

## INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR EMPREGANDO ÁCIDO DILUÍDO COMO PRÉ-TRATAMENTO PARA O BAGAÇO

C. M. OLIVEIRA<sup>1</sup>, A. J. G. CRUZ<sup>1</sup> e C. B. B. COSTA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: cassiaoliveira@hotmail.com

**RESUMO** – O aumento na demanda por biocombustíveis tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias, como a produção de etanol a partir da hidrólise do bagaço. Neste trabalho foi realizada a integração energética do processo de produção de etanol de 1<sup>a</sup>/2<sup>a</sup> geração e energia elétrica, empregando ácido diluído como pré-tratamento para o bagaço. A partir dos conceitos da análise *Pinch* foi possível sintetizar uma rede de trocadores de calor, na qual os custos com utilidades são reduzidos. O processo com a rede de trocadores proposta foi comparado com o processo sem integração energética e com o processo parcialmente integrado, comumente encontrado nas usinas. A aplicação da integração energética demonstrou redução no consumo de energia acima de 50% em relação ao processo sem integração e acima de 30% em relação ao processo parcialmente integrado.

### 1. INTRODUÇÃO

A preocupação mundial com o melhor uso da energia se iniciou com os choques do petróleo em 1973-1974 e 1979-81, que forçaram a alta dos preços e a percepção de escassez deste recurso. O Brasil iniciou a diversificação de combustíveis com o Proálcool, programa desenvolvido pelo governo brasileiro com o objetivo de substituir derivados do petróleo por biocombustíveis. Desde então, o Brasil tem apresentado grande importância no mercado de etanol.

O setor sucroenergético tem como produto principal o etanol de primeira geração (1G) e subprodutos como o bagaço, que pode ser utilizado na geração de energia elétrica e produção de etanol de segunda geração (2G). Como a demanda por biocombustíveis tem aumentado muito nos últimos anos, há um grande interesse na implementação da tecnologia de etanol 2G.

A composição química do bagaço de cana é de 32-48% de celulose, 19-24% de hemicelulose, 23-32% de lignina e uma pequena quantidade de cinzas e extrativos (Santos *et al.*, 2012). Existem estudos na literatura com diferentes tipos de pré-tratamento para materiais lignocelulósicos, tais como explosão a vapor, organosolv, uso de ácido diluído ou álcali, hidrotérmico, entre outros. O pré-tratamento com ácido diluído é um dos métodos químicos mais utilizados e tem a vantagem de solubilizar a hemicelulose e convertê-la em açúcares fermentáveis, eliminando ou reduzindo a necessidade de misturas de enzimas hemicelulases (Saha *et al.*, 2005). Neste tipo de pré-tratamento utiliza-se, principalmente, ácido sulfúrico ou ácido fosfórico para romper o complexo lignocelulósico (Balat, Balat e Öz, 2008).

A produção de etanol 2G ainda é uma tecnologia recente que pode ser otimizada, buscando reduzir o consumo de energia e conseqüentemente aumentando a disponibilidade de bagaço para a segunda geração. Dentre as técnicas disponíveis de integração energética, a análise *Pinch* é uma das metodologias mais consagradas na literatura devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação. Neste contexto, o presente trabalho propôs a integração energética com a técnica *Pinch* no processo de produção de etanol de 1<sup>a</sup>/2<sup>a</sup> geração e energia elétrica, empregando o pré-tratamento com ácido diluído para o bagaço de cana-de-açúcar e considerando a fermentação das pentoses. O estudo utilizou dados da simulação do processo em estudo, denominado como biorrefinaria virtual.

## 2. MÉTODO

A integração energética da biorrefinaria virtual foi realizada com base nos princípios da análise *Pinch*, técnica desenvolvida por Linnhoff na Inglaterra. Inicialmente foi realizado um estudo da biorrefinaria para identificação das correntes que poderiam participar da integração energética, considerando as possíveis restrições do processo. A metodologia *Pinch* requer a aquisição de dados das correntes, tais como temperatura inicial e final, vazão mássica e definição do tipo de corrente (quente ou fria). As informações foram obtidas de simulações realizadas no *software* EMSO (*Environment for Modeling, Simulation, and Optimization*), o qual tem sido utilizado no desenvolvimento da biorrefinaria realizada pelo grupo de pesquisa de Simulação e Controle de Processos do Departamento Engenharia Química da UFSCar. Para cada corrente identificada na participação da integração energética foram calculadas a capacidade calorífica, variação de entalpia e capacidade térmica.

Ao iniciar a análise *Pinch* foi definida a diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{\min}$ ) entre uma corrente quente e fria igual a 10°C, valor comumente adotado na literatura. Para auxiliar nos cálculos foram utilizados o *software* gratuito Hint (Martín e Mato, 2008) e a planilha disponível em Elsevier (2007). Com auxílio destas ferramentas foi sintetizada uma rede de trocadores de calor que minimiza os custos de utilidade.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A biorrefinaria apresentada neste tópico possui uma capacidade de moagem de 12.000 ton/dia de cana-de-açúcar, produção de 1.382 m<sup>3</sup> etanol hidratado/dia e consumo de 3,4 kg vapor/L etanol hidratado. Na Tabela 1 são apresentadas as informações das correntes de processo que precisam de aquecimento ou resfriamento.

A Figura 1 mostra o diagrama das curvas compostas, no qual é possível identificar a demanda mínima de energia. Pode-se verificar que são recuperados pela troca de calor entre as correntes 81,3 MW, sendo necessários 66,9 MW de utilidade quente e 62,6 MW de utilidade fria. A temperatura *Pinch* deslocada do processo é igual a 106,9°C e as temperaturas *Pinch* quente e fria são 111,9°C e 101,9°C, respectivamente.

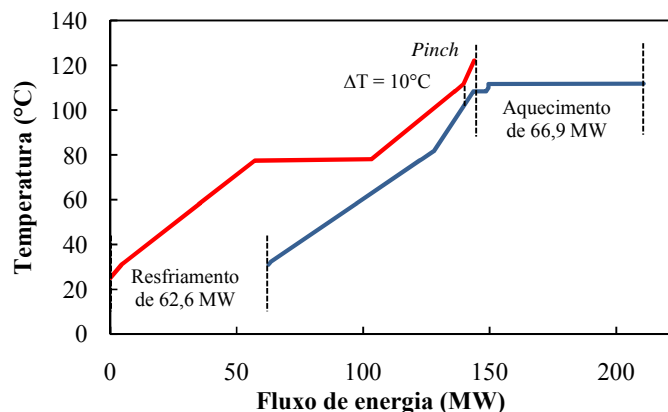
Com base nos valores obtidos pela análise *Pinch* pôde-se propor uma rede de trocadores de calor que atende o consumo mínimo de energia. A Figura 2 mostra a rede sintetizada, onde estão presentes 14 unidades de troca térmica. Este valor representa um acréscimo de 2 unidades de troca térmica no processo sem integração energética. Em comparação com a biorrefinaria original, o processo com a rede de trocadores de calor que atende a demanda

mínima energética apresenta economia de 54,8% em utilidade quente e 56,5% em utilidade fria e consumo de vapor vegetal reduzido a 1,5 kg vapor/L etanol hidratado. Na Figura 2, os números abaixo dos trocadores de calor, aquecedores e resfriadores indicam a taxa de energia trocada entre as correntes ou entre correntes e utilidades, em MW.

**Tabela 1 – Dados das correntes de processo utilizadas na integração energética da biorrefinaria.**

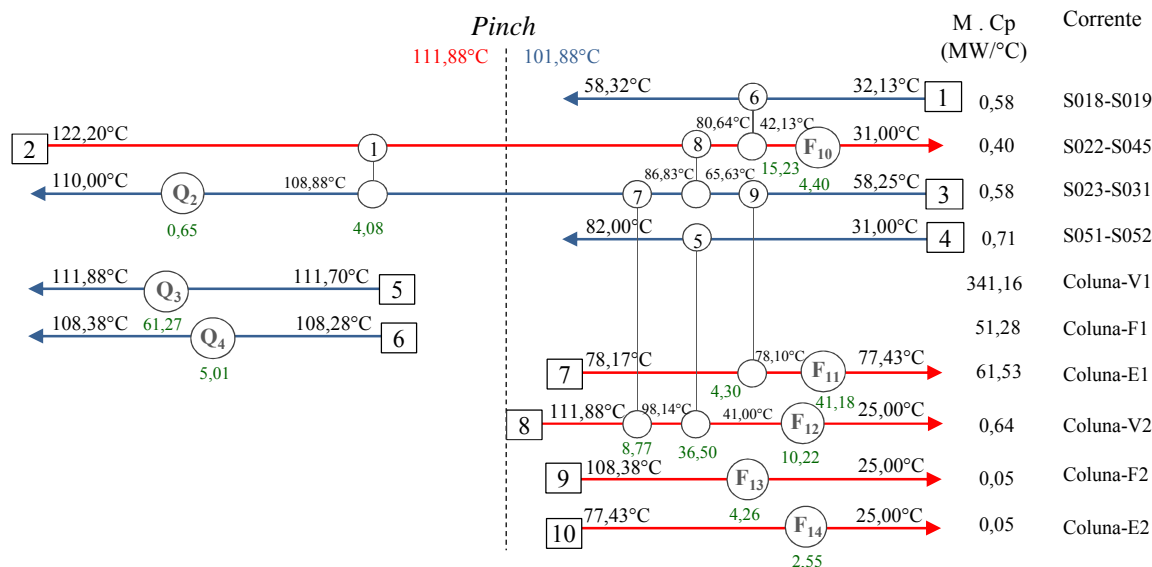
Corrente	Constituição	Equipamento		T <sub>inicial</sub> (°C)	T <sub>final</sub> (°C)	ΔH (kW)
		Sai	Entra			
S018-S019	Caldo	Moenda	Calagem	32,13	58,32	15.234,43
S022-S045	Caldo	Evaporador	Fermentador	122,20	31,00	-36.078,32
S023-S031	Caldo	Calagem	Flash	58,25	110,00	30.169,28
S051-S052	Vinho	Flash	Coluna 1	31,00	82,00	36.503,05
Coluna-V1	Vinhaça	Coluna 1	Refrervedor	111,70	111,88	61.265,23
Coluna-F1	Flegmaça	Coluna 2	Refrervedor	108,28	108,38	5.015,00
Coluna-E1	Etanol	Coluna 2	Condensador	78,17	77,43	-45.479,59
Coluna-V2	Vinhaça	Refrervedor	-	111,88	25,00	-55.496,94
Coluna-F2	Flegmaça	Refrervedor	-	108,38	25,00	-4.261,95
Coluna-E2	Etanol	Condensador	-	77,43	25,00	-2.545,91

**Figura 1 – Curvas compostas das correntes participantes da integração energética.**



Nas usinas frequentemente há um nível de integração no processo, o qual depende do projeto de cada usina. A fim de comparação, tomou-se como base uma biorrefinaria com integração entre a corrente de vinhaça e de vinho na entrada da coluna de destilação e entre a corrente de caldo na saída das moendas e a corrente de caldo na saída do evaporador. Este tipo de integração é comumente utilizado nas destilarias e foi denominado de biorrefinaria parcialmente integrada. A demanda energética neste processo nas mesmas condições de processo da biorrefinaria não integrada é de 96,4 MW de utilidade quente e 92,1 MW de utilidade fria e consumo de 2,2 kg vapor/L etanol hidratado. O processo com a rede de trocadores de calor proposta neste trabalho apresenta economia de 30,6% de utilidade quente e 32,0% de utilidade fria em relação ao processo parcialmente integrado.

Figura 2 – Rede de trocadores de calor proposta para a biorrefinaria.



#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados indicaram que a integração energética da biorrefinaria proporciona grande economia de utilidades em relação ao processo não integrado e ao processo parcialmente integrado. Além do aspecto econômico, devido à diminuição dos custos com utilidade quente e fria, há os benefícios ambientais e a possibilidade de uma disponibilidade maior de bagaço para a produção de etanol de segunda geração.

#### 5. NOMENCLATURA

F: utilidade fria;  $\Delta H$ : variação de entalpia (kW);  $\Delta T_{\min}$ : diferença mínima de temperatura (°C); Q: utilidade quente;  $T_{\text{final}}$ : temperatura final (°C);  $T_{\text{inicial}}$ : temperatura inicial (°C).

#### 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradem ao CNPq e à FAPESP.

#### 7. REFERÊNCIAS

- BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C. Progress in bioethanol processing. *Prog. Energy Combust. Sci.*, v. 34, p. 551–573, 2008.
- ELSEVIER LTD. *Pinch analysis spreadsheet*. Disponível em: <<http://www.elsevierdirect.com/v2/companion.jsp?ISBN=9780750682602>>. 2007.
- MARTÍN, A.; MATO, A. F. Hint: An educational software for heat exchanger network design with the pinch method. *Educ. Chem. Eng.*, v. 3, p. e6-e14, 2008.
- SAHA, B. C.; ITEN, L. B.; COTTA, M. A.; WU, Y. V. Dilute acid pretreatment, enzymatic saccharification and fermentation of wheat straw to ethanol. *Process Biochem.*, v. 40, n. 12, p. 3693-3700, 2005.
- SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Quim. Nova*, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.