

Pré-tratamento com Ácido Diluído do Bagaço de Cana-de-açúcar para a Máxima Recuperação de Xilose



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

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 03

Pré-tratamento com Ácido Diluído do Bagaço de Cana- -de-açúcar para a Máxima Recuperação de Xilose

Sílvio Vaz Jr.
Daniele Cristina Joaquim Santoro
Viviane Marcos Nascimento
Sarita Cândida Rabelo

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

Embrapa Agroenergia

Parque Estação Biológica (PqEB), s/nº.

Ed. Embrapa Agroenergia.

Caixa Postal 40315.

CEP 70770-901, Brasília, DF.

Fone: + 55 (61) 3448-158

Fax: + 55(61)3448-1589

www.embrapa.br

<https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/>

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Alexandre Alonso Alves*

Secretária-executiva: *Marcia Mitiko O. Esquiagola*

Membros: *André Pereira Leão*

Bruno Galvêas Laviola

Emerson Leo Schultz

Luciane Chedid Melo Borges

Maria Iara Pereira Machado

Patrícia Verardi Abdelnur

Rosana Falcão

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

Sarita Cândida Rabelo (reator Parr de liga Hastelloy C-276 com 7,5L de capacidade, munido com controle de temperatura e pressão empregado em reações de pré-tratamento de biomassas).

1ª edição

Publicação digitalizada (2017)

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

Pré-tratamento com ácido diluído do bagaço de cana-de-açúcar para a máxima recuperação de xilose / Silvio Vaz Jr., Daniele Cristina Joaquim Santoro, Viviane Marcos Nascimento, Sarita Cândida Rabelo. – Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2017.

25 p. : (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-0395, 3)

1. Ácido diluído. 2. Alta recuperação 3. Hemicelulose. 4. xilose. 5. Produtos químicos renováveis. I. Vaz Junior, Silvio. II. Série.

662.88 – CDD 22

© Embrapa 2017

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Objetivos	11
Materiais e Métodos	11
Resultados e Discussão	16
Conclusão	22
Agradecimentos	22
Referências	23

Pré-tratamento com Ácido Diluído do Bagaço de Cana-de-açúcar para a Máxima Recuperação de Xilose

Sílvio Vaz Jr.¹

Daniele Cristina Joaquim Santoro²

Viviane Marcos Nascimento³

Sarita Cândida Rabelo⁴

Resumo

O Brasil é conhecido mundialmente como líder no setor de biocombustíveis, em virtude, principalmente, da produção eficiente de etanol a partir da cana-de-açúcar, do etanol conhecido como de primeira geração (E1G). O etanol de segunda geração (E2G) e os produtos químicos renováveis (ex.: ácidos orgânicos, álcoois e poliálcoois, furanos, etc.), derivados de açúcares solúveis obtidos a partir da fração lignocelulósica da cana-de-açúcar (bagaço e palha), surgem como bioprodutos promissores para as indústrias bioenergética e química. Apesar de algumas unidades comerciais já estarem em operação no País, principalmente para o caso do E2G, o potencial desses bioprodutos ainda não foi totalmente explorado, ressaltando a etapa de pré-tratamento como uma etapa-chave do processo e que ainda apresenta muitos questionamentos e desafios técnico-econômicos. O pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído é um dos

¹ Químico, doutor em Química Analítica, pesquisador da Embrapa Agroenergia, Brasília, DF.

² Estudante de graduação em Engenharia Química pela Universidade São Francisco, técnica de laboratório do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE-CNPEN), Campinas, SP.

³ Química, estudante de doutorado em Química pela Universidade de São Paulo (USP), analista de desenvolvimento tecnológico do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE-CNPEN), Campinas, SP.

⁴ Química, doutora em Engenharia Química, pesquisadora e coordenadora da Divisão de Processos do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE-CNPEN), Campinas, SP.

mais estudados e aplicados para a obtenção de pentoses, favorecendo uma alta hidrólise da hemicelulose e sua recuperação em açúcares monoméricos, majoritariamente a xilose. A fim de se obter o máximo aproveitamento da fração hemicelulósica do bagaço de cana-de-açúcar, foi realizada uma otimização, em escala laboratorial e piloto, do pré-tratamento catalisado por ácido sulfúrico diluído. A condição ótima encontrada foi 140 ± 3 °C, 12-15 min e $0,5\% \pm 0,02$ (v/v) H_2SO_4 , em que $85,53 \pm 0,76\%$ (m/m) da hemicelulose presente no bagaço foi solubilizada, sendo $82,63 \pm 2,96\%$ (m/m) dos açúcares recuperados na forma monomérica, favorecendo a utilização do açúcar nos processos de conversão, sejam eles fermentativos ou de síntese.

Termos para indexação: ácido diluído, alta recuperação, hemicelulose, xilose, produtos químicos renováveis.

Acid Pretreatment of Sugarcane Bagasse for High Xylose Recovery

Abstract

Brazil is the world's leader in biofuels sector, mainly due to the ethanol fuel production from sugarcane, referred as first generation ethanol (E1G). The second-generation ethanol (E2G) and renewable chemicals (e.g., organic acids, alcohols, polyalcohols, furans, etc.) derived from soluble sugars from the sugarcane bagasse and straw, appear as a promising bioproducts for bioenergy and chemistry. Although some commercial units are already in operation in Brazil, mainly for E2G, their potential has not yet been fully explored, highlighting the pretreatment as a crucial step in the process, which shows technical-economical challenges and drawbacks. The dilute sulfuric acid pretreatment is one of the most widely studied and applied to obtain pentoses, favoring high hemicellulose hydrolysis followed by its recovery as monomeric sugars, majority xylose. In order to obtain maximum utilization of hemicellulosic fraction of the sugarcane bagasse, a pilot and laboratory optimization of the pretreatment catalyzed by sulfuric acid were performed. The best condition was performed using the following parameters: 140 ± 3 °C, 12-15 min, $0,5\% \pm 0,02$ (v/v) H_2SO_4 , where $85.53 \pm 0.76\%$ (m/m) of hemicellulose was solubilized, in which $82.63 \pm 2.96\%$ (m/m) of the sugars were recovered as monomeric

form, favoring the use of this sugar fraction in conversion processes, either fermentative or synthetic processes.

Index terms: dilute acid, high recovery, hemicellulose, xylose, renewable chemicals.

Introdução

Os materiais lignocelulósicos representam um enorme potencial para a produção sustentável de compostos químicos e combustíveis (ZHOU et al; 2011).

O Brasil destaca-se nesse cenário em virtude da alta disponibilidade e do baixo custo da matéria-prima, como o bagaço e a palha de cana-de-açúcar, advindos da produção de etanol de primeira geração (E1G). Além disso, a biomassa já vem previamente processada das moendas, estando disponível em grandes quantidades dentro da usina. O modelo brasileiro possibilita a integração do processo de primeira geração com unidades de produção de blocos químicos (*building blocks*) e etanol de segunda geração (E2G), promovendo, assim, custos atrativos para os processos de uma biorrefinaria (OLIVÉRIO; HILST, 2004).

Além da produção de etanol e açúcar, as usinas brasileiras utilizam o bagaço de cana-de-açúcar no processo de cogeração de energia, tornando as usinas eletricamente autossuficientes e disponibilizando o suplementar para a rede pública de abastecimento (BRASIL ..., 2016).

Constituída predominantemente por celulose, hemicelulose e lignina, a matriz lignocelulósica apresenta-se como uma estrutura extremamente complexa, cuja eficiente conversão em açúcares monoméricos — passíveis de utilização em processos de produção de insumos para química fina, polímeros e biocombustíveis — não é trivial.

A etapa de pré-tratamento é considerada a etapa-chave da biorrefinaria, pois visa ao desmantelamento da estrutura celulose-hemicelulose-lignina, aumentando a acessibilidade às cadeias de celulose e hemicelulose, de forma a tornar as frações mais suscetíveis a transformações químicas nas etapas subsequentes (HESS, 2008).

O pré-tratamento é visto como uma das etapas mais caras do processo de conversão da biomassa a açúcares fermentescíveis e blocos químicos e, por isso, apresenta grande potencial para melhorar a

eficiência e diminuir o custo (LEE et al., 1994; LYND, et al., 1996; MOSIER et al., 2003a; 2003b).

O pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído é um dos mais antigos e amplamente estudados, sendo conhecido desde 1819 (GALBE; ZACCHI, 2002). Essa etapa faz uso de baixas concentrações de ácido sulfúrico — tipicamente, 0,5% a 5,0% (v/v) — sob temperaturas moderadas (120 °C a 160 °C) e tempos de reação que variam de 15 a 40 minutos, quando o objetivo é solubilizar as hemiceluloses e deixar a celulose mais acessível para a etapa de sacarificação enzimática, já que a presença das hemiceluloses juntamente com a lignina reduz a eficiência dessa etapa (HAMELINCK et al., 2005).

Durante o pré-tratamento com ácido diluído, é possível observar uma hidrólise majoritária da fração hemicelulósica, além da formação de um resíduo sólido rico em celulose e lignina, chamado de celulignina.

O principal viés do pré-tratamento com ácido diluído é a dificuldade de controle das condições de processo, em decorrência, principalmente, de uma estreita janela de operação, o que pode favorecer a degradação dos açúcares solubilizados, gerando, assim, produtos como furfural, hidroximetilfurfural (HMF), ácidos carboxílicos, dentre outros. Por isso, torna-se necessário adequar as condições operacionais do pré-tratamento de acordo com a aplicabilidade do licor a distintos processos de obtenção de blocos químicos e biocombustíveis (LARSSON et al., 1999).

A xilose, principal constituinte monomérico da hemicelulose, pode resultar na produção de inúmeros compostos químicos de alto valor agregado, como ácido succínico, álcool furfúrico, tetrahydro álcool furfúrico, ácido levulínico, metiltetrahidrofuranol, metil furanol, xilitol, anidrido maleico, ácido maleico, dentre outros (ISIKGOR; BECER, 2015).

Com base nesse preceito, os investimentos em P&D são de extrema importância para prover alterações e aperfeiçoamento das etapas físicas, químicas e biológicas para a obtenção dos açúcares de

segunda geração, com o posterior desenvolvimento de produtos de alto valor agregado.

O estudo do pré-tratamento, incluindo a variação de escala, é de relevante importância, pois examina os problemas associados à transposição de dados obtidos em equipamentos de escala de laboratório para uma escala piloto, ambas ainda em batelada. Os grandes desafios estão relacionados à reprodução, na escala industrial e contínua, das condições favoráveis a um bom desempenho do processo (SCHMIDELL, 2001).

Objetivos

O objetivo deste trabalho foi otimizar o pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar com ácido sulfúrico diluído, em escala laboratorial e piloto, visando à máxima solubilização da hemicelulose e recuperação de xilose no licor de pré-tratamento, com a mínima formação de produtos de degradação.

Materiais e Métodos

Aquisição e preparo da matéria-prima

O bagaço in natura utilizado foi cedido pela Usina da Pedra (Serrana, SP), proveniente da safra 2012/13, coletado em maio de 2012, por colheita mecanizada, e resultante da última moenda após extração do caldo.

O material foi mantido refrigerado para conservar as características originais, sem a submissão a qualquer processo de lavagem ou separação física.

Em virtude da heterogeneidade do material, composto de fibras e células de parênquima, uma prévia homogeneização (quarteamento da amostra), foi realizada, garantindo, assim, a representatividade de cada amostra do estudo perante o todo.

Pré-tratamento com ácido diluído

O pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído foi otimizado em estudos anteriores no Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), em escala laboratorial, empregando reatores de aço-inox 316 de 0,5 L, submersos em banho termostático com glicerina, conforme apresentado na Figura 1A. As reações foram realizadas com 20 g de bagaço in natura (base seca), empregando uma razão sólido:líquido de 1:10 (m/v). Após o término da reação, o material foi separado por filtração e a fração sólida lavada com água até o valor do pH de 6.

A ampliação de escala na faixa operacional otimizada em laboratório — 140 ± 3 °C, 12-15 min e $0,5\% \pm 0,02$ (v/v) de ácido sulfúrico, (segundo protocolo desenvolvido pelo CTBE) — foi realizada, utilizando relação sólido:líquido 1:10 (m/v). Para isso, foi utilizado o reator Hastelloy® 276 (CTBE/POPE Scientific), com capacidade de 350 L (Figura 1B), munido de agitação mecânica e aquecimento concomitante de vapor fluente e óleo térmico. As variáveis de processo, tais como temperatura, pressão e agitação, foram integralmente monitoradas por supervisórios automatizados de controle de processo.

Após o término das reações, o material foi filtrado em filtro tipo Nutsche (POPE Scientific), com capacidade de 100 L, munido de agitação mecânica para ressuspensão da biomassa pré-tratada (Figura 2). O material pré-tratado foi lavado com água até que a celulignina atingisse um valor de pH de 6.

As reações de pré-tratamento foram realizadas em triplicata e as frações sólidas e líquidas obtidas foram analisadas quanto à composição química.



Figura 1. Reactores de aço-inox 316 de 0,5 L (1A) e reator de Hastelloy® 276 com capacidade de 350 L (1B) empregados no pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar in natura com ácido sulfúrico.

Foto: Sarita Cândida Rabelo



Figura 2. Filtro tipo Nutsche (POPE Scientific), com capacidade de 100 L, munido de agitação mecânica para filtração e lavagem da biomassa pré-tratada.

Foto: Sarita Cândida Rabelo

Com o valor da massa seca do bagaço pré-tratado e lavado, foi possível calcular o rendimento da etapa de pré-tratamento, avaliando, assim, as perdas de massa em decorrência da solubilização ou da degradação da biomassa.

O rendimento mássico de pré-tratamento foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$R = \frac{m_{final}}{m_{inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$m_{inicial}$: Massa inicial do bagaço de cana-de-açúcar (g, base seca).

m_{final} : Massa do bagaço de cana-de-açúcar após o pré-tratamento (g, base seca).

R: Rendimento mássico do pré-tratamento.

A solubilização da celulose, hemicelulose e lignina foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$S = 100 * (m_i * y_i - m_i * R * y_f) / (m_i * y_i) \quad (2)$$

Em que:

S: Solubilização do componente (%).

m_i : Massa inicial do bagaço de cana-de-açúcar (g, base seca).

y_i : Conteúdo do componente no bagaço in natura (%).

y_f : Conteúdo do componente no bagaço pré-tratado (celulignina) (%).

R: Rendimento mássico do pré-tratamento.

O fator de severidade combinado é frequentemente usado para descrever a solubilização de hemicelulose e lignina de uma biomassa após a etapa de pré-tratamento. A Equação 3 descreve este fator de severidade.

$$\log(R_0) = \log \left[t \cdot \exp \left(\frac{T - T_{ref}}{14,75} \right) \right] \quad (3)$$

Em que:

t: Tempo de residência em minutos.

T: Temperatura de pré-tratamento em °C.

T_{ref} : Temperatura de referência (100 °C).

O valor 14,75 é uma constante arbitrária ω baseada na energia de ativação, quando se assume uma cinética de pseudo primeira ordem. Essa constante tem sido avaliada e, em alguns casos, otimizada (RABELO et al., 2013).

O fator de severidade combinado é calculado com base no fator de severidade ($\log R_0$) (Equação 3), e o valor do pH é medido após o pré-tratamento, por meio da Equação 4.

$$\log(R_0') = \log R_0 - pH \quad (4)$$

Composição química do bagaço (in natura e pré-tratado) e do licor

Para a análise da composição química do bagaço in natura e do bagaço pré-tratado, certa quantidade de cada biomassa foi moída em um moinho de facas (modelo Pulverisette 19, marca Fritsch), o que possibilitou a obtenção de amostras com tamanho de partícula de 0,50 mm.

Após a moagem, o material foi analisado quanto ao teor de cinzas, extrativos, lignina total, celulose e hemicelulose, segundo metodologias-padrão alinhadas por meio de um projeto interlaboratorial entre vários grupos (SLUITER, et al., 2016).

Os licores de pré-tratamento foram analisados por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) de acordo com a metodologia de referência, também do NREL (SLUITER et al., 2016). No caso do licor de pré-tratamento, parte do material foi utilizado para quantificação dos açúcares monoméricos e a outra parte foi usada para quantificação dos açúcares totais (monômeros e oligômeros), após uma etapa de hidrólise ácida, como descrito por Jacobsen e Wyman (2002).

Comparação das escalas de processo

Os ensaios realizados em escala laboratorial e piloto tiveram seus rendimentos de pré-tratamento e composição das celuligninas comparados, utilizando-se, para isso, o valor médio dos ensaios em triplicata.

Resultados e Discussão

Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar in natura

A composição química do bagaço de cana-de-açúcar que descreve a porcentagem de cada componente em sua estrutura é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do bagaço in natura.

Componentes	(%)
Celulose	41,4 ± 0,50
Hemicelulose	28,26 ± 0,14
Lignina	22,50 ± 0,43
Cinzas	4,62 ± 0,45
Extrativos	4,01 ± 0,06
Balanco	100,77 ± 0,44

A composição química dos materiais lignocelulósicos varia de acordo com sua origem, região e condições climáticas de plantio, processos de colheita e condições de armazenamento, apresentando um valor médio mássico para hemicelulose entre 25,6% e 29,6%; para celulose, entre 36,9% e 45,7%, e, para lignina, entre 18,9% e 26,1% (ROCHA et al., 2015).

Os resultados apresentados na Tabela 1 estão de acordo com os valores reportados na literatura (ROCHA et al., 2015; SLUITER et al., 2016; NAKASU et al., 2016).

Pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído

O rendimento da etapa de pré-tratamento e o fator de severidade combinado para os ensaios realizados em triplicata, na condição otimizada em escala piloto, são reportados na Tabela 2.

Tabela 2. Rendimento da etapa de pré-tratamento e fator de severidade combinados na condição otimizada do pré-tratamento em escala piloto.

Reação	t (min)	T (°C)	C _{H₂SO₄} (%, v/v)	R (%)	(Log Ro')
1	14	143	0,50	62,2	1,30
2	13	141	0,50	65,9	1,27
3	15	140	0,50	65,5	1,29

t: tempo (minutos); T: temperatura °C; C_{H₂SO₄}: concentração de ácido sulfúrico; R: rendimento mássico do pré-tratamento; (Log Ro'): fator de severidade combinado.

Observa-se, a partir da Tabela 2, que a faixa de condições operacionais empregadas no pré-tratamento com ácido sulfúrico proporcionou uma alta solubilização mássica, sendo remanescente na celulignina um valor médio de $64,5 \pm 2,0\%$, denominado de rendimento de pré-tratamento.

Após a etapa de pré-tratamento, a fração sólida (celulignina) e a fração líquida (licor hemicelulósico) foram analisadas. Na Figura 3, apresenta-se a composição química de cada material pré-tratado. Nessa figura, são apresentados apenas os constituintes mais expressivos da biomassa: celulose, hemicelulose e lignina. Na abscissa, é possível observar as condições operacionais aplicadas a cada ensaio. O primeiro valor se refere ao tempo de reação (min), seguido pela temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e concentração de ácido ($\%$, v/v).

Analisando a Figura 3, é possível observar que, aproximadamente, 85% de toda a hemicelulose presente na biomassa foi solubilizada durante a etapa de pré-tratamento. Para a celulose, a taxa de solubilização variou de 5% a 10%.

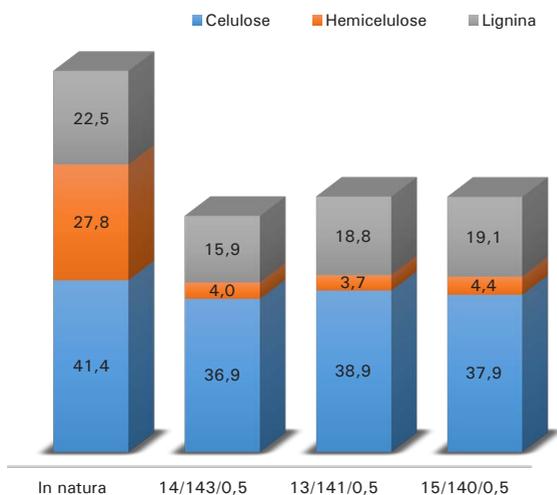


Figura 3. Composição química da biomassa antes e após cada pré-tratamento. Primeiro número na abscissa representa: tempo (min), segundo: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), terceiro: concentração de ácido sulfúrico ($\%$, v/v). Base de cálculo: os dados reportados apresentam os percentuais de celulose, hemicelulose e lignina corrigidos pelos respectivos rendimentos de pré-tratamento.

A porcentagem de hemicelulose solubilizada (com base na fração sólida) e a porcentagem dessa fração recuperada no licor de pré-tratamento são apresentadas na Figura 4. Para efeito de cálculo, foram considerados os açúcares na forma monomérica e oligomérica, desconsiderando os produtos de degradação formados a partir da fração hemicelulósica.

Analisando a Figura 4, é possível observar uma alta solubilização e recuperação de hemicelulose na forma monomérica (xilose), apresentando, em média, $85,5 \pm 0,8 \%$ e $82,6 \pm 3,0 \%$, respectivamente.

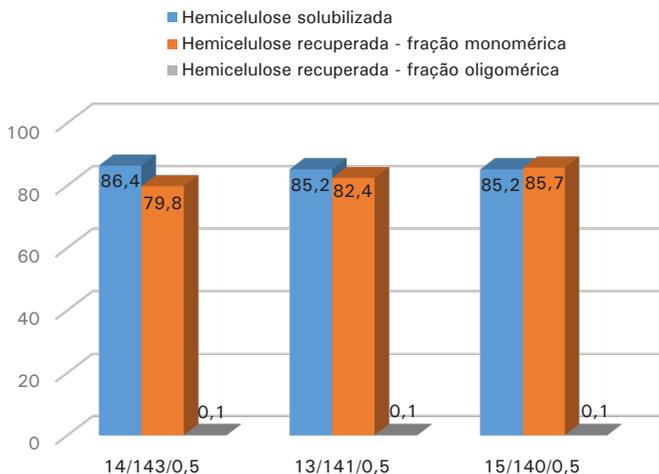


Figura 4. Porcentagem de hemicelulose solubilizada (com base na fração sólida) e a porcentagem dessa fração recuperada no licor de pré-tratamento. Primeiro número na abcissa representa: tempo (min), segundo: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), terceiro: concentração de ácido sulfúrico ($\%$, v/v).

A importância na distribuição entre a quantidade de monômeros e oligômeros presentes em um licor é regida pelo processo de obtenção do produto desejado. Majoritariamente, os microrganismos como leveduras e bactérias são capazes de fermentar monômeros e

não oligômeros de açúcar para a produção de insumos de química fina e combustíveis. Em vista disso, a maximização dos açúcares monoméricos é essencial (WYMAN, 2013).

As concentrações de açúcares, ácidos orgânicos e aldeídos furânicos quantificados no licor de pré-tratamento são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Concentração de açúcares no licor de pré-tratamento obtido em escala piloto.

Reação	Arabinose (g L ⁻¹)	Xilose (g L ⁻¹)	C5 total (g L ⁻¹)	Glicose (g L ⁻¹)	Celobiose (g L ⁻¹)
1	2,09	19,76	21,85	2,86	1,42
2	2,31	20,39	22,70	2,99	1,39
3	2,59	21,57	24,16	3,24	1,49

Tabela 4. Concentração dos ácidos orgânicos e aldeídos furânicos observados no licor de pré-tratamento obtidos em escala piloto.

Reação	Ácido acético (g L ⁻¹)	Ácido fórmico (g L ⁻¹)	HMF (g L ⁻¹)	Furfural (g L ⁻¹)
1	4,028	n.d. ⁽¹⁾	0,003	0,002
2	4,330	n.d.	0,003	0,003
3	4,498	0,124	0,003	0,003

⁽¹⁾n.d.: não detectado.

Analisando a Tabela 4, é possível observar uma alta concentração de ácido acético quantificada no licor. Sabe-se que o ácido acético é obtido durante a hidrólise dos grupos acetil da hemicelulose e, por isso, a concentração desse composto no meio depende muito das condições do processo de hidrólise da hemicelulose e do tipo de biomassa empregada. Por experiência prévia do CTBE, para o material utilizado,

a concentração máxima de ácido acético que poderia ser obtida e quantificada no licor de pré-tratamento seria $5,3 \text{ g L}^{-1}$.

A concentração dos demais produtos de degradação (ácido fórmico, HMF e furfural) varia de acordo com as condições operacionais, podendo até diminuir com a severidade do processo por causa da degradação dos mesmos, o que leva à formação de outros produtos não analisados.

Na Figura 5, apresenta-se uma comparação da composição química do bagaço pré-tratado em escala de laboratório e em planta-piloto.

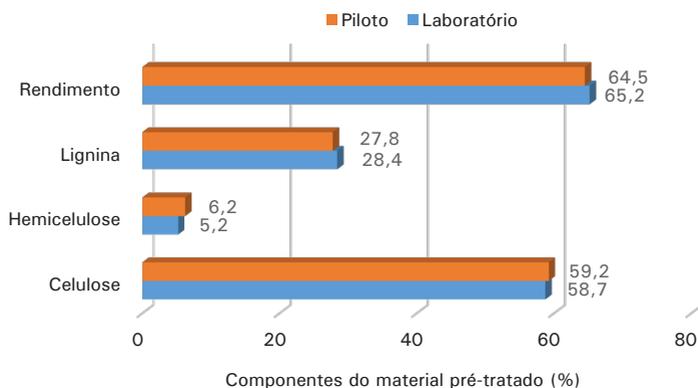


Figura 5. Comparação da composição química e rendimento de pré-tratamento dos materiais em escala de laboratório e piloto (os dados reportados na figura consideram os percentuais mássicos de celulose, hemicelulose e lignina sem a correção pelo rendimento de pré-tratamento).

É possível observar na Figura 5 que tanto os rendimentos obtidos em escala laboratorial de bancada quanto os obtidos em escala-piloto apresentaram valores muito similares.

Conclusão

O pré-tratamento com ácido diluído realizado em escala-piloto, previamente otimizado em escala laboratorial, apresentou-se seletivo, promovendo uma alta solubilização de hemicelulose, resultando em um licor rico em xilose advinda dessa hemicelulose. Além disso, foi observada uma baixa formação de produtos de degradação.

A faixa de pré-tratamento utilizada pode ser considerada de baixa severidade, o que pode proporcionar uma redução de custos do sistema industrial e obtenção de um licor com potencial para posterior fermentação ou síntese orgânica, visando à produção de produtos químicos renováveis de alto valor agregado.

Agradecimentos

À equipe do CTBE e ao Sistema Embrapa de Gestão, processo de número 02.12.01.003.00.00 (Projeto C5-AGREGA). À equipe de editoração da Embrapa Agroenergia, Luciane Chedid, Maria Iara Machado e Maria Goreti.

Referências

BRASIL lidera ranking mundial de uso da biomassa na produção de energia. **Biomassa e Bioenergia**, 20 abr. 2016. Disponível em: <<http://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/brasil-lidera-ranking-mundial-de-uso-da-biomassa-na-producao-de-energia/20130926-114923-f300>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

GALBE, M.; ZACCHI, G. A review of the production of ethanol from softwood. **Applied Microbiology and Biotechnology**, New York, v. 59, n. 6, p. 618-628, 2002.

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

HESS, M. Thermoacidophilic proteins for biofuel production. **Trends in Microbiology**, London, v. 16, n. 9, p. 414-419, 2008.

ISIKGOR, F.; BECER, C. R. Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. **Polymer Chemistry**, Cambs, v. 6, n. 25, p. 4497-4559, 2015.

JACOBSEN, S. E.; WYMAN, C. E. Xylose monomer and oligomer yields for uncatalyzed hydrolysis of sugarcane bagasse hemicellulose at varying solids concentration. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, DC, v. 41, n. 6, p. 1454-1461, 2002.

LARSSON, S.; PALMQVIST, E.; HAHN-HAGERDAL, B.; TENGBORG, C.; STENBERG, K.; ZACCHI, G.; NILVEBRANT, N-O. The generation of fermentation inhibitors during dilute acid hydrolysis of softwood. **Enzyme and Microbial Technology**, New York, 24, n. 3-4, p. 151-159, 1999.

LEE, D.; YU, A. H. C.; WONG, K. K. Y.; SADDLER, J. N. Evaluation of the enzymatic susceptibility of cellulosic substrates using specific hydrolysis rates and enzyme adsorption. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Totowa, v. 45-46, p. 407-415, 1994.

LYND, L. R.; ELANDER, R. T.; WYMAN, C. E. Likely features and costs of mature biomass ethanol technology. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Totowa, v. 57-58, p. 741-761, 1996.

MOSIER, N.; HENDRICKSON, R.; DRESCHER, R.; DIEN, B. S.; BOTHAST, R. J.; WELCH, G.; LADISCH, M. R. **Principles and economics of pretreating cellulose in water for ethanol production**. Washington, DC: American Chemical Society, 2003a. (BIOT Division. Paper, n. 103).

MOSIER, N. S.; HENDRICKSON, R.; WELCH, G.; DRESCHER, R.; DIEN, B.; LADISCH, M. Corn fiber pretreatment scale-up and evaluation in an industrial corn to ethanol facility. In: SYMPOSIUM ON BIOTECHNOLOGY FOR FUELS AND CHEMICALS, 25., Breckenridge, CO. **Program and abstracts ...** Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2003b. (Paper 6A-04).

NAKASU, P.; IENCZAK, J. L.; COSTA, A. C.; RABELO, S. C. Acid post-hydrolysis of xylooligosaccharides from hydrothermal pretreatment for pentose ethanol production. **Fuel**, Oxon, v. 185, p. 73-84, 2016.

OLIVÉRIO, J. L.; HILST, A. G. P. DHR - DEDINI Hidrólise Rápida (DEDINI Rapid Hydrolysis) - revolutionary process for producing alcohol from sugar cane bagasse. **International Sugar Journal**, London, v. 106, n. 1263, p. 168-172, 2004.

RABELO, S. C.; MACIEL, F. R.; COSTA, A. C. Lime pretreatment and fermentation of enzymatically hydrolyzed sugarcane bagasse. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, Totowa, v. 169, n. 5, p. 1696-1712, 2013.

ROCHA, G. J. M.; NASCIMENTO, V. M.; GONÇALVES, A. R.; SILVA, V. F. N.; MARTÍN, C. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 64, p. 52-58, 2015.

SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. **Biotechnologia industrial**. São Paulo; Edgard Blücher, 2001. v. 2.

SLUITER, J. B.; CHUM, H.; GOMES, A. C.; TAVARES, R. P.A.; AZEVEDO, V.; PIMENTA, M. T.B.; RABELO, S. C.; MARABEZI, K.; CURVELO, A. A.S.; ALVES, A. R.; GARCIA, W. T.; CARVALHO, W.; ESTEVES, P. J.; MENDONÇA, S.; OLIVEIRA, P. A.; RIBEIRO, J. A.A.; MENDES, T. D.; VICENTIN, M. P.; DUARTE, C. L.; MORI, M. N. Evaluation of Brazilian Sugarcane Bagasse Characterization: an interlaboratory comparison study. **Journal of AOAC International**, Gaithersburg, v. 99, n. 3, p. 579-585, 2016.

WYMAN, C. E. **Aqueous pretreatment of plant biomass for biological and chemical conversion to fuels and chemicals**. Hoboken: Wiley, 2013.

ZHOU, C. H.; XIA, X.; LIN, C. X.; TONG, D. S.; BELTRAMI, J. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass to fine chemicals and fuels. **Chemical Society Reviews**, Cambs, v. 40, n. 11, p. 5588-5617, 2011.

Embrapa

Agroenergia

MINISTÉRIO DA
**AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO**



CGPE 13641