admitida atinja valores da ordem de 300% de excesso de ar de combustão, carregando o calor rejeitado (PRADO, 2007). Esse gás pode ser colocado em uma caldeira de recuperação para fazer uma queima suplementar, gerando uma quantidade de vapor até 2,5 vezes maior que a gerada em uma caldeira puramente de recuperação de calor dos gases (COSTA, 2008; PRADO, 2007).

Desse modo, como nos ciclos combinados gás/vapor, possuímos no BIG-GTCC uma seção com o ciclo Brayton de turbina a gás e uma seção que utiliza o calor rejeitado desse ciclo e o aproveita em um ciclo Rankine, com turbina de vapor (Fig. 22), o que permite alcançar altas eficiências globais na produção de energia elétrica, devido às altas temperaturas na entrada da turbina a gás ligado às baixas temperaturas de condensação do ciclo a vapor (COSTA, 2008).

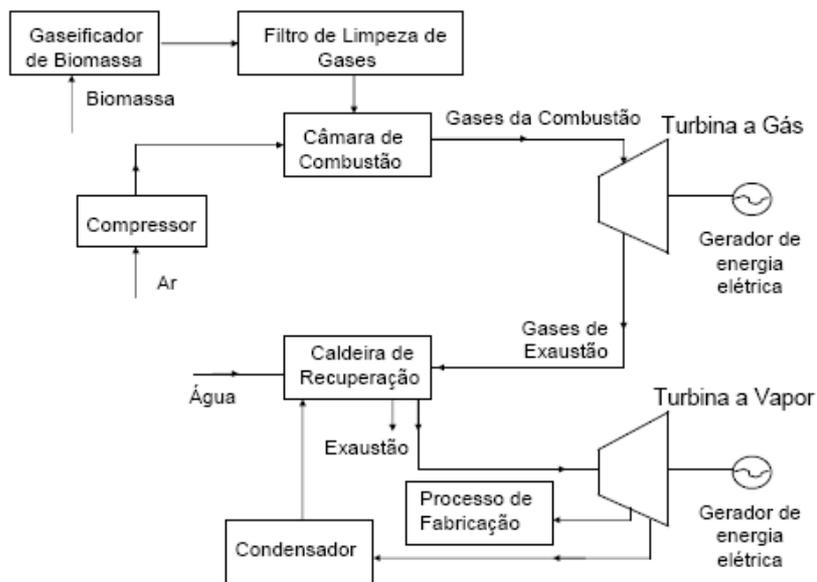


Figura 22. Ciclo combinado com gaseificação.  
Fonte: Costa (2008).

#### 4.2.6 Pirólise

A pirólise é a conversão da biomassa em líquidos, sólidos e gases pelo seu aquecimento em ausência de oxigênio a temperaturas na faixa de 350°C a 550°C. O que diferencia esse método da gaseificação é que este não utiliza agente oxidante, além de o processo ser endotérmico. Dependendo do tipo de pirólise utilizado, pode-se se produzir bio-óleo com uma eficiência de até 80%. A distribuição dos produtos desse processo depende da temperatura e do tempo de residências da biomassa que sofrerá a quebra termicamente (CORAL, 2009).

Como colocado anteriormente, dependendo do tipo de pirólise, obtêm-se diferentes proporções de bio-óleo, vapor e carvão. Os tipos de pirólise são determinados em função da velocidade em que se aumenta a temperatura no reator, assim sendo, a pirólise pode ser classificada em pirólise lenta, rápida e *flash*. Na pirólise lenta, a taxa de aquecimento é de

5°C/min a 7°C/min, e seu objetivo é a formação de carvão utilizando um reator de leito fixo (BERNARDO NETO, 2009).

Na pirólise rápida, as partículas de biomassa com tamanhos em média menores do que 6 cm são rapidamente aquecidas até 450°C a 600°C a pressão atmosférica. A taxa de aquecimento é de cerca de 300°C/min, ou seja, um aquecimento relativamente rápido se comparado com a pirólise lenta (BERNARDO NETO, 2009). Esse tipo de pirólise tem como intuito priorizar a formação de bio-óleo, geralmente num reator de leito fluidizado circulante.

No caso da pirólise *flash*, o aquecimento é feito em poucos segundos, resultando numa taxa mais alta do que a pirólise rápida e necessitando de um reator especial, tendo em vista que o tempo de residência da biomassa neste reator é baixo. Os únicos reatores que atendem a essa aplicação são leito fluidizado e reator de leito arrastado (BERNARDO NETO, 2009).

#### **4.2.7 Dificuldades encontradas para o uso do bagaço de cana para geração de eletricidade**

Uma das barreiras do uso do bagaço de cana para geração de energia elétrica é a falta de consenso com relação ao preço de venda dos excedentes, em virtude das várias reduções na referência tarifária estabelecida pela Eletrobras (COELHO, 1999). Isso se deve ao fato de os planejadores do setor elétrico avaliarem o setor de cana como sendo sazonal, não observando o novo papel das novas termoeletricas em um sistema de base hidroelétrica (CLEMENTE, 2003).

Outra dificuldade encontrada é que as plantas existentes atualmente nas usinas de cogeração geram energia apenas para atender a necessidade da usina, sem excedentes (PRIETO, 2003). Tendo em vista o custo elevado de um investimento para uma troca de equipamentos mais eficientes, muitas dessas usinas não modernizam seus equipamentos (CLEMENTE, 2003).

A gaseificação que apresenta bons rendimentos e que consegue aproveitar melhor a biomassa apresenta certas dificuldades para conseguir uma planta comercial. Uma das dificuldades encontradas é a necessidade de a planta operar de forma contínua com uma disponibilidade de 90%. Apenas a planta de Varnamo, na Suécia, conseguiu operar continuamente durante 3.600 horas (MARCON, 2005), porém, esse tempo de operação não é suficiente para a determinação de confiabilidade como tecnologia para geração de eletricidade em grande escala. Outra desvantagem é não existir um reator que consiga operar com diferentes tipos de biomassa (MARCON, 2005).

A gaseificação também apresenta a dificuldade de obter um gás sem as impurezas como particulados, compostos alcalinos, alcatrão e compostos nitrogenados, sendo necessária a limpeza do gás síntese por processos que se diferenciam de acordo com o tipo de biomassa utilizada e do projeto do gaseificador (SALES, 2007). O alcatrão condensa a temperaturas

abaixo de 120°C e, como o alcatrão líquido é polar e cancerígeno, ele gruda em superfícies metálicas, causando entupimentos (MME, 2008).

#### 4.2.8 Usinas existentes pelo mundo

Existem diversas usinas termoelétricas espalhadas pelo mundo, mas poucas utilizam o sistema de gaseificação para a produção em larga escala de energia elétrica. Uma delas é a usina Varnamo, localizada na Suécia, que foi a primeira planta de demonstração com o sistema BIG/GTCC completamente integrado, utilizando um gaseificador pressurizador. Ficou em operação entre 1996 a 1999, estando agora desativada (LARSON; WILLIAMS, 2001). A Tabela (10) apresenta alguns projetos de usinas utilizando a tecnologia de gaseificação.

Tabela 10. Usinas que utilizam a gaseificação.

Projeto	Localização	Biomassa	Tecnologia de Conversão	Capacidade
PICHTR	Hawai, EUA	Bagaço de cana	Aquecimento direto, com injeção de ar ou oxigênio, pressurizado, borbulhante, leito fluidizado	3-5 MW
Mvap, Alfafagas	Minessota, EUA	Talos de alfafa	Aquecimento direto, injeção de ar, pressurizado, leito fluidizado borbulhante	75 MW
Burlington	Vermont, EUA	Madeira	Aquecimento indireto, baixa pressão, injeção de vapor	12-15 MW e 42 MW
Energy Farm. Bioelétrica S. p. A. Cascina	Itália	Cavaco de madeira e resíduos agrícola	Aquecimento direto, injeção de ar, atmosférico, leito fluidizado circulante	12,1 MW
PDB- Projeto de demonstração Brasileiro Mucuri, BA. Brasil	Brasil	Cavaco de madeira	Aquecimento direto, injeção de ar, atmosférico, leito fluidizado circulante	32 MW
Sydkruft Varnamo	AB, Suécia	Resíduos e cavacos de madeira	Aquecimento direto, injeção de ar, pressurizado, leito fluidizado borbulhante	6 MW e 9MWth

Fonte: Sales (2007).

O projeto brasileiro de uma planta de geração de eletricidade usando um gaseificador BIG/GTCC será de uso comercial, porém, ainda não se iniciou o processo de construção (SALES, 2007). O Centro Tecnológico Canavieira pesquisa a melhor opção para o uso da gaseificação numa produção em larga escala de energia elétrica e participa do projeto da planta que será construída na Baía (LARSON; WILLIAMS, 2001).

## 5 RESULTADOS

Para que se possa fazer uma comparação entre o uso do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol celulósico e o uso deste para a produção de energia elétrica (cogeração), é necessário definir quais as tecnologias das duas rotas serão avaliadas. Neste estudo, utilizou-se, para a produção de etanol celulósico, o método que utiliza a hidrólise enzimática, o qual apresenta os maiores rendimentos. Já para a análise da produção de energia elétrica, iremos avaliar a geração por meio da tecnologia de turbina a vapor com condensação e extração, a mais utilizada em sistemas de cogeração atualmente (LARSON, 2001; UNICA, 2010).

Para a planta de etanol celulósico, foi utilizada a usina descrita no artigo de Walter e Ensinas (2010), como demonstrado na Fig. (23), em que se utiliza como pré-tratamento o método de explosão a vapor. A hidrólise da celulose é feita utilizando enzimas que conseguem hidrolisar 95% das hexoses e 85% das pentoses. A planta tem sua fermentação sendo feita de maneira separada, tendo assim uma eficiência de 91% das hexoses e 50% das pentoses. Deve-se lembrar que a fermentação das pentoses ainda não é um processo comercial, e sim um processo que ainda está em pesquisa (WALTER; ENSINAS, 2010), porém, na usina descrita no artigo, foi considerada para uma melhora no rendimento.

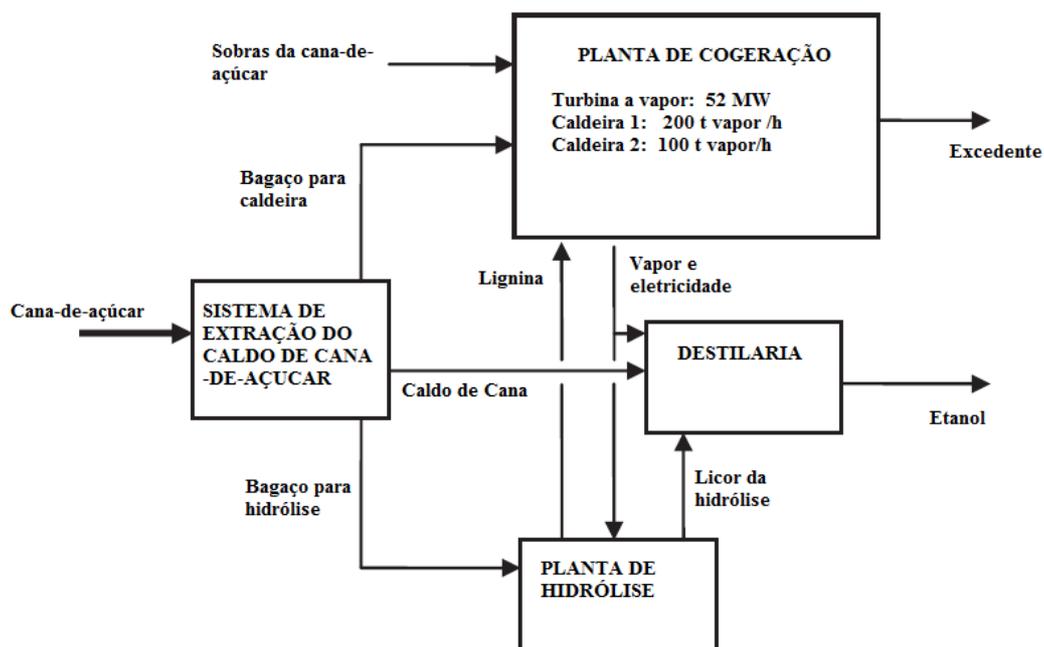


Figura 23. Planta de hidrólise combinada a uma planta de etanol.

Fonte: Walter e Ensinas (2010).

A usina funciona 4.000 horas por ano, tendo um consumo de 73.100 kg de vapor 2,5 bar e 18.100 kg de vapor 37 bar por hora. O vapor a 37 bar é utilizado no pré-tratamento, no qual é injetado na solução de bagaço e ácido sulfúrico provocando a separação da hemicelulose e da lignina e da celulose, preparando assim a biomassa para a hidrólise enzimática. A lignina obtida pelo pré-tratamento serve como material para ser reaproveitado na cogeração e assim gerar eletricidade e vapor para as usinas de etanol de primeira geração e de etanol celulósico. Na Tabela (11), estão os valores que a usina de etanol celulósico consome e produz, juntamente com o seu valor em um ano de operação (4.000h).

Tabela 11. Dados de entrada e saída da planta de hidrólise enzimática.

Parâmetros	Valor	Valor energético (GJ/ano)
<b>Consumo</b>		
Vapor 37 bar	18.100 kg/hora	202.908,24
Vapor 2,5 bar	73.100 kg/hora	794.421,56
Eletricidade	39,4 GWh/ano	141.840
Bagaço (50% umidade)	425.318,15 t bagaço/ano	3.198.392,5
<b>Produto</b>		
Lignina (50% umidade)	26.600 kg/hora	1.380.008
Etanol	63.500.000 L/ano	1.337.310

Fonte: Walter e Ensinas (2010).

Como representado na Fig. (23), a usina de etanol celulósico utiliza uma planta de cogeração para processar a lignina retirada após o pré-tratamento; essa lignina representa, de acordo com os dados de Walter e Ensinas (2010), 25% do bagaço de cana. A planta de cogeração é constituída de uma turbina a vapor de 52 MW e com duas caldeiras, uma com taxas de 200 toneladas de vapor/hora e a outra de 100 toneladas/hora. Essa planta gera vapor a 90 bar com temperatura de 520°C, além de gerar eletricidade para a hidrólise e para a produção de etanol de primeira geração, esta produz um excedente de 109,4 GWh/ano.

A planta de cogeração também utiliza palha com 15% de umidade em suas caldeiras, entretanto, a utilização da lignina e da palha não é suficiente para atender a demanda da usina. Desse modo, utiliza-se 24% do bagaço disponível para a cogeração, sobrando assim apenas 76% do bagaço para o uso na geração de etanol celulósico. Na Tabela (12), estão os valores que a planta de cogeração consome e produz, juntamente com o seu valor em um ano de operação (4.000h).

Tabela 12. Dados de operação da planta de cogeração da usina de etanol celulósico.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Valor energético</b> (GJ/ano)
<b>Consumo</b>		
Palha (15% umidade)	41.200 kg/hora	2.135.808
Bagaço (50% umidade)	19.600 kg/hora	589.568
Lignina (50% umidade)	26.600 kg/hora	1.380.008
<b>Produto</b>		
Eletricidade excedente	109,4 GWh/ano	393.840
Eletricidade planta hidrólise	39,4 GWh/ano	141.840
Eletricidade planta de etanol de 1ª geração	24 GWh/ano	393.840
Vapor 2,5 bar planta hidrólise	73.100 kg/hora	794.421,56
Vapor 2,5 bar planta de etanol de 1ª geração	186.000 kg/hora	2.021.373,6
Vapor 37 bar planta hidrólise	18.100 kg/hora	202.908,24

Fonte: Walter e Ensinas (2010).

No caso da planta descrita por Walter e Ensinas (2010), a disponibilidade de bagaço (50% umidade) e de palha (15% umidade) por tonelada de cana-de-açúcar processada é de 140 kg/t cana, sendo que as características da biomassa utilizada estão representadas na tabela 13. Para análise da planta de biocombustível a partir do bagaço, serão utilizadas apenas a planta de hidrólise e a de cogeração. Os produtos destinados a produção de etanol de primeira geração estarão representados na saída do fluxo como destinados para esse fim.

Tabela 13. Características da biomassa disponível.

Parâmetros	Bagaço	Palha	Lignina	Etanol
PCI (MJ/kg)	7,52	12,96	12,96	21,06
Umidade	50%	15%	50%	-

Fonte: Walter e Ensinas (2010); Ripoli (2010).

Como colocado anteriormente, 76% do bagaço foram utilizados na hidrólise, sendo que os 24% remanescentes foram usados na cogeração. Para o cálculo do balanço de energia entre o que foi consumido e o que foi produzido, utilizaram-se os valores dos poderes caloríficos apresentados na tabela 13. Os valores de entalpia dos vapores com pressões de 2,5 bar e 37 bar foram retirados de tabelas termodinâmicas, sendo de 2.716,9 kJ/kg e 2.802,6 kJ/kg (MORAN; SHAPIRO, 2000), respectivamente.

O fluxo energético da usina de etanol celulósico utilizando hidrólise enzimática e cogeração está representado na Fig. (24). Esse fluxo foi elaborado no programa e!Sankey 2, tendo como base os dados colocados nas Tabelas (11) e (12).

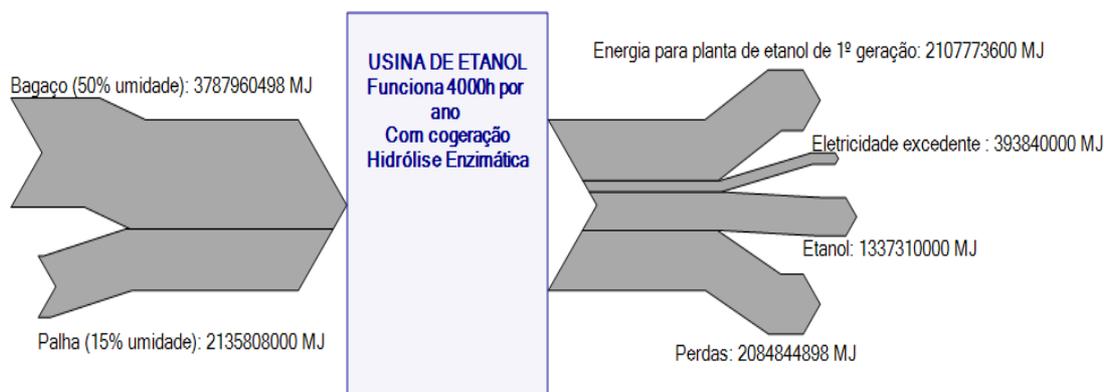


Figura 24. Fluxo energético da usina de etanol celulósico com cogeração do artigo de Walter e Ensinas (2010).

Fonte: Elaboração própria com dados de Walter e Ensinas (2010).

Nesse fluxo energético, está representado em valores energéticos, por exemplo, quanto de energia se utiliza em uma usina de etanol de segunda geração. Com isso, pode-se utilizar a equação (2) para definirmos a eficiência da usina, onde  $Q_{sai}$  é a energia gerada em etanol na usina e  $Q_{entra}$  é quanto de energia a usina necessita.

$$\eta = \frac{Q_{sai}}{Q_{entra}} \quad (2)$$

Podemos observar que a usina de etanol celulósico apresentou ter uma eficiência energética de 64,81%. Dessa eficiência, a porcentagem da energia destinada para a produção de etanol de primeira geração é de 35,58%, 2.107.773.600 MJ, estando em forma de vapor e energia elétrica e produzindo um excedente de 6,65% de energia elétrica. A perda por parte da usina seria de 35,19%, sendo grande parte no processo de hidrólise enzimática. Este, se analisado separadamente, sendo apenas aproveitado o etanol produzido, teria uma eficiência de 30,83%, uma eficiência relativamente baixa se comparada com a usina com a cogeração.

Analisando o aproveitamento do bagaço pela usina de etanol celulósico, foi feito o fluxo energético do bagaço utilizando as eficiências de cada uma das plantas e os dados disponibilizados. Tomando como medida padrão uma tonelada de bagaço de cana, 7520 MJ, pode-se observar que a maior perda da usina está no processo de hidrólise que praticamente tem suas perdas de 39,9% da energia total do sistema.

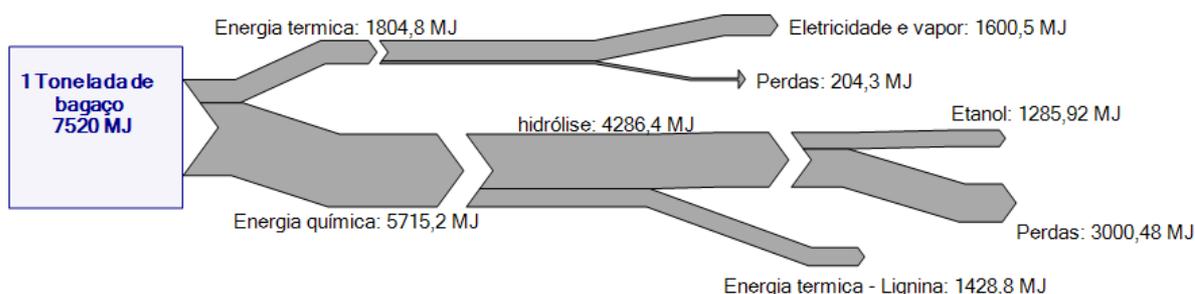


Figura 25. Fluxo energético do bagaço de cana na usina de etanol celulósico.

Fonte: Elaboração própria com dados de Walter e Ensinas (2010).

Embora a eficiência da hidrólise enzimática ainda seja muito baixa, o potencial de produção de etanol seria muito alto. Adotando que, para cada tonelada de cana-de-açúcar produzida obtêm-se 30% de bagaço e 34% de palha e folhas (FERREIRA-LEITÃO, 2010) e que a previsão em 2009/2010 era de que a produção de cana-de-açúcar seria de 604 mil toneladas métricas, teríamos 137,8 mil toneladas métricas de bagaço de cana para produção de etanol. Tendo em vista essa produção e utilizando os dados da simulação da usina de produção de

etanol por hidrólise de resíduos de Walter e Ensinas (2010), na qual se produzem 149,3 litros por tonelada de bagaço de cana, haveria um potencial de produção de 20,58 bilhões de litros de etanol (ROJAS-PALMAS et al., 2011).

No uso de bagaço de cana apenas para a produção de energia elétrica, foi utilizada a planta descrita no artigo de Seabra e Macedo (2010), que está representada na Fig. (26) . Esta utiliza turbinas a vapor com condensação e extração (CEST), que é a mais utilizada nos sistemas de cogeração. A planta de cogeração está acoplada a uma usina que consegue disponibilizar 260 kg de bagaço e 66 kg de palha para cada tonelada de cana processada, sendo que 22,7% do bagaço e toda a palha são destinados para uma planta de cogeração da própria usina que produz vapor 2,5 bar 360 kg de vapor por tonelada de cana e 364 GWh de eletricidade por ano, esta planta será denominada como planta interna de cogeração, para facilitar a descrição.

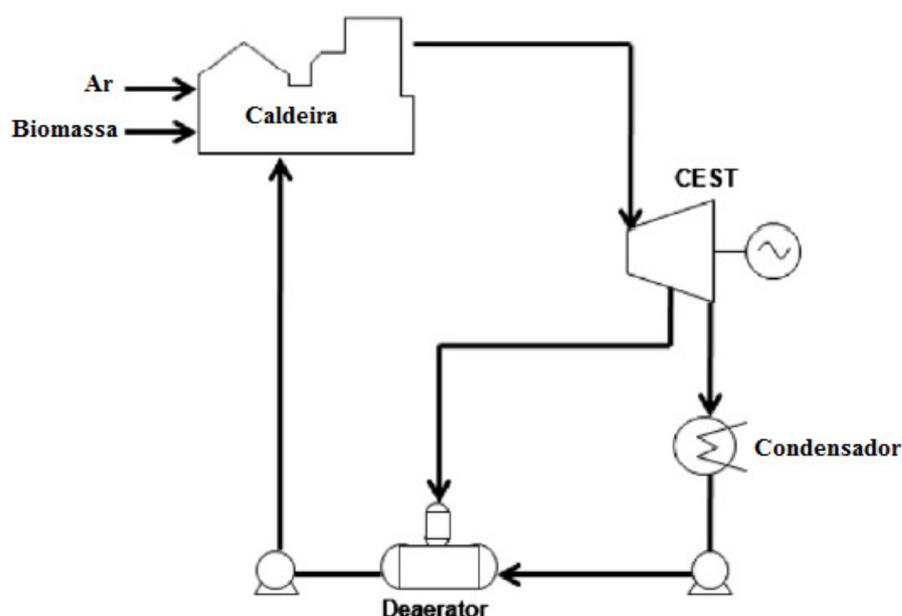


Figura 26. Representação do ciclo Rankine da planta de geração de eletricidade do artigo de Seabra e Macedo.

Fonte: Seabra e Macedo (2010).

No caso da planta que utiliza o sistema CEST, esta está equipada com uma caldeira de 65 bar/480° C, que consome 362 kt de bagaço por ano e é projetada para operar 8.406 horas por ano (SEABRA; MACEDO, 2010). Na Tabela (14) estão os valores que a planta de cogeração consome e produz, juntamente com o seu valor em um ano de operação (4.000 h). Foi necessário padronizar o tempo de operação das usinas, desse modo, tomou-se como padrão 4.000 horas por ano.

Tabela 14. Dados de operação da planta de cogeração para produção de energia elétrica.

Parâmetros	Valor	Valor energético (GJ/ano)
<b>Consumo</b>		
Bagaço (50% umidade)	362.000 t bagaço/ano	1.295.379,49
<b>Produto</b>		
Eletricidade	392 GWh/ano	671.520,34

Fonte: Seabra e Macedo (2010).

Para que se possa fazer uma comparação entre a tecnologia de produção de etanol com a de geração de eletricidade, foi feita uma análise apenas da planta de cogeração que utiliza o sistema CEST e, utilizando os dados da Tab. (14), foi feito o fluxo energético da usina termoeletrica, representado na Fig. (27). Neste fluxo, pode-se observar que a eficiência da usina termoeletrica é de 51,84%, utilizando a Equação (2), que produz apenas energia elétrica para venda, tendo em vista que a planta interna de cogeração fornece a energia elétrica e o vapor necessário para a usina de etanol de primeira geração.



Figura 27. Fluxo energético da usina termoeletrica (CEST).  
Fonte: Elaboração própria com base nos dados de Seabra e Macedo (2010).

Analisando o aproveitamento do bagaço pela usina termoeletrica, também foi feito o fluxo energético do bagaço utilizando a eficiência de cada planta e os dados disponibilizados. Tomando como a mesma medida padrão uma tonelada de bagaço de cana, 7.520 MJ, pode-se observar que existe uma perda relativamente alta, 48,16%, isso se deve à queima da biomassa (bagaço de cana) em caldeiras diretamente, de modo que não se aproveita o máximo da energia que esta pode oferecer.

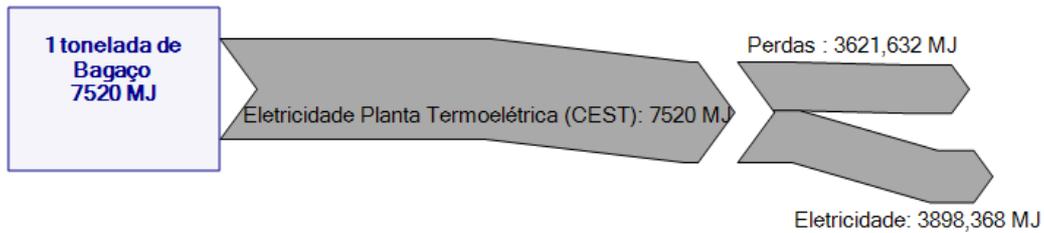


Figura 28. Fluxo de energia do bagaço de cana para usina termoelétrica.  
 Fonte: Elaboração própria com dados de Seabra et al. (2010).

Embora a perda da usina termoelétrica CEST seja grande, esta ainda possui um rendimento maior do que o processo de hidrólise enzimática. Desse modo, tendo em vista que o método da hidrólise enzimática é o que possui a maior eficiência entre os de produção de etanol celulósico, pode-se entender o porquê da escolha da cogeração por muitas usinas de etanol para o aproveitamento do bagaço.

Pode-se observar também que, ao utilizar uma usina de cogeração para processar a lignina gerada no processo de hidrólise enzimática, esta aumenta seu rendimento para 64,81%, superando assim o rendimento da usina termoelétrica com rendimento de 51,84%.

Nos gráficos representados na Fig. (29), em que o eixo das ordenadas  $y$  é o retorno do investimento e o eixo da abscissa é o custo da palha sendo plotado gráficos com diferentes custos do bagaço, está representado o retorno do investimento para os dois usos de bagaço. Pode-se observar que o retorno do investimento (ROI) para o uso do bagaço para geração de eletricidade é maior do que o uso para produção de etanol de segunda geração, enquanto o preço da biomassa for pequeno, seja do bagaço ou da palha. Entretanto, à medida que o preço do bagaço e da palha aumenta, essa relação muda, chegando ao ponto em que a opção do uso do bagaço de cana para etanol tenha um retorno maior.

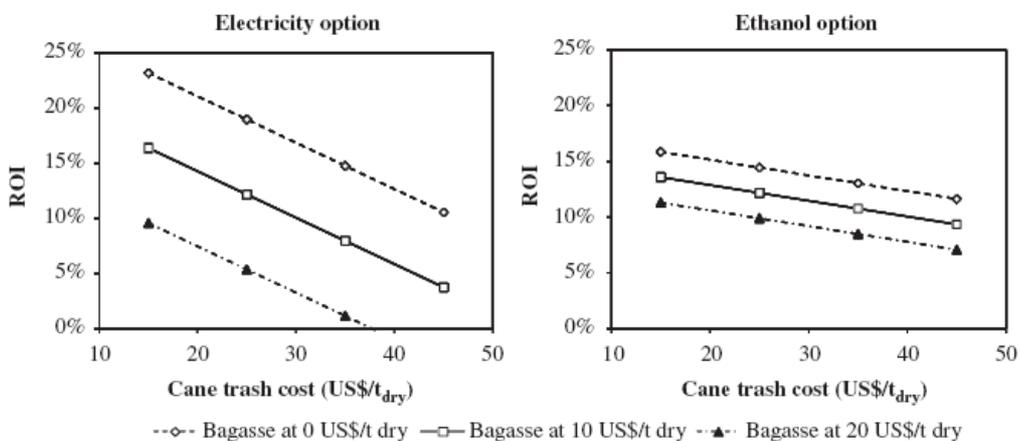


Figura 29. Comparação do retorno do investimento em função do custo da biomassa.  
 Fonte: Seabra e Macedo (2010).

Outro dado que se pode retirar dos gráficos da Fig. (29) é a grande dependência da geração de eletricidade a partir do bagaço em relação ao custo da biomassa, em que, com uma pequena variação em seu preço, pode tornar a opção menos rentável. Já no caso do etanol, este não depende tanto do preço da biomassa, tendo uma variação de retorno de investimento menor com o aumento do seu preço.

Essa dependência da geração elétrica pode variar caso seja utilizado na cogeração um sistema com gaseificação que utiliza o ciclo combinado para gerar eletricidade (BIG/GTCC), tendo em vista que esta tecnologia consegue aproveitar melhor a biomassa do bagaço do que os sistemas de turbinas CEST (LARSON; WILLIAMS, 2001). O uso da gaseificação para produção em larga escala ainda está em desenvolvimento, porém possui um grande potencial para desenvolvimento (GOMÉZ, 1996).

De acordo com Larson e Williams (2001), um sistema de cogeração que utiliza o BIG/GTCC consegue produzir 62% a mais de energia elétrica do que um sistema que utiliza turbinas com condensação e extração, podendo assim ter um rendimento maior do que a usina de etanol de segunda geração e tornando-se uma opção mais vantajosa.

## 6 CONCLUSÃO

A quantidade de bagaço de cana disponível no Brasil foi de cerca de 140 mil toneladas métricas em 2009/2010, sendo este uma fonte de energia muito vasta que ainda não está sendo totalmente aproveitada. Das tecnologias existentes atualmente, a geração de eletricidade pela tecnologia CEST a partir do bagaço é a que apresenta ser de maior rentabilidade, tendo em vista o preço do bagaço e da palha de cana serem baixos. Embora a planta de etanol celulósico tenha tido a maior eficiência, a tecnologia de hidrólise descrita ainda está em desenvolvimento. Além disso, sem o uso de uma planta de cogeração, esta apresenta rendimentos menores do que a termoelétrica.

O uso da gaseificação ainda apresenta alguns problemas, como não poder funcionar de maneira contínua e ter a dificuldade para obter um gás síntese limpo para aproveitamento. Porém, muitos países pesquisam para possibilitar o uso dessa tecnologia na geração de energia elétrica, tendo em vista o acréscimo que esta poderia gerar na produção de energia elétrica.

O método da rota bioquímica também apresenta certas dificuldades, como, por exemplo, a fermentação das pentoses. Se isso fosse resolvido, a produção e a eficiência dessa tecnologia seriam aumentadas. Outra dificuldade é o elevado custo dos pré-tratamentos da biomassa dessa tecnologia, que a tornam uma tecnologia muito cara se comparada com a termoelétrica. Desse modo, pode-se dizer que a utilização da biomassa, especialmente o bagaço, ainda precisa ser mais desenvolvida, tanto em relação às tecnologias de aproveitamento quanto às políticas governamentais de incentivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica no Brasil**. Fontes renováveis – Parte 2. Biomassa. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf)>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da Abraf 2010** – ano base 2009. Disponível em: <[www.abraflor.org.br](http://www.abraflor.org.br)>.
- BAIOCO, J. S.; SANTAREM, C. A.; BONE, R. B.; FILHO, V. J. M. F. Custos e Benefícios Econômicos de Tecnologias de Transporte de Gás Natural no Brasil. Artigo apresentado **4º PDPETRO**, 2007.
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO (BNDES); CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. BNDES: Rio de Janeiro, 2008.
- BASQUEROTTO, C. C. **Cogeração de energia elétrica com bagaço de cana-de-açúcar comprimido (briquete)**. 2010. Monografia (Graduação em Tecnologia em Biocombustíveis). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Araçatuba, São Paulo, 2010.
- BERNARDO NETO, O. **Integração das principais tecnologias de obtenção de etanol através do processamento de celulose (2ª geração) nas atuais usinas de processamento de cana-de-açúcar (1ª geração)**. 2009. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BUCKERIDGE, M. S. et al. As rotas para o etanol celulósico no Brasil. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher/Flapesp, 2010.
- CANILHA, L. et al. Sacarificação da biomassa lignocelulósica através de pré-hidrólise ácida seguida por hidrólise enzimática: uma estratégia de “desconstrução” da fibra vegetal. **Revista Analytica**, n. 44, p. 48-54, dez. 2009/jan. 2010.
- CLEMENTE, L. **Avaliação dos resultados financeiros e riscos associados de uma típica usina de cogeração sucroalcooleira**. Monografia (Para obtenção do título de Especialista) Universidade Federal do Paraná. Parana, 2003.
- COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa**. Um modelo para o estado de São Paulo. São Paulo, 1999.
- COELHO, S. T.; MARTINS, O. S.; SANTOS, S. M. A. **Estado da arte da gaseificação**. São Paulo: Cenbio, 2002.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Ângelo Bressan Filho. **A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil**. Análise de desempenho da safra 2009-2010. Conab/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>.
- CORAL, D. S. O. **Indicadores técnicos-econômicos das rotas termoquímica e bioquímica para a obtenção de biocombustíveis utilizando bagaço de cana para as condições brasileiras**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Itajubá, Minas Gerais, 2009.
- COSTA, P. M. F. **Um estudo de oportunidade para o setor sucroalcooleiro na matriz energética**. 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- COUTO, L. C.; COUTO L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de Valorização da Biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n.1, p.71-92, 2004.

- DANTAS FILHO, P. L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar**: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- DANTAS, Djolse Nascimento. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica**: análise energética, exérgica e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- FERREIRA-LEITÃO et al. Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. **Waste Biomass Valor**, v. 1, p. 65-76, 2010.
- GALVÃO JÚNIOR, F. A. **Otimização do sistema de coleta de resíduos de biomassa e madeira para fins energéticos**. 2003. 218 f. Dissertação ( Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- GOLDEMBERG, J. **Biomassa e Energia**. *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 3, p. 582-587, 2009.
- GOLDEMBERG, J.; DONDERO, J.D. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2003.
- GÓMEZ, E. O. **Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Agrícola ) – Faculdade de Engenharia Agrícola São Paulo, 1996.
- GOUVEIA, E. R. et al. **Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n6/26.pdf>>.
- HIGA, M.; BANNWART, A. C. Avaliação energética em usina de açúcar e álcool utilizando a análise PINCH. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 9, n. 3, p. 95-101, 2005.
- JAGGER, A. Brazil invests in second-generation biofuels. **Wiley InterScience**, n. 3, p. 8-10, 2009. Disponível em: <[www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)>; DOI: 10.1002/bbb.127; Biofuels, Bioprod. Bioref.
- KINTO, O. T. et al. Energia da gaseificação de biomassa como opção energética de desenvolvimento limpo. **Enc. Energ. Meio Rural**, ano 4, 2002.
- LARSON, E. D.; WILLIAMS, R. H. A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba. **Energy for Sustainable Development**, v. 5, n. 1, 2001.
- LORA, E. E. et. al. **Rotas termoquímicas e bioquímicas para biocombustíveis**: estado-da-arte, oportunidades e desafios para o Brasil. Itajubá, Minas Gerais, 2009.
- LORA, E. S.; ANDRADE, R. V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 2007. DOI: 10.1016/j.rser.2007.12.004.
- MARCON, H. B. **Aplicação de ciclo combinado BIG/GTCCa para cogeração de energia com gaseificação do bagaço de cana**. Campinas-SP, 2005.
- MARTINS, L. S. **Geração de energia através de biomassa**. Projeto final (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2006.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). Rafael Silva Menezes. **Ações do MCT em Apoio à P, D&I em Biocombustíveis Líquidos**. PACTI 2007-2010, MCT/Setec/CGTS, 2007.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Relatório preliminar do balanço energético Nacional – ano base 2011** MME: Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Rendeiro, G. et al. **Combustão e gasificação de biomassa sólida – soluções energéticas para a Amazônia** MME: Brasília, 2008. Disponível em: <[http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes\\_Energeticas\\_para\\_a\\_Amazonia\\_Biomassa.pdf](http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Biomassa.pdf)>.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- NETO, V. C. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural**. Rio de Janeiro-RJ, 2001.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD); International Energy Agency (IEA). **From 1<sup>st</sup>- to 2<sup>nd</sup>- Generation Biofuel Technologies**. França, (2008). Disponível em: <http://www.iea.org/Textbase/about/copyright.asp>.
- PAOLEILLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. Bauru-SP, 2006.
- PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos Ambientais e Potencial Energético no Aproveitamento de Resíduos da Indústria Sucroalcooleira**. Dissertação pra o título de Mestre em Engenharia Industrial da Faculdade de Engenharia da UNESP. Bauru-SP, 2006.
- PINTO, F. H. P. B. **Etanol celulósico: um estudo de viabilidade econômica financeira**. 2010. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – EESP/FGV, Embrapa e Esalq/USP: São Paulo, 2010.
- PITARELO, A. P. **Avaliação de susceptibilidade do bagaço e da palha de cana-de-açúcar à bioconversão via pré-tratamento a vapor e hidrólise enzimática**. Curitiba, 2007.
- PRADO, T. G. F. **Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica**. 2007. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- PRIETO, M. G. S. **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucroalcooleira, Estudo de Caso**. Tese de doutorado (Doutor em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.
- QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos”. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, abr. 2005.
- RIPOLI, M. L. C. **Mapeamento do palhiço enfiado de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) e do seu potencial energético**. 2002.
- ROJAS-PALMAS, S. et al. **Biomass residues for second generation biofuel in the brazilian context**, Cobem, 2011.
- ROMÃO JÚNIOR, R. A. **Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para cogeração de energia numa usina sulcroalcooleira**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Ilha Solteira - São Paulo, 2009.
- SALES, C. A. B. **Avaliação técnico-econômica da conversão da biomassa em eletricidade utilizando tecnologias de gaseificação**. Itajaúba, Minas Gerais, 2007.
- SANTOS, M. L. et al. **Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica**. São Paulo, 2010.
- SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. **Energy** **39**, p. 421-428, 2010.
- SILVA, O. G. **Produção de etanol com a utilização do bagaço de cana-de-açúcar**. 2010. Monografia (Graduação – Curso de Tecnologia de Combustíveis) – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, São Paulo, 2010.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). Castro, N. J.; Brandão, R.; Dantas, G. A. **Importância e perspectivas da bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica brasileira.** UNICA: São Paulo, 2010. Disponível em: <[http://www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica/pdf/Matriz\\_Bioeletricidade\\_Castro5.pdf](http://www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica/pdf/Matriz_Bioeletricidade_Castro5.pdf)>.

WALTER, A.; ENSINAS, A. Combined production of second generation biofuels and electricity from sugarcane residues. **Energy** **35**, p. 874-879, 2010.