

Resíduos agroindustriais: potencial de produção do etanol de segunda geração no Brasil

Rachel de Moura Nunes¹
Emerson Adriano Guarda²
Juan Carlos Valdés Serra³
Álvaro Alves Martins⁴

Resumo

A tecnologia para converter biomassa lignocelulósica em açúcares fermentáveis, para a produção de etanol, vem sendo considerada como uma alternativa promissora, para atender à demanda mundial por combustíveis. Este trabalho analisa o potencial dos resíduos agrícolas, utilizados no Brasil, como fonte de biomassa, para produção de etanol de segunda geração. Dentre os resíduos estudados, a palha da cana-de-açúcar apresenta teor de celulose em torno de 39%, o bagaço de cana 43%, a palha de trigo 35%, a palha de arroz 38% e a pseudocaule da bananeira 46%. Conforme o estudo, com os resíduos de palha de arroz, consegue-se uma elevada conversão de celulose em etanol, algo em torno de 80%, valor bem próximo aos obtidos com resíduos da cana-de-açúcar, que ficam entre 85-89%, os demais resíduos têm conversão em torno de 60% e ambos possuem potencial de produção anual de bioetanol na ordem de bilhões de litros.

Palavras-chave: Resíduos. Lignocelulose. Bioetanol.

Abstract

The technology to convert lignocellulosic biomass into fermentable sugars for ethanol production has been considered as a promising alternative in order to meet the global demand for fuel. This paper analyzes the potential of agricultural residues used in Brazil as a source of biomass for the second generation ethanol production. Among the studied waste, the sugar cane straw has cellulose content around 39%, the sugarcane bagasse 43%, the wheat straw 35%, the rice straw 38% and the banana pseudostem 46%. According to the study, with the rice-straw waste, it is achieved a high conversion of cellulose into ethanol, somewhere around 80%, a very close value to those obtained with waste from sugar cane, which are between 85-89%, other waste conversion is around 60% and both have potential annual production of bioethanol in the order of billions of liters.

Keywords: Waste. Lignocellulose. Bioethanol.

1 Mestranda em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, TO, Brasil e química da Fundação Universidade Federal do Tocantins (UFT), Tocantins, TO. E-mail: rachelnunes@uft.edu.br

2 Doutor em Química Orgânica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil e professor adjunto do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, TO. E-mail: emersonprof@uft.edu.br

3 Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), São Paulo, SP, Brasil e professor associado I do curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO. E-mail: juancs@uft.edu.br

4 Mestrando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, TO e técnico de Laboratório da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Palmas, TO. E-mail: a.uft@hotmail.com

1 Introdução

A matriz energética mundial ainda é fortemente inclinada para as fontes de carbono fóssil, com participação total de 80%, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão mineral e 21% de gás natural (JARDINE, 2009).

A utilização de combustíveis fósseis é um dos principais fatores que influencia negativamente a qualidade e o equilíbrio do meio ambiente, motivo pelo qual a sua utilização deve ser condicionada, para se evitar índices de poluição nos grandes centros urbanos que ponham em risco o ecossistema terra.

Em busca da minimização dos impactos ambientais desses combustíveis fósseis, o estudo realizado por BNDES (2008) afirma que os biocombustíveis apresentam duas importantes vantagens: seu uso permite reduzir a emissão de carbono para a atmosfera, o que reduz a emissão de gases do efeito estufa, responsáveis pelo aquecimento global e são tidos como ecologicamente favoráveis, uma vez que liberam 50% menos material particulado e 98% menos enxofre, além de serem biodegradáveis e não tóxicos (NASS *et al.*, 2007; DEMIRBAS, 2009 *apud* POMPELLI *et al.*, 2011). Pode-se citar, também, como vantagem, a contribuição para o aumento de emprego na zona rural, a redução da dependência de fontes de origem fóssil e de alguns tipos de resíduos, além do menor investimento financeiro em pesquisas, pois as pesquisas de prospecção de petróleo são muito dispendiosas (FALSETTI, 2010 *apud* SILVA; KONRADT-MORAES, 2012).

De acordo com Balat *et al.* (2008 *apud* ORTIZ, 2010), as matérias-primas, para a produção de bioetanol, podem ser classificadas em três tipos: sacarificadas (cana-de-açúcar, sorgo doce, beterraba), amiláceas (milho, batatas, cereal, mandioca) e celulósicas (madeira, palha).

A produção de bioetanol de primeira geração é efetuada em bases comerciais por duas rotas tecnológicas, utilizando matérias-primas doces, diretamente fermentá-

veis, como a cana-de-açúcar e a beterraba açucareira ou matérias-primas amiláceas, como o milho e o trigo, cujo amido deve ser convertido em açúcares (sacarificado), antes da fermentação.

Na busca para a expansão da produção de bioetanol sem comprometer a segurança alimentar e garantindo o fornecimento de combustível, surge o estudo do processo, para obtenção do bioetanol de segunda geração, que faz uso de materiais lignocelulósicos, tais como excedente de bagaço, lixo e outros resíduos agrícolas que podem ser utilizados, através de tratamentos químicos, termoquímicos ou rotas bioquímicas, para obter o produto-alvo, melhorando o processo de eficiência, bem como reduzir os impactos ambientais (MARTIN *et al.*, 2006; SOCCOL *et al.*, 2009 *apud* DIAS, 2010).

Em um clima de incerteza nos preços de grãos e conservação de combustível, ter eficiência é mais importante do que nunca. Muitos resíduos agroindustriais são excelentes substratos, para fermentação em estado sólido (HOSKINS; LYONS, 2009), tais como palhas, cascas, caules, pedúnculos, madeiras de coníferas e folhosas, resíduos de indústrias de polpa e papel, e colheitas herbáceas.

Para Rosa *et al.* (2011), além da poluição dos solos e água, advinda da lixiviação dos resíduos, a inutilização desses, pode representar perda de biomassa e de nutriente e também elevar os valores dos produtos finais, uma vez que o tratamento, transporte e a disposição final dos resíduos influencia diretamente o custo do processo.

Segundo Ferreira-Leitão *et al.* (2010), o aproveitamento de resíduos agroindustriais e florestais destaca-se na produção de combustíveis renováveis, produtos químicos e de energia, uma vez que sua disponibilidade acaba por solucionar o problema do acúmulo de resíduos e evita a contaminação de solos e rios.

Conforme Lamtec (2012), os biocombustíveis de segunda geração são combustíveis líquidos ou gasosos, produzidos a partir

da biomassa. Dentre os mais comuns temos: o biodiesel, produzido a partir de óleos orgânicos, e o bioetanol, produzido a partir da fermentação de carboidratos.

Soccol *et al.* (2009 *apud* Dias, 2010) classifica o processo de produção de bioetanol de segunda geração nas seguintes operações: pré-tratamento da biomassa, a hidrólise, a fermentação, sendo que o pré-tratamento é realizado apenas em biomassa celulósica (GRAY *et al.*, 2006 *apud* ORTIZ, 2010).

Já Paes (2010) afirma que o processo de produção do etanol de segunda geração é composto por duas etapas: primeiramente, quebram-se as longas cadeias de celulose e hemicelulose, via hidrólise enzimática ou química, com a finalidade de obter açúcares de moléculas menores e, em seguida, os açúcares reduzidos, obtidos no processo de hidrólise são fermentados, assim como ocorre com a sacarose da cana-de-açúcar.

A composição da biomassa lignocelulósica tem como principais componentes: a celulose (36-61%), a hemicelulose (13-39%), e a lignina (6-29%) (OLSSON; HAHN-HÄGERDAL, 1996 *apud* BRETHERAUER; WYMAN, 2010).

Um dos grandes desafios, para a obtenção de celulose, a partir de materiais lignocelulósicos, segundo Candido (2011), é o fracionamento dos componentes químicos que compõem a estrutura da biomassa vegetal, para que a celulose não seja degradada durante esse fracionamento.

Muitas pesquisas estão sendo realizadas para melhorar a digestibilidade química e enzimática da biomassa lignocelulósica, para a eficiente conversão da celulose e hemicelulose em etanol. Dentre essas tecnologias, pode-se destacar o baixo custo de pré-tratamentos termoquímicos, o desenvolvimento de enzimas mais eficientes na hidrólise dos polissacarídeos e a busca por microrganismos capazes de fermentar pentoses e hexoses com maior eficiência (GRAY *et al.*, 2006 *apud* SILVA, 2009).

Castro e Pereira-Junior (2010) afirmam que as matérias-primas lignocelulósicas são as fontes renováveis mais abundantemente

encontradas na natureza, sendo compreendidas, majoritariamente, pelos materiais agroindustriais, pelos resíduos urbanos e pelas madeiras de angiospermas e gimnospermas (COUGHLAN; MCHALE, 1988). Dentre essas, os materiais agroindustriais se destacam pelo caráter de resíduo, conferido por sua obtenção, após o processamento de matérias-primas, que apresentam maior valor agregado. O Brasil, pela vocação natural que possui para agroindústria, apresenta como biomassa residual, predominante, o bagaço de cana-de-açúcar.

Este trabalho analisa o potencial dos resíduos agrícolas utilizados no Brasil como fonte de biomassa, para produção de bioetanol de segunda geração, comparando suas particularidades de produção e a suas valorações quanto resíduo.

2 Resíduos agroindustriais lignocelulósicos

Os materiais lignocelulósicos são formados por estruturas duras e fibrosas, compostas majoritariamente pelos polissacarídeos celulose e hemicelulose (cerca de 70% da massa seca), entremeados por outra macromolécula, formada por álcoois aromáticos, a lignina, aos quais se encontram unidos por ligações covalentes e de hidrogênio (LEE, 1997 *apud* SILVA, N., 2010).

A fração celulósica (40%-60% da matéria seca) é um polímero linear do dímero glicose-glicose (celobiose), rígido e difícil de ser quebrado. Sua hidrólise gera glicose, um açúcar de seis carbonos, cuja fermentação com *Saccharomyces cerevisiae* já é bem conhecida. Por sua vez, a fração hemicelulósica (20%-40%), em geral, é constituída de uma cadeia principal de xilose (ligações β -1,4) (BNDES, 2008).

Segundo Ferreira-Leitão *et al.* (2010), o aproveitamento de resíduos agroindustriais e florestais destaca-se na produção de combustíveis renováveis, produtos químicos e de energia, uma vez que sua disponibilidade acaba por solucionar o problema do acúmu-

lo de resíduos e evita a contaminação de solos e rios.

2.1 Palha de cana-de-açúcar

Segundo Santos, F. *et al.* (2012), para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, são gerados cerca de 140 kg de palha e 140 kg de bagaço em base seca.

Para Olivares *et al.* (2008), o tecido vegetal da palha de cana apresenta os mesmos componentes químicos que o bagaço ou a madeira, ou seja, a palha da cana-de-açúcar, sendo toda a parte aérea da planta, menos os colmos industrializáveis, é constituída basicamente de celulose, hemicelulose e lignina, entretanto, as propriedades físico-mecânicas, geométricas, térmicas e energéticas são diferentes.

Em termos energéticos, a palha representa 1/3 da energia potencial da cana-de-açúcar que, atualmente, é subaproveitada.

Uma das práticas mais comuns, ainda hoje utilizada no Brasil, é a queima da palha da cana-de-açúcar, com o propósito de facilitar as operações de colheita. Um dos pontos mais críticos sobre a queima da palha da cana-de-açúcar são as emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, principalmente o gás carbônico (CO₂), como também o monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e a formação do ozônio (O₃), além da poluição do ar atmosférico pela fumaça e fuligem (ANTUNES; AZANIA; AZANIA, 2013).

Devido aos impactos ambientais, ocasionados pela queima da palha de cana-de-açúcar, a eliminação gradativa da atividade está em ascensão, assim a cultivo está sendo realizado sob o sistema mecanizado de colheita de cana crua, na qual as folhas secas e os ponteiros são lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura morta, denominada de palhada. Essa palhada decompõe-se por ação física, química e biológica, constituindo uma fonte de nutrientes e matéria orgânica, possibilitando, portanto, a diminuição do uso de fertilizantes, bene-

ficiando a sustentabilidade em longo prazo e o balanço energético da cadeia produtiva dessa cultura (FORTES, 2010). Entretanto, estudos demonstram que a decomposição da palha sobre o campo emite quase o dobro de N₂O, se comparada à queimada da mesma (JUTTEL, 2011).

2.2 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana é o resíduo sólido remanescente da trituração da cana-de-açúcar para obter o seu sumo. A produção de açúcar e etanol no Brasil gera enormes quantidades de bagaço. Durante a safra 2010/2011, mais de 625 milhões de toneladas de cana-de-açúcar foram esmagados, que gerou cerca de 208 milhões de toneladas de bagaço de cana (CONAB, 2011 *apud* ROCHA *et al.*, 2011).

Esse resíduo, proveniente da produção do açúcar, possui diversas aplicações como: forragem, na utilização de ração animal, especialmente para ruminantes, e na cogeração de energia elétrica (COSTA; BOCCHI, 2012).

Na tentativa de evitar o descarte de uma parte importante do bagaço e, ao mesmo tempo minimizar os impactos ambientais, esta matéria é foco de estudos, para produção de etanol, por possuir uma quantidade considerável de celulose e outros componentes de interesse para a indústria de biorrefinaria.

2.3 Palha de trigo

Aguiar (2010) afirma que a palha de trigo apresenta-se como uma alternativa interessante para a bioconversão em etanol e pode ser utilizada como matéria-prima para papel e produção de bioenergia, através da combustão (KERSTETTER; LYONS, 2001), já que se encontra entre os principais materiais lignocelulósicos, composta basicamente por celulose, hemicelulose e lignina.

Afirmam Ferreira-Leitão *et al.* (2010) que o principal resíduo da safra de trigo é palha de trigo correspondente a 50% do peso da planta e, usualmente, utilizada no solo

(matéria orgânica) como uma forma de fertilizante ou como cama para instalação de animais (BAHIA, 2013).

Da produção brasileira de trigo, as culturas de trigo geram cerca de 6 milhões de toneladas de palha. Considerando-se que 50% dos resíduos de palha estariam disponíveis para a conversão, mais de 600 milhões de litros de etanol e 1 milhão de toneladas de lignina podem potencialmente ser produzidos (FERREIRA-LEITÃO *et al.*, 2010).

2.4 Palha de arroz

Esse resíduo resulta do processo de beneficiamento do arroz como um subproduto que representa cerca de 23% do peso do arroz (PINHEIRO; GAIDZINSKI; SOUZA, 2007).

Entre as aplicações evidenciadas por alguns autores (NAKBANPOTE *et al.*, 2000; DINIZ, 2005; FOLETTO *et al.*, 2005 *apud* ZUCCO; BERALDO, 2008), destaca-se o seu emprego como adsorvente na extração de ouro, na remoção de chumbo e mercúrio em águas residuárias, na remoção de ácidos graxos livres em óleo de soja ou na remoção de cobre, níquel e zinco em soluções sintéticas. É aproveitada também a partir da queima controlada, com alto teor de sílica e baixo teor de carbono, micronizada e com características apropriadas, para uso como componente de concretos e argamassas à base de cimento Portland. Na agricultura, destaca-se principalmente como substrato (enraiza-

mento; hidroponia em morangueiros; substituto do xaxim no enchimento de vasos para plantas e flores).

Ela é um dos mais abundantes materiais residuais lignocelulósicos no mundo. A palha de arroz inclui colmos (caule), lâminas foliares, bainhas foliares e os restos da panícula, após a debulha (JULIANO, 1985 *apud* CHENG; TIMILSINA, 2011) e possui teores similares de celulose, hemicelulose, lignina se comparados a resíduos de vegetais.

2.5 Pseudocaule da bananeira

Uma matéria-prima desprezada pelos plantadores de banana de Pernambuco está, por exemplo, transformando-se num poderoso aliado dos fabricantes de caixas de papelão para embalagens. O pseudocaule é a parte da bananeira que se eleva do chão até o fruto, o equivalente ao tronco em outras espécies vegetais.

Há muitos anos vem sendo averiguada a viabilidade técnica para produzir polpa celulósica, a partir de resíduos da bananeira, principalmente do pseudocaule e do engaço.

Uma alternativa para uso do pseudocaule é o aproveitamento da massa de celulose, para fabricação de papéis especiais e de etanol, fermentação das pentoses e produção de biogás (SOFFNER, 2001 *apud* SILVA, 2009).

Na tabela 1, demonstra-se a composição lignocelulósica das principais biomassas utilizadas na produção de bioetanol no Brasil.

Tabela 1: Composição química das biomassas utilizadas para produção de bioetanol

Biomassa	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Palha de trigo ¹	35	24	25
Palha de arroz ²	38	27	8
Palha de cana-de-açúcar ³	39	30	25
Bagaço de cana-de-açúcar ⁴	43	26	22
Pseudocaule da bananeira ⁵	46	10	15

Fonte: 1- Canilha; Carvalho; Silva (2004), Zhu *et al.* (2005); 2- Silva; Silva; Bohnen (2005), Santos, F. *et al.* (2012); 3- Silva (2009), Santos, F. *et al.* (2012); 4- Silva (2009), Rocha *et al.* (2011); 5- Silva (2009); Reddy; Yang (2005).

3 Processo de produção de bioetanol

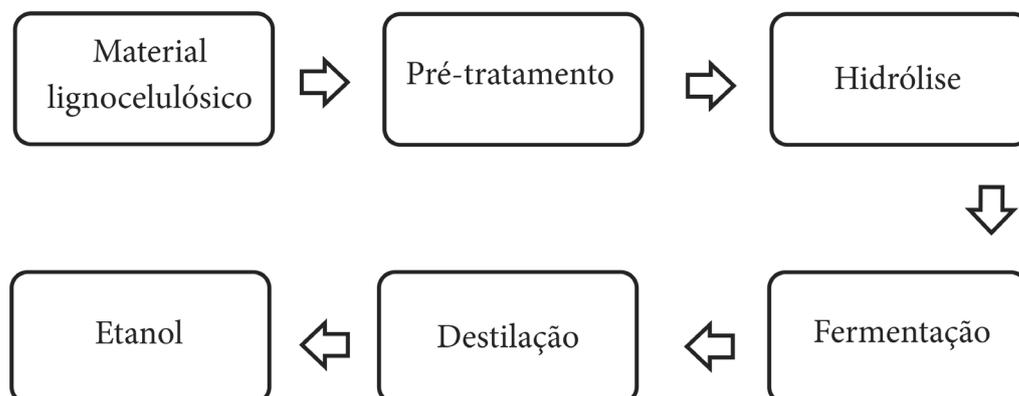


Figura 1: Rota tecnológica da biomassa lignocelulósica, para obtenção de etanol

Fonte: Adaptado Santos, F. et al. (2012).

3.1 Pré-tratamento

O principal objetivo do pré-tratamento é o de aumentar o acesso das enzimas que podem melhorar a digestibilidade da celulose. Cada pré-tratamento tem um efeito específico sobre a fração de celulose, hemicelulose e lignina, assim, os diferentes métodos do pré-tratamento devem ser escolhidos, de acordo com a configuração do processo selecionado, para a subsequente hidrólise e etapas de fermentação (ALVIRA et al., 2010).

Além disso, essa etapa é realizada devido à lignina restringir a hidrólise, pois essa esconde a superfície celulósica, impedindo o intumescimento das fibras. Logo, torna-se necessária uma etapa de pré-tratamento, tanto a fim de quebrar a estrutura cristalina da lignocelulose quanto a fim de remover a lignina, expondo as moléculas de celulose e hemicelulose à ação enzimática (OGEDA; PETRI, 2010).

Os processos de pré-tratamentos de materiais lignocelulósicos podem ser térmicos, químicos, físicos, biológicos ou uma combinação de todos esses, o que dependerá do grau de separação requerido e do fim proposto (FERRAZ et al., 1994; CARRASCO, 1992 apud SANTOS; GOUVEIA, 2009).

3.2 Hidrólise

As tecnologias para a obtenção de bioetanol de segunda geração, produzido a partir de materiais lignocelulósicos, envolvem a hidrólise dos polissacarídeos da biomassa em açúcares fermentáveis e sua posterior fermentação. Para executar essa tarefa, o processo de hidrólise utiliza tecnologias complexas e multifásicas, com base no uso de rotas ácidas e/ou enzimáticas, para a separação dos açúcares e remoção da lignina (PEREIRA JR. et al., 2008 apud SILVA, N., 2010).

A hidrólise ácida, que pode ser concentrada ou diluída, ocorre em dois estágios, devido às diferenças entre a hemicelulose e a celulose. O primeiro envolve a hidrólise da hemicelulose conduzida conforme as condições do pré-tratamento. No segundo estágio, temperaturas mais altas são aplicadas, buscando otimizar a hidrólise da fração celulósica (SILVA, O., 2010).

Uma desvantagem desse tipo de hidrólise é o elevado custo do processo, além da geração de produtos degradantes, como fragmentos de furfural e lignina e compostos como ácido acético, difenóis, derivados de fenilpropano e cetonas que são inibidores da fermentação microbiana (IRWIN, 1993; HOSHINO et al., 1997 apud OGEDA; PETRI, 2010).

A hidrólise enzimática é uma reação heterogênea, catalisada pelas celulases, sendo distinguida por um substrato insolúvel (celulose) e um catalisador solúvel (enzimas). A completa hidrólise da celulose requer a ação combinada de múltiplas enzimas (celulases) com diferentes especificidades ao substrato (KOVÁCS *et al.*, 2009 *apud* SILVA, O., 2010).

Essa última reproduz o processo existente na natureza, em que a quebra das longas cadeias das moléculas de celulose em açúcares é feita por enzimas (secretadas por fungos ou bactérias, microrganismos que se alimentam de matéria orgânica) e a fermentação, por leveduras, dos açúcares em etanol (BASTOS, 2007).

Apresenta a vantagem de obter um alto rendimento de açúcares fermentáveis e, devido ao processo ser realizado por enzimas que atacam especificamente seu objeto, não há formação de subprodutos (EKLUND *et al.*, 1990 *apud* CARVALHO, 2011) ao mesmo tempo tem a desvantagem de possuir baixa concentração de nutrientes e necessitar de complementação nutricional, para que a fermentação ocorra de forma adequada.

3.3 Fermentação

A etapa de fermentação consiste na transformação dos açúcares em etanol, gás carbônico e outros subprodutos, através da ação de leveduras, tais como organismos *Saccharomyces cerevisiae*, bastante utilizada para a produção industrial de álcool combustível, devido à sua capacidade de assimilar facilmente a glicose da cana ou da celulose de biomassas residuais (SÁNCHEZ; CARDONA, 2008 *apud* SILVA, N., 2010).

Várias são as formas de realização da fermentação da biomassa lignocelulósica. Segundo Silva, N. (2010), os processos mais utilizados são:

a) Hidrólise Separada da Fermentação (SHF):

Nesse processo, a hidrólise da celulose e a subsequente fermentação da glicose são

realizadas em reatores diferentes; a fermentação das pentoses ocorre em outro reator; apresenta temperatura ótima para as celulases de 45 °C a 50 °C, sendo que a temperatura ótima para a maior parte dos microrganismos produtores de etanol está entre 30 °C e 37 °C (OLSSON *et al.*, 2006). Possui a desvantagem de ocorrer uma hidrólise incompleta da celulose e rendimentos não muito altos. Segundo Taherzadeh e Karimi (2007), outra desvantagem do SHF é a possibilidade de contaminação, devido ao longo tempo envolvido na etapa.

b) Fermentação e Sacarificação Simultânea (SSF):

Nesse outro tipo, a fermentação da glicose e a hidrólise da celulose são realizadas no mesmo reator; a fermentação das pentoses, no entanto, continua se processando em reator separado; esse processo requer uma condição intermediária de temperatura, para as enzimas e para a levedura adicionada, uma vez que a temperatura ótima, para a sacarificação, é cerca de 55 °C e 30 °C, para a fermentação. A agitação também é outra variável que requer uma condição intermediária. A sacarificação é realizada, geralmente, a 150 rpm. Essa estratégia de processo apresenta como vantagens: a redução da inibição das celulases pelos seus produtos de hidrólise, uma vez que os glicídios não se acumulam no meio; menor complexidade e custo do processo, comparado ao SHF. Entretanto, o desfavorecimento da cinética enzimática, devido à necessidade de conduzir o processo dentro da faixa ótima do microrganismo fermentador constitui uma desvantagem.

c) Sacarificação e Cofermentação Simultâneas (SSCF):

Nessa configuração, as etapas de hidrólise da celulose e fermentação das pentoses são realizadas em um mesmo reator, fermentadas por um único microrganismo, sendo necessária a aplicação da engenharia genética, para desenvolver um microrganismo que fermente ambos os açúcares.

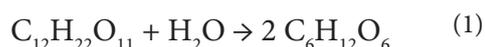
d) Bioprocesso Consolidado (CPB):

O processo de hidrólise da biomassa, onde ocorre o máximo de integração, na qual todas as operações de caráter biológico – inclusive a produção de enzimas – são realizadas em um único reator; O CBP parece ser uma abordagem alternativa, com visível potencial e ponto final na evolução da produção de bioetanol de segunda geração, a partir de materiais lignocelulósicos. A aplicação do CBP não vincula custos de operação ou investimento de capital, para a compra de enzimas ou sua produção, apresentando assim vantagens em relação ao custo de produção (LYND *et al.*, 2002).

A fermentação pode ser realizada a partir de açúcares, amido ou celulose (LAMTEC, 2012). Primeiro, prepara-se o mosto, líquido açucarado, sempre atento à concentração de açúcares totais e sua relação com sólidos solúveis, acidez total e pH. Esse tem papel importante na fermentação, sendo que, para favorecer o desenvolvimento das leveduras, deve estar na faixa entre 4,5 e cinco.

Em alguns casos pode ser necessária a suplementação de nutrientes, adição de antissépticos e aumento da temperatura, para se obter rendimentos satisfatórios. O uso de antissépticos têm o objetivo de controlar os contaminantes, sendo que o ácido sulfúrico tem se mostrado o melhor controlador das contaminações. As leveduras desempenham melhor sua atividade à temperatura de 32 a 34 °C (ALCARDE, 2005). Abaixo se demonstra as reações de hidrólise das matérias-primas (a) e (b) e fermentação alcoólica (c), conforme as seguintes equações:

a) Açúcares



b) Celuloses

c) $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$ (3)

Cada matéria-prima, na etapa de hidrólise, passa por um tipo de reação, referente à decomposição das macromoléculas em glicose, conforme equações 1 e 2. Após esse processo, o mosto segue para etapa da fermentação, equação 3, onde há a obtenção de etanol e gás carbônico.

4 Avaliação da produção de etanol, a partir de resíduos agroindustriais

Fazendo-se uma análise em função da composição dos resíduos apresentados, podemos observar que todos os resíduos são capazes de substituir o uso da cana-de-açúcar, como matéria-prima na produção de etanol de segunda geração, uma vez que apresentam características semelhantes, e até melhores nos teores de celulose, podendo vir a solucionar um dos problemas do uso desse como fonte de energia.

Para Santos, F. *et al.* (2012), considerando que toda glicose, sendo convertida em etanol, o aproveitamento integral da cana-de-açúcar (colmo, palha e bagaço) poderá aumentar significativamente a produção de etanol por hectare, passando dos atuais 7.000 L, para aproximadamente 14.000 L, sem necessidade de expansão da área cultivada.

Os resíduos da cana-de-açúcar são o grande foco da produção de etanol de 2ª geração, mas seu grande uso, como fonte de energia, pode vir a causar problemas quanto à disponibilidade dos mesmos, para tal processo. Segundo o Anuário Brasileiro de Cana-de-Açúcar, a produção brasileira na temporada 2011/12 foi de 588,9 milhões de toneladas, obtidas em área plantada de 8,4 milhões de hectares. O rendimento foi de 69,8 toneladas por hectare, muito abaixo da média histórica de 85 t/ha. O grande causador dessa redução foi o clima frio nas grandes áreas de concentração da cultura. (ANUÁRIO, 2011).

Assim, a queda na produção da cana-de-açúcar vem alimentar a necessidade de

investir em outras fontes de matéria-prima, visando evitar que a mesma, como foco central do etanol de segunda geração, cause transtornos maiores, uma vez que o seu cultivo influencia diretamente nos patamares de alimentação, transporte e econômico.

O Brasil bateu recorde absoluto de produção de arroz no ciclo 2010/11, e os reflexos das 13,6 milhões de toneladas colhidas naquela temporada chegaram à atual. Os cálculos efetuados, para se chegar nesse valor, consideraram o percentual de casca, correspondendo a 22% da massa total do grão (CIENITEC, 1986 *apud* MAYER *et al.*, 2006). Assim, no ciclo 2010/2011, gerou-se quase 3 milhões de toneladas de casca e palha de arroz.

No cultivo de banana, o Brasil possui mais de 500 mil hectares, sendo o terceiro maior produtor mundial de bananas. Segundo estimativas da UNIVALE (*apud*

ROSA *et al.*, 2011), que produz banana no perímetro irrigado do Rio Jaguaribe/CE, produz-se de 50 a 150 toneladas/hectare/ano de pseudocaule, resíduo lignocelulósico com elevado potencial de produção de etanol.

Percebe-se, assim, que uma grande quantidade de resíduos é gerada anualmente no país, o que acaba por ser um ponto positivo, para a geração de etanol de 2ª geração, uma vez que várias alternativas podem fomentar o desenvolvimento do processo.

Na tabela 2, estão descritos os potenciais de conversão da celulose e a capacidade de produção anual de bioetanol de cada resíduo, demonstrando que há uma grande possibilidade de valoração dos mesmos, visto que, são gerados em grandes quantidades e, quase sempre, são apenas armazenados ou descartados, desperdiçando uma gama de fonte de energia.

Tabela 2: Relação entre o teor de celulose, seu potencial de conversão em etanol e capacidade produtiva alcóolica em função da produção anual de cada biomassa lignocelulósica no Brasil

Resíduo	Celulose (%)	Conversão de celulose em etanol (%)	Produção residual anual (t)	Produção bioetanol (L)
Palha cana	39	85 ¹	208 milhões ⁶	87,38 bilhões
Palha trigo	35	89 ²	6 milhões ⁷	2,37 bilhões
Palha de arroz	38	80 ³	3 milhões ⁸	1,15 bilhões
Bagaço cana	43	89 ⁴	208 milhões ⁹	100,88 bilhões
Pseudocaule bananeira	46	61 ⁵	50 milhões ¹⁰	17,78 bilhões

Fonte: 1- Silva (2009); 2- Santos, F. *et al.* (2012); 3- Monteiro *et al.* (2010); 4- Silva (2009); 5- Silva (2009); 6- Rocha *et al.* (2011); 7- Ferreira-Leitão *et al.* (2010); 8- Mayer *et al.*, 2006; 9- Rocha *et al.* (2011); 10- Rosa *et al.* (2011).

Avaliando a produção de etanol de 2ª geração, os experimentos de Petersen *et al.* (2009 *apud* Santos, F. *et al.*, 2012) mostraram que, para a palha de trigo, as melhores condições, utilizando pré-tratamento hidrotérmico, foram de 195 °C, durante 6 a 12 min, obtendo-se uma recuperação de aproximadamente 94% de celulose, sendo que, 89% dessa celulose podem ser convertidas em etanol.

Utilizando a palha de cana, Silva (2009) realizou o pré-tratamento com H₂SO₄ 1,0% (m/v) a 120 °C por 10 min, seguido de deslignificação com NaOH 1,0% (m/v) a 100 °C por 1h, para deslignificação da amostra. Após a sacarificação enzimática da polpa bruta, realizou ensaios de fermentação dos hidrolisados, utilizando a levedura *Candida guilliermondii* mantida em ágar extrato de malte a

4 °C, nos quais observou uma conversão de 85,0% de celulose em etanol. O inóculo foi obtido do cultivo da levedura em meio sintético, contendo xilose como fonte de carbono, suplementado com extrato de farelo de arroz (20 g/L), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (0,1 g/L) e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (2,0 g/L), contendo 20 mL de meio, pH inicial 5,5 sob agitação de 200 rpm em incubadora de movimento rotatório a 30 °C por 24 h.

O mesmo autor observa para bagaço de cana, uma conversão de 89% da celulose recuperada, ou seja, um resultado um pouco melhor que a palha, uma vez que o teor de celulose do bagaço é quase 10% maior que o daquele.

Santos, J. *et al.* (2012) observaram em seus experimentos 72% de conversão da celulose do bagaço da cana em etanol, após 30 h de fermentação, com carga enzimática (10 FPU/g de celulose e 5% v/v de α -glucosidase). Antes da fermentação, a amostra passou por pré-hidrólise de 6h a 50 °C e 15 rpm de agitação e composição de meio de cultura $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1 g/L; K_2HPO_4 0,5 g/L; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,25 g/L, extracto de levedura 2 g/L, peptona a 1 g/L (cultura meio 1) e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 2 g/L, KH_2PO_4 2 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,75 g/L, extracto de levedura 4 g/L (meio de cultura 2) valor um pouco abaixo do ideal, o que pode ser explicado devido à combinação adequada das condições de pré-hidrólise, da temperatura, agitação, composição de meio de cultura (com maior concentração de nutrientes) e a carga de enzima.

Silva (2009) mostra também resultados, para o pseudocaule de bananeira, na qual a amostra apresentou uma conversão da celulose de 61%, utilizando 10 kg de pseudocaule de bananeira (massa seca), 100 L de solução de H_2SO_4 1% (m/v), relação sólido-líquido 1:10 (m/v) e agitação de 100 rpm, sob aquecimento até temperatura de 120 °C. A hidrólise foi realizada sob as seguintes condições: tampão citrato de sódio 0,05 mol.L⁻¹, pH 4,8, sob agitação de 100 rpm em incubadora de movimento rotatório a 45 °C por 72 h e

relação sólido:líquido 1:10 (m/v). As cargas enzimáticas que foram utilizadas são de 15 FPU/g de material lignocelulósico seco, para o complexo Celluclast 1,5 L, e de 10 UI/g de material lignocelulósico seco, para a enzima β -glucosidase e no fim da etapa, o hidrolisado hemicelulósico foi separado do material pré-tratado por centrifugação. Esse protocolo foi escolhido, para se avaliar a sacarificação enzimática das biomassas vegetais, após as etapas de pré-tratamento e deslignificação.

Monteiro *et al.* (2010) obtiveram para um amostra de palha de arroz com concentração 20 g/L e, utilizando as leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, uma produção de etanol de 16 g/L, equivalente a 80% de conversão da glicose em etanol. A casca de arroz foi hidrolisada com ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1%, em autoclave (121 °C 30 minutos) e concentrado 2,8 vezes. Após hidrólise, o meio foi centrifugado e filtrado.

De forma geral, realizando um balanço de massa entre os percentuais de celulose, produção anual desses resíduos e potenciais de conversão da celulose em etanol de cada matéria, pode-se estimar a produção de bioetanol, pelo aproveitamento dessas biomassas lignocelulósicas, na ordem de bilhões de litros.

Este estudo demonstra que, mesmo utilizando técnicas ainda em fases de aprimoramento, a conversão da celulose, obtida em vários trabalhos, é alta, em média acima de 80%, valores que incentivam a busca por novas tecnologias que facilitem o acesso à celulose, aumentando a sua capacidade de produção de álcool e diminuindo custos.

Nesse patamar, as inovações da utilização de biomassa seguem em ascensão, pode-se citar: a criação de organismos geneticamente modificados, para fazer combustível, a partir de qualquer tipo de material orgânico; a prospecção e a seleção de fungos é uma das estratégias, para obter melhores enzimas, para hidrolizar o material lignocelulósicos, onde o alto nível de biodiversidade como no Brasil, propicia uma maior probabilidade de

encontrar microrganismos que apresentem novidades nesse aspecto; processos termoquímicos que, na prática, funcionam como uma planta de biomassa em líquidos (BTL), transformando a matéria-prima em gás que, posteriormente, é revertida em combustível; testes de microrganismos fermentadores (os fungos *Trichoderma reesei*, *Candida shehatae*, *Saccharomyces cerevisiae*), buscando as similaridades e diferenças no metabolismo de carboidratos, com isso, diminuir o tempo da etapa e controlar possíveis inibidores.

A denominada produção de terceira e quarta geração são conceitos e técnicas ainda em estudo, mas já definidas quanto às áreas. Enquanto a tecnologia de terceira geração, aproveita-se de novas colheitas de energia, especialmente projetadas, ou seja, a modificação nas características de árvores, como a diminuição do teor da lignina, aumento no teor de açúcar e, até mesmo, plantas mais resistentes a temperaturas elevadas, são o foco principal, a quarta geração faz das fontes de biomassa, máquinas captadoras de carbono que retiram CO₂ da atmosfera e o armazenam em seus galhos, troncos e folhas, sendo depois utilizados como biomassa rica em carbono, para conversão em combustível e gases (BIOCOMBUSTÍVEIS, 2008).

Assim, um dos grandes desafios no uso dos biocombustíveis está em superar o baixo custo da produção dos derivados do petróleo, definindo objetivos estratégicos nacionais de médio e longo prazo.

5 Considerações finais

Combustíveis de segunda geração envolvem uma mudança na bioconversão e livram-se do aparente dilema combustível *versus* alimentos. Em vez de só usar açúcares facilmente extraíveis, amidos ou óleos, como na geração anterior, a segunda geração permite o uso de todas as formas de biomassa lignocelulósica.

Verificou-se que no Brasil existem diversas fontes alternativas, para a produção do

etanol de 2ª geração, tais como palha de cana-de-açúcar, bagaço de cana, palha de trigo, palha de arroz e pseudocaule de bananeira.

Para a palha e bagaço de cana-de-açúcar, com teor celulósico em média de 39% e 43%, respectivamente, estima-se um potencial de produção de etanol em torno de 88 e 101 bilhões de litros.

Já os resíduos da cultura de arroz e trigo, apresentam potencial de 1,15 e 2,37 bilhões de litros, valores inferiores aos alcançados pelos resíduos da cana, não devido ao percentual de conversão da celulose e, sim, pela enorme diferença entre a produção anual destes resíduos.

O pseudocaule da bananeira, com maior teor de celulose e aplicação ainda de baixo valor agregado, apresenta potencial de produção de aproximadamente 17 bilhões de litros de etanol.

Dentro desse contexto, os materiais lignocelulósicos ocupam um lugar de destaque, principalmente em função da sua abundância e do seu caráter renovável, fatores que têm propiciado um grande interesse por esse tipo de material, tendo como principal papel na matriz energética serem fontes de energia que não contribuem para o acúmulo de gases do efeito estufa na atmosfera.

Referências

AGUIAR, C. M. **Hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos utilizando celulases produzidas pelo fungo *Aspergillus niger***. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). 2010. 118 f. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste, Toledo. 2010. Disponível em: <http://cac.php.unioeste.br/eventos/senama/anais/PDF/ARTIGOS/84_1269954158_ARTIGO.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

ALCARDE, A.R. **Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar: fermentação. Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC).**

2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_105_22122006154841.html>. Acesso em: 10 abr. 2013.

ALVIRA, P. et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4851-4861, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409015983>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

ANTUNES, J. F. G.; AZANIA, C. A. M.; AZANIA, A. A. P. M. **Impactos ambientais das queimadas de cana de açúcar**. 2013. Disponível em: <http://www.grupocultivar.com.br/sistema/uploads/artigos/27-01_gc_cana.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

ANUÁRIO BRASILEIRO DE CANA DE AÇÚCAR 2011. Santa Cruz do Sul, p. 10-12, 2011. Disponível em: <http://www.brazilbuyers.com/wp-content/uploads/files/Brazilian%20Sugar%20Cane%20Yearbook_2011_Portuguese%20&%20English.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

BAHIA. Secretaria de Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária (SEAGRI). **Cultura: trigo**. Disponível em: <<http://www.seagri.ba.gov.br/Trigo.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

BALAT, M.; BALAT, H; ÖZ, C. Progress in bioethanol processing. **Progress in Energy and Combustion Science**, Turkey, v. 34, p. 551-573, 2008.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Bioetanol de cana de açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BASTOS, V. D. Etanol, Alcoolquímica E Biorrefinarias. **BNDES Setorial**, Rio de Ja-

neiro, n. 25, p. 5-38, mar. 2007.

BIOCOMBUSTÍVEIS: da primeira a quarta geração. **Biodiselbr**, 10 mar. 2008. Disponível em: <http://portal.ftc.br/bioenergia/wp-content/uploads/2010/05/Artigo_2.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

BRETHAUER, S.; WYMAN, C. E. Review Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4862-4874. 2010.

CANDIDO, R. G. **Utilização da celulose de resíduos lignocelulósicos para obtenção de produtos de alto valor agregado**. 2011. 140 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial na Área de Conversão de Biomassa) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2011.

CANILHA, L.; CARVALHO, W.; SILVA, J. B. A. Caracterização do hidrolisado de palha de trigo visando extração da xilose para a bioconversão em xilitol. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 7., ENCONTRO AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA, 4., 2004, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2004. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2004/trabalhos/epg/pdf/EPG2-8.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

CARVALHO, M.L. **Estudo cinético da hidrólise enzimática de celulose de bagaço de cana de açúcar**. 102 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos. 2011.

CASTRO, A. L.; PEREIRA JUNIOR, N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v. 33, n. 1, p. 181-188, 2010. CHENG, J. J.; TIMILSINA, G. R. Status and

barriers of advanced biofuel technologies: A review. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3541-3549, 2011.

COSTA, W. L. S.; BOCCHI, M. L.M. Aplicações do bagaço da cana-de-açúcar utilizadas na atualidade. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, v. 2, n.1, 2012. Disponível: <http://www.fatecjab.edu.br/revista/2012_v04_n01/artigo02.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2012.

COUGHLAN, M. P.; McHALE, A. Purification of the β - D-glucoside glucohydrolases of *Talaromyces emersonii*. **Methods Enzymol**, v. 160, n. 437-443, 1988.

DIAS, M. O. S. *et al.* Simulation of integrated first and second generation bioethanol production from sugarcane: comparison between different biomass pretreatment methods. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 38, p. 955-966, 2010.

FERREIRA-LEITAO, V. *et al.* Biomass Residues in Brazil: availability and potential uses. **Waste Biomass Valor**, v. 1, p. 65-76, 2010.

FORTES, C. **Produtividade de cana de açúcar em função da adubação nitrogenada e da decomposição da palhada em ciclos consecutivos**. 2010. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64134/tde-03112010-005326/>>. Acesso em: 11 ago. 2012.

HOSKINS, B.; LYONS, M. Improving bioethanol yield: the use of solid-state fermentation products grown on DDGS. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 115, n. 1, p. 64-70, 2009.

JARDINE, J. G. **Indicações de aspecto tecnológico sobre o bioetanol de matéria-prima**

amilácea. Campinas, SP: Embrapa Informática Agropecuária, 2009. 23 p. (Documentos/Embrapa Informática Agropecuária; 94).

JUTTEL, L. P. Uso da palha de cana na produção de bioenergia. **Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE)**, 01 ago. 2011. Disponível em: <<http://www.bioetanol.org.br/destaques/detalhe.php?ID=NTU>>. Acesso em: 10 abr. 2013.

KERSTETTER, J. D.; LYONS, J. K. **Wheat straw for ethanol production in Washington: a resource, technical and economic assessment**. Olympia, WA: Washington State Office of Trade and Economic Development, 2001. Disponível em: <http://www.agmrc.org/media/cms/WheatstrawForEthanol_062E85CC8E352.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2013.

LAMTEC. **Energias Renováveis: bio-combustíveis**. Disponível em: <<http://www.lamtec-id.com/energias/biocombustiveis.php>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

LYND, L. R. *et al.* Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v. 66, n. 3, p. 506-577, 2002.

MARTIN, C. *et al.* Investigation of cellulose convertibility and ethanolic fermentation of sugarcane bagasse pretreated by wet oxidation and steam explosion. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 81, p. 1669-1677, 2006.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPEN-THAL, J. E. Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. In: **SIMPEP**, 13., Bauru, 2006.

MONTEIRO, S. Z. *et al.* Avaliação da fermentação da casca de arroz à etanol pelas

- leveduras *S. Cerevisiae* e *P. Stipitis*. In: SA-LÃO INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 22., 2010. **Anais...** Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. S. Hidrólise enzimática de biomassa. **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1549-1558, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v33n7/a23v33n7.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.
- OLIVARES, E. G. et al. Estudo experimental da classificação pneumática contínua de bagaço de cana-de-açúcar In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7., 2008, Fortaleza. **Resumos...**: semiárido, energia e desenvolvimento sustentável. Fortaleza: Agrener, 2008.
- OLSSON, L. et al. Separate and simultaneous enzymatic hydrolysis and fermentation of wheat hemicellulose with recombinant xylose utilizing *Saccharomyces cerevisiae*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 129-132, p. 117-129, 2006.
- ORTIZ, S. **Produção de bioetanol a partir de resíduos agroindustriais**. 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Blumenau, 2010. Disponível em: <http://proxy.furb.br/tede/tde_arquivos/7/TDE-2012-02-17T095840Z-694/Publico/Diss%20Samara%20Ortiz.pdf>. Acesso em: 20 maio 2012.
- PAES, C. L. Embrapa avalia novas fontes para produzir etanol. Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, 20 jan. 2010. Disponível em: <http://www.cpac.embrapa.br/noticias/noticia_completa/167/>. Acesso em: 20 maio 2012.
- PINHEIRO, A. C.; GAIDZINSKI, R.; SOUZA, V. P. Utilização da casca de arroz como solvente alternativo para o tratamento de efluentes da Região Carbonífera Sul Catarinense. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA – CETEM, 15., 2007. **Anais...** 2007. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XV_jic_2007/Alexandre_Clemente_Roberta_Gaizinskil.pdf>. Acesso em: 20 maio 2012.
- POMPELLI, M. F. et al. Crise energética mundial e o papel do Brasil na problemática de biocombustíveis. **Agronomía Colombiana**, v. 29, n. 2, p. 231-240, 2011.
- REDDY, N.; YANG, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. **Trends in Biotechnology**, v. 23, p. 22-27, 2005.
- ROCHA, G. J. M. et al. Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production. **Industrial Crops and Products**, v. 35, p. 274-279, 2011.
- ROSA, M. F. et al. Valorização de resíduos da agroindústria. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS – SIGERA, 2., 2011, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Embrapa, 2011. v. 1. Disponível em: <<http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/p12.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v35n5/a25v35n5.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- SANTOS, J. R. A.; GOUVEIA, E. R. Produção de bioetanol de bagaço de cana de açúcar. **Re-**

vista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 27-33, 2009.

_____ *et al.* Optimization of ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* UFPEDA 1238 in simultaneous saccharification and fermentation of delignified sugarcane bagasse. **Industrial Crops and Products**, v. 36, n. 1, p. 584-588, mar. 2012.

SILVA, J. M.; KONRADT-MORAES, L. C. Vantagens e desvantagens dos biocombustíveis e dos combustíveis fósseis. In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA - SEMEX, 10., 2012. **Anais...** n. 5, 2012.

SILVA, L. P.; SILVA, L. S.; BOHNEN, H. Componentes da parede celular e digestibilidade *in vitro* de palha de arroz (*Oryza sativa*) com diferentes teores de silício. **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 1205-1208, set./out. 2005.

SILVA, N. L. C. **Produção de bioetanol de segunda geração a partir de biomassa residual da indústria de celulose**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, O. G. **Produção de etanol com a utilização do bagaço de cana de açúcar**. 2010. 45 f. Dissertação (Graduação em Tecnologia de Biocombustíveis) – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba-SP, 2010.

SILVA, V. F. N. **Estudos de pré-tratamento e sacarificação enzimática de resíduos agroindustriais como etapas no processo de obtenção de etanol celulósico**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo - EEL, 2009.

TAHERZADEH, M.J.; KARIMI, K. Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. **Biore-sources**, v. 2, n. 4, p. 707-738. 2007.

ZHU S. D. *et al.* Pretreatment by microwave/alkali of rice straw and its enzymic hydrolysis, **Process Biochemistry**, v. 40, p. 3082-3086, 2005.

ZUCCO, L. L.; BERALDO A. L. Efeito da adição de cinza da casca de arroz em misturas cimento-casca de arroz. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 217-226, 2008.

