

INTEGRAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FURFURAL EM UMA BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR

J. F. L. SILVA^{1,2}, M. A. SELICANI¹, T. L. JUNQUEIRA¹, B. C. KLEIN^{1,2}, A. BONOMI^{1,2}

¹ CTBE/CNPEM - Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol

² Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química

E-mail para contato: jean.silva@bioetanol.org.br

RESUMO – Furfural é um químico de base com variadas aplicações e com grande expectativa de crescimento de mercado. Derivado de biomassa, sua produção pode ser incorporada à indústria brasileira através do uso de bagaço de cana-de-açúcar, usualmente destinado à geração de energia (vapor e eletricidade). Neste contexto, a integração de uma planta de furfural – utilizando parte do bagaço disponível como matéria-prima – à produção de etanol no cenário brasileiro foi simulada e comparada a uma destilaria de etanol. Os resultados mostraram que a planta integrada tem uma taxa interna de retorno de 16,7 %, que é 4 p.p. superior à da destilaria autônoma. No contexto da biorrefinaria de cana-de-açúcar, a produção de furfural é vantajosa por ser um produto de maior valor agregado e investimento relativamente baixo.

1. INTRODUÇÃO

Hoje, compostos químicos de origem vegetal estão ganhando considerável espaço no mercado graças ao ideal de criação de uma indústria química baseada em bioderivados e também devido à pressão política. Esta tendência vem da oscilação dos preços do petróleo, da busca por fontes de energia alternativas e da visão de garantir um suprimento energético renovável. O conceito de biorrefinaria ganha força para suportar esta necessidade (De Jong e Marcotullio, 2010; Moulijn *et al.*, 2012). Bioetanol, o mais conhecido bioderivado, tem um mercado consolidado no mundo e uma situação de sucesso no mercado brasileiro. Muita atenção é dada à destinação do bagaço e da palha que hoje são usados como combustível em unidades de cogeração (produção e utilização combinada de vapor e eletricidade) e possuem potencial aplicação na produção de etanol de segunda geração ou celulósico (Mariano *et al.*, 2013). Também, muito esforço é destinado à criação de novas rotas de utilização da biomassa para produzir compostos de maior valor agregado.

Da mesma maneira que a indústria petroquímica baseia-se em cerca de 20 compostos derivados de petróleo (Moulijn *et al.*, 2012), é possível imaginar uma série de compostos derivados de biomassa para aplicações gerais na indústria química de base. Um destes compostos é o furfural, reconhecido como uma plataforma química para uma ampla gama de aplicações (De Jong e Marcotullio, 2010). Usos atuais consistem na derivação de furanos e uso como solvente em processos extrativos. Sua produção é consagrada na indústria através da hidrólise de biomassa rica em pentoses e a consequente desidratação do açúcar formado. A

hidrólise da biomassa é em geral conduzida em meio ácido, e a quantidade de processos existentes é ampla e varia com a matéria-prima (Zeitsch, 2000). A demanda de furfural em 2013 foi de 300 kt/a, e espera-se que será de 652 kt/a em 2020 (GVR, 2015).

O processo Rosenlew consiste em um digestor de bagaço de cana-de-açúcar com a vantagem de ser um processo autocatalítico. O uso desta tecnologia é consagrado no ambiente industrial e é empregado na segunda maior planta de produção de furfural do mundo, situada na África do Sul (Zeitsch, 2000). Porém, a maior parte do furfural produzido no mundo vem da China, obtido através do Processo em Batelada Chinês, que utiliza sabugo de milho como matéria-prima. Devido à disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar no mercado brasileiro, é interessante considerar a incorporação de uma planta de produção de furfural a uma destilaria de etanol de primeira geração.

O objetivo deste trabalho é de avaliar os impactos econômicos da integração de uma planta de produção de furfural a uma destilaria de etanol. A planta de furfural terá capacidade de produção de 21 kt/a, equivalente a 6% do mercado mundial em 2014. A modificação consiste em integrar um processo já consagrado para usar matéria-prima de baixo custo e integrar o uso de utilidades, que é um dos fatores que mais influenciam no custo de produção do furfural.

2. MÉTODOS

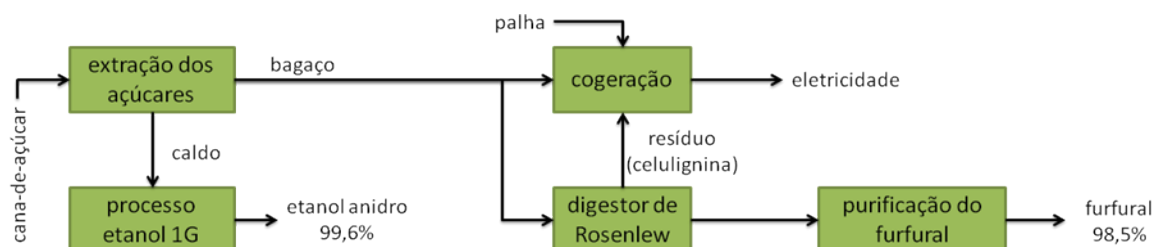
2.1. Descrição do processo

O processo consiste em uma planta de furfural integrada a uma planta de produção etanol com capacidade de processamento anual de 4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (TC). A planta de etanol é projetada para operar durante 200 dias de safra, enquanto que a unidade de cogeração de calor e potência (CHP) e a unidade de produção de furfural operam 330 dias/ano. São processadas 833 t/h de cana-de-açúcar e, após extração do caldo, produz-se 221 t/h de bagaço. Deste bagaço, 5% é estocado para inicialização da unidade de CHP. Do restante, 40% seguem para o consumo imediato no CHP durante a safra, 41% segue para a planta de furfural e o restante é estocado para alimentar a unidade de CHP na entressafra. Parte da biomassa que segue para a planta de furfural é estocada para operação na entressafra. Considera-se também o processamento de 68 t/h de palha de cana-de-açúcar (equivalente a 50% da produzida no campo), que seguem diretamente para a queima na caldeira em operação durante a safra. O caldo extraído segue para o processo de produção do etanol, através da fermentação dos açúcares, conhecido como processo de primeira geração (1G). A caldeira opera produzindo vapor a 65 bar, o que a leva a ter maior eficiência térmica do que as tradicionais caldeiras de 22 bar e proporciona a produção de eletricidade, usada na planta e vendida para a rede (Mariano *et al.*, 2013).

Para a produção de furfural, o bagaço é inserido no digestor de Rosenlew, que opera a 180 °C e 10 bar. Vapor a 10 bar superaquecido (265 °C) entra no fundo do reator, promove a hidrólise da xilana e sua conversão a furfural, o qual é removido do reator por arraste a vapor. O resíduo deste reator segue para um vaso flash para recuperar furfural ainda presente na biomassa e após isso é destinado à queima, uma vez que o sólido possui capacidade calorífica significativa. A corrente de vapor, produto da reação, segue então para a sequência de destilação proposta por Zeitsch (2000). Água é removida como produto de fundo em uma

primeira coluna. O topo desta coluna gera uma corrente com furfural, água e componentes voláteis que segue para uma segunda coluna onde o topo elimina os voláteis (metanol, etanol e diacetil principalmente), que são levados para queima na CHP. O fundo desta segunda coluna e uma corrente lateral da primeira coluna consistem majoritariamente de furfural e água em uma mistura azeotrópica. Estas correntes são resfriadas e destinadas a um decantador, onde duas fases são obtidas: 1) a aquosa, que retorna à primeira coluna e 2) a fase orgânica rica em furfural (acima de 90%). A fase orgânica segue para uma terceira coluna, onde se obtém no fundo furfural com 98,5% de pureza. O topo – uma mistura azeotrópica de água e furfural – retorna ao decantador. Um esquema simplificado de todo este processo encontra-se na Figura 1.

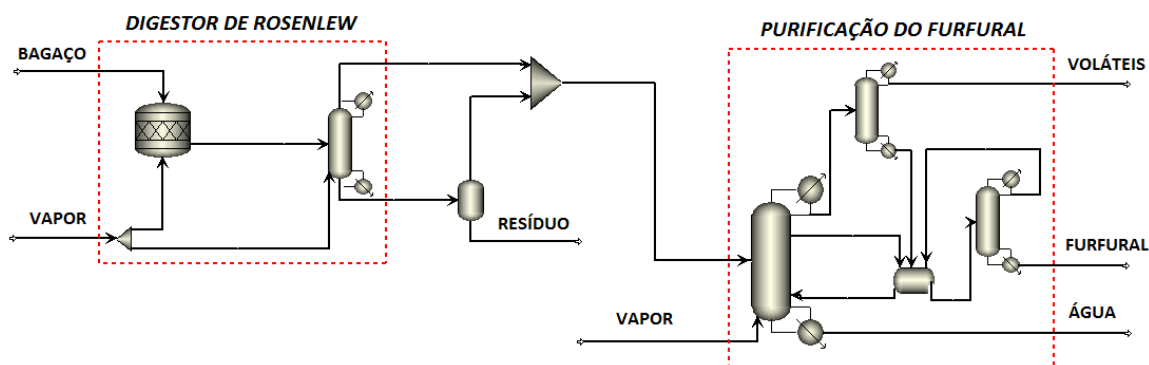
Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de furfural integrado ao de etanol.



2.2. Simulação do processo

A biorrefinaria integrada de produção de etanol 1G e furfural foi simulada no Aspen Plus (versão 7.3.2). A configuração da planta e os parâmetros de processo utilizados para simulação da produção de etanol 1G e da etapa de cogeração são baseados na Biorrefinaria Virtual de Cana-de-Açúcar, ferramenta desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) (Dias *et al.*, 2011; CTBE, 2012; Mariano *et al.*, 2013). Adaptações no modelo de destilaria de etanol previamente desenvolvido foram realizadas para incluir o processo de produção de furfural, as diferenças entre os períodos de operação (safra e entressafra) e a integração do uso de utilidades (*e.g.* vapor). O digestor Rosenlew foi simulado como um reator RStoic para conversão e uma coluna RadFrac para a separação das fases líquida e vapor. As colunas usadas para a purificação do furfural são simuladas com o modelo RadFrac e com parâmetros apresentados por Zeitsch (2000). A Figura 2 apresenta o fluxograma simplificado do modelo feito no Aspen Plus.

Figura 2 – Fluxograma simplificado do processo de produção do furfural no Aspen Plus.



2.3. Análise técnico-econômica

Foram avaliados o investimento e o custo de produção para cada um dos seguintes cenários no contexto da indústria brasileira: 1) 1GBASE: base, correspondente à destilaria autônoma que consome todo o bagaço para produzir eletricidade como subproduto; e 2) 1G+FF: correspondente à planta de furfural integrada à usina autônoma, utilizando parte do bagaço com matéria-prima. O investimento em equipamentos e a instalação foram estimados a partir da base de dados do CTBE e o capital de giro é considerado como 10% do investimento capital fixo. A análise econômica foi realizada com base nos dados da Tabela 1, considerando um tempo de vida de projeto de 25 anos, com tempo de construção e comissionamento de 2 anos, depreciação linear nos 10 primeiros anos e valor residual nulo.

Tabela 1 – Premissas para a análise econômica

Parâmetro	Valor	Referência
Taxa mínima de atratividade - TMA (%)	12,0	
Alíquota de tributos (%)	34,0	
Preço da cana-de-açúcar (R\$/t)	66,95	CanaSoft ¹
Preço da palha (R\$/t)	62,31	CanaSoft ¹
Preço da eletricidade (R\$/MWh)	132,43	MME, média de leilões (2005-2013)
Preço do etanol anidro (R\$/L)	1,34	CEPEA, média móvel (2004-2014)
Preço do furfural (R\$/kg)	3,28	CEPEA, média móvel (2004-2014)

¹ Modelo da fase agrícola integrado à Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise técnico-econômica

Os principais resultados obtidos na avaliação econômica são apresentados na Tabela 2. Destaca-se a receita anual com os produtos: um adicional de R\$ 69 milhões relativo à venda de furfural comparado a uma redução de R\$ 29 milhões na receita com eletricidade, o que é uma perspectiva bastante promissora. Além do mais, a destinação de parte do bagaço para a planta de furfural no cenário 1G+FF e maior período de operação (330 d/a) diminuem a necessidade de capacidade na unidade de CHP. Esta diminuição na capacidade de processamento da unidade de CHP é mais do que suficiente para cobrir as despesas com capital total inicial da unidade de produção de furfural.

Um aspecto importante é o preço de mercado do furfural comparado ao preço da eletricidade, considerando que ambos podem ser produzidos a partir da mesma matéria-prima. Nos dois cenários analisados, esta comparação torna-se complicada, uma vez que, no cenário com furfural, parte da eletricidade e parte do vapor de processo são gerados a partir do resíduo do digestor de Rosenlew. Porém, observando o custo de produção alocado para a eletricidade e para o etanol na Tabela 2, nota-se uma redução de 11% em ambos, uma vez que neste novo cenário a planta conta com a receita adicional do furfural. Outro parâmetro importante para a análise comparativa de projetos é a taxa interna de retorno (TIR), que indica a rentabilidade de um empreendimento. Pela Tabela 2, pode-se constatar que a integração da produção de

furfural a uma planta de etanol 1G favorece o retorno financeiro da biorrefinaria, com uma TIR superior em 4 p.p. em relação ao cenário base.

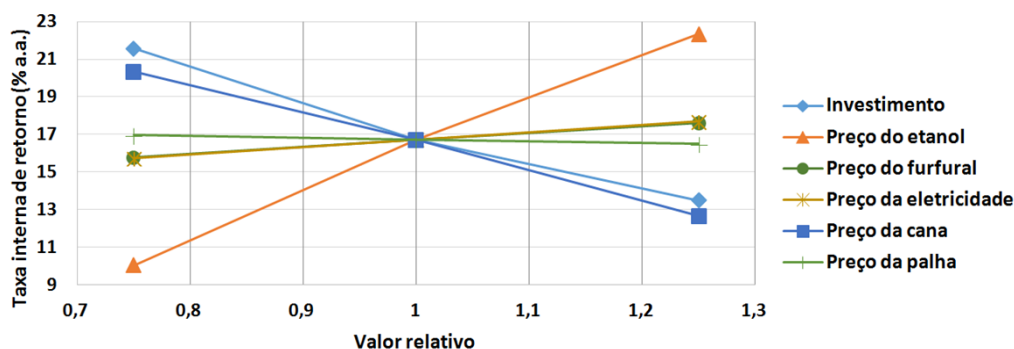
Tabela 2 – Resultados do estudo baseados na simulação e na análise econômica

Parâmetro	Cenário	
	1GBASE	1G+FF
Produção de etanol (kt/a)	266	266
Produção de eletricidade para a rede (MWh/a)	773	555
Produção de furfural (kt/a)	-	21
Investimento (R\$, milhões)	1028,6	898,4
Custo de produção de etanol (R\$/L)	1,16	1,03
Custo de produção da eletricidade (R\$/MWh)	114,56	102,01
Custo de produção do furfural (R\$/kg)	-	2,53
Taxa interna de retorno (% a.a.)	12,7	16,7
Receita anual com etanol (R\$, milhões)	450,5	450,5
Receita anual com eletricidade (R\$, milhões)	102,3	73,5
Receita anual com furfural (R\$, milhões)	-	69,0

3.2. Análise de sensibilidade

Os resultados da análise econômica são bastante dependentes dos preços dos produtos no mercado e das incertezas sobre o investimento. Portanto, para analisar o impacto destes parâmetros sobre a lucratividade da planta, foi realizada uma análise de sensibilidade para a TIR como função de variações de $\pm 25\%$ no capital total inicial da planta do cenário 1G+FF e nos preços de cana, palha, etanol, eletricidade e furfural. Os resultados apresentados na Figura 3 mostram que, de fato, a TIR é mais sensível ao preço do principal produto da planta, o etanol. Porém, o resultado mais notável é que a única situação em que a planta deixa de ser um investimento atrativo ($TIR < TMA$) é para uma queda no preço do etanol maior que 18%. Variações no preço do furfural, mercado que crescerá muito nos próximos anos, não representam um grande impacto na atratividade do investimento. Além do mais, como a eletricidade e o furfural têm praticamente a mesma participação na receita, flutuações em seus preços apresentam efeitos semelhantes na TIR.

Figura 3 – Sensibilidade da taxa interna de retorno do cenário 1G+FF



4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi estudada a viabilidade da integração da produção de furfural via o processo contínuo Rosenlew à produção de etanol no contexto brasileiro. Dados de operação das plantas usados na simulação do processo refletem instalações industriais existentes. Os resultados obtidos mostraram que a integração da planta de furfural possui resultados extremamente positivos, uma vez que possibilita a obtenção de um produto de maior valor agregado. A taxa interna de retorno do investimento é de 16,7%, significativamente maior que a da destilaria autônoma de etanol (12,7%). Através da análise de sensibilidade, concluiu-se também que flutuações no preço do furfural não geram um grande impacto sobre a lucratividade do empreendimento, mostrando que a integração é realmente uma opção bastante atrativa.

5. REFERÊNCIAS

- DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROCHA, G. J. M.; PRADELLA, J. G. C.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.: Second-generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production? *Bioresour. Technol.*, v. 102, 8964–8997, 2011.
- DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.: Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresour. Technol.*, v. 103, 152-161, 2012.
- CTBE – Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol: The Virtual Sugarcane Biorefinery - 2011 Report. Relatório Técnico, 2012.
- DE JONG, W.; MARCOTULLIO, G.: Overview of biorefineries on co-production of furfural, existing concepts and novel developments. *Int. J. of Chem. Reactor Eng.*, v. 8, A69, 2010.
- GVR: GRAND VIEW RESEARCH: Furfural market analysis by application (furfuryl alcohol, solvent) and segment forecasts to 2020. Relatório publicado por Grand View Research em janeiro de 2015.
- MARIANO, A. P.; DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CUNHA, M. P.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R.: Utilization of pentoses from sugarcane biomass: techno-economics of biogas vs. butanol production. *Bioresour. Technol.*, v. 142, p. 390-9, 2013.
- MOULIJN, J. A.; MAKKEE, M.; VAN DIEPEN, A. E.: Chemical Process Technology. John Wiler & Sons: Chichester, Reino Unido. 2ª ed., 2012.
- ZEITSCH, K.J. The chemistry and technology of furfural and its many by-products. Sugar Series. Elsevier: Holanda, v. 13, p. 3, 48, 126, 304-306, 358-365, 2000.