

## Contextualização, Mercado e Gargalos de P&D do Etanol Lignocelulósico



ISSN 2177-4439  
Setembro, 2016

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Agroenergia  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# **Documentos 20**

## **Contextualização, Mercado e Gargalos de P&D do Etanol Lignocelulósico**

Embrapa Agroenergia  
Brasília, DF  
2016

Disponível no endereço eletrônico:  
<http://www.embrapa.br/agroenergia/publicacoes>

### **Embrapa Agroenergia**

Parque Estação Biológica (PqEB)  
Av. W3 Norte (final)  
CEP 70770-901 Brasília, DF  
Fone: (61) 3448-4246  
Fax: (61) 3448-1589  
[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)  
[www.embrapa.br/fale-conosco/sac/](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/)

### **Comitê Local de Publicações**

Presidente: *Marcia Mitiko Onoyama Esquiagola*  
Secretária-executiva: *Priscila Seixas Sabaini*  
Membros: *Bruno Galvêas Laviola, Gislaine Ghiselli, Jose Dilcio Rocha, Maria Iara Pereira Machado, Patrícia Verardi Abdelnur, Rosana Falcão, Sérgio Saraiva Nazareno dos Anjos, Sílvia Belém Gonçalves.*

Supervisão editorial e revisão de texto: *Luciane Chedid Melo Borges*  
Normalização bibliográfica: *Maria Iara Pereira Machado*  
Editoração eletrônica: *Maria Goreti Braga dos Santos*  
Foto da capa: *Mônica Caraméz Triches Damaso*

### **1ª edição**

Publicação digitalizada (2016)

### **Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Agroenergia

---

Contextualização, mercado e gargalos de P&D do etanol lignocelulósico / autores, Cristina Maria Monteiro Machado ... [et al.]. - Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2016.

35 p. ; 14,8 cm x 21 cm. - (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439; 20).

1. Etanol lignocelulósico – mercado. I. Machado, Cristina Maria Monteiro. II. Série.

# **Autores**

## **Cristina Maria Monteiro Machado**

Engenheira química, doutora em Processos Biotecnológicos, pesquisadora da Embrapa, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (DPD), Brasília, DF.

## **Mônica Caramez Triches Damaso**

Engenheira química, doutora em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

## **Daniela Tatiane de Souza**

Economista, doutora em Engenharia de Produção, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

## **Melissa Braga**

Química, mestre em Físico-química, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

## **Marcia Mitiko Onoyama**

Engenheira de Alimentos, doutora em Engenharia de Produção, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

## **Lorena Costa Garcia**

Engenheira de Alimentos, doutora em Engenharia

de Alimentos, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Betania Ferraz Quirino**

Bióloga, doutora em Biologia Celular e Molecular, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Dasciana de Sousa Rodrigues Gambetta**

Química industrial, doutora em Engenharia Bioquímica, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Felipe Brandão de Paiva Carvalho**

Engenheiro de Bioprocessos e Biotecnologista, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**João Ricardo Moreira de Almeida**

Biólogo, doutor em Microbiologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Leonardo Fonseca Valadares**

Químico, doutor em Físico-Química, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Sílvia Belém Gonçalves**

Engenheira química, doutora em Engenharia Química, pesquisadora da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Thais Demarchi Mendes**

Bióloga, mestre em Microbiologia Aplicada, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

**Thályta Fraga Pacheco**

Engenheira química, mestre em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, analista da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

# Apresentação

O aumento no consumo mundial de energia, principalmente no setor de transportes, traz consigo a necessidade de diversificação da matriz energética, em complemento à matriz de origem fóssil. A energia a partir de fontes renováveis como o etanol e o biodiesel surge como uma possibilidade de suprir a demanda energética dentro de um contexto de sustentabilidade do planeta.

Diferentemente da matriz energética mundial, a qual se constituiu principalmente pela origem fóssil, o Brasil possui mais de 40% de sua matriz pautada em energia renovável. O País é um dos protagonistas em biocombustíveis líquidos, com ampla experiência em desenvolvimento científico e tecnológico, principalmente para o etanol de sacarose, a partir da cana-de-açúcar. No entanto, o volume nacional gerado desse biocombustível não é suficiente para suprir a demanda interna do País. Sendo assim, existe oportunidade de gerar uma quantidade complementar de etanol, o etanol celulósico, a partir dos resíduos e coprodutos gerados pelo setor sucroalcooleiro energético, dentro de um contexto de biorrefinaria.

O etanol celulósico já tem sido alvo de intenso estudo, tanto nacional como também mundialmente, por instituições de pesquisa como a Embrapa e as universidades, bem como pelo setor produtivo. Porém,

ainda são vários os desafios que se apresentam para obtenção desse biocombustível a partir de biomassa lignocelulósica, utilizando processo bioquímico (hidrólise/fermentação). Sendo assim, o foco deste documento consiste em apresentar um panorama mundial do mercado de etanol lignocelulósico e de insumos ligados à sua produção, além dos gargalos técnicos e científicos na produção desse biocombustível.

*Manoel Teixeira Souza Junior*  
Chefe-Geral da Embrapa Agroenergia

# Sumário

<b>Contextualização, Mercado e Gargalos de P&amp;D do Etanol Lignocelulósico .....</b>	<b>9</b>
<b>Introdução.....</b>	<b>9</b>
<b>Mercado de etanol lignocelulósico.....</b>	<b>10</b>
<b>Estratégia de atuação das empresas.....</b>	<b>14</b>
<b>Mercado de enzimas para etanol lignocelulósico .....</b>	<b>15</b>
<b>Gargalos técnicos e científicos na produção de etanol lignocelulósico.....</b>	<b>18</b>
<b>Engenharia da biomassa.....</b>	<b>19</b>
<b>Desconstrução da parede celular: pré-tratamento e hidrólise enzimática.....</b>	<b>20</b>
<b>Desenvolvimento do processo fermentativo .....</b>	<b>26</b>
<b>Aproveitamento de resíduos e coprodutos.....</b>	<b>27</b>
<b>Considerações finais .....</b>	<b>28</b>

<b>Referências .....</b>	<b>30</b>
<b>Literatura recomendada.....</b>	<b>32</b>

# Contextualização, Mercado e Gargalos de P&D do Etanol Lignocelulósico

---

## Introdução

O desenvolvimento econômico do Brasil apresenta um histórico de uso da energia da biomassa, desde os ciclos econômicos ligados ao açúcar até o Programa Brasileiro de Álcool (Proálcool), iniciado na década de 1970, e as florestas energéticas para a siderurgia. Mais recentemente, o Plano Nacional de Agroenergia (PNA) 2006-2011 definiu as diretrizes nacionais básicas para a produção de biocombustíveis e geração de energia de biomassa. No contexto do PNA 2006-2011, várias ações institucionais foram implementadas, inclusive no âmbito de diferentes ministérios e instituições de pesquisa a eles ligadas. As referidas ações visavam coordenar o desenvolvimento tecnológico tanto das matérias-primas atuais e potenciais do País, como dos processos para a produção de etanol, biodiesel e outros bioprodutos, além do aproveitamento dos resíduos e coprodutos gerados nas diversas cadeias produtivas agrícolas.

Nesse contexto, vários esforços têm sido enveredados no País para pesquisa e produção de etanol lignocelulósico, seja por instituições de pesquisa como a Embrapa e as universidades, seja pelo setor privado. A empresa GranBio inaugurou em 2014 a primeira planta do Hemisfério Sul para produção de etanol lignocelulósico em escala comercial, em São Miguel dos Campos, no Estado de Alagoas. Recentemente, em julho de 2015, a empresa Raízen inaugurou uma planta de etanol em Piracicaba, no Estado de São Paulo.

No entanto, ainda são vários os desafios para obtenção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica, utilizando processo bioquímico (hidrólise/fermentação). Sendo assim, este estudo tem por objetivo apresentar um panorama mundial do mercado de etanol lignocelulósico e de insumos ligados à sua produção e também os gargalos técnicos e científicos na produção desse biocombustível.

## **Mercado de etanol lignocelulósico**

Os projetos mundiais de etanol lignocelulósico estão em estágios bastante diferenciados de desenvolvimento, embora as primeiras plantas com escala de produção significativa tenham sido inauguradas em 2013/2014. Em 2012, o custo de produção obtido para o etanol lignocelulósico nos EUA foi de US\$ 0,94/litro, cerca de 40% maior que o custo de produção para o etanol de milho (US\$ 0,67/litro) (KOROSEC, 2013).

Os elementos de maior custo na produção de etanol lignocelulósico são as despesas de capital, de matéria-prima e de enzimas. Entretanto, os custos operacionais estimados do processo caíram significativamente desde 2008, em virtude dos avanços tecnológicos obtidos. Por exemplo, o custo da enzima para um litro de etanol lignocelulósico caiu 72% entre 2008 e 2012. De modo geral, uma planta semicomercial com porte médio (cerca de 90 milhões de litro/ano) exige um desembolso inicial de US\$ 290 milhões. Em 2016, com a inauguração de novas plantas, estima-se que a capacidade média anual das plantas

irá atingir até 125 milhões de litros. O investimento inicial por litro instalado deverá cair de US\$ 3/litro em 2013 para US\$ 2/litro em 2016, em decorrência da obtenção de economias de escala (KOROSEC, 2013).

Nos EUA, as plantas de etanol lignocelulósico com produção em escala comercial entraram em operação em 2013/2014. Em 2013, 26 novas plantas estavam em construção no País. Na Itália, a companhia Mossi & Ghisolfi anunciou, em abril de 2012, a construção de uma planta em escala industrial. Essa planta foi inaugurada em outubro de 2013, com previsão de produzir 50 milhões de litros de etanol/ano. Na Europa, várias plantas piloto estão em operação na Dinamarca, Espanha, Alemanha e Suécia.

No Brasil, a GranBio Investimentos S.A. e a Beta Renewables inauguraram em setembro de 2014 a primeira planta brasileira de etanol lignocelulósico, com capacidade de produção de 82 milhões de litros/ano (GRANBIO, 2015). A Raízen inaugurou em julho de 2015 uma planta de etanol lignocelulósico, com capacidade de produção de 40 milhões de litros/ano. As biomassas utilizadas são bagaço e palha de cana-de-açúcar. O processamento da biomassa foi desenvolvido pela logen Energy e a hidrólise enzimática utiliza enzimas específicas desenvolvidas pela empresa Novozymes (RAIZEN, 2015).

Na Tabela 1, são apresentados projetos de produção de etanol lignocelulósico no mundo, bem como sua localização, matéria-prima utilizada, fornecedor de enzima, capacidade de produção e o início da operação. Muitos desses projetos irão operar dentro do conceito de biorrefinarias, o que significa dar outras aplicações aos seus produtos que não sejam apenas o uso energético, assim como a diversificação da produção. A grande maioria das plantas está localizada nos EUA, mas países como Canadá, Itália, Dinamarca, China e Brasil também são sedes de algumas iniciativas.

**Tabela 1.** Plantas de produção de etanol lignocelulósico.

Empresa	Localização	Matéria-prima	Fornecedor de enzima	Capacidade	Início
<b>Poet-DSM</b>	Emmetsburg (Iowa) EUA	palha de milho	DSM	94,6 milhões de litros/ano	2014
<b>Alpena Prototype Biorefinery</b>	Alpena (Michigan), EUA	resíduo da indústria de madeira	n/d <sup>(1)</sup>	3,8 milhões de litros/ano	2013
<b>Abengoa Bioenergy</b>	Hugoton (Kansas), EUA	palha de milho, sorgo, trigo	Abengoa	87 milhões de litros/ano	2014
<b>DuPont Danisco</b>	Nevada (Iowa), EUA	resíduos de milho	Danisco	102,2 milhões de litros/ano	2012
<b>Ineos New Planet BioEnergy</b>	Vero Beach (Flórida), EUA	resíduos sólidos municipais e resíduos vegetais	n/d	30,2 milhões de litros/ano	2013
<b>Enerkem Mississippi Biofuels</b>	Edmonton (Alberta), Canadá	resíduos sólidos municipais	n/d	37,8 milhões de litros/ano	2013
<b>Mascoma</b>	Rome (New York), EUA - unidade de demonstração	diferentes matérias-primas	Mascoma	757 mil litros/ano	2008
	Kinross (Michigan), EUA	polpa e aparas de madeira	Mascoma	75,7 milhões de litros/ano	2015
<b>Fiberight</b>	Blairstown (IA), EUA	resíduos sólidos municipais	Novozymes	13,2 milhões de litros/ano	2015
<b>Beta Renewables</b>	Crescentino, Itália	resíduos de trigo, arroz, cana e álamo	Novozymes	75,7 milhões de litros/ano	2012
<b>GranBio</b>	São Miguel dos Campos (AL), Brasil	bagaço e palha de cana	Novozymes	82 milhões de litros/ano	2014

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Empresa	Localização	Matéria-prima	Fornecedor de enzima	Capacidade	Início
<b>Raízen</b>	Piracicaba (SP), Brasil	bagaço e palha da cana	Novozymes	40 milhões de litros/ano	2015
<b>Bluefire</b>	Fulton (MS), EUA	resíduos florestais e outros resíduos celulósicos	Arkenol	71,9 milhões de litros/ano	2017
<b>Cofco-Sinopec</b>	Hei Long Jiang Province (China)	n/d	Novozymes	50 milhões de toneladas	2013
<b>Inbicon</b>	Spiritwood (ND), EUA	palha de trigo	n/d	37,8 milhões de litros/ano	2009
	Maabjerg, Dinamarca	palha de trigo	Danisco Genencor (DuPont)	75,7 milhões de litros/ano	2016
<b>Aemetis</b>	Cupertino, EUA	palha de trigo, bagaço de cana	n/d	208,2 milhões de litros/ano	n/d
<b>Zechem</b>	Boardman (OR), EUA	resíduos florestais e resíduos de milho, trigo e cana	Processo não requer	94,6 milhões de litros/ano	2013
<b>M&amp;G Guozhen Green Refinery/Beta Renewables</b>	China	palha de milho e resíduos de cana	Novozymes	235 milhões de litros/ano	2016

<sup>(1)</sup> n/d: não disponível.

Fonte: World (2014), Abengoa (2015), Batista (2013), Bevill (2012), Empresa (2013), Chemicals Technology (2012), Dittrock (2012), Gomes (2013), Gazzoni (2013), Jessen (2014), Ineos (2013), Jornal Cana (2012).

## Estratégia de atuação das empresas

Com o objetivo de viabilizar a produção de etanol lignocelulósico, as empresas do setor têm adotado diferentes estratégias de atuação, entre as quais se destacam:

- **Ampliação dos acordos de transferência de tecnologia:**

Em virtude de muitos projetos buscarem sair da etapa de pesquisa e desenvolvimento para uma etapa de comercialização, verifica-se um maior número de acordos entre empresas visando transferir/licenciar tecnologias, notadamente a tecnologia de produção de enzimas. Verifica-se que as empresas do setor procuram adquirir ativos-chave, atrelando a produção de etanol a partir de uma dada matéria-prima às especificidades técnicas de uma enzima. Nessa linha, por exemplo, a Novozymes fornece enzimas para a Mossi & Ghisolfi e a Genencor para a DuPont (BIOFUEL DIGEST, 2012).

- **Produção das enzimas:**

Empresas produtoras de etanol lignocelulósico têm procurado produzir suas próprias enzimas, como é o caso da Abengoa. Para isto, a empresa fechou um acordo de exclusividade com a Dyadic International, de US\$ 5,5 milhões, no qual a Dyadic desenvolve uma tecnologia específica para a Abengoa.

- **Colocalização da produção:**

Os projetos de instalação de etanol lignocelulósico nos Estados Unidos têm buscado uma colocalização com a produção de etanol de milho. Em outras palavras, procura-se operar conjuntamente ambos os tipos de atividades, como o que fez a Poet-DSM Advanced Biofuels em Iowa (EUA). Essa estratégia utiliza equipamentos e instalações conjuntamente, aproveitando os mesmos fornecedores e compartilhando a mesma infraestrutura local. A GranBio, no Brasil, também criou um projeto associativo, buscando complementariedade de eficiência operacional com usinas de cana-de-açúcar. A planta brasileira comporta uma capacidade de produção de 82 milhões de litros de etanol/ano e está localizada ao lado da Usina Caeté.

- **Diversificação produtiva em direção à produção de butanol:**

Algumas empresas têm avaliado a possibilidade de combinar a produção de etanol e butanol a partir de açúcares fermentescíveis obtidos da biomassa lignocelulósica, como a Gevo Inc. na sua planta de Luverne (EUA). A empresa tem adaptado a planta para produzir também o isobutanol, que pode ser obtido por meio do butanol.

Verifica-se, desse modo, que a partir de 2013 a indústria de etanol lignocelulósico entrou em uma nova fase, a de comercialização de tecnologias. Ainda assim, algumas empresas têm esperado a comprovação efetiva da viabilidade comercial para realização de maiores investimentos.

Por outro lado, também foram verificados desinvestimentos e encerramentos das atividades em algumas empresas. A companhia norte-americana Range Fuels, que recebeu US\$ 40 milhões do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para investir na produção de etanol de celulose, foi fechada e liquidou seus ativos. A expectativa era de que a Range fosse a primeira empresa dos EUA a produzir etanol de celulose em escala comercial. Outra companhia que realizou desinvestimentos foi a Broomfield, cuja expectativa era produzir até 100 milhões de galões (378,5 milhões de litros) de combustível a partir de celulose de madeira.

## **Mercado de enzimas para etanol lignocelulósico**

O mercado mundial de enzimas para biocombustíveis foi avaliado em US\$ 535,6 milhões em 2011. Em 2017, esse valor de mercado deve chegar a quase US\$ 915 milhões, com taxas de crescimento de 8,2% a.a. As enzimas amilases (utilizadas na produção de etanol de fontes amiláceas, especialmente milho) constituem o maior segmento da indústria de enzimas para biocombustíveis, com faturamento de cerca de 226,6 milhões dólares em 2011. O segundo maior mercado de enzimas

para biocombustíveis é o de celulases, com uma receita de US\$ 155,8 milhões de dólares, no mesmo ano (BCC RESEARCH, 2013).

Com a finalidade de produzir etanol lignocelulósico, várias empresas estão desenvolvendo enzimas para hidrólise da biomassa lignocelulósica, incluindo a Novozymes, da Dinamarca, que está entre as maiores do ramo, e que produz celulases e hemicelulases.

Em 2009, a Syngenta entrou em um acordo com a Proteus (França) para desenvolver enzimas celulolíticas. A Codexis tem trabalhado em conjunto com a Shell e a Logen para aumentar a eficiência das enzimas. A empresa Dyadic tem otimizado a tecnologia de plataforma C1 para o desenvolvimento de novas enzimas. O objetivo é converter a biomassa em açúcares fermentescíveis para produzir etanol e butanol, assim como produtos químicos, polímeros e plásticos. A Dyadic constitui parte dos acordos não exclusivos de licença com a Abengoa Bioenergy e a Codexis. Após um projeto de 4 anos entre Dyadic e Sekab E-Technology, foi desenvolvido um novo coquetel enzimático para a produção de etanol lignocelulósico, AlternaFuel® CMAX™. A Biométhodes desenvolveu tecnologias próprias de pré-tratamento e uma solução enzimática para a redução dos custos de produção de etanol. A empresa também pretende desenvolver aplicações de maior valor agregado para a lignina (INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGNOCELLULOSIC ETHANOL, 2013).

Na Tabela 2, apresenta-se uma visão geral dos principais fornecedores de enzimas para produção de etanol lignocelulósico.

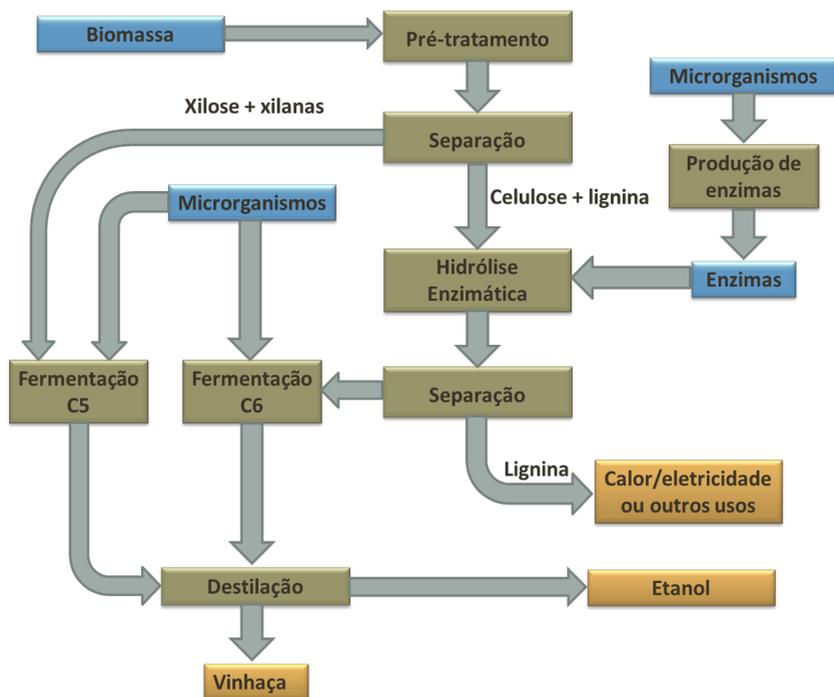
**Tabela 2.** Fornecedores de enzimas para produção de etanol lignocelulósico.

Empresa	Localização	Tecnologia
Novozymes	Dinamarca	CellicCTec3 – constitui uma nova geração de enzimas lançadas pela Novozyme em 2012. Essa tecnologia possui um desempenho 1,5 vezes maior do que o produto anteriormente lançado (CellicCTec2). Em termos de rendimento, são necessários apenas 50 kg de CellicCTec3 para obter 1 tonelada de etanol a partir de biomassa, bem abaixo dos 250 kg de enzima necessários pelas tecnologias concorrentes.
Mascoma	EUA	Bioprocesso consolidado – realiza, em somente uma etapa, a produção de celulase, a hidrólise enzimática e a fermentação de hexoses e pentoses por um mesmo microrganismo.
DSM	Dinamarca	Coquetel enzimático da DSM – apresenta atividade ótima na faixa de temperatura de 60 °C a 70 °C.
DuPont Genencor	EUA	Accellerase® TRIO – utiliza uma baixa dosagem de enzimas para produzir etanol. Com a AccelleraseTRIO, a Genencor fornece um coquetel de enzimas em um único produto para a hidrólise da celulose e da hemicelulose da biomassa em açúcares fermentescíveis C6 e C5, respectivamente, aumentando o rendimento do etanol por unidade de matéria-prima.
Codexis	EUA	CodeXyme 4 – apresenta um desempenho superior de 10% a 20% sobre CodeXyme 3. Para usar o coquetel de enzimas CodeXyme4X, o pré-tratamento precisa ser hidrotérmico.

Fonte: Biofuel Digest (2012).

## Gargalos técnicos e científicos na produção de etanol lignocelulósico

Quando se considera materiais lignocelulósicos como substratos para a fermentação alcoólica, deve-se superar a estrutura nativa da parede celular da biomassa, que dificulta o acesso das enzimas que hidrolisam a celulose e a hemicelulose a monômeros como glicose e xilose (substratos da fermentação alcoólica). Assim, o processo de produção de etanol de celulose e hemicelulose passa por diversas etapas, necessita de distintos insumos e, para que seja viabilizado, diferentes áreas interdependentes e multidisciplinares deverão ser estudadas, como apresentado na Figura 1.



**Figura 1.** Rota genérica (pré-tratamento ácido ou auto-hidrólise) e insumos necessários na produção de etanol lignocelulósico; em que: quadros azuis = insumos; quadros marrons = processos; quadros laranja = produtos/coprodutos.

## Engenharia da biomassa

A parede das células vegetais é composta por uma mistura complexa e dinâmica de componentes como polissacarídeos, proteínas, compostos fenólicos e sais minerais, que possuem diferentes funções. Os polissacarídeos representam a maior parte do peso seco da parede e consistem em celulose, hemiceluloses e pectinas. Essa matriz é altamente ordenada e pode tornar-se mais rígida ou mais frouxa, conforme as necessidades da célula ou da planta.

Estima-se que milhares de genes participem da síntese, disposição e função das paredes celulares, mas poucos foram identificados e suas enzimas correspondentes são ainda menos conhecidas. Muitas questões se mantêm, por exemplo, sobre como os polissacarídeos e a lignina são sintetizados, como a composição celular é regulada e como sua composição se relaciona às funções da parede celular. Para responder tais questões, centenas de enzimas precisam ser identificadas e correlacionadas aos genes. Após essa fase, a produtividade e a eficiência dos processos de conversão poderão ser aumentadas pela alteração de aspectos fundamentais do crescimento das plantas. A alteração da parede celular para aumento da quantidade relativa de celulose e diminuição da lignina poderá ter efeitos significativos. Eventualmente, poderão ser desenvolvidas espécies altamente produtivas de matérias-primas com sua estrutura celular alterada para aumento da conversão.

Paralelamente, um pré-requisito para uma indústria competitiva de biocombustíveis é o desenvolvimento de espécies que possuam, além de composição da parede celular desejável, alta produtividade em sistemas de produção sustentáveis. Uma vez que o foco do melhoramento genético das plantas tem sido, principalmente, direcionado à alimentação humana e/ou animal, algumas características desejáveis à produção de biocombustíveis não foram melhoradas. Nessa área, ainda há grandes desafios tecnológicos ligados ao estudo de espécies energéticas, domesticação de espécies alternativas,

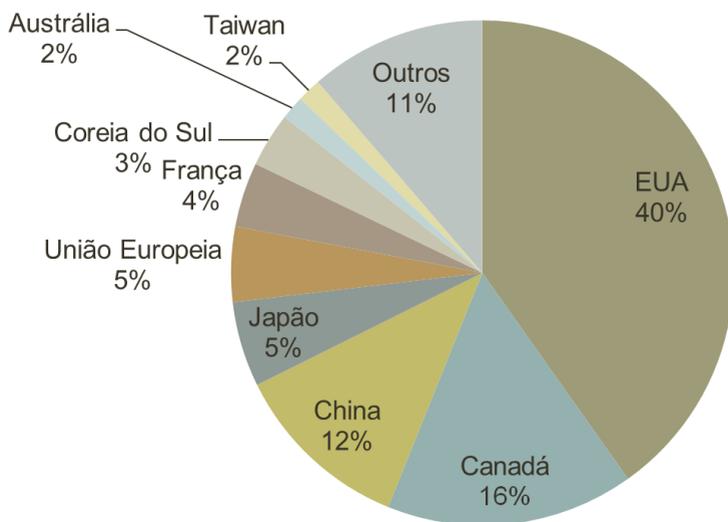
melhoramento para aumento de produtividade de forma sustentável, composição mais adequada e resistência ao estresse biótico e abiótico.

## **Desconstrução da parede celular: pré-tratamento e hidrólise enzimática**

Atualmente, considera-se fundamental, antes da hidrólise enzimática, uma etapa de pré-tratamento, de modo a reduzir o grau de cristalinidade da celulose e aumentar o teor de celulose amorfa, que é mais acessível ao ataque enzimático. Para o pré-tratamento da biomassa, métodos químicos, físicos, biológicos e combinados podem ser utilizados, e cada um deles têm vantagens e desvantagens. Portanto, é de grande importância para o estabelecimento de um processo economicamente e ambientalmente viável a escolha do método a ser utilizado, assim como a definição dos parâmetros de processo, considerando-se a biomassa utilizada e as restrições relacionadas à hidrólise enzimática e fermentação.

Sobre a abordagem do pré-tratamento em patentes, buscou-se na base Derwent Innovation Index (Thomson Innovation), no período de 2011 a 2013, empregando-se como estratégia de busca a combinação dos seguintes termos (com ou sem operadores booleanos): *cellulosic* \$ or *lignocellulosic* \$ or *biomass* combinados com *pretreat* \* or *acid hydrolysis* \* or *steam explosion* or *hydrothermolysis* or *ammonia fiber explosion* or *organosolve* or *sulfite pretreat* \* or *(alkaline and oxidation)* or *ozone pretreat* \* or *microwave* or *ionic liquid* or *(milling and grinding)* or *steam pretreat* \* or *liquid hot water* or *carbon dioxide pretreat* \* or *ammonia pretreat* \* or *CO<sub>2</sub> explosion* or *oxidizing agent* \$ or *organic solvent* \$ or *organic solvents* or *sulfite pretreat* \*. As informações recuperadas foram então tratadas no software Vantage Point (Search Technology) para obter os gráficos e tabelas aqui apresentados.

Verificou-se então que no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013, os Estados Unidos, o Canadá e a China foram os maiores solicitantes de patentes e, juntos, totalizaram 68% dos pedidos realizados (Figura 2), um total de 352 pedidos. Os pedidos estão relacionados a (i) processos de conversão de biomassa lignocelulósica em etanol, incluindo a etapa de pré-tratamento; (ii) métodos de pré-tratamento; (iii) compostos orgânicos e inorgânicos utilizados no processo; e (iv) equipamentos.



**Figura 2.** Países de onde partiram os pedidos de patentes em pré-tratamento, no período de 2011 a 2013.

Fonte: Thomson Reuters, Derwent Innovation Index, período 2011-2013.

No período do levantamento, observa-se que predominam as empresas privadas entre as principais depositantes (Tabela 3). A empresa Shell foi a maior depositante mundial de pedidos de patentes no referido período. Os pedidos estão relacionados a métodos de pré-tratamentos químicos notadamente ácidos e com agentes oxidantes.

Os pedidos depositados pelo Institut Français du Pétrole, o segundo maior depositante, tratam de métodos de pré-tratamentos biológicos, químicos (ácido, alcalino, solventes orgânicos), térmicos e combinações destes.

**Tabela 3.** Principais depositantes dos pedidos de patentes no período de 2011 a 2013.

Registros	Depositantes
20	Shell
18	Institut Français du Pétrole – Energies Nouvelles
11	Chinese Acad Sci Process Eng Inst
9	ChemtexItalSpa
9	Du Pont De Nemours&Co E I
8	Atomic Energy Council Inst Nuclear Energ
8	logen Energy Corp
8	RenmatixInc
7	AndritzInc
7	Univ South China Technology
6	Beta RenewablesSpa
6	Greenfield Ethanol Inc
6	Toyota
6	University of Michigan

Fonte: Thomson Reuters, Derwent Innovation Index, período 2011-2013.

As maiores expectativas para a viabilização do etanol lignocelulósico estão depositadas na possibilidade de ser utilizada a maquinaria bioquímica de microrganismos (fungos e bactérias) para hidrolisar a parede celular. O problema é que, assim como os fungos desenvolveram estratégias para penetrar a parede celular, as plantas também coevoluíram para sofisticar seus mecanismos de defesa. Assim, embora haja fungos capazes de hidrolisar a parede celular vegetal, ela é bastante recalcitrante. Dessa forma, é imprescindível

a prospecção, seleção e melhoramento de microrganismos para serem obtidas enzimas mais eficientes, assim como a identificação, caracterização, melhoramento e produção econômica desses sistemas enzimáticos. Também é necessário o desenvolvimento de processos de hidrólise enzimática mais eficientes, considerando as limitações na reação de hidrólise (inibição), o tempo e custo desse processo.

Além das questões já citadas, para acompanhar o desenvolvimento desses processos, são necessárias técnicas avançadas de análise de imagem, como microscopia, espectrometria de massas e RMN para a caracterização da parede celular in natura e após tratamentos físicos, químicos e enzimáticos, de forma a elucidar a interação da lignina com os outros polímeros, enquanto é feita a “desconstrução” da parede celular. Além disso, métodos analíticos mais rápidos e eficientes de caracterização da composição das biomassas antes e após as etapas de pré-tratamento e hidrólise enzimática também são necessários.

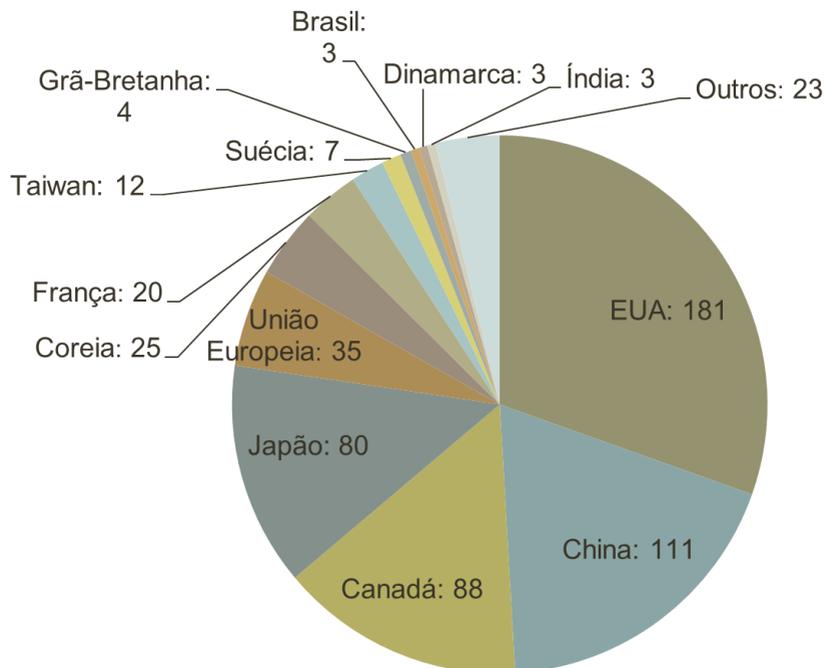
No período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013, a China e os EUA foram os maiores solicitantes de patentes em hidrólise enzimática, e juntos totalizaram cerca de 50% dos pedidos feitos no período, um total de 477 pedidos (Figura 3).

A empresa Novozymes, maior depositante mundial de pedidos de patentes no período relacionado (Tabela 4), tem como principal área tecnológica as composições enzimáticas para hidrólise de material lignocelulósico. De forma geral, os pedidos podem ser divididos em três classes:

- Novos polipeptídeos para aumentar a atividade celulolítica (WO2013043910-A1, WO2012135659-A2, WO2011059740-A1, WO2011039319-A1).
- Composição enzimática para degradação de material celulósico e processos relacionados (WO2013043981-A1, WO2012122518-A1, WO2012058293-A1, WO2012021396-A1, WO2012021399-A1, WO2012021400-A1, WO2012021410-A1, WO2012021394-A1,

WO2012021395-A1, WO2012021401-A1, WO2012021408-A1, WO2012019151-A1, WO2012006642-A1);

- Pré-tratamento englobando o processo enzimático (WO2013039776-A1, WO2012012590-A2, WO2011080154-A1, WO2011003940-A1, WO2011002832-A1).



**Figura 3.** Países de onde partiram os pedidos de patentes de hidrólise enzimática, no período de 2011 a 2013.

Fonte: Thomson Reuters, Derwent Innovation Index, período 2011-2013.

Os pedidos depositados pelo Institut Français du Pétrole, o segundo maior depositante de acordo com esta busca, tratam do desenvolvimento de processos cujo foco é o pré-tratamento do material celulósico, mas que englobam a fermentação desse material celulósico, motivo pelo qual foram mantidos nessa busca.

Foram recuperados três pedidos de patentes feitos por instituições brasileiras (Tabela 4):

- CTC (BR201101295-A2): Enzima hidrolítica empregada para a produção de etanol. Envolve a utilização de vinhaça como agente tampão e água no meio de fermentação contendo biomassa lignocelulósica e levedura. Este pedido também foi depositado via PCT (WO2012129622-A1).
- Unicamp (BR201004486-A2): Processo de preparação de etanol a partir de monocotiledôneas, tais como cana-de-açúcar, trigo ou arroz, empregando celulase ou xilanase.
- UFRJ (BR201000997-A2): Preparação de etanol envolvendo a sacarificação por hidrólise enzimática e fermentação de materiais em um reator. A fermentação é realizada por meio da utilização de *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis* ou cepa geneticamente modificada de *Zymomonas mobilis*. Este pedido também foi depositado via PCT (WO2011127545-A1).

**Tabela 4.** Principais depositantes dos pedidos de patentes acrescidos das instituições brasileiras solicitantes no período de 2011 a 2013.

Registros	Depositantes
25	NovozymesInc
15	Institut Français du Pétrole – Energies Nouvelles
14	Toyota
12	DSMIpAssetsBv
12	Du Pont De Nemours&Co E I
11	CodexisInc
9	Atomic Energy Council Inst Nuclear Energ
9	logen Energy Corp
8	QterosInc
7	Univ Kobe
6	Honda Motor CoLtd

Continua...

**Tabela 4.** Continuação.

Registros	Depositantes
1	CTC – Centro Tecnologia Canavieira
1	Unicamp – Universidade Estadual de Campinas
1	UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Fonte: Thomson Reuters, Derwent Innovation Index, período 2011-2013.

## Desenvolvimento do processo fermentativo

A fermentação de açúcares por microrganismos é o método mais comum para a conversão de açúcares em etanol. O processo está bem estabelecido para alguns açúcares, como a sacarose extraída da cana-de-açúcar e a glicose obtida do amido de milho. A produção de etanol combustível a partir da mistura de açúcares presentes na biomassa lignocelulósica, entretanto, ainda é um desafio, com muitas oportunidades de avanço. As hemiceluloses são ricas em pentoses como xiloses e arabinoses. A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, usualmente empregada na produção de etanol a partir da sacarose e amido, é muito pouco eficiente na conversão de pentoses. Outro gargalo nesse processo relaciona-se aos compostos inibidores de microrganismos, produzidos paralelamente durante o pré-tratamento, como, por exemplo, acetato, furfural e hidroximetilfurfural, além da própria lignina presente na biomassa. Muitos desses compostos afetam significativamente o crescimento dos microrganismos e reduzem o metabolismo de açúcares e a concentração final de etanol. Dessa forma, ainda se faz necessária a identificação/desenvolvimento de microrganismos resistentes aos inibidores presentes nos hidrolisados de biomassa e que sejam capazes de fermentar pentoses e hexoses alcançando maiores taxas de conversão.

Para aumentar a produtividade do etanol, paralelamente ao desenvolvimento de microrganismos, diferentes estratégias fermentativas devem ser estudadas de forma a minimizar o efeito

de inibidores, diminuir o número de etapas trabalhadas e aumentar o rendimento do processo fermentativo. A estratégia mais simples e atualmente utilizada (Figura 1) é a hidrólise e fermentação separadas. As desvantagens desse método são o número de etapas e a inibição da atividade das celulasas pelos compostos formados na hidrólise, o que prejudica o rendimento do mesmo. Outras alternativas estudadas (não descritas nesse documento) consistem nos processos de sacarificação e fermentação simultâneas, cocultura de microrganismos e bioprocessos consolidados, cada uma delas com dificuldades a serem superadas para seu estabelecimento.

## **Aproveitamento de resíduos e coprodutos**

A indústria de biocombustíveis, como qualquer indústria, produz vários resíduos em abundância que não podem ser descartados sem tratamentos prévios por questões ambientais e legais, podendo resultar em graves problemas de saúde pública, poluição e/ou multas severas. Por outro lado, resíduos podem ser utilizados como insumos (são denominados então coprodutos) a serem aproveitados na própria cadeia produtiva ou em outras. No caso do etanol obtido a partir de materiais lignocelulósicos, o aproveitamento dos resíduos é necessário para que sua cadeia produtiva seja ambiental e economicamente sustentável. De fato, o desenvolvimento de aplicações para as correntes não aproveitadas no processo principal será indispensável para a viabilização do etanol lignocelulósico.

Entre os coprodutos, o resíduo sólido, rico em lignina, tem sido queimado para gerar calor de processo e eletricidade em plantas das empresas como a Abengoa, Poet, Dupont, GranBio e Raízen. Essa ação é necessária para suprir a demanda energética das empresas, a exemplo do que é realizado nas usinas de cana, que queimam o bagaço de cana-de-açúcar. Entretanto, o emprego de parte dessa lignina em outras aplicações possibilitará a geração de produtos de maior valor agregado. As possibilidades de aplicação em uma biorrefinaria são

inúmeras, destacam-se a produção de fibras de carbono, compósitos, produtos químicos aromáticos de baixa massa molecular e combustíveis (RAGAUSKAS et al., 2014). É importante ressaltar que a lignina gerada na produção de etanol lignocelulósico tem propriedades distintas daquela tradicionalmente produzidas na indústria de polpa de celulose, que compõe o licor negro. Assim, as características da lignina devem ser consideradas no desenvolvimento de novos produtos e na superação desse gargalo.

## Considerações finais

A diversificação da matriz energética mundial tornou-se fundamental em virtude da crescente demanda por energia. Sendo assim, o desenvolvimento econômico de vários países que possuem a agroindústria do etanol consolidada, tem sido voltado para a obtenção de biocombustíveis sem aumento de área plantada. Isso é possível quando coprodutos e resíduos não somente da agroindústria do etanol de fontes tradicionais, mas também do agronegócio de uma forma geral, passam a ter aplicação como insumos industriais, dentro do conceito de biorrefinaria. Esse é o caso do etanol lignocelulósico, que pode ser produzido a partir de bagaço e palha de cana-de-açúcar, bem como de resíduos de madeira, das plantações de cereais, oleaginosas e leguminosas.

Embora, atualmente, o etanol lignocelulósico seja foco de pesquisa em diversas instituições mundiais e já se encontre em escala comercial de produção em alguns países, incluindo o Brasil, muitos são os desafios para sua consolidação como uma tecnologia madura.

Em relação à biomassa, etapas de melhoramento genético e avanços nos sistemas de produção ainda são necessários. A desconstrução celular com etapas de pré-tratamento mais eficientes e que produzam menos inibidores tem sido estudada. Adicionalmente, a seleção e o melhoramento de microrganismos para fermentação de pentoses e hexoses e para produção de sistemas enzimáticos eficientes e menos

onerosos são questões cruciais para viabilizar a produção de etanol lignocelulósico. Em relação aos resíduos, a transformação destes em produtos de maior valor é importante para agregar valor à cadeia produtiva e diversificar os produtos. E, além das questões técnicas já citadas, estudos socioeconômicos e ambientais compõem outro pilar na estruturação em nível industrial e comercial desse bioproduto.

No entanto, o Brasil possui características que podem torná-lo um grande produtor de etanol lignocelulósico nos próximos anos: um agronegócio forte e uma agroindústria do etanol de sacarose de cana bem estabelecida, além de possuir equipes técnicas capacitadas para vencer os desafios citados, embora com grande demanda por mais profissionais e novos perfis multidisciplinares. Mas é provável que ainda falte, para o País, maior definição de políticas industriais voltadas para o setor de biocombustíveis e bioenergia que possam impulsionar decisivamente as tomadas de decisão. É certamente nessa área que o poder público poderá contribuir para o avanço consistente do setor.

## Referências

ABENGOA. **Abengoa celebrates grand opening of its first commercial-scale next generation biofuels plant**. Disponível em: <[http://www.abengoa.com/web/en/noticias\\_y\\_publicaciones/noticias/historico/2014/10\\_octubre/abg\\_20141017.html](http://www.abengoa.com/web/en/noticias_y_publicaciones/noticias/historico/2014/10_octubre/abg_20141017.html)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

BATISTA, F. Raízen define investimento em etanol lignocelulósico. **Valor Econômico**, 13 mar. 2013.

BCC RESEARCH. **Global markets and technologies for biofuel enzymes, 2013**. Disponível em: <<http://www.bccresearch.com/market-research/energy-and-resources/biofuels-enzymes-global-markets-technologies-egy099a.html>>. Acesso em: 23 set. 2015.

BEVILL, K. Industry gets progress report on cellulosic ethanol projects. **Ethanol Producer Magazine**, 06 Jun. 2012. Disponível em: <<http://www.ethanolproducer.com/articles/8846/industry-gets-progress-report-on-cellulosic-ethanol-projects>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

BIOFUEL DIGEST. **The enzyme wars**. 24 fev. 2012. Disponível em: <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2012/02/24/the-enzyme-wars>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

CHEMICALS TECHNOLOGY. Enerkem starts cellulosic ethanol production at Quebec facility. **Chemicals Technology**, 8 Jun. 2012. Disponível em: <<http://www.chemicals-technology.com/news/newsenerkem-cellulosic-ethanol-production-westbury>>. Acesso em: 08 abr. 2013.

DITTRICK, P. DuPont lets engineering contract for Iowa cellulosic ethanol project. **Oil & Gas Journal**, 6 Jul. 2012.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGNOCELLULOSIC ETHANOL, 3., 2013, Madrid. [Anais ...]. Bruxelas: EPSO, 2013.

GAZZONI, M. BNDES compra 15% da GraalBio, da família Gradin, por R\$ 600 milhões. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 22 jan. 2013.

GOMES, F. Raizen prevê R\$2 bi para etanol de 2a geração até 2024. **Reuters**, 26 nov. 2013.

GRANBIO. **BIOFLEX 1**. Disponível em: <<http://www.granbio.com.br/conteudos/biocombustiveis/>>. Acesso em: 14 nov. 2015.

JESSEN, H. **Fiberight still working at MSW Plant in Iowa**. 2014. Disponível em: <<http://fiberight.com/fiberight-still-working-at-msw-plant-in-iowa/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

INEOS. **INEOS Bio facility in Florida begins producing renewable power**. Disponível em: <<http://www.ineos.com/businesses/ineos-bio/news/ineos-bio-facility-in-florida-begins-producing-renewable-power>>. Acesso em: 09 abr. 2013.

KOROSEC, K. Cellulosic ethanol to be cost competitive by 2016. **ENVIRONMENTAL LEADER**, 12 mar. 2013. Disponível em: <<http://www.environmentalleader.com/2013/03/12/cellulosic-ethanol-to-be-cost-competitive-by-2016/>>. Acesso em: 19 maio 2015.

RAGAUSKAS, A. J.; BECKHAM, G. T.; BIDDY, M. J.; CHANDRA, R.; CHEN, F.; DAVIS, M. F.; DAVISON, B. H.; DIXON, R. A.; GILNA, P.; KELLER, M.; LANGAN, P.; NASKAR, A. K.; SADDLER, J. N.; TSCHAPLINSKI, T.J.; TUSKAN, G. A.; WYMAN, C. E. Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. **Science**, Washington, DC, v. 344, n. 6185, 2014.

WORLD directory of advanced renewable fuels and chemicals. São Paulo: Elabora, 2014.

## Literatura recomendada

ADVANCED ETHANOL COUNCIL. **Cellulosic biofuels – Industry Progress Report 2012-2013**. Disponível em: <[http://ethanolrfa.3cdn.net/d9d44cd750f32071c6\\_h2m6vaik3.pdf](http://ethanolrfa.3cdn.net/d9d44cd750f32071c6_h2m6vaik3.pdf)>. Acesso em: 07 abr. 2013.

ALTPROFITS. **Novozymes 2009**. Disponível em: <<http://www.oilgae.com/energy/nb/2009/01/novozymes-biopolymers-novel-hyaluronic.html>>. Acesso em: 15 abr. 2013

BRASIL é “bola da vez” na rota do etanol celulósico. **Unica**, 07 nov. 2012. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/252184839203981924/brasil-e-por-cento22bola-da-vez-por-cento22-na-rota-do-etanol-celulosico>>. Acesso em: 09 abr. 2013.

BUCKERIDGE, M. S.; SANTOS, W. D.; SOUZA, A. P. As rotas para o etanol lignocelulósico no Brasil. In: CORTEZ, L. A. B. (Coord.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: p&d para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010. p. 365-380.

DEPARTMENT OF ENERGY (Estados Unidos). **Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: a joint research agenda**. 2005. Washington, DC, 2006.

DUPONT INDUSTRIAL BIOSCIENCES. **Genencor**. Disponível em: <<http://biosciences.dupont.com/duponttm-genencorr-science>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

EMBRAPA. Secretaria-Executiva do PAC Embrapa. **Programa de fortalecimento e crescimento da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 44 p.

EMBRAPA. Secretaria de Gestão e Estratégia. **V Plano Diretor da Embrapa: 2008-2011-2023**. Brasília, DF, 2008. 43 p.

EMBRAPA AGROENERGIA. **I Plano Diretor da Embrapa Agroenergia: 2008 - 2011 - 2023: focando em soluções - da biomassa à energia**. Brasília, DF, 2008. 48 p.

EMPRESA dos EUA anuncia produção de etanol lignocelulósico em escala industrial. **Cana News**, 02 ago. 2013. Disponível em: <<http://www.cananews.net.br/?p=noticia&sec=10&no=866>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

ENERKEM. **Energem Alberta Biofuels**. Disponível em: <<http://energkem.com/en/facilities/plants/edmonton-alberta-canada.html>>. Acesso em: 07 abr. 2013.

HAMELINCK, C. N.; VAN HOOIJDONK, G.; FAAIJ, A. P. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 28, n. 4, p. 384-410, 2005.

HARTIG, S. **Value creation in bio-energy**. 2012. Disponível em: <[http://www.dsm.com/content/dam/dsm/cworld/en\\_US/documents/sha-carnegie-biofuels-seminar-copenhagen-111212.pdf](http://www.dsm.com/content/dam/dsm/cworld/en_US/documents/sha-carnegie-biofuels-seminar-copenhagen-111212.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2011**. Paris, 2011.

ISOLA, J. **Cellulosic ethanol heads for cost competitiveness by 2016**. Bloomberg, 2013.

JORNALCANA. GranBio anuncia primeira planta de etanol lignocelulósico do Hemisfério Sul. **Jornal Cana**, 25 maio 2012. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/noticia/Jornal-Cana/48260+GaalBio-anuncia-primeira-planta-de-etanol-celulosico-do-Hemisferio-Sul>>. Acesso em: 06 abr. 2013. Acesso para assinantes.

LANE, J. Enzyme wars. **Biofuels Digest**, 24 fev. 2012.

LEIRADO, J. S. **Second-generation biofuels: ready for take-off**. [S.l.]: Abengoa, 2011.

MASCOMA. **About us**. Disponível em: <<http://www.mascoma.com/about-us/overview/>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

OECD LIBRARY. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2012**. Disponível em: <[http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2012\\_agr\\_outlook-2012-en](http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/agriculture-and-food/oecd-fao-agricultural-outlook-2012_agr_outlook-2012-en)>. Acesso em: 11 abr. 2013.

PETROBRÁS. **Etanol**. Disponível em: <<http://sites.petrobras.com.br/minisite/petrobrasbiocombustivel/etanol/>>. Acesso em 07 abr. 2013.

PHILLIPS, L. **Overview & outlook: brazilian sugarcane industry**. Washington, DF: UNICA, 2012.

PLANO Nacional de Agroenergia 2006-2011. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: Embrapa, Secretaria de Gestão Estratégica, 2005. 118 p.

POET DSM. About. Disponível em: <<http://www.poetdsm.com/about>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

RAÍZEN. **Tecnologia em energia renovável**. Disponível em: <<http://www.raizen.com/energia-do-futuro-tecnologia-em-energia-renovavel/etanol-de-segunda-geracao>>. Acesso em: 14 nov. 2015.

REN21. **Renewables energy policy network for the 21st century**. Paris, 2013.

RIO + 20: Carros movidos a etanol lignocelulósico de bagaço de cana circulam pelo Rio. **WeBioEnergias**, 15 jun. 2012. Disponível em: <<http://www.webioenergias.com.br/noticias/biocombustiveis/1534/rio+20:-carros-movidos-a-etanol-celulosico-de-bagaco-de-cana-circulam-pelo-rio.html>>. Acesso em: 08 abr. 2013.

ROYAL DSM (Netherlands). **DSM bio-based products & services 2013**. Disponível em: <<http://www.dsm.com/corporate/about/business-entities/dsm-biobased-productsandservices.html>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

ROYAL DSM (Netherlands). **First commercial-scale cellulosic ethanol plant in the U.S. opens for business**. Disponível em: <<http://poet-dsm.com/pr/first-commercial-scale-cellulosic-plant>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

SARANTINOPOULOS, P.; PERKINS, J.; VAN EGMOND, P.; KUMAR, M.; STAM, H. **Improvement of the DSM thermophilic enzyme system for lignocellulose degradation**. 2011. Disponível em: <<https://sim.confex.com/sim/33rd/webprogram/Paper17950.html>>. Acesso em: 20 jan. 2014.

SARKAR, N.; GHOSH, S.; BANNERJEE, S.; AIKAT, K. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. **Renewable Energy**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 19-27, 2012.

SCHLITTLER, L. A. F. S.; ANTUNES, A. M. de S.; JUNIOR PEREIRA N. Use of patent applications as a tool for technology development investigations on ethanol production from lignocellulosic biomass in Brazil. **JOURNAL OF TECHNOLOGY MANAGEMENT & INNOVATION**, Santiago, v. 7, n. 3, p. 80-90, 2012.

SOCIEDADE NACIONAL DE AGRICULTURA (Brasil). Maior usina de etanol de segunda geração do mundo será instalada na China. **SNA News**, 6 ago. 2014 .Disponível em: <<http://sna.agr.br/maior-usina-de-etanol-2a-geracao-do-mundo-sera-instalada-na-china>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

VOEGELE, E. BlueFire announces LOI from China EXIM to finance Fulton project. **Ethanol Producer Magazine**, 27 Oct. 2014. Disponível em: <<http://ethanolproducer.com/articles/11588/bluefire-announces-loi-from-china-exim-to-finance-fulton-project>> . Acesso em: 24 abr. 2015.

WARMINGTON, A. Biochemicals deals heat up. **Speciality Chemicals Magazine**, 09 Feb 2012. Disponível em: <<http://www.specchemonline.com/articles/view/biochemicals-deals-hot-up>> . Acesso em: 09 abr. 2013.

**Embrapa**

---

**Agroenergia**

MINISTÉRIO DA  
**AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO**



CGPE 13043