



Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras **Evaluation of energy potential of the agroindustrial residues from different brazilian regions**

Martha Suzana Rodrigues dos Santos Rocha¹

Renata Maria Rosas Garcia Almeida²

Antonio José Gonçalves da Cruz³

Resumo: Esse estudo apresenta uma avaliação preliminar do potencial energético de resíduos provenientes da colheita e do processamento de produtos agroindustriais de diferentes regiões brasileiras. O objetivo foi avaliar o potencial desses resíduos, como matérias-primas limpas e renováveis, na geração de energia e/ou também na produção de bioetanol. Analisaram-se os resíduos provenientes dos cultivos de arroz, milho, soja, trigo, cana-de-açúcar e coco. Os estudos mostraram que as biomassas provenientes da cana-de-açúcar (palha e bagaço) e do milho (palha) apresentam elevado potencial energético, podendo contribuir significativamente para o aumento da geração de energia elétrica. Em relação ao bioetanol, o uso de biomassas residuais (palha e bagaço de cana-de-açúcar, palha de trigo e milho e casca de coco) pode vir a contribuir com um acréscimo expressivo em litros de bioetanol por hectare, sem a necessidade de aumentar a área plantada.

Palavras-chave: Biomassa, geração de energia, bioetanol.

¹ UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

² UFAL – Universidade Federal de Alagoas

³ UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

Abstract: This study presents a preliminary assessment of the energy potential of some residues from the harvesting and processing of agroindustrial products from different Brazilian regions. The aim of this study was to evaluate the potential of agro-industrial residues, as clean and renewable raw materials, for energy generation and / or also in the production of bioethanol. Residues from rice, corn, soybean, wheat, sugarcane and coconut cultivations were analyzed. Studies have shown that residual biomass from sugarcane (straw and bagasse), and from corn (straw) have high energetic potential which can contribute to increase the production of electrical energy. Concerning bioethanol, the use of residual biomass (straw and bagasse from sugarcane, wheat and corn straw, and coconut shell) can contribute with an expressive increase in liters of bioethanol per hectare without expanding the cultivated area.

Keywords: Biomass, energy generation, bioethanol.

1. Introdução

Diante da necessidade de uma matriz energética mais limpa e renovável e da crescente preocupação com o meio ambiente, a busca por fontes alternativas para a produção de energia tem aumentado (Pereira et al., 2015). As biomassas vegetais compreendem toda a matéria orgânica vegetal que pode ser convertida em energia. Os resíduos provenientes das indústrias de grãos, madeira, papel, entre outras, e que são, na maioria dos casos subutilizados, são denominados de biomassa residual. A biomassa é constituída basicamente por três componentes principais, a celulose, a hemicelulose e a lignina (Gonçalves et al., 2014).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), a área de grãos plantada na safra 2015/16 foi de 58,3 milhões de hectares, o que representa crescimento de 0,7% em relação à área cultivada na safra 2014/15, que totalizou 57,89 milhões de hectares. Nesse cenário, com toneladas de grãos sendo produzidas, toneladas de refugos agrícolas são descartados, incluindo casca, palha, bagaço, sabugo, entre outros (Salazar et al., 2005).

A proposta deste artigo é apresentar um levantamento preliminar acerca do potencial energético dos resíduos provenientes do cultivo de arroz, milho, trigo e soja, bem como da cana-de-açúcar e do coco no Brasil, através de duas vertentes: (i) o potencial de geração de energia elétrica, fundamentado em dados de poder calorífico, e; (ii) o potencial de produção de bioetanol (etanol 2G) com base na composição química de cada biomassa residual.

A localização geográfica dos resíduos também foi avaliada, com o intuito de verificar questões associadas ao aproveitamento desses resíduos.

2. Biomassas residuais: potencial energético

Quando se trata de avaliar o potencial energético de resíduos agroindustriais, o poder calorífico é uma variável que merece atenção. Define-se como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa de material (Jara, 1989). Sabe-se que existe uma correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de umidade presente em determinada biomassa; logo é importante para fins energéticos que a biomassa apresente teor de umidade que não afete negativamente o seu potencial para geração de energia (Furtado et al., 2012).

O poder calorífico pode ser classificado em superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é definido quando a combustão se efetua a volume constante e na qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (Briane & Doat, 1985). Já o poder calorífico inferior (PCI) é definido como a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após calcular as perdas com a evaporação da água (Jara, 1989). Nesse trabalho será empregado o PCS das biomassas, visto que é o poder calorífico superior que pode ser determinado por meio de análise experimental em calorímetros usuais, o que não ocorre com o PCI, que por sua vez, é determinado através de cálculos analíticos a partir do PCS.

Fica claro que para se obter bons rendimentos em termos de queima do combustível, o poder calorífico do material utilizado deve ter valores expressivos para que se possa indicar o material como bom gerador de energia (Ramos e Paula et al., 2011).

O desenvolvimento de processos para a produção de bioetanol a partir de biomassas envolve a otimização, de forma integrada, de diversas etapas: pré-tratamento, sacarificação, fermentação e destilação. Para que se possa avaliar a eficiência nas diferentes etapas desse processo, é essencial determinar a composição química da biomassa utilizada durante a sua conversão nas diferentes etapas envolvidas. Sem ela é impossível avaliar se as condições utilizadas estão sendo favoráveis à produção de etanol e, assim realizar estudos de valorização de materiais lignocelulósicos (Gouveia et al., 2009).

3. Composição de biomassas residuais

A biomassa tem em sua composição três constituintes principais: celulose, hemicelulose e lignina. A união desses três componentes gera uma estrutura responsável por criar uma barreira natural que dificulta a ação de microrganismos.

A celulose é um polímero linear e cristalino de estrutura rígida formada por unidades de β -(1 \rightarrow 4)-D-glicopiranosose ligadas por ligações glicosídicas (β -1,4). Para quebrar este arranjo é preciso submetê-la a um severo pré-tratamento (Olsson e Hahn-Hagerdal, 1996). As unidades da fibra de β -(1 \rightarrow 4)-D-glicopiranosose ficam acopladas de modo tal que grupos OH (2), OH (3), e CH₂OH ficam orientados equatorialmente formando cadeias lineares.

Uma fibra de celulose pode conter de 5.000 a 10.000 unidades de glicose. A unidade de repetição do polímero de celulose consiste em duas unidades de glicose anidra, chamada de celobiose (Mohan et al., 2006).

O segundo constituinte, a hemicelulose, é composta de heteropolímeros ramificados e lineares como: L-arabinose, D-galactose, D-glicose, D-manose e D-xilose. Grupos metil e acetil encontram-se também ligados a sua cadeia de carbono (Olsson e Hahn-Hagerdal, 1996). A quantidade de hemicelulose varia conforme a origem do lignocelulósico (entre 25 a 35%). Sua estrutura não é cristalina, e ao contrário da celulose é facilmente hidrolisada. Xilose e arabinose são os dois principais monômeros de sua hidrólise.

O terceiro constituinte é a lignina. Sua função principal é prover sustentação do material lignocelulósico. Ela é formada por uma complexa estrutura de polímeros amorfos e possui característica hidrofóbica. Além disso, auxilia no transporte de água na planta e no sequestro de carbono (Souza, 2014).

Dentro do âmbito do etanol de segunda geração, que é aquele proveniente de biomassas, as biomassas lignocelulósicas vêm se destacando ao longo dos anos e tornando-se cada vez mais alternativa promissora, devido à sua grande quantidade de material passível à fermentação (Rabelo et al., 2014). Sendo assim, as principais etapas para produção de etanol a partir de biomassas envolvem essencialmente: pré-tratamento, hidrólise e fermentação. Cada uma dessas etapas

representa grandes desafios a serem vencidos e otimizados para que o processo seja considerado como promissor (Pereira et al., 2015).

Visto que a estrutura das biomassas lignocelulósicas dificulta a ação de microrganismos, a etapa de pré-tratamento tem a função de desestruturar a barreira natural formada por esses materiais, facilitando assim o acesso aos polímeros de interesse (Assumpção, 2015). Na sequência, ocorre a etapa de sacarificação, que pode ser ácida ou enzimática. Estudos têm mostrado que a hidrólise enzimática é muito mais específica que a ácida e elimina a possibilidade de formação de inibidores do processo fermentativo, um inconveniente que ocorre com a hidrólise ácida. Essa etapa converte os polissacarídeos em açúcares fermentescíveis, os quais serão transformados em etanol na última etapa do processo, a fermentação (Pratto, 2015).

A figura 1 mostra, de forma simplificada, as etapas presentes na produção de etanol de segunda geração (E2G).



Figura 1. Etapas de obtenção do etanol 2G

No processo de obtenção de E2G, cada etapa apresenta um determinado rendimento. A figura 2 ilustra as operações unitárias envolvidas no processo de produção de E2G (a partir da celulose e da

hemicelulose) com os respectivos rendimentos alcançados em cada uma das etapas do processo, tomando por base a quantidade de palha presente em uma tonelada de cana-de-açúcar. A composição química da palha de cana-de-açúcar foi obtida da literatura (Santos et al., 2012; Mota & Monteiro, 2013; Pratto, 2015).

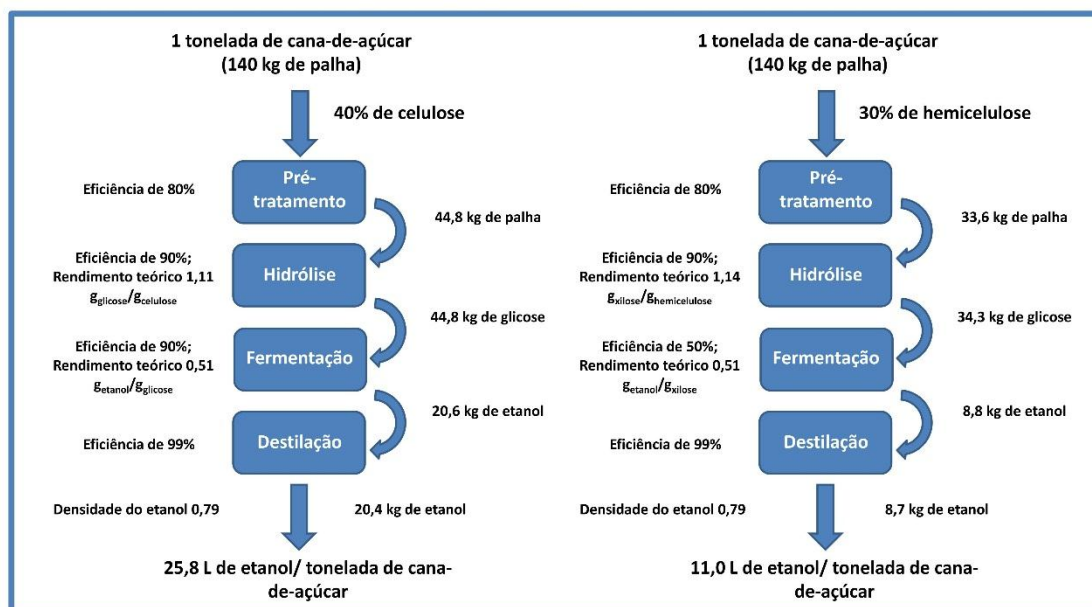


Figura 2. Potencial de obtenção do E2G a partir da celulose e da hemicelulose presente na palha de cana-de-açúcar

A produção de energia elétrica a partir de biomassas residuais apresenta-se como outra vertente promissora para suprir a demanda por energia no Brasil. Estima-se que 90% de toda energia elétrica produzida mundialmente ocorre através do ciclo de *Rankine* (Figura 3), que é um ciclo termodinâmico reversível, capaz de converter calor em trabalho. O setor sucroalcooleiro brasileiro utiliza esse tipo de sistema, empregando o bagaço de cana-de-açúcar como principal biomassa residual.

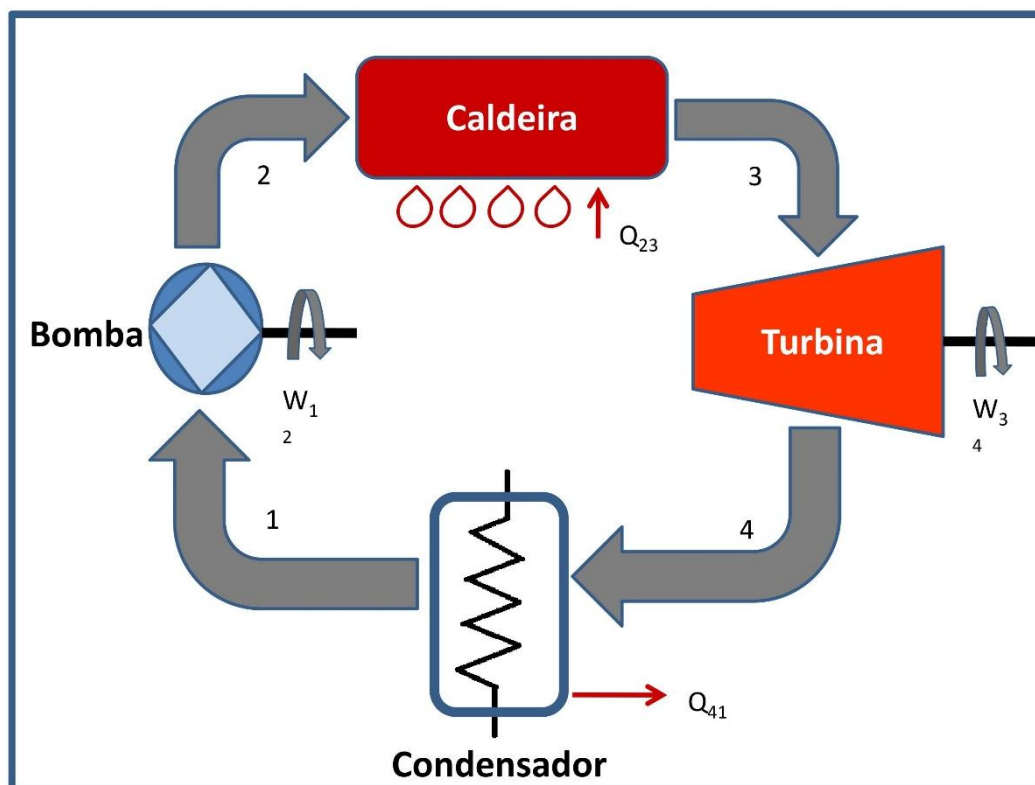


Figura 3. Ciclo Rankine

A energia gerada é utilizada no próprio processo ou quando há excedente vendida para a concessionária de energia elétrica. A biomassa, que é a fonte de calor, é alimentada e queimada diretamente nas caldeiras, sendo a energia térmica resultante utilizada na produção de vapor. Este vapor alimenta as turbinas, gerando assim energia elétrica. Após sair das turbinas e realizar trabalho, o vapor segue para atender as necessidades térmicas do processo (Dantas-Filho, 2009). Qualquer tipo de biomassa, incluindo os resíduos lignocelulósicos em geral, devido à sua elevada qualidade energética, pode ser alimentada à caldeira para geração de calor.

3.1. Milho

O milho (*Zea mays*) pertence à família *Gramineae*, e é originário da América Central. É um grão que pode ser cultivado nos hemisférios norte ou sul, ao nível do mar e em regiões montanhosas, em climas úmidos e regiões secas, devido à sua grande capacidade de adaptação a diversos climas (Matos, 2007; Ritchie et al., 2003).

De acordo com a FAO (2014) o Brasil ocupa a terceira posição entre os países produtores de milho, ficando atrás somente dos Estados Unidos da América e da China, sendo este o terceiro produto agrícola mais produzido no Brasil, depois da cana-de-açúcar e da soja (FAO, 2014).

No décimo segundo levantamento referente à safra 2015/2016, realizado pela Conab em setembro de 2016, a área total semeada com milho em todas as regiões do Brasil atingiu 15.922,5 mil hectares em 2016, o que equivale a 66.979,5 mil toneladas, sendo 12.924,1 mil hectares (61.413,9

mil toneladas) na região centro-sul e 2.998,4 mil hectares (5.565,6 mil toneladas) na região norte-nordeste (CONAB, 2016).

A palha e o sabugo são importantes subprodutos da indústria do milho. A palha é obtida ainda durante a colheita e na maioria dos casos não possui uma utilização definida, tornando-se um resíduo. Já o sabugo, parte interna e mais densa do milho, é o resíduo gerado após o milho ser debulhado e geralmente é usado para ração animal (Santos, 2014). Para cada tonelada de milho processado são gerados, aproximadamente, 180 kg de sabugo (Torre et al., 2008; Tsai, 2000) e 700 kg de palha (Horst, 2013).

3.2. Arroz

O arroz (*Oryza sativa L* entre outras espécies do gênero *Oryza*) é uma planta pertencente à família das gramíneas e é responsável pela alimentação da metade da população humana. No cenário mundial, caracteriza-se como a terceira maior cultura de grãos (Rocha et al., 2011). As cascas de arroz representam aproximadamente 20% da massa seca da colheita, sendo um abundante resíduo lignocelulósico. Essas cascas cobrem e protegem o grão durante o seu crescimento, e consistem de camadas, que compreendem a epiderme exterior, revestida com uma camada de cutícula espessa de células altamente silicificadas (Dagnino, et al., 2012).

Segundo dados do levantamento do CONAB em 2016, a área plantada de arroz em 2016 atingiu 2.007,8 mil hectares, o que equivale a 10.602,9 mil toneladas, sendo 1.459,1 mil hectares no centro-sul (9.191,4 mil toneladas) e 548,7 mil hectares no norte-nordeste (1.411,5 mil toneladas) (CONAB, 2016). Para cada tonelada de grãos de arroz colhidos são gerados, em média, 220 kg de casca (EMBRAPA, 2012).

3.3. Soja

A soja (*Glycine Max L.*) é considerada uma leguminosa originária da China, cultivada há mais de cinco mil anos. A soja começou a ser cultivada nas Américas no início do século XX. Atualmente é cultivada nos Estados Unidos, Brasil e Argentina, que juntos produzem aproximadamente 85% da soja do mundo (Chavez et al., 2010; Bulhões, 2007).

O décimo segundo levantamento da safra brasileira de soja na temporada 2015/16, realizado pela Conab, apresentou 33.251,9 mil hectares de área plantada para a soja, correspondendo a 95.434,6 mil toneladas, sendo 28.797,4 mil hectares para a região centro-sul (86.508,6 mil toneladas) e 4.454,5 mil hectares para o norte-nordeste (8.926,0 mil toneladas) (CONAB, 2016). A geração de resíduos para a cultura da soja é da ordem de 80 kg de casca para cada tonelada de grão. Industrialmente, a casca de soja não possui alto valor agregado, sendo amplamente utilizada como ração animal, na forma solta ou peletizada (Rojas, 2012).

3.4. Coco

O coqueiro (*Cocos nucifera L.*) é uma palmeira perene, originária do sudeste asiático, que foi introduzida no Brasil por volta de 1553, no estado da Bahia, trazida pelos portugueses. Por ser uma cultura de clima tropical, encontrou condições propícias para seu desenvolvimento no país e se espalhou pelas regiões Norte, Nordeste e Sudeste (Pereira, 2012; Purseglove, 1975).

A casca do coco verde, enquanto matéria-prima não utilizada apresenta custos e impactos para a sociedade e meio ambiente, ao passo que o seu aproveitamento, para geração de energia, agrega valor ao resíduo e pode trazer benefícios para o meio como um todo. Empresas automobilísticas, de beneficiamento do coco, a Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias – EMBRAPA, Universidades Federais e Estaduais, dentre outras, estão investindo em pesquisas para encontrar maneiras de utilização das cascas de coco verde (Silveira, 2008).

Segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola apresentado em dezembro de 2016, a área plantada do coco foi de 234,705 mil hectares no ano de 2016, o que equivale a 3.508,850 mil toneladas, sendo 216,183 mil hectares (3.058,288 mil toneladas) na região norte-nordeste e 16,509 mil hectares (400,006 mil toneladas) na região sudeste (LSPA - IBGE, 2016). Estima-se que 850 kg de casca de coco verde sejam gerados para cada tonelada de coco produzida (EMBRAPA, 2012).

3.5. Trigo

O trigo (*Triticum*) foi introduzido na Índia, China e Europa desde cinco mil anos a.C. Pertencente à família *Poaceae* se originou do cruzamento de outras plantas silvestres que existiam nas proximidades dos rios Tigre e Eufrates (Brammer, 2000; Moraes-Fernandes et al., 2000).

Em geral, o trigo nacional é utilizado pela indústria para a produção de massas. Por ser de elevada importância no consumo, especialmente humano, representa um produto de elevada importância estratégica. Existem estimativas de redução das importações de trigo nos próximos anos devido ao aumento esperado da produção interna. Segundo técnicos da CONAB, o Brasil tem potencial para expandir a produção de trigo, sendo ainda produzido com ótima qualidade (Horst, 2013).

Atualmente a produção de trigo no país concentra-se na região Sul, nos estados de Paraná, 56,4%, e Rio Grande do Sul, 33,6%. A participação de outros estados é ainda pequena. A produção projetada de trigo para 2020/2021 é de 6,2 milhões de toneladas, e um consumo de 11,7 milhões de toneladas no mesmo ano. O abastecimento interno exigirá importações de 5,5 milhões de toneladas em 2020/2021 (MAPA, 2011).

De acordo com dados do Conab a área plantada de trigo alcançou 2.097,0 mil hectares na safra 2015/2016, o que equivale a 6.164,1 mil toneladas, sendo todo apresentado na região centro-sul (CONAB, 2016). Estima-se que para cada tonelada de grãos de trigo produzidos, são geradas 1,36 toneladas de palha (Horst, 2013).

3.6. Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta herbácea, alógama, pertencente à família *Poaceae*, tribo *Andropogoneae* e gênero *Saccharum*. A família *Poaceae* (ou família das gramíneas) tem grande importância para a economia humana, pois nela se incluem cereais, tais como milho, trigo, arroz e sorgo, bem como muitas outras culturas forrageiras (Tzvelev, 1989).

Existem várias teorias que tentam explicar sua origem, porém a maioria das publicações cita que a cana-de-açúcar é originária da Nova Guiné, por volta de 2.500 a.C., utilizada naquela época, tanto para a construção de cercados como para apreciar o seu caldo açucarado. O cultivo expandiu-se para a Índia, China e regiões vizinhas, entre 1.500 a.C. e 1.000 a.C. (Matsuoka et al., 2005). Posteriormente a cana-de-açúcar se disseminou para vários lugares do mundo, principalmente para países tropicais e subtropicais (Wolf, 2011).

A produtividade média de cana-de-açúcar no Brasil é de 85 toneladas por hectare. Cada tonelada de cana processada gera cerca de 140 kg de palha e 140 kg de bagaço em base seca, ou seja, 12 toneladas de palha e 12 toneladas de bagaço por hectare (Santos et al., 2014).

Segundo dados do LSPA, a área plantada de cana-de-açúcar atingiu 9.589,974 mil hectares em 2016, o equivalente a 728.529,485 mil toneladas, sendo 1.037,661 mil hectares na região norte-nordeste (59.692,865 mil toneladas) e 8.552,313 mil hectares na região centro-sul (668.862,620 mil toneladas) (LSPA - IBGE, 2016).

Diante do exposto, verifica-se que há uma grande quantidade de resíduos sendo gerado anualmente a partir dos diferentes cultivos das regiões brasileiras, o que potencializaria sua utilização em larga escala para fins promissores, que possam gerar valor agregado a esses resíduos agroindustriais.

De acordo com o relatório síntese do balanço energético nacional da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), tomando como referência o ano base 2014, os principais setores que utilizaram energia foram: Indústria (32,9%), transportes (32,5%), setor energético (10,3%), residências (9,3%), serviços (4,7%) e agropecuária (4,2) (EPE, 2015). Em relação ao consumo de energia nas indústrias, 18,5% foi a partir do bagaço de cana-de-açúcar, o que representa 16,2 Mtep (mega tonelada equivalente de petróleo). No caso do setor energético, o bagaço de cana-de-açúcar denota um valor expressivo de 45,4% (12,5 mil tep). No setor de transportes, 15,1% do consumo de energia foi a partir de etanol (13,0 Mtep).

Os números expostos confirmam que a oferta de energia interna tem crescido no âmbito dos renováveis, indicando que ao longo dos anos outras fontes de biomassa se desenvolveram e se consolidaram como de fato já acontece com o bagaço da cana. Dados de poder calorífico e composição química de lignocelulósicos são apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Poder calorífico superior (PCS) de diversas biomassas lignocelulósicas.

| Resíduo | PCS (Mtep) | Referência |
|---------------------------------|-------------------|----------------------------|
| Palha de Milho | 24,73 | Santos, 2014 |
| Sabugo de Milho | 6,60 | Santos, 2014 |
| Casca de Arroz | 0,89 | Horst, 2013 |
| Casca de Soja | 3,34 | Ramos e Paula et al., 2011 |
| Palha de Trigo | 3,30 | Horst, 2013 |
| Casca de Coco | 1,47 | Esteves, 2014 |
| Palha de Cana-de-açúcar | 41,80 | Santos et al., 2014 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 41,57 | Santos et al., 2014 |

*Mtep: mega tonelada equivalente de petróleo

A partir da Tabela 1, pode-se observar que as biomassas estudadas apresentam poder calorífico superior bastante diversificado. Observa-se que os valores do PCS dos resíduos provenientes da cana-de-açúcar são os mais promissores visto que apresentam elevado valor. A palha de milho também oferece um PCS atrativo, apesar de inferior ao da palha e bagaço de cana.

Diante da necessidade de diversificação da matriz energética, acredita-se que os resíduos citados são promissores e devem ao longo dos anos, passar a compor a matriz energética nacional no sentido de suprir o setor energético brasileiro, que já utiliza como fonte principal o bagaço de cana-de-açúcar. As demais biomassas indicam valores inferiores em comparação ao bagaço de cana e a palha de cana e milho.

Tabela 2. Composição química de diferentes biomassas lignocelulósicas.

| Resíduo | Composição Química (%) | | | | | | | | Referência |
|--------------------------|------------------------|--------------|---------|------------|--------|---------|----------|-------|-------------------------------------|
| | Celulose | Hemicelulose | Lignina | Extrativos | Cinzas | Pectina | Proteína | Total | |
| Palha de Milho | 36,7 | 34,2 | 14,0 | 11,6 | 2,3 | — | — | 98,8 | Santos, 2014 |
| Sabugo de Milho | 35,4 | 26,9 | 18,0 | 18,3 | 2,4 | — | — | 101,0 | Santos, 2014 |
| Casca de Arroz | 34,0 | 13,0 | 29,0 | 3,0 | 17,0 | — | 2,0 | 98,0 | Hickert, 2010 |
| Casca de Soja | 35,8 | 23,1 | 9,1 | 5,0 | 4,0 | 4,2 | 15,4 | 96,6 | Rojas, 2012 |
| Palha de Trigo | 35,1 | 19,8 | 18,9 | 14,2 | 9,3 | — | — | 97,3 | Kaparaju & Felby, 2010; Horst, 2013 |
| Casca de Coco | 41,0 | 21,5 | 30,6 | 3,7 | 6,5 | — | — | 103,3 | Esteves, 2014 |
| Palha de Cana-de-açúcar | 44,3 | 31,1 | 19,0 | 16,7 | 4,9 | — | — | 99,3 | Wolf, 2011 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 38,8 | 29,4 | 21,7 | 4,9 | 5,1 | — | — | 99,9 | Wolf, 2011 |

A composição química das biomassas apresentada na Tabela 2, mostra que, para todos os resíduos avaliados, a celulose é o componente presente em maior quantidade. Esse fator faz com que os resíduos se mostrem promissores para a produção do etanol 2G, visto que esse polímero é o de maior interesse e que pode ser convertido a açúcares fermentescíveis após as etapas de pré-tratamento e hidrólise, e seu processo fermentativo ocorre pelo uso de leveduras comerciais (Santos, 2014). Nota-se também que para a maioria dos resíduos, a hemicelulose é o segundo componente mais abundante, exceção apenas para a casca do arroz e do coco que apresentam nessa posição a lignina. As hemiceluloses são heteropolissacarídeos que também podem ser submetidos às etapas adequadas para obtenção do bioetanol, porém esse processo não ocorre fazendo-se uso do principal microrganismo utilizado na produção industrial de etanol, a *Saccharomyces cerevisiae* (Suarez, 2014).

A produção do etanol chamado de segunda geração tem ganhado espaço e importância, visto que há uma necessidade emergente de diversificação da matriz energética brasileira. Essa necessidade de fontes alternativas tem crescido principalmente devido ao fato de que fontes derivadas do petróleo são poluentes e de preços instáveis (Bach et al., 2014).

Apesar do estudo do etanol celulósico não ser recente, seu custo de produção ainda representa um desafio. Investimentos em pesquisas estão sendo continuamente realizados, objetivando melhorias no processo, o que inclui redução de custos em todas as etapas envolvidas (Wang et al., 2014).

4. Potencial para produção de etanol lignocelulósico

De acordo com a quantidade gerada dos resíduos provenientes de cada cultura e considerando-se eficiência de: 80% na etapa de pré-tratamento; 90% na etapa de hidrólise da celulose em glicose; 90% na etapa de fermentação da glicose em etanol; 90% na hidrólise da hemicelulose em xilose; e 50% de eficiência na fermentação da xilose em etanol, pode-se fazer uma estimativa do aumento significativo da produção de etanol por hectare sem que haja expansões das áreas de cultivo (Santos et al., 2012; Mota & Monteiro, 2013). As Tabela 3 e 4 apresentam esses resultados para a celulose e hemicelulose, respectivamente.

Tabela 3. Potencial de produção de etanol a partir da celulose presente nos resíduos de cada cultura.

| Resíduo | Teor de Celulose por tonelada de resíduo (%) | Glicose obtida a partir da hidrólise da celulose ¹ (kg) | Etanol obtido a partir da fermentação da glicose ² (kg) | Volume de etanol por tonelada de resíduo ³ (L) | Volume de etanol por hectare de biomassa(L) |
|---------------------------------|--|--|--|---|---|
| Palha de Milho | 36,7 | 293,57 | 135,01 | 170,90 | 503,65 |
| Sabugo de Milho | 35,4 | 283,17 | 130,23 | 164,85 | 124,92 |
| Casca de Arroz | 34,0 | 271,97 | 125,08 | 158,33 | 183,92 |
| Casca de Soja | 35,8 | 286,37 | 131,70 | 166,71 | 38,28 |
| Palha de Trigo | 35,1 | 280,77 | 129,13 | 163,45 | 653,55 |
| Palha de Cana-de-açúcar | 44,3 | 354,36 | 162,97 | 206,29 | 2.194,10 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 38,8 | 310,37 | 142,74 | 180,68 | 1.921,70 |
| Casca de coco | 41,0 | 327,97 | 150,83 | 190,93 | 2.426,20 |

1: 1,111 g/g; assumindo 80% de eficiência no pré- tratamento e 90% de eficiência na hidrólise; 2: $Y_{p/s} = 0,51$ g/g; assumindo 90% de eficiência na fermentação; 3: densidade do etanol 0,79

Tabela 4. Potencial de produção de etanol a partir da hemicelulose presente nos resíduos de cada cultura.

| Resíduo | Teor de Hemicelulose por tonelada de resíduo (%) | Xilose obtida a partir da hidrólise da hemicelulose ¹ (kg) | Etanol obtido a partir da fermentação da xilose ² (kg) | Volume de etanol por tonelada de resíduo ³ (L) | Volume de etanol por hectare de biomassa (L) |
|--------------------------|--|---|---|---|--|
| Palha de Milho | 34,2 | 279,73 | 71,47 | 90,47 | 266,61 |
| Sabugo de Milho | 26,9 | 220,02 | 56,22 | 71,16 | 53,92 |
| Casca de Arroz | 13 | 106,33 | 27,17 | 34,39 | 39,95 |
| Casca de Soja | 23,1 | 188,94 | 48,27 | 61,11 | 14,03 |
| Palha de Trigo | 19,8 | 161,95 | 41,38 | 52,38 | 209,42 |
| Palha de Cana-de-açúcar | 31,1 | 254,37 | 64,99 | 82,27 | 874,99 |
| Bagaço de Cana-de-açúcar | 29,4 | 240,47 | 61,44 | 77,77 | 827,16 |
| Casca de coco | 21,5 | 175,85 | 44,93 | 56,87 | 722,73 |

1: 1,136 g/g; assumindo 80% de eficiência no pré-tratamento e 90% de eficiência na hidrólise; 2: $Y_{p/s} = 0,51$ g/g; assumindo 50% de eficiência na fermentação; 3: densidade do etanol 0,79

A análise dos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4 mostra que a utilização dos resíduos das culturas de milho, arroz, soja, trigo, cana-de-açúcar e coco apresenta grande potencial de geração de etanol por hectare de área cultivada, levando em conta os teores de celulose e hemicelulose.

O aproveitamento dos resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha) possibilitaria um incremento de 5.817,95 litros na produção de etanol por hectare, passando dos atuais 7.000 litros (obtidos pelo processo convencional a partir do caldo) para 12.817,95 litros (aproveitamento integral da cana-de-açúcar) (Santos et al., 2012). Esse aumento é bastante significativo, visto que não necessitaria expansão das áreas de cultivo. A palha de milho, de trigo e a casca de coco também oferecem números atrativos, frente aos demais resíduos que apresentam valores bem inferiores e que talvez não representem grande significância no potencial de produção de etanol total (casca de arroz, de soja e sabugo de milho).

Atualmente, a utilização de biomassas para produção de etanol de segunda geração já é realidade em nosso país, com grande tendência de crescimento ao longo dos anos visto que esse tipo de inovação apresenta-se como a chave para tornar o etanol ainda mais competitivo e suprir a crescente demanda de biocombustíveis no Brasil e no mundo.

A GranBio, empresa de biotecnologia industrial, é um exemplo de revolução verde em nosso país, visto que é uma empresa 100% brasileira que está em operação desde setembro de 2014, em

São Miguel dos Campos, Alagoas. Primeira planta de etanol de segunda geração no Hemisfério Sul, produz etanol a partir do processamento da palha de cana-de-açúcar (Granbio, 2015).

Outro exemplo é a empresa Raízen, que se destaca no setor energético como uma das mais competitivas do mundo. Possui diversas unidades produtoras e distribuidoras espalhadas nas diferentes regiões do Brasil e utiliza os co-produtos da cana-de-açúcar: palha e bagaço, para a produção do etanol celulósico. Em novembro de 2014, iniciou a operação de sua primeira planta industrial para a fabricação do etanol 2G em escala comercial. A unidade está localizada em Piracicaba (SP), e tem uma capacidade instalada de 40 milhões de litros de etanol por ano (Raízen, 2015).

5. Localização geográfica dos resíduos

O aproveitamento de resíduos agroindustriais é uma questão que se encontra diretamente associada à localização geográfica de suas culturas geradoras bem como de suas respectivas capacidades produtivas. Fatores bastante relevantes, como é o caso dos custos associados ao transporte e ao armazenamento de tais resíduos, podem ser minimizados levando-se em conta as regiões de maior beneficiamento potencial.

A Tabela 5 apresenta os resultados por região dos cultivos estudados nesse trabalho.

Tabela 5. Produção das culturas por região.

| Cultura | Região Norte | Região Nordeste | Região Centro-Oeste | Região Sudeste | Região Sul |
|-----------------------|---------------------|-----------------|---------------------|------------------|----------------|
| | Produção (em mil t) | | | | |
| Milho | 1.966,8 | 3.598,8 | 28.470,9 | 9.853,3 | 23.089,7 |
| Soja | 3.818,9 | 5.107,1 | 43.752,6 | 7.574,9 | 35.181,1 |
| Arroz | 1.017,8 | 393,7 | 608,0 | 54,5 | 8.528,9 |
| Trigo | — | — | 122,1 | 459,7 | 5582,3 |
| Cana-de-açúcar | 4.481,1 | 55.211,8 | 141.944,8 | 476.014,5 | 50.877,4 |
| Coco | 395,8 | 2.662,5 | — | 400,0 | — |

A partir dos dados da Tabela 5, observa-se que as culturas do milho e da soja estão concentradas na região centro-oeste, sendo, por consequência a região brasileira que gera maior quantidade destes resíduos: milho (sabugo e palha), soja (casca de soja). Logo, essa região apresenta-se como a de maior potencial para a localização de uma unidade produtiva de etanol 2G que tenha intuito de utilizar como fonte de biomassa os resíduos do milho e da soja.

Já para o caso das culturas de arroz e trigo, a região sul detém a maior produção. Quando se verifica a cultura de cana-de-açúcar, a região sudeste é a que apresenta maior produção. De fato, as grandes usinas brasileiras encontram-se na região sudeste devido à grande capacidade produtiva de cana-de-açúcar nessa região. Por fim, na região nordeste predomina a produção do coco, o que indica que fábricas de beneficiamento de resíduos do coco verde deveriam se instalar nessa região, visto

que esses resíduos são bastante volumosos, inviabilizando seu transporte por longas distâncias e armazenamento a longo prazo.

Nota-se, portanto uma distribuição dos resíduos lignocelulósicos nas diferentes regiões brasileiras. O Brasil possui grandes vantagens no uso de biomassas, devido à intensa radiação solar durante todo o ano e sua diversidade de clima, que mostram a grande capacidade produtiva em toda a sua extensão agricultável.

6. Conclusões

Atualmente, diversas formas de aproveitamento de biomassas para geração de energia têm sido extensivamente estudadas. Isso se deve principalmente ao fato de que há uma necessidade emergente da utilização de fontes alternativas de energia, em detrimento ao uso do petróleo, que é de origem fóssil, poluente e de preços instáveis. Outra razão é que esses tipos de resíduos muitas vezes são desperdiçados ou até mesmo subutilizados em atividades que não agregam valor como é o caso da geração de energia limpa.

Apesar desse fato ainda não ser uma total realidade em nosso país, a utilização em larga escala das biomassas residuais como produtoras de energia se apresenta bastante atrativa, uma vez que potencializará a solução de problemas ambientais associados à poluição e desperdício. Questões associadas à localização geográfica dos resíduos também devem ser analisadas, como o intuito de que os custos associados a transporte e armazenamento destas biomassas sejam minimizados.

Por fim, dentro do contexto ambiental, o etanol celulósico (E2G) define-se como promissor apesar dos entraves ainda associados à tecnologia de conversão da biomassa lignocelulósica. Isso porque o aproveitamento desses resíduos irá aumentar significativamente a produção de etanol em nosso país, diversificando a matriz energética brasileira sem que haja competitividade com a indústria de alimentos e sem a necessidade de expansão da área cultivada.

7. Agradecimentos

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior – e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – pelo apoio financeiro. Ao projeto “Casadinho”/ PROCAD, CNPq/ CAPES (Proc. nº 552595/2011-0), uma cooperação entre a UFSCar, UFAL e UFRJ, por proporcionar a interação entre as universidades.

8. Referências

- ASSUMPCÃO, S. M. N. 2015. *Pré- tratamento químico combinado do bagaço da cana visando a produção de etanol de segunda geração*. 100p. Dissertação de mestrado - UFBA, Salvador – BA.
- BACH, F., FIORESE, M. L., HASAN, S. D. M., MOREJON, C. F. M. 2014. Estudo da influência de variáveis no processo de produção de bioetanol de soro de leite. *Engvista*, v. 16, n. 3, p. 392-409.
- Balanço Energético Nacional 2015 – Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, EPE 2015.
- BRAMMER, S.P. 2000. *Mapeamento de genes de resistência parcial à ferrugem da folha em cultivares brasileiras de trigo (Triticum aestivum L. em Thell)*. 105p. Tese de Doutorado - UFRGS, Porto Alegre – RS.
- BRIANE, D., DOAT, J., 1985. Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois. *Aix-en-Provence, Édisud*. 180p.
- BULHÕES, R. 2007. *Limites e possibilidades para a cultura de soja no Paraná*. 190p. Tese de Doutorado – UNICAMP, Campinas, SP.
- CHAVEZ, F., LUZ, B., CASTILHOS, Z. 2010. *Agrominerais para o Brasil*. CETEM. Rio de Janeiro.
- Companhia Nacional de Abastecimento, CONAB 2016. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_09_15_18_32_boletim_12_setembro.pdf, acessada em janeiro 2017.
- DAGNINO, E. P., CHAMORRO, E. R., ROMANO, S. D., FELISSIA, F. E., AREA, M. C. 2012. Optimization of the acid pretreatment of rice hulls to obtain fermentable sugars for bioethanol production. *Industrial Crops and Products*, v. 42, p.363-368.
- Empresa brasileira de pesquisa agropecuária – EMBRAPA. 2012. Agroenergia. *Produção de briquetes e pellets a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais*. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento.
- ESTEVES, M. R. L. 2014. *Estudo do potencial energético e aproveitamento das cascas de coco verde para a produção de briquete em Maceió-AL*. 78p. Dissertação de mestrado - UFAL, Maceió – AL.
- FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations: Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, Disponível em <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>, Acessada em dezembro 2014.
- FURTADO, T. S., FERREIRA, J. C., BRAND, M. A., NEVES, M. D. 2012. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de pinus taeda em diferentes idades. *Rev. Árvore*, v. 36, p. 577-582.
- GONÇALVES, F. A., RUIZ, H. A., NOGUEIRA, C. C., SANTOS, E. S., TEIXEIRA, J. A., MACEDO, G. R. 2014. Comparison of delignified coconuts waste and cactus for fuel-ethanol production by the simultaneous and semi-simultaneous saccharification and fermentation strategies. *Fuel*, v. 131, p.66-76.
- GOUBEIA, E. R., NASCIMENTO, R. T., SOUTO-MAIOR, A. M. 2009. Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar. *Química Nova*, v. 32, p. 1500-1503.
- Granbio. Disponível em: www.granbio.com.br, acessada em setembro 2015.
- HICKERT, L. R. 2010. *Otimização da hidrólise da casca de arroz (Oryza Sativa) e avaliação da capacidade de bioconversão deste hidrolisado a etanol e xilitol por leveduras*. 117p. Dissertação de mestrado - UFRGS, Porto Alegre - RS.
- HORST, D. J. 2013. *Avaliação da produção energética a partir de ligninas contidas em biomassas*. 103p. Dissertação de mestrado – UTFPR, Ponta Grossa - PR.
- JARA, E. R. P. 1989. *O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

- KAPARAJU, P., FELBY, C. 2010. Characterization of lignin during oxidative and hydrothermal pretreatment processes of wheat straw and corn stover. *Bioresource Technology*, v. 101, p. 3175-3181.
- LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA – IBGE, 2016. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Disponível em: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_\[mensal\]/Fasciculo/lspa_201612.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_[mensal]/Fasciculo/lspa_201612.pdf), acessada em janeiro 2017.
- MATOS, E. H. S. F. 2007. Dossiê técnico cultivo do milho verde. 24p. CDT – Centro de Apoio ao Desenvolvimento Técnico, Brasília, UNB.
- MATSUOKA, S., GARCIA, A. A. F., ARIZONO, H. 2005. *Melhoramento da cana-de-açúcar*. p. 225-274. Programa de melhoramento da cana-de-açúcar da Universidade Federal de Viçosa – UFV.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DO ABASTECIMENTO. MAPA. Boletim informativo. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal>, acessada em outubro 2015.
- MOHAN, J. E., ZISKA, L. H., SCHLESINGER, W. H., THOMAS, R. B., SICHER, R. C., GEORGE, K., CLARK, J. S. 2006. Biomass and toxicity responses of poison ivy (*Toxicodendron radicans*) to elevated atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* v. 103, p. 9086–9089.
- MORAES-FERNANDES, M. I. B., ZANATTA, A. C. A., PRESTES, A. M., CAETANO, V. R., BARCELLOS, A. L., ANGRA, D.C., PANDOLFI, V. 2000. Cytogenetics and immature culture embryo at Embrapa Trigo breeding program: transfer of disease from related species by artificial resynthesis of hexaploid wheat (*Triticum aestivum* L. em Thell). *Genetics and Molecular Biology*, v. 23, p.1051-1062.
- MOTA, C. J. A., MONTEIRO, R. S. 2013. Química e sustentabilidade: Novas fronteiras em biocombustíveis. *Química Nova*, v. 36, p.1483-1490.
- OLSSON, L., HAHN-HAGERDAL, B., 1996. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 18, p. 312-331.
- PEREIRA, C. L. 2012. *Aproveitamento do resíduo do coco verde para a produção de compósitos destinados à construção rural*. 137p. Tese de doutorado – USP, Pirassununga - SP.
- PEREIRA, S. C., MAEHARA L., MACHADO C. M. M., FARINAS, C. S. 2015. 2G Ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass. *Biotechnology for Biofuels*, v. 8, p.1-16.
- PRATTO, B. 2015. *Hidrólise enzimática da palha de cana-de-açúcar: estudo cinético e modelagem matemática semi-mecânica*. 141p. Dissertação de mestrado – UFSCar, São Carlos – SP.
- PURSEGLOVE, J.W. 1975. Tropical crops monocotyledons. 2ª ed, London, 607p.
- RABELO, S. C., ANDRADE, R. R., MACIEL FILHO, R., COSTA, A. C. 2014. Alkaline hydrogen peroxide pretreatment, enzymatic hydrolysis and fermentation of sugarcane bagasse to ethanol. *Fuel*, v. 136, p. 349-357.
- Raízen. Disponível em [www. Raízen.com](http://www.Raizen.com), acessada em setembro 2015.
- RAMOS E PAULA, L. E. TRUGILHO, P. F., NAPOLI, A., BIANCHI, M. L. 2011. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, v. 17, p. 237-246.
- RITCHIE, S. W., HANWAY, J. J., BENSON, G. O. 2003. *Como a planta de milho se desenvolve*. Arquivo do Agrônomo, Encarte de informações agronômicas.
- ROCHA, N. R. A. F., FISCHER, J., MOURA, J. D., BARROS, M. A., CARDOSO, V. L., Coutinho Filho, U. Avaliação da Produção de Etanol empregando Complexo Enzimático gerado por *Aspergillus niger* com Hidrólise Separada. Resumos do Simpósio Nacional de Bioprocessos - SINAFERM, 2011, Caxias do Sul, Brasil.
- ROJAS, M. J. 2012. *Produção de etanol e hidrolisado protéico da casca de soja*. 96p. Dissertação de Mestrado – UFSCar, São Carlos - SP.
- SALAZAR, R. F. S., SILVA, G. L. P., SILVA, M. L. C. P. Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos. Resumos do VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2005, Campinas – SP.

- SANTOS, F. A., QUEIRÓZ, J. H., COLODETTE, J. L., FERNANDES, S. A., GUIMARÃES, V. M., REZENDE, S. T. 2012. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, v. 35, p. 1004-1010.
- SANTOS, F. A., QUEIROZ, J. H., COLODETTE, J. L., MANFREDI, M., QUEIROZ, M. E. L. R., CALDAS, C. S., SOARES, F. E. F. 2014. Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico. *Química Nova*, v. 37, p. 56-62.
- SANTOS, M. S. R. 2014. *Estudo de pré - tratamentos de palha e sabugo de milho visando a produção de etanol 2G*. 75p. Dissertação de mestrado – UFAL, Maceió - AL.
- SILVEIRA, M. S. 2008. *Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em Salvador – BA*. 164p. Dissertação de mestrado - Escola Politécnica da UFBA, Salvador – BA.
- SOUZA, R. F. R. 2014. *Produção de etanol a partir de hidrolisado enzimático do bagaço da cana-de-açúcar por leveduras isoladas do bioma amazônico*. 66p. Dissertação de mestrado – UFPE, Recife – PE.
- SUAREZ, C. A. G. 2014. *Otimização da produção de etanol 2G a partir de hexoses e pentoses*. 165p. Tese de doutorado – UFSCar, São Carlos - SP.
- TORRE, P., ALIAKBARIAN, B., RIVAS, B., DOMÍNGUEZ, J. M., CONVERTI, A. 2008. Release of ferulic acid from corn cobs by alkaline hydrolysis. *Biochemistry Engineering Journal*, v. 40, p. 500-506.
- TSAI, W. T., CHANG, C. Y., WANG, S. Y., CHANG, C. F., CHIEN, S. F., SUN, H.F. 2000. Preparation of activated carbons from corn cob catalyzed by potassium salts and subsequent gasification. *Bioresource Technology*, v. 78, p. 203-208.
- TZVELEV, N.N. 1989. *The Botanical Review*, 55, 141.
- WANG, Q., WANG, Z., SHEN, F., HU, J., SUN, F., LIN, L., YANG, G., ZHANG, Y., DENG, S. 2014. Pretreating lignocellulosic biomass by the concentrated phosphoric acid plus hydrogen peroxide (PHP) for enzymatic hydrolysis: Evaluating the pretreatment flexibility on feedstocks and particle sizes. *Bioresource Technology*, v. 166, p. 420-428.
- WOLF, L. D. 2011. *Pré-tratamento organossolve do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol e obtenção de xilooligômeros*. 48p. Dissertação de mestrado – UFSCar, São Carlos, SP.