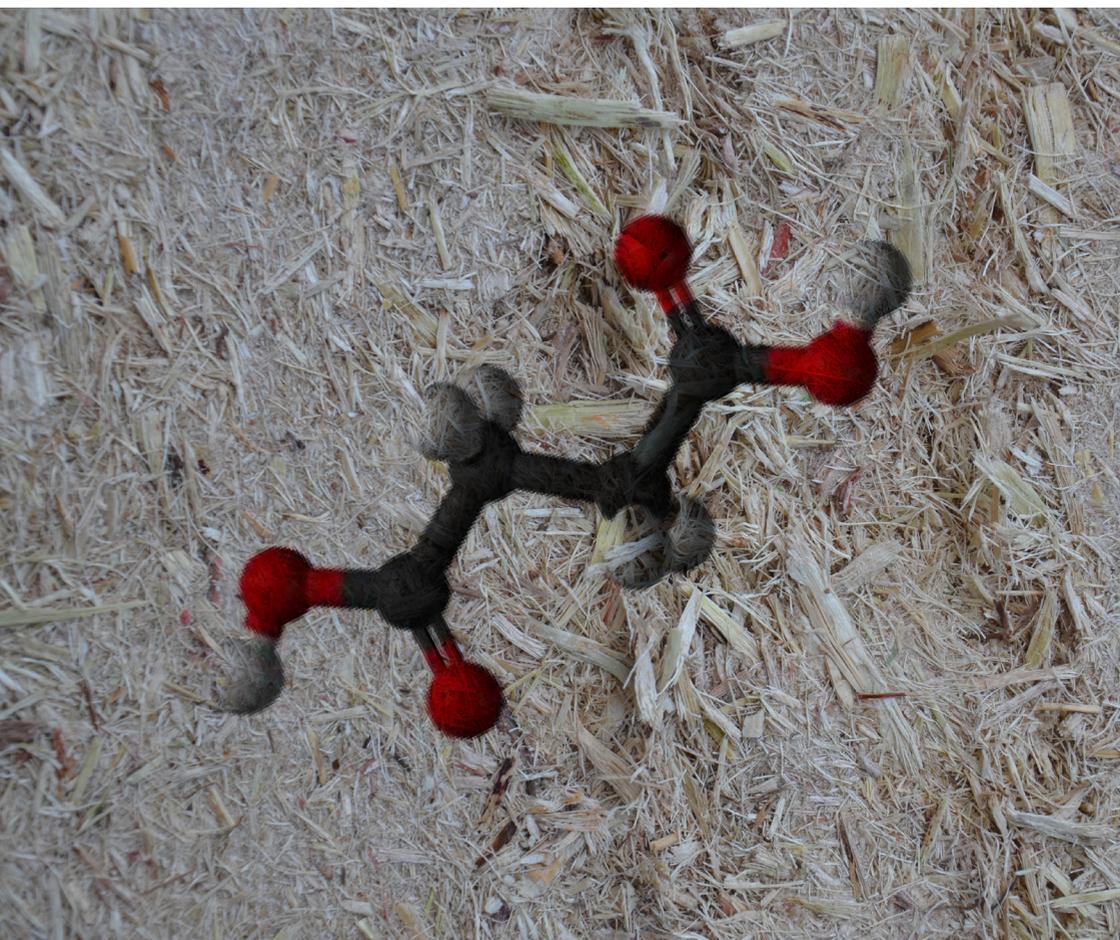


**Avaliação de Cenários-Base:
Determinação dos Potenciais
Industrial e Econômico de Rotas
de Conversão a partir de Xilose do
Bagaço de Cana-de-açúcar**



ISSN 2177-0395

Outubro, 2016

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

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 02

Avaliação de Cenários-Base: Determinação dos Potenciais Industrial e Econômico de Rotas de Conversão a partir de Xilose do Bagaço de Cana-de-açúcar

Sílvio Vaz Jr.
Antonio Bonomi
Tassia Lopes Junqueira
Jean Felipe Leal Silva

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

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

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Alexandre Alonso Alves*

Secretária-executiva: *Marcia Mitiko O. Esquiagola*

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 e foto da capa

Maria Goreti Braga dos Santos

Ilustração da capa

Sílvio Vaz Jr.

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

Avaliação de cenários-base: determinação dos potenciais industrial e econômico de rotas de conversão a partir de xilose do bagaço de cana-de-açúcar / Sílvio Vaz Junior [et al.]. – Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2016.

23 p. – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / ISSN 2177-0395; 2)

1. cana-de-açúcar – bagaço – xilose. 2. Cana-de-açúcar – potencial industrial – potencial econômico. I. Vaz Junior, Sílvio. II Série.

662.88 – CDD 22

© Embrapa 2016

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Objetivo	10
Descrição dos cenários-base	10
Ácido succínico	11
Furfural	12
Xilitol	14
Ácido xilônico	15
Ácido levulínico	17
Análise técnico-econômica dos cenários-base	17
Conclusões	20
Agradecimentos	21
Referências	22

Avaliação de Cenários-Base: Determinação dos Potenciais Industrial e Econômico de Rotas de Conversão a partir de Xilose do Bagaço de Cana-de-açúcar

Silvio Vaz Jr.¹

Antonio Bonomi²

Tassia Lopes Junqueira³

Jean Felipe Leal Silva⁴

Resumo

A comprovação da viabilidade técnico-econômica é de fundamental importância para a implantação de novas tecnologias industriais, as quais se encontrem em etapa de desenvolvimento. As biorrefinarias – em especial as de cana-de-açúcar – necessitam comprovar essa viabilidade para produtos e processos inovadores, antes do escalonamento dos mesmos. A aplicação de ferramentas de simulação e avaliação, como a Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC), é de grande importância em estudos do potencial técnico e econômico de novos produtos para as biorrefinarias, reduzindo o tempo de avaliação e gerando informações que possam ser utilizadas na tomada

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

² Engenheiro químico, doutor em Engenharia Química, coordenador da Divisão de Avaliação Integrada de Biorrefinarias do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), Campinas, SP.

³ Engenheira química, doutora em Engenharia Química, especialista da Divisão de Avaliação Integrada de Biorrefinarias do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), Campinas, SP.

⁴ Engenheiro químico, mestrando em Engenharia Química, estagiário do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), Campinas, SP.

de decisão dos projetos de P&D&I. Para um processo ser competitivo, é necessário que este produza um mesmo produto ou equivalente com maior rentabilidade do que o processo de produção convencional (cenário-base). Este Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento descreve e apresenta a avaliação técnico-econômica dos cenários-base, realizada a partir da aplicação da BVC, para cinco produtos derivados da xilose do bagaço. A comparação dos resultados dos cenários-base com aqueles a serem gerados posteriormente para as rotas renováveis, a partir de bagaço de cana-de-açúcar, permitirão determinar os potenciais industrial e econômico das rotas desenvolvidas.

Termos para indexação: bagaço, biorrefinarias, química renovável, bioeconomia, química verde.

Assessment of Base Scenarios: Stage of the Determination Process of Industrial and Economic Potentials of Conversion Routes of Xylose from Sugarcane Bagasse

Abstract

Evidence of the technical and economic feasibilities is of fundamental importance for the implementation of new industrial technologies, which are in development stage. Biorefineries - especially of sugarcane - need to prove the viability of innovative products and processes before scaling them. The application of simulation and evaluation tools, such as the Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB), are of great importance for technical and economic studies of new products for biorefineries, reducing the time of evaluation and generating information that can be used in decision making for projects of R&D&I. In order to be competitive, the developed process needs to produce the same or equivalent product with higher profitability compared to the conventional production process (base scenario). This Bulletin of Research and Development describes and presents the techno-economic assessment of base scenarios, carried out using the VSB, for five products obtained from xylose from bagasse. Comparison of the base scenarios results to those that will be posteriorly generated

for renewable routes, from sugarcane bagasse, allows determining the industrial and economic potentials of the developed routes.

Index terms: bagasse, biorefineries, renewable chemistry, bioeconomy, green chemistry.

Introdução

A geração de resíduos lignocelulósicos das cadeias agroenergéticas pode ser vista, na atualidade, como uma grande oportunidade de agregar valor a tais cadeias produtivas. Os principais componentes dessa biomassa residual – ou biomassa lignocelulósica –, que são a celulose, a hemicelulose e a lignina, poderão servir como matérias-primas renováveis para o setor químico brasileiro (VAZ JUNIOR, 2014), que apresenta um déficit considerável em sua balança comercial, importando tecnologias, reagentes e insumos estratégicos.

O bagaço de cana-de-açúcar possui um dos maiores teores de hemicelulose em relação a outras fontes de biomassa agroindustrial, o que faz com que ele seja considerado como uma matéria-prima em potencial para compostos químicos que tenham os constituintes da hemicelulose como precursores. A D-xilose, que é uma pentose (fração C5), é o principal açúcar constituinte da hemicelulose e tem sido objeto de pesquisas para seu aproveitamento industrial.

A hemicelulose pode ser extraída do bagaço da cana-de-açúcar por meio de pré-tratamento químico, de modo a fornecer a D-xilose, que, após separação e purificação, é utilizada como composto precursor de moléculas bloco-construtoras e intermediários de síntese. Ácidos orgânicos (levulínico, succínico e xilônico), furfural e xilitol são obtidos por meio de rotas de síntese orgânica (plataforma química) e por meio de fermentação utilizando microrganismos e/ou catálise enzimática (plataforma bioquímica). Esses produtos e suas respectivas plataformas tecnológicas são avaliados quanto ao potencial de uso pela indústria química e pela indústria da cana-de-açúcar. As possibilidades apresentadas da troca ou substituição parcial de matérias-primas de origem petroquímica por matérias-primas renováveis e a valorização da biomassa residual devem ser vistas como contribuições relevantes à economia verde ou bioeconomia.

A Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar (BVC) consiste em uma ferramenta inovadora que permite mensurar o sucesso e a maturidade de diferentes abordagens tecnológicas, considerando os impactos técnicos, econômicos, sociais e ambientais de novas tecnologias associadas ao ciclo produtivo da cana-de-açúcar (setores agrícola, industrial e de uso final dos produtos) (BONOMI et al., 2016).

A utilização da BVC, como uma metodologia padronizada para a avaliação de cenários tecnológicos visando à integração e/ou comparação desses desenvolvimentos, possibilita entender o estágio de desenvolvimento tecnológico das rotas de utilização de biomassa.

Objetivo

A aplicação da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC) para avaliar, do ponto de vista técnico-econômico, as rotas já estabelecidas comercialmente para posterior comparação com as novas rotas desenvolvidas para a obtenção de produtos químicos renováveis (ácidos succínico, xilônico e levulínico, furfural e xilitol) a partir de xilose, obtida da fração hemicelulósica do bagaço de cana-de-açúcar.

Descrição dos cenários-base

Cenários-base consistem em rotas industriais consolidadas ou promissoras para a produção dos derivados de hemicelulose estudados. A simulação dos mesmos, na BVC, permitirá a comparação das rotas já estabelecidas comercialmente com as rotas renováveis em desenvolvimento.

Os cenários podem consistir em rotas que utilizem a mesma matéria-prima empregada pelas rotas em desenvolvimento (bagaço

de cana-de-açúcar), matérias-primas de origem fóssil ou ainda outras opções renováveis.

Neste estudo, foram considerados como cenários-base os processos com maior representatividade industrial. Contudo, por serem processos licenciados comercialmente, os dados disponíveis na literatura são muito limitados. Portanto, a configuração, os parâmetros operacionais e os rendimentos dos processos foram baseados em informações disponíveis em livros, patentes e artigos científicos.

Para os cinco produtos de interesse, ácidos succínico, xilônico e levulínico, furfural e xilitol, foram simuladas e avaliadas as rotas de produção convencionais usando a BVC. A metodologia consistiu na busca de informações sobre os processos para o cálculo dos balanços de massa e energia, utilizados na estimativa de investimentos e avaliação de viabilidade econômica de cada processo estudado.

Ácido succínico

Optou-se por utilizar a rota petroquímica como cenário-base por ser uma rota consolidada para a produção de ácido succínico, apesar de já existirem também rotas renováveis para a sua obtenção. Além disso, como a rota desenvolvida utiliza fontes renováveis, a análise da rota petroquímica permite a comparação dos dois processos que partem de matérias-primas completamente distintas.

O uso do anidrido maleico como matéria-prima tem por justificativa a maior disponibilidade de informações técnico-econômicas sobre a sua conversão para anidrido succínico. Existem patentes que descrevem o uso tanto do anidrido maleico quanto do ácido maleico como molécula precursora (BAYER AKTIENGESELLSCHAFT, 1999; FUMAGALLI, 2006; TRUNIN et al., 1967). O cenário-base considerado utilizou, então, o anidrido maleico como precursor. Este foi convertido em anidrido succínico num processo de hidrogenação e, então, transformado em

ácido succínico por meio de uma etapa de hidrólise. Esta etapa utilizou dados fornecidos por Fumagalli (2006).

A transformação do anidrido succínico a ácido succínico é descrita como uma simples dissolução do anidrido em água quente e posterior resfriamento para cristalização, sendo desenvolvida com base em Trunin et al. (1967).

Na Figura 1, está representado um esquema básico da síntese do ácido succínico via rota petroquímica. A planta considerada tem capacidade anual de produção de 3 kt de ácido succínico a 99,5% m/v de pureza, com 330 dias de operação por ano.

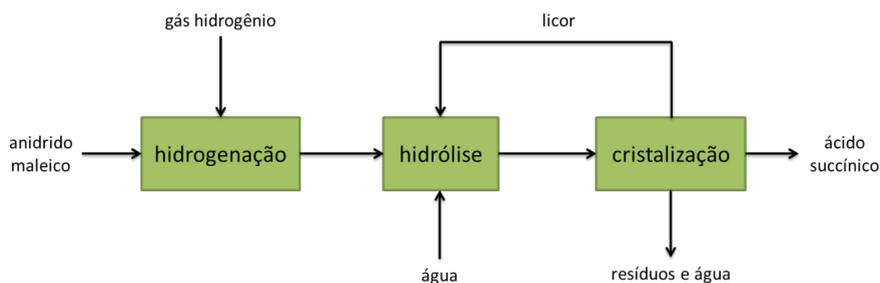


Figura 1. Rota petroquímica da produção do ácido succínico utilizada no cenário-base.

Furfural

Não há rota petroquímica para a obtenção de furfural, sendo este exclusivamente produzido a partir de biomassa (ZEITSCH, 2000). Como cenário-base, optou-se por utilizar o processo Rosenlew, dada sua relevância industrial e disponibilidade de informações.

O processo Rosenlew tem uso consolidado em uma planta de produção de furfural a partir de bagaço de cana-de-açúcar na cidade de Sezela,

África do Sul (ZEITSCH, 2000; WATSON; CONNORS, 2008). Os dados operacionais disponíveis apresentam informações sobre o digestor utilizando bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima e sobre a primeira etapa de purificação (ZEITSCH, 2000). O processo ocorre no reator a 10,05 bar de pressão e a uma temperatura de 180 °C, com tempo de residência de 2 horas. A reação é autocatalítica e possui rendimento de 59,5% m/v para a conversão de hemicelulose. Após a produção do furfural, a corrente diluída segue para a destilação, na qual o azeótropo é contornado por uma separação bifásica a baixa temperatura. Ao final, obtém-se furfural com 98,5% m/v de pureza. A capacidade da planta definida para esse cenário é de 27,5 kt ano⁻¹ de furfural com 330 dias de operação por ano. Essa capacidade é da mesma ordem de grandeza da planta em Sezela, que tem capacidade de produção de 19 kt ano⁻¹, o que aumenta a confiabilidade nos resultados obtidos a partir dessa fonte de dados. Na Figura 2, apresenta-se um esquema simplificado do processo.

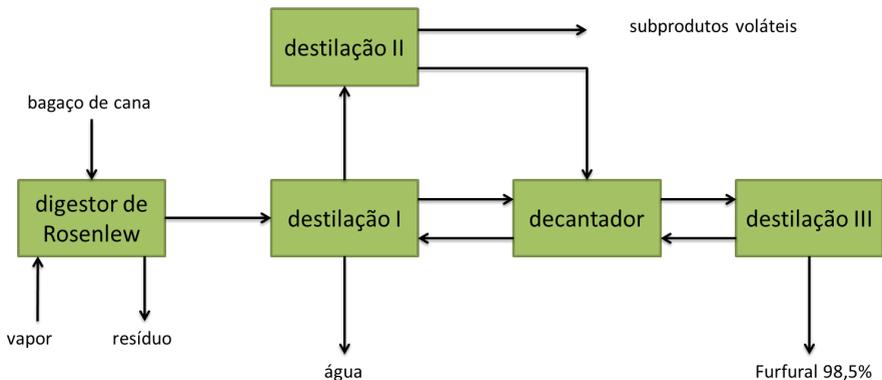


Figura 2. Esquema do processo Rosenlew para a produção de furfural.

Vale ressaltar que parte da demanda energética é suprida com o resíduo do digestor de Rosenlew e o restante é atendido por bagaço. A configuração e as condições de operação gerais do CHP (*Combined Heat*

and Power – sistema combinado de cogeração de vapor e eletricidade) refletem sistemas de baixa eficiência com caldeiras de 22 bar.

Xilitol

Xilitol é produzido comercialmente por meio de uma rota química, na qual materiais lignocelulósicos ricos em xilanas são utilizados como matéria-prima (SALGADO et al., 2012). A xilose é obtida a partir da hidrólise de biomassa, purificada e posteriormente convertida em xilitol por hidrogenação (MUSSATO; ROBERTO, 2002).

Sendo assim, a rota química de produção de xilitol foi escolhida como cenário-base em virtude da sua representatividade industrial. O processo aqui simulado baseia-se majoritariamente no descrito por Mejala e Hamalainen (1977), em que as etapas de purificação do licor de xilose e da mistura de polióis ocorrem, preferencialmente, tendo a bétula (*Betula* sp.) como matéria-prima.

A etapa de extração é baseada na patente de Pfeifer (1980). Escolheu-se esse método por apresentar resultados satisfatórios, além de uma descrição completa para fibra e medula de bagaço. O foco da invenção é reduzir o consumo de ácido em decorrência da menor diluição, uma vez que a hidrólise das xilanas e a remoção da xilose ocorrem em fases distintas. Considerou-se que todo o resíduo da extração de xilose é enviado para queima e, pelo balanço de massa e energia, observou-se que é suficiente para suprir a demanda de vapor necessária do processo.

Já a hidrogenação da xilose a xilitol segue as condições descritas para o sorbitol (HYDROCARBON RESEARCH, 1982). O licor de polióis obtido dessa etapa é, então, enviado para uma nova purificação e o xilitol obtido passa por etapas de cristalização e secagem para, então, ser comercializado.

A rota de produção de xilitol é apresentada resumidamente na Figura 3. Considerou-se que a capacidade da planta é de 5 kt ano⁻¹ de xilitol com operação de 330 dias por ano.

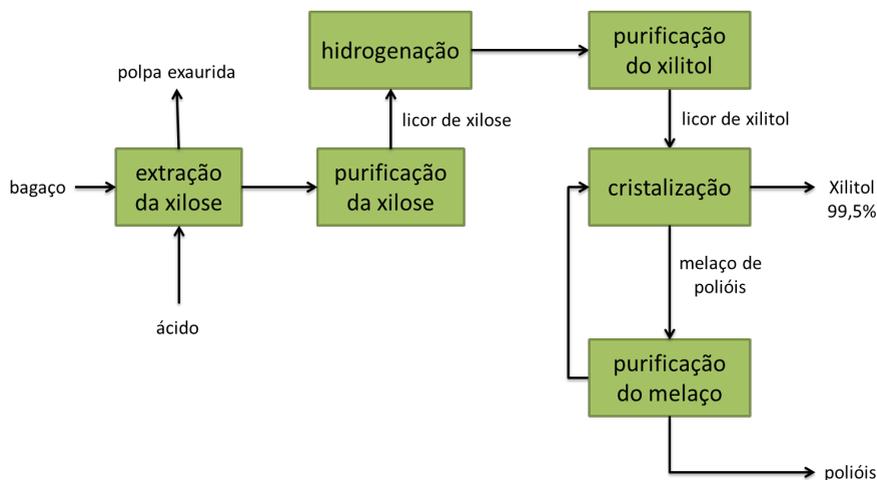


Figura 3. Fluxograma da produção de xilitol utilizado no cenário-base.

Ácido xilônico

O ácido xilônico é tido como uma versátil plataforma química. Contudo, não há produção comercial estabelecida, em decorrência, especialmente, do mercado limitado para o xilonato e de dificuldades técnicas que tornam o processo economicamente inviável (TOIVARI et al., 2012; LIU et al., 2012). Como não há um cenário industrial consolidado, buscou-se outra opção para o desenvolvimento do cenário-base: utilização do ácido xilônico como substituinte do ácido glicônico no mercado, estabelecendo a produção de ácido glicônico como cenário-base.

Diversos processos para a produção de ácido glicônico a partir de glicose são descritos, incluindo tanto processos químicos quanto biológicos. Contudo, os processos fermentativos são as rotas predominantes de produção (RAMACHANDRAN et al., 2006). Propôs-se, então, utilizar como cenário-base a produção de ácido glicônico pelo fungo *Aspergillus niger* a partir de glicose, tendo como intermediário o gliconato de cálcio, conforme processo testado em escala piloto (BLOM et al., 1952).

Na Figura 4, apresenta-se um fluxograma simplificado do processo de produção de ácido glicônico. No processo, xarope de glicose é alimentado em bateladas a um fermentador, e o meio é neutralizado continuamente. Ao final da batelada, o filtrado obtido do meio é concentrado e cristalizado (a cristalização é o processo de purificação). Os cristais assim obtidos são dissolvidos em solução ácida e recupera-se o ácido em leitos cromatográficos, como descrito por Ziffer (1944). A solução aquosa final é comercializada com concentração de 50% m/v.

A capacidade da planta foi definida como 6 kt ano^{-1} de ácido glicônico, o que equivale a 12 kt ano^{-1} da solução a 50% m/v. Considerou-se ainda que a planta opera 330 dias por ano.

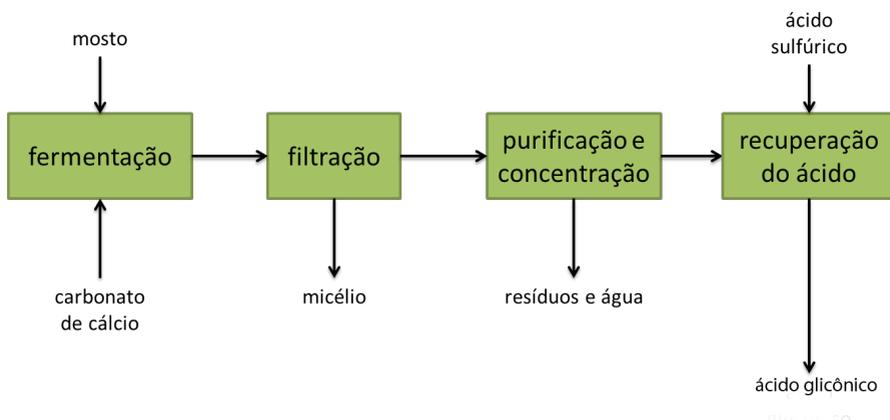


Figura 4. Fluxograma da produção de ácido glicônico.

Ácido levulínico

Não há tecnologias comerciais estabelecidas para a produção de ácido levulínico. Nesse sentido, o cenário-base escolhido é o processo Biofine[®], por ser considerado uma tecnologia promissora para obtenção do ácido levulínico (HAYES et al., 2008; RACKEMANN; DOHERTY, 2013).

Os dados para esse cenário-base foram obtidos a partir dos resultados apresentados sobre o processo Biofine[®] (BIOFINE INCORPORATED, 1997). Os documentos obtidos possuem dados gerais do processo, como condições de operação, e também já apresentam o capital investido e o custo operacional para diversas escalas para uma planta operando com lama de papel como matéria-prima. O processo é apresentado no fluxograma da Figura 5. Uma vez que as informações disponíveis eram suficientes para a estimativa de investimento e análise econômica, esse processo não foi simulado. Considerou-se uma planta produzindo 3,5 kt ano⁻¹ com 330 dias de operação.

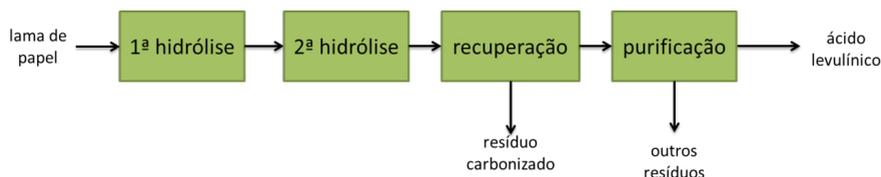


Figura 5. Fluxograma da produção do ácido levulínico, segundo o processo Biofine[®].

Análise técnico-econômica dos cenários-base

Com base nos balanços de massa e energia, calculou-se o rendimento de cada processo e ajustou-se a vazão de matéria-prima para obter a capacidade de produção desejada dos produtos de interesse. Na Tabela 1, resumem-se os resultados técnicos obtidos.

Tabela 1. Capacidades de processamento, matéria-prima e rendimentos para cada produto.

Produto	Capacidade de produção (kt ano ⁻¹)	Matéria-prima	Rendimento (kg prod. kg mat. ⁻¹)
Ácido succínico	3,0	Anidrido maleico	1,19
Ácido glicônico (1) (50% m/v)	12,0	Xarope de glicose (DE95 (2))	1,31
Ácido levulínico	3,5	Lama de papel	0,28
Furfural	27,5	Bagaço de cana (50% umidade)	0,05
Xilitol	5,0	Bagaço de cana (50% umidade)	0,07

⁽¹⁾ Considera-se que o ácido glicônico pode ser substituído pelo ácido xilônico.

⁽²⁾ O xarope possui 75% de sólidos solúveis, sendo 94% glicose, 4% maltose, 1% maltotriose e 1% de açúcares superiores.

Na Tabela 2, são apresentados os preços das matérias-primas e produtos das cinco rotas avaliadas. Vale ressaltar que, para a avaliação de viabilidade econômica, também foram estimados tanto a quantidade de insumos (ácidos, nutrientes, etc.) necessários em cada processo quanto os respectivos preços para a contabilização nos custos operacionais da planta. Considerou-se como data de referência para a análise de viabilidade o mês de dezembro de 2014 e a taxa de conversão de dólar para real de 2,35.

Tabela 2. Preços das matérias-primas e produtos.

Produto	Preço	Unidade
Anidrido maleico	3,75	R\$ kg ⁻¹
Xarope de glicose (DE95, 75% brix)	1,18	R\$ kg ⁻¹
Lama de papel (1)	-	-
Bagaço de cana (50% umidade)	103,29	R\$ t ⁻¹
Ácido succínico	6,08	R\$ kg ⁻¹
Ácido glicônico (50% m/v)	2,33	R\$ kg ⁻¹
Ácido levulínico	11,10	R\$ kg ⁻¹

continua...

Tabela 2. Continuação.

Produto	Preço	Unidade
Furfural	4,06	R\$ kg ⁻¹
Xilitol	7,41	R\$ kg ⁻¹
Eletricidade	144,42	R\$ MWh ⁻¹

¹ No processo Biofine®, é considerado custo zero para a lama de papel. No entanto, atualmente há mercado para esse produto, portanto essa é uma premissa bastante otimista.

A estimativa de investimento foi realizada com base na configuração de cada processo e nos balanços de massa e energia. A partir dos dados de investimento, custos operacionais e receita com a comercialização dos produtos, realizou-se a análise do fluxo de caixa dos projetos para o cálculo da taxa interna de retorno.

Tabela 3. Resultados da avaliação da viabilidade econômica.

Produto	Investimento total (R\$ milhões)	Taxa interna de retorno - TIR (%)
Ácido succínico	36,58	6,8
Ácido glicônico	43,28	12,4
Ácido levulínico	46,56	26,1
Furfural	156,40	13,3
Xilitol	75,42	14,6

Dentre os produtos avaliados, o ácido levulínico foi o que apresentou maior rentabilidade econômica (maior TIR). No entanto, esse resultado deve ser analisado com cautela, dado que o custo de matéria-prima, negligenciado na análise, pode ser significativo no mercado brasileiro. O alto preço do produto, maior dentre os produtos químicos considerados, também teve grande influência nesse resultado. Uma vez estabelecida uma produção em larga escala, esse preço pode baixar consideravelmente, principalmente no caso de aplicações voltadas ao mercado de combustíveis, que demandam preços mais competitivos.

Os cenários-base para ácido glicônico, furfural e xilitol apresentaram taxas internas de retorno maiores que 12%, valor usualmente considerado como mínimo para novos investimentos, segundo técnicos do CTBE. Os três cenários têm em comum a utilização de açúcares como matéria-prima, seja do xarope de glicose ou do bagaço hidrolisado.

A produção de ácido succínico, por sua vez, é baseada em um produto de origem petroquímica, que apresenta custo relativamente alto e bastante dependente das flutuações no preço do petróleo. Dessa forma, esse cenário está associado à menor taxa interna de retorno dentre as rotas avaliadas. Outros fatores que podem ser apontados para a menor rentabilidade é a escala de produção (3 kt ano⁻¹), que pode ser considerada pequena para instalações petroquímicas, e o preço do ácido succínico que foi relativamente conservador, já assumindo uma maior participação das rotas de fermentação no mercado internacional.

Conclusões

Foram avaliadas rotas industrialmente consolidadas ou com maior potencial de implementação. A maioria dos cenários avaliados mostrou-se economicamente viável, com exceção da produção do ácido succínico, que apresentou TIR menor do que 12%. Vale ressaltar que esse resultado é sensível à capacidade de processamento e aos preços de matéria-prima e produtos considerados.

Em geral, tem-se que a utilização de biomassa como matéria-prima, especificamente bagaço de cana-de-açúcar, para obtenção de produtos químicos tem grande potencial para melhorar a viabilidade das biorrefinarias existentes ou ainda para viabilizar a produção de etanol de segunda geração (etanol celulósico) por meio da utilização da xilose para a produção de produtos de maior valor agregado.

No entanto, para avaliar o potencial industrial e econômico das rotas renováveis, é necessário realizar uma avaliação técnico-econômica comparativa com os cenários-base. Para tanto, a BVC deverá ser empregada para simulação e avaliação das rotas desenvolvidas, considerando sua integração às biorrefinarias de cana-de-açúcar, para indicar o potencial de aplicação industrial dessas tecnologias.

Agradecimentos

Ao Sistema Embrapa de Gestão, processo de número 02.12.01.003.00.00 (Projeto C5-AGREGA). À equipe do CTBE.

À Luciane Chedid (revisão gramatical), Maria Iara Machado (revisão bibliográfica) e Maria Goreti Braga dos Santos (editoração).

Referências

- BLOM, R. H.; PFEIFER, V. F.; MOYER, A. J.; TRAUFLER, D. H.; CONWAY, H. F.; CROCKER, C. K.; FARISON, R. E.; HANNIBAL, D. V. Sodium gluconate production – fermentation with *Aspergillus niger*. **Industrial and Engineering Chemistry**, Washington, DC, v. 44, n. 2, p. 435-440, 1952.
- BONOMI, A.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; LIMA, M. A. P. **Virtual biorefinery**: an optimization strategy for renewable carbon valorisation. New York: Springer, 2016.
- HYDROCARBON RESEARCH. J. C. Chao; D. T. A. Huibers. **Catalytic hydrogenation of glucose to produce sorbitol**. US 4322569 A. 30 mar. 1982.
- BAYER AKTIENGESELLSCHAFT. G. Darsow. **Process for preparing succinic anhydride**. Patente. US 5952514 A.14 set. 1999.
- BIOFINE INCORPORATED. S. W. Fitzpatrick. **Production of levulinic acid from carbohydrate-containing materials**. US 5608105 A. 04 mar. 1997.
- FUMAGALLI, C. Succinic Acid and Succinic Anhydride. In: KIRK-OTHMER Encyclopedia of Chemical Technology. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- HAYES, D. J.; ROSS, J.; HAYES, M. H. B.; FITZPATRICK, S. The biofine process: production of levulinic acid, furfural and formic acid from lignocellulosic feedstocks. In: KAMM, B.; GRUBER, P. R.; KAMM, M. (Ed.). **Biorefineries-industrial processes and products**: status quo and future directions. Weinheim: Wiley, 2008. cap. 7, p. 139- 164.
- LIU, J.; ZENG, X.; CHENG, M.; YUN, J.; LI, Q.; JING, Z.; JIN, F. Reduction of formic acid to methanol under hydrothermal conditions in the presence of Cu and Zn. **Bioresource Technology**, Oxon, v. 114, p. 658-662, 2012.

MELAJA, A. J.; HAMALAINEN, L. **Process for making xylitol**. Patent US4008285 A. 15 fev. 1977.

MUSSATTO, S. I.; ROBERTO, I. C. Xilitol: edulcorante com efeitos benéficos para a saúde humana. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 401-413, 2002.

PFEIFER, H. **Method of manufacturing xylose solution from xylan-containing raw material**. Patent CA 1082178 A. 22 jul. 1980 .

RACKEMANN, D. W.; DOHERTY, W. O. S. A review production levulinic acid and furanics from sugars. **International Sugar Journal**, Kent, v. 115, n. 1369, p. 28-34, 2013.

RAMACHANDRAN, S.; FONTANILLE, P.; PANDEY, A.; LARROCHE, C. Gluconic acid: properties, applications and microbial production. **Food Technology and Biotechnology**, Zagreb, v. 44, n. 2, p. 185-195, 2006.

SALGADO, J. M.; CONVERTI, A.; DOMÍNGUEZ, J. M. Fermentation strategies explored for xylitol production. In: SILVA, S. S. da; CHANDEL, A. K. (Ed.). **D-Xylitol: fermentative production, application and commercialization**. [Berlin]: Springer, 2012. p. 161-163.

TOIVARI, M. H.; NYGARD, Y.; PENTTILÄ, M.; RUOHONEN, L.; WIEBE, M. G. Microbial D-xylonate production. **Applied Microbiology Biotechnology**, New York, v. 96, n. 1, p. 1-8, 2012.

TRUNIN, R. A.; UCHITEL, M. L.; MAEVSKIJ, E. I.; HEIFETS, V. I.; CHERNITZKAYA, S. K.; KASSEINOVA, D.; PIVONENKOVA, P. L.; LUBIMOVA, T. B. **Method for preparing succinic acid**. Patent US 3341578 A. 12 set. 1967.

VAZ JUNIOR, S. Perspectives for the brazilian residual biomass in renewable chemistry. **Pure and Applied Chemistry**, Berlin, v. 86, n. 5, p. 833-842, 2014.

WATSON, L. J.; CONNORS, C. G. Furfural: a value adding opportunity for the australian sugar industry. **Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technologists**, Sidney, v 30, p. 429-436, 2008.

ZEITSCH, K. J. **The chemistry and technology of furfural and its many by-products**. [Amsterdam]: Elsevier, 2000. (Sugar Series, 13).

ZIFFER, J. **Process of producing gluconic acid and gluconates**. US 2351500 A. 13 jun. 1944.

Embrapa

Agroenergia

MINISTÉRIO DA
**AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO**



CGPE 13178