

Análise energética de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar

Kamila Albano Batista¹

Cássia Maria Oliveira²

Resumo: A integração energética em uma biorrefinaria de cana-de-açúcar permite reduzir o consumo de vapor na planta e, conseqüentemente, disponibilizar mais bagaço para a produção de etanol de segunda geração (2G) e/ou energia elétrica. Este trabalho teve por objetivo realizar a integração energética de biorrefinarias de cana-de-açúcar em três cenários. Os cenários indicam diferentes condições de processo e diferem nas frações de bagaço desviadas para a seção de etanol 2G e cogeração de energia. Aplicando a análise *Pinch*, técnica usada na integração energética, foi possível verificar que a biorrefinaria com a integração energética proposta neste estudo pode alcançar uma economia de até 69% de utilidade quente e 80% de utilidade fria em relação à biorrefinaria sem qualquer integração e de até 43% de utilidade quente e 57% de utilidade fria em relação à biorrefinaria com integração de projeto, termo designado para a biorrefinaria comumente encontrada nas usinas brasileiras. Um excedente de até 10,1% de etanol ou 28,6% de energia elétrica pode ser atingido com a integração energética proposta neste estudo. Assim, é possível constatar que uma redução nos custos com utilidades e no uso de recursos ambientais, bem como um aumento na produção de etanol ou de energia elétrica podem ser obtidos com a integração energética, possibilitando a biorrefinaria tornar-se mais sustentável e econômica.

Palavras-chaves: etanol; energia elétrica; integração energética; análise *Pinch*.

Abstract: The energy integration in a sugarcane biorefinery allows to reduce the steam consumption in the plant and, consequently, to make available more bagasse for production of second generation ethanol (2G) and/or electricity. This work aimed to perform the energy integration of sugarcane biorefineries in three scenarios. The scenarios indicate different operating conditions and differ in bagasse fractions diverted to the 2G ethanol section and the cogeneration system. Applying the *Pinch* analysis, a technique for energy integration, it was possible to verify that the biorefinery with the energy integration proposed in this study can achieve savings of up to 69% of hot utility and 80% of cold utility compared to the biorefinery without any integration and up to 43% of hot utility and 57% of cold utility in relation to the biorefinery with project integration, a term designated for the biorefinery commonly found in Brazilian plants. A surplus of up to 10.1% of ethanol or 28.6% of electricity can be achieved with the energy integration proposed in this study. Thus, it is possible to see that a reduction in the utility costs and the use of environmental resources, as well as an increase in the production of ethanol or electricity can be achieved with energy integration, making more sustainable and economical the biorefinery.

Keywords: ethanol; electricity; energy integration; *Pinch* analysis.

¹ Discente no curso de Tecnologia de Alimentos - Instituto Federal de São Paulo, Câmpus Matão, k.batista@aluno.ifsp.edu.br

² Docente no curso de Tecnologia de Alimentos - Instituto Federal de São Paulo, Câmpus Matão, cassiaoliveira@ifsp.edu.br

Introdução

A diversificação da matriz energética é uma preocupação de todos os países nas últimas décadas diante da necessidade de reduzir a emissão de poluentes, escassez de recursos energéticos e mudanças climáticas. Nesse sentido, acordos internacionais como o de Paris surgem com o objetivo de reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Embora, no Brasil muitos recursos naturais ainda são usados de forma inadequada, o país tem uma matriz energética de 43% proveniente de fontes renováveis, enquanto no mundo este valor é de 14% (EPE, 2016). Parte desse valor se deve à utilização de cana-de-açúcar como matéria-prima de biocombustíveis e energia elétrica.

O etanol no Brasil é produzido principalmente a partir do caldo de cana-de-açúcar por um processo conhecido como produção de etanol de primeira geração (1G). Em processos recentes, o bagaço da cana-de-açúcar é utilizado além da produção de calor, energia mecânica e energia elétrica, na produção de etanol de segunda geração (2G). Contudo, ainda existem gargalos técnicos e econômicos para viabilizar a tecnologia de etanol 2G. Assim, estudos que proponham melhorias são imprescindíveis para a produção integrada de etanol 1G/2G mais sustentável e econômica.

Dentre os métodos para análise energética de processos, tem-se a integração energética. Esta técnica tem como objetivo permitir a economia de energia de um processo através da troca de calor entre correntes quentes e frias em uma rede de trocadores de calor (RTC). Deste modo, é possível um melhor sistema de gestão de energia e conservação dos recursos, prevenção da poluição e redução nos custos de capital e operacional. Dependendo do método empregado para a integração energética, o custo inclui apenas as despesas operacionais ou as despesas operacionais e de capital, bem como outras despesas (por exemplo, custos de tubulação) (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Em geral, as técnicas para síntese de RTC podem ser classificadas em: sequenciais e simultâneos. Simplificadamente, as técnicas sequenciais subdividem o problema em subproblemas a fim de reduzir a complexidade e incluem métodos que usam conceitos termodinâmicos (por exemplo, a análise de *Pinch*) e métodos de programação matemática. Em técnicas simultâneas, todas as variáveis do problema são otimizadas em uma única etapa. Na literatura, importantes trabalhos de revisão do estado da arte para a síntese de RTC podem ser citados, como Morar e Agachi (2010), Klemeš e Kravanja (2013) e Klemeš, Varbanova e Kravanja (2013), bem como os livros 'Chemical Process Design and Integration' (SMITH, 2014), 'Redes de cambiadores de calor' (RAVAGNANI; SUÁREZ, 2012), 'Energy

Optimization in Process Systems and Fuel Cells' (SIENIUTYCZ; JEŻOWSKI, 2013) e 'Handbook of Process Integration (PI)' (PARDALOS; DU, 1998).

A síntese de RTC em biorrefinarias tem como um dos principais objetivos reduzir o consumo de vapor no processo. Assim, menos bagaço precisa ser queimado para a geração vapor consumido como utilidade no processo e o excedente pode ser desviado para a produção de etanol 2G ou de energia elétrica, dependendo da demanda de mercado. Isto é, a economia de utilidade quente proporcionada pela integração energética permite que menos bagaço seja usado na geração de vapor e, conseqüentemente, o bagaço excedente pode ser reaproveitado gerando mais etanol ou energia elétrica. No entanto, outros aspectos alcançados via integração energética, como o aumento da segurança energética e a diminuição do consumo de recursos ambientais e da geração de resíduos, são igualmente importantes. Assim, todas as melhorias proporcionadas pela integração energética contribuem para catalisar a viabilidade da produção de etanol 2G.

Estudos de integração energética em usinas de cana-de-açúcar foram realizados em processos com produção de etanol 1G e açúcar (PINA *et al.*, 2014, 2015) e etanol 1G/2G (OLIVEIRA; CRUZ; COSTA, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2018). Contudo, nenhum destes estudos estimaram o possível incremento na produção de etanol ou de eletricidade que pode ser alcançado com a integração energética.

Dentre as ferramentas computacionais que são usadas na análise *Pinch*, pode-se citar alguns programas gratuitos como o Hint, THEN, *PINCHLENI* e *Online Pinch Analysis Tool* e a planilha de cálculos apresentada por Kemp (2007). Outros programas com recursos mais apurados são o *Aspen Energy Analyzer da Aspen Technology*, o *SuperTarget* da KBC, o *Pinch* da Universidade de Lucerne de Ciências Aplicadas e Artes e o *ProSimPlus* da ProSim. Contudo, estas últimas são ferramentas comerciais.

Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo realizar a integração energética de três estudos de caso de biorrefinaria de cana-de-açúcar utilizando a análise *Pinch*.

Material e Métodos

Neste estudo, a biorrefinaria de cana-de-açúcar refere-se ao processo de produção de etanol 1G/2G e energia elétrica, sendo que a fração líquida da etapa do pré-tratamento hidrotérmico da biomassa, rica em xilose, é usada na produção de biogás, o qual é empregado como uma das fontes de energia da caldeira. O processo foi modelado e simulado no simulador EMSO por Furlan *et al.* (2012) e Furlan *et al.* (2013).

A integração energética da biorrefinaria de cana-de-açúcar foi realizada com base nos princípios da análise *Pinch*, técnica desenvolvida por Linnhoff na Inglaterra. Embora técnicas mais robustas possam ser empregadas para a integração energética, como programação matemática via Programação Matemática Não Linear Inteira Mista, a análise *Pinch* é uma técnica adequada ao problema apresentado neste trabalho, uma vez que os custos associados à demanda energética são mais significativos que custos de investimento da rede de trocadores de calor em biorrefinarias de cana-de-açúcar, como demonstrado por Oliveira *et al.* (2018).

Três estudos de caso foram considerados. No Estudo de Caso 1 (EC1) todo o bagaço é desviado para o sistema de cogeração de energia, ou seja, não há utilização da fração de xilose para a produção de biogás, visto que neste estudo de caso não tem produção de etanol de segunda geração. No Estudo de Caso 3 (EC3) foi desviada a máxima quantidade de bagaço para a seção de produção de etanol 2G, garantindo a autossuficiência energética do processo. Isto é, uma otimização interna no simulador foi realizada a fim de estimar a fração de bagaço máxima que pode ser usada no processo de etanol 2G, de modo que o restante ainda atenda à produção de vapor e energia elétrica usada na própria usina. No Estudo de Caso 2 (EC2) metade dessa fração máxima de bagaço foi desviada para a produção de etanol 2G e o restante foi direcionado para o sistema de cogeração de energia. Para cada um dos estudos de caso, a metodologia adotada neste trabalho é descrita simplificada nos tópicos a seguir.

Identificação das correntes de processo

Foi realizado um estudo do processo da biorrefinaria para identificação das correntes que podem participar da integração energética, considerando as possíveis restrições do processo. Nesta etapa foi feita a aquisição de dados das correntes, tais como temperatura inicial e final, carga térmica e definição do tipo de corrente (quente ou fria; líquida ou gasosa). As informações foram obtidas de simulações realizadas no *software* EMSO por Furlan *et al.* (2012) e Furlan *et al.* (2013) e dados publicados por Oliveira (2018).

Análise *Pinch*

A *análise Pinch* é uma metodologia para minimizar o consumo de energia de processos químicos, calculando metas de energia termodinamicamente viáveis (chamado também de consumo mínimo de utilidades ou demanda mínima de energia). As metas de energias são alcançadas a partir da síntese de redes de trocadores de calor que viabilizam a troca de energia

entre correntes quentes e correntes frias do próprio processo ao invés de usar utilidades externas (vapor e água de resfriamento). É também conhecida como integração de processos, integração de calor, integração de energia ou tecnologia *Pinch* (ALFARO; WERWIE, 2016).

Os dados do processo são representados como um conjunto de fluxos de energia em função da carga térmica (produto de entalpia específica e vazão) e da temperatura. Esses dados são combinados para todas as correntes na planta para fornecer curvas compostas, uma curva para todas as correntes quentes (ou seja, correntes que liberam calor) e uma curva para todas as correntes frias (ou seja, correntes que exigem calor) (ALFARO; WERWIE, 2016). O ponto mais próximo entre as curvas compostas quente e fria é o ponto *Pinch*. Assim, tem-se a temperatura *Pinch* de fluxo quente, a temperatura *Pinch* de fluxo frio e a demanda mínima de energia (NAVARINI, 2019).

Portanto, iniciando o projeto de síntese da rede, os objetivos de energia são atingidos usando trocadores de calor para recuperar o calor entre correntes quentes e frias em dois sistemas separados, um para as temperaturas acima da temperatura *Pinch* e outro para as temperaturas abaixo da temperatura *Pinch*. Esta divisão em duas regiões é realizada para evitar a troca de calor através do ponto *Pinch*, o que provocaria um consumo de energia acima da demanda mínima de energia estipulada pela técnica. Mais informações sobre a metodologia *Pinch* podem ser consultadas na obra de Smith (2014).

Realizada a análise *Pinch*, foram obtidas as curvas compostas, temperatura *Pinch*, consumo mínimo de utilidade quente e fria, tabela problema, cascata energética e grande curva composta. Estes resultados foram obtidos a partir da inserção dos dados das correntes no programa Hint (MARTÍN; MATO, 2008) e na planilha de cálculos apresentada por Kemp (2007).

Avaliação dos resultados da integração energética

Nesta etapa foi realizada uma comparação entre a biorrefinaria com a integração energética proposta neste trabalho, denominado de processo S3, e as biorrefinarias sem integração energética (S1) e com integração de projeto (S2), ambas apresentadas no trabalho de Oliveira (2018). O termo integração de projeto refere-se ao processo comumente encontrado nas usinas, no qual existe integração energética entre algumas correntes de processo.

Os parâmetros de comparação são consumo das utilidades (vapor e de água de resfriamento), excedente de etanol e excedente de energia elétrica. O consumo de utilidades foi obtido a partir da análise *Pinch*. A demanda de energia foi empregada para determinar a

quantidade de vapor economizada no processo com a integração energética proposta neste trabalho em comparação ao processo com integração de projeto. E posteriormente, o quanto esta quantidade de vapor representa em bagaço de cana-de-açúcar (chamado de excedente de bagaço). A equação 1 apresenta o cálculo do excedente de bagaço. O bagaço, por sua vez, pode ser usado na produção de etanol de segunda geração ou de energia elétrica. Deste modo, foi estimado quanto a mais de etanol 2G ou de energia elétrica pode ser produzida com o excedente de bagaço. As comparações em excedente de etanol e energia elétrica foram realizadas com base no total produzido (etanol 1G/2G ou energia elétrica) do processo com integração de projeto, uma vez que é o processo mais próximo ao implementado nas usinas de cana-de-açúcar.

$$b_{ex} = 3600 \cdot \frac{H_{S2} - H_{S3}}{\eta \cdot LHV} \quad (\text{Equação 1})$$

b_{ex} : bagaço excedente (kg/h);

H_{S2} : consumo de vapor no processo com integração de projeto, S2 (kW);

H_{S3} : consumo de vapor no processo com a integração energética proposta neste trabalho, S3 (kW);

η : eficiência da caldeira (especificada neste trabalho em 88%);

LHV: *lower heating value*, denominado de PCI em português (poder calorífico inferior) para o bagaço (kJ/kg).

O excedente de etanol 2G foi estimado a partir de uma regressão não linear baseada em dados da simulação da biorrefinaria empregada neste trabalho. A equação de regressão é apresentada a seguir. A estimativa do excedente de energia elétrica foi realizada com base na metodologia apresentada por Santos (2012).

$$E_{et2G} = -28,928 \left(\frac{b_{ex}}{b_t} \right)^2 + 42,564 \frac{b_{ex}}{b_t} \quad (\text{Equação 2})$$

E_{et2G} : excedente de etanol 2G (m³/h);

b_{ex} : bagaço excedente (kg/h);

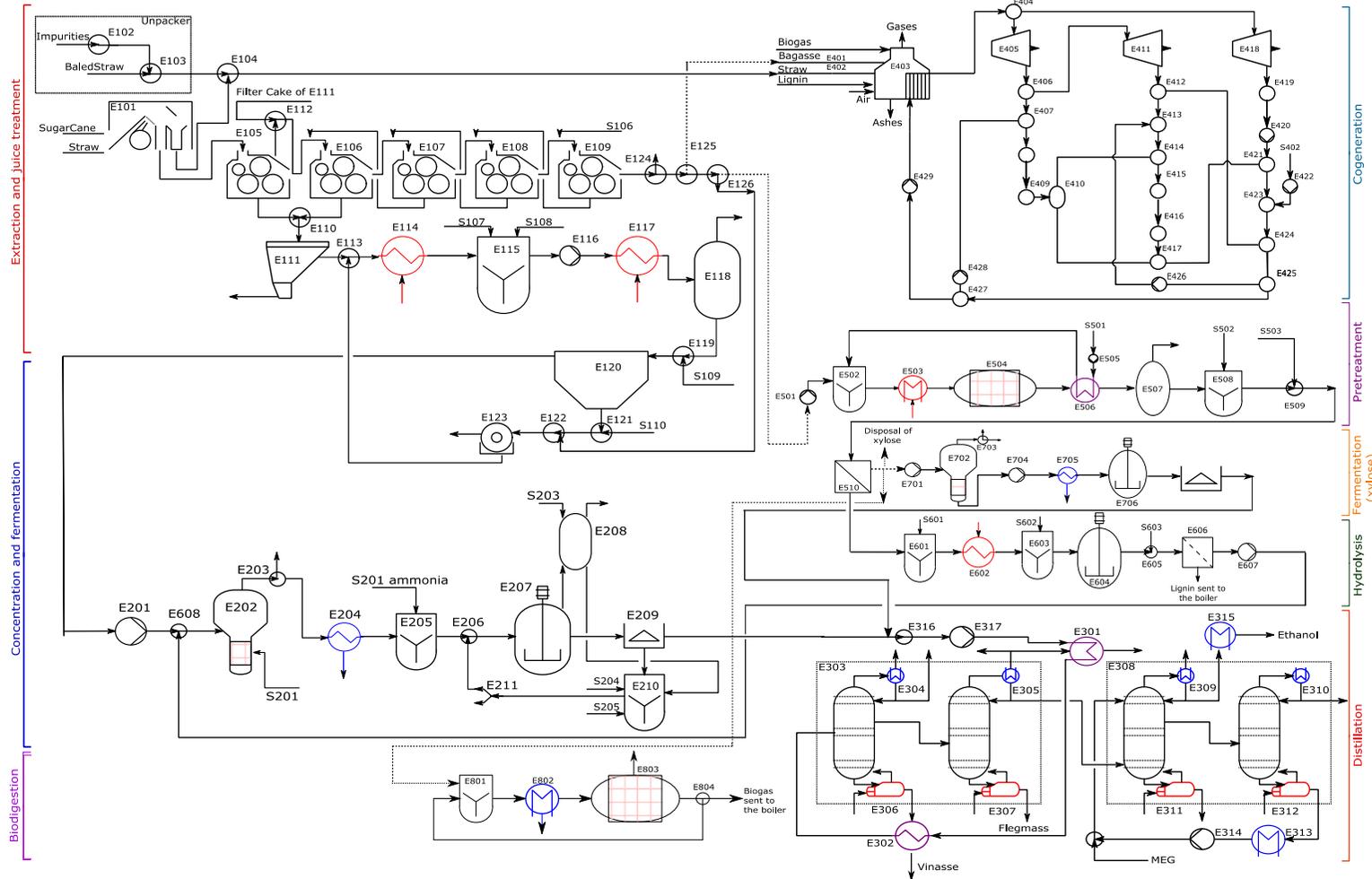
b_t : bagaço total do processo (kg/h).

Resultados e Discussão

Neste trabalho foram realizados três estudos de caso de integração energética de biorrefinarias de cana de açúcar. A biorrefinaria avaliada possui uma capacidade de moagem de 833 t/h de cana-de-açúcar. Mais informações sobre os parâmetros do processo podem ser obtidas em Furlan *et al.* (2012), Furlan *et al.* (2013) e Oliveira (2018). Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do processo.

Os estudos de caso avaliados diferem nas condições de operação. No EC1, nenhuma quantidade de bagaço é desviada para a seção de produção de etanol 2G. Nos EC2 e EC3, 39% e 78% de todo o bagaço é desviado para a produção de etanol 2G, respectivamente. O EC3 representa a quantidade máxima de bagaço que pode ser disponibilizada para a produção de etanol 2G garantindo a autossuficiência energética do processo, ou seja, o restante do bagaço é usado na produção de vapor e energia elétrica, ambos consumidos dentro da biorrefinaria. Oito correntes quentes e 7 correntes frias estão presentes no EC1. Enquanto os EC2 e EC3 têm 10 correntes quentes e 10 correntes frias. A Tabela 1 mostra dados de das correntes para os três estudos de caso. Na tabela, o termo “Corrente” representa a nomenclatura e descrição das correntes de processo. “Equipamento” refere-se ao equipamento de troca térmica indicado na Figura 1 para a corrente especificada, “ T^0 ” e “ T^{final} ” são as temperaturas de entrada e saída, “CP” é a capacidade térmica e “h” é o coeficiente convectivo da corrente.

Figura 1: Etapas para a produção de etanol 1G/2G e energia elétrica.



Fonte: Oliveira (2018).

Tabela 1: Dados das correntes da biorrefinaria de cana.

	Corrente	Equipamento	T ⁰ (K)	T ^{final} (K)	CP (kW/K)	h (kW/m ² K)
EC1						
H1	Caldo de cana concentrado	E204	388	306	638	1,38
H2	Vapor a partir do topo da coluna D (Condensador D)	E304	358	357	11.661	1,38
H3	Vapor a partir do topo da coluna B (Condensador B)	E305/E301	355	354	60.307	1,38
H4	Vapor a partir do topo da coluna extrativa (Condensador DEH1)	E309	351	350	24.592	1,38
H5	Vapor a partir do topo da coluna extrativa (Condensador DEH2)	E310	333	332	2.074	1,38
H6	Vinhaça	E302	385	363	747	1,38
H7	Monoetilenoglicol	E313	421	353	33	1,38
H8	Etanol anidro	E315	351	308	43	1,38
C1	Caldo de cana	E114	321	343	1.256	1,38
C2	Caldo de cana	E117	343	378	1.288	1,38
C3	Vinho	E301/E302	303	362	867.	1,38
C4	Líquido a partir do fundo da coluna A (Refrervedor A)	E306	384	385	67.968	1,38
C5	Líquido a partir do fundo da coluna B1 (Refrervedor B)	E307	381	382	22,466	1,38
C6	Líquido a partir do fundo da coluna extrativa (Refrervedor DEH1)	E311	379	407	352	1,38
C7	Líquido a partir do fundo da coluna extrativa (Refrervedor DEH2)	E312	411	421	335	1,38
EC2						
H1	Caldo de cana concentrado	E204	388	306	724	1,38
H2	Vapor a partir do topo da coluna D (Condensador D)	E304	358	357	13.316	1,38
H3	Vapor a partir do topo da coluna B (Condensador B)	E305/E301	355	354	67.021	1,38
H4	Vapor a partir do topo da coluna extrativa (Condensador DEH1)	E309	351	350	27.298	1,38
H5	Vapor a partir do topo da coluna extrativa (Condensador DEH2)	E310	333	332	2.302	1,38
H6	Vinhaça	E302	385	363	880	1,38
H7	Monoetilenoglicol	E313	421	353	37	1,38

H8	Etanol anidro	E315	351	308	51	1,38
H9	Bagaço pré-tratado	E506	468	353	604	1,38
H10	Xilose	E705	344	313	674	1,38
C1	Caldo de cana	E114	321	343	1.256	1,38
C2	Caldo de cana	E117	343	378	1.288	1,38
C3	Vinho	E301/E302	303	362	1.010	1,38
C4	Líquido a partir do fundo da coluna A (Refervedor A)	E306	384	385	78.239	1,38
C5	Líquido a partir do fundo da coluna B1 (Refervedor B)	E307	381	382	23.622	1,38
C6	Líquido a partir do fundo da coluna extrativa (Refervedor DEH1)	E311	379	407	391	1,38
C7	Líquido a partir do fundo da coluna extrativa (Refervedor DEH2)	E312	411	421	371	1,38
C8	Bagaço + água de embebição	E503	439	468	602	1,38
C9	Água de embebição	E506	303	458	481	1,38
C10	Fração sólida (celulose + lignina)	E602	315	323	237	1,38
EC3						
H1	Caldo de cana concentrado	E204	388	306	816	1,38
H2	Vapor a partir do topo da coluna D (Condensador D)	E304	358	357	15.094	1,38
H3	Vapor a partir do topo da coluna B (Condensador B)	E305/E301	355	354	74.164	1,38
H4	Vapor a partir do topo da coluna extrativa (Condensador DEH1)	E309	351	350	30.174	1,38
H5	Vapor a partir do topo da coluna extrativa (Condensador DEH2)	E310	333	332	2.545	1,38
H6	Vinhaça	E302	385	363	1.028	1,38
H7	Monoetilenoglicol	E313	421	353	41	1,38
H8	Etanol anidro	E315	351	308	53	1,38
H9	Bagaço pré-tratado	E506	468	353	1.247	1,38
H10	Xilose	E705	344	313	1.390	1,38
C1	Caldo de cana	E114	321	343	1.256	1,38
C2	Caldo de cana	E117	343	378	1.288	1,38
C3	Vinho	E301/E302	303	362	1.181	1,38
C4	Líquido a partir do fundo da coluna A (Refervedor A)	E306	384	385	89.594	1,38
C5	Líquido a partir do fundo da coluna B1 (Refervedor B)	E307	381	382	24.776	1,38

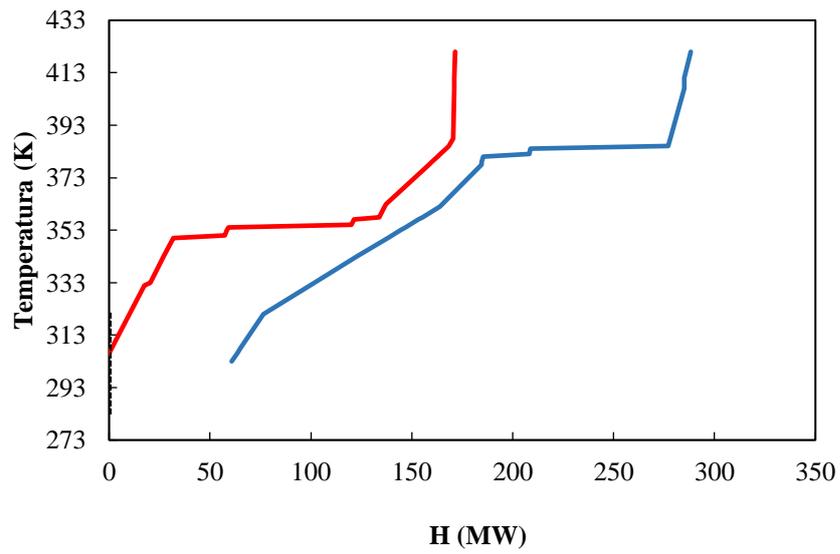
C6	Líquido a partir do fundo da coluna extrativa (Refervedor DEH1)	E311	379	407	432	1,38
C7	Líquido a partir do fundo da coluna extrativa (Refervedor DEH2)	E312	411	421	411	1,38
C8	Bagaço + água de embebição	E503	439	468	1.241	1,38
C9	Água de embebição	E506	303	458	993	1,38
C10	Fração sólida (celulose + lignina)	E602	315	323	488	1,38

Fonte: Oliveira (2018).

Para iniciar a análise *Pinch* foi definido o ΔT_{\min} de 10°C. Este valor foi adotado nos três estudos de caso avaliados. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os diagramas das curvas compostas para este estudo, indicados por S3-EC1, S3-EC2 e S3-EC3. No eixo vertical encontram-se as temperaturas e no eixo horizontal os valores de entalpia. Os diagramas das curvas compostas fornecem as curvas compostas quente (vermelho) e fria (azul). O ponto *Pinch* é identificado onde as curvas compostas se aproximam, ou seja, onde as curvas estão separadas pela diferença mínima de temperatura estabelecida no problema. Assim, o diagrama é dividido em duas regiões, acima e abaixo do *Pinch*. Acima do *Pinch*, onde a curva composta fria ultrapassa a curva composta quente não há possibilidade de troca de energia entre as correntes, sendo necessária uma utilidade quente (vapor). Abaixo do *Pinch*, onde não há sobreposição das curvas é necessária uma utilidade externa fria (água de resfriamento). Portanto, somente onde há sobreposição das curvas composta quente e fria, energia pode ser economizada a partir da troca de calor entre as próprias correntes do processo.

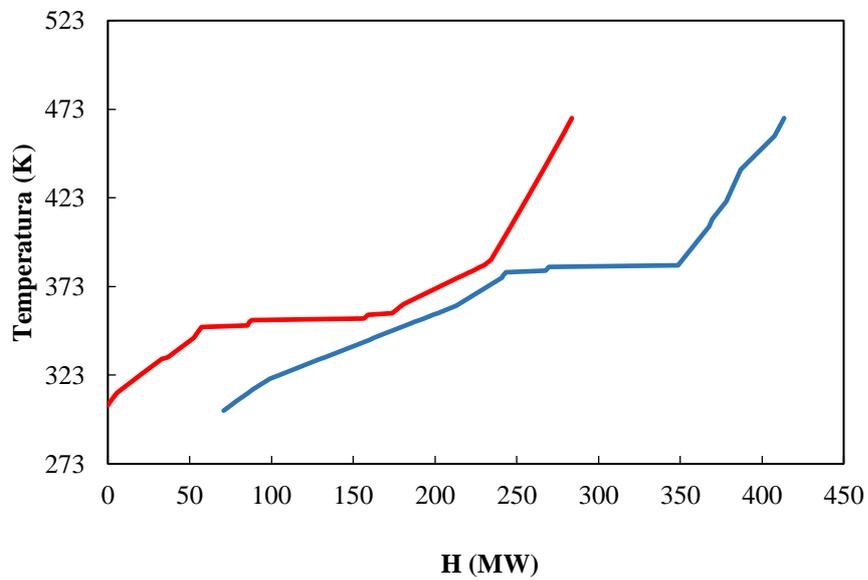
Com base dos resultados da análise *Pinch*, no EC1 pode-se verificar que a quantidade de energia recuperada pela troca de calor entre as correntes é de 110,7 MW e a quantidade de utilidade quente (UQ) e fria (UF) necessárias para o processo é de 116,8 MW e 60,7 MW, respectivamente. A temperatura *Pinch* deslocada do processo é de 80°C e as temperaturas *Pinch* quente e fria são 85°C e 75°C, respectivamente. No EC2 a quantidade de energia recuperada é de 413,5 MW e o consumo de utilidade externa é de UQ = 129,8 MW e UF = 70,8 MW. A temperatura *Pinch* deslocada do processo é igual a 80°C e as temperaturas *Pinch* quente e fria são 85°C e 75°C, respectivamente. No EC3 a quantidade de energia recuperada é de 321,4 MW e o consumo de utilidade externa é de UQ = 145,4 MW e UF = 81,7 MW. A temperatura *Pinch* deslocada do processo é igual a 107°C e as temperaturas *Pinch* quente e fria são 112°C e 102°C, respectivamente.

Figura 2: Diagrama de curva composta (S3-EC1).

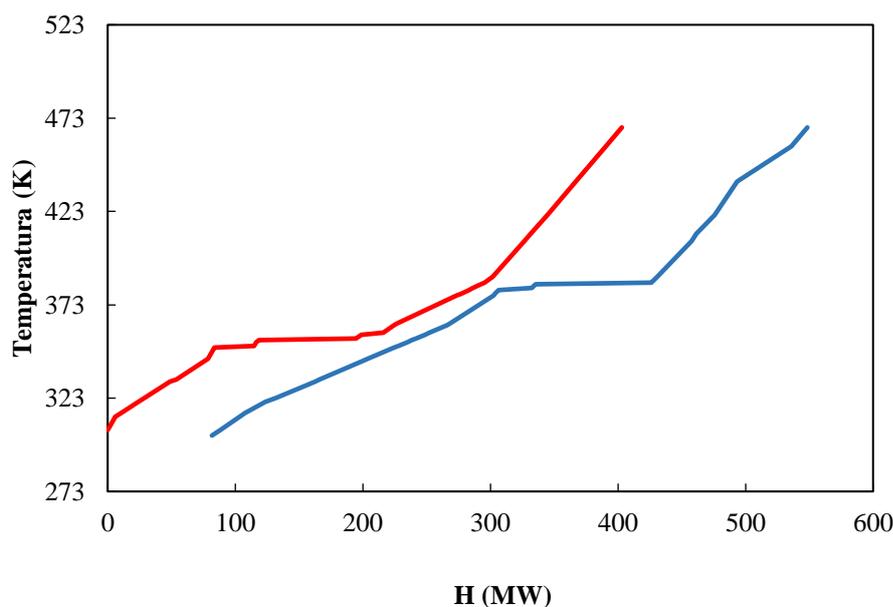


Fonte: Elaborado pelas autoras

Figura 3: Diagrama de curva composta (S3-EC2).



Fonte: Elaborado pelas autoras

Figura 4: Diagrama de curva composta (S3-EC3).

Fonte: Elaborada pelas autoras

Sabe-se que as biorrefinarias de cana-de-açúcar frequentemente possuem integração energética entre algumas correntes. Tais integrações foram determinadas através de estudos anteriores e conhecimento adquirido sobre o processo. Neste estudo, a nível de comparação, considerou-se a integração energética entre as correntes de vinho e vapor do topo da coluna B (equipamento indicado na Figura 1 por E301), entre correntes de vinho e vinhaça (E302) e entre o bagaço pré-tratado e água de embebição (E506). O processo com as integrações energéticas mencionadas é denominado neste trabalho como biorrefinaria com integração de projeto (S2). Enquanto o mesmo processo sem qualquer integração energética é chamado de biorrefinaria sem integração energética (S1). Os dados de comparação referentes aos processos S1 e S2 foram obtidos do trabalho de Oliveira (2018). O processo com a integração energética proposta neste trabalho é identificado pela sigla S3 em cada um dos estudos de caso avaliados. A Tabela 2 mostra o consumo de utilidades nos processos com a integração energética apresentada neste trabalho, bem como dos processos sem integração e com integração de projeto.

A Tabela 3 compara a redução no consumo de utilidade quente e fria do processo com integração energética (S3) em relação aos processos sem integração (S1) e com integração de projeto (S2). Verifica-se que a biorrefinaria com a integração energética proposta neste estudo pode alcançar uma economia de até 69% de utilidade quente e 80% de utilidade fria em relação à biorrefinaria sem qualquer integração e de até 43% de utilidade quente e 57% de utilidade fria em relação à biorrefinaria com integração de projeto, comumente encontrada nas usinas brasileiras. Os resultados demonstram um impacto positivo nos custos de operação, na gestão

de energia e no consumo de recursos naturais, uma vez que tais recursos são usados na produção de utilidades como vapor e água de resfriamento.

Tabela 2: Consumo de utilidades nas biorrefinarias.

Parâmetro	EC1			EC2			EC3		
	S1 ¹	S2 ²	S3 ³	S1 ¹	S2 ²	S3 ³	S1 ¹	S2 ²	S3 ³
UF (MW)	171,5	120,3	60,7	283,7	154,7	70,8	404,1	191,0	81,7
UQ (MW)	227,5	176,4	116,8	342,7	213,7	129,8	466,8	253,7	145,4

Fonte: Elaborada pelas autoras

¹Biorrefinaria sem integração energética.

²Biorrefinaria com integração de projeto.

³Biorrefinaria com a integração energética proposta neste trabalho.

Tabela 3: Comparação da economia em utilidades entre as biorrefinarias.

Parâmetro	EC1		EC2		EC3	
	S3/S	S3/S	S3/S	S3/S	S3/S	S3/S
	1	2	1	2	1	2
UF (%)	65	50	75	54	80	57
UQ (%)	49	34	62	39	69	43

Fonte: Elaborada pelas autoras

A integração energética em biorrefinarias de cana-de-açúcar proporciona além das vantagens supramencionadas, a possibilidade de aumentar a produção de etanol de segunda geração, visto que o menor consumo de vapor na planta permite desviar mais bagaço para o setor de etanol 2G. A Tabela 4 mostra uma estimativa da produção de etanol 1G/2G com a integração energética proposta neste estudo em cada um dos estudos de caso. Uma vez que o aumento na fração de bagaço para a produção de etanol 2G aumenta entre os estudos de caso 1 a 3, a produção de etanol também é maior, e, conseqüentemente, a produção de energia elétrica diminui. Tais resultados foram estimados com base em dados das simulações das biorrefinarias e das equações apresentadas no item 2.3. A Tabela 5 apresenta uma comparação do processo com a integração energética proposta neste trabalho (S3) em relação ao processo comumente encontrado nas usinas, chamado de integração de projeto (S2). Pode-se verificar que é possível alcançar um excedente de produção de etanol de 8,5% e 10,1% nos EC2 e EC3, respectivamente. Visto que o excedente de etanol é calculado com base na economia de bagaço que, por sua vez, é direcionado à produção de etanol 2G, esse valor não foi estimado para o EC1, o qual tem apenas produção de etanol 1G. Na produção de excedente de energia elétrica os incrementos podem chegar a 14,4%, 18,1% e 28,5% nos EC1, EC2, EC3. É importante

mencionar que esses valores indicam um máximo de acréscimo na produção de etanol e energia elétrica com a integração energética apresentada neste estudo, em especial ao que se refere à produção de etanol, dado que a maior disponibilidade de bagaço para a produção de etanol 2G eleva o consumo de vapor dentro da planta. Isto é, o consumo de utilidades dentro da planta é afetado pela fração de bagaço que é desviada para a produção de etanol 2G. Contudo, tais resultados são importantes para demonstrar o potencial da integração energética dentro de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar e auxiliar na otimização do processo. Além disso, este trabalho apresenta um resultado inédito, uma vez que outros estudos não estimaram o possível incremento na produção de etanol ou de eletricidade que pode ser atingido com a integração energética.

Tabela 4: Produção de etanol e energia elétrica nas biorrefinarias.

	EC1	EC2	EC3
	S3	S3	S3
Etanol 1G/2G (m³/h)	74,1	93,7	98,8
Energia elétrica (MW)	177,4	110,4	98,3

Fonte: Elaborada pelas autoras

Tabela 5: Comparação na produção de etanol e energia elétrica entre as biorrefinarias.

	EC1	EC2	EC3
	S3/S2	S3/S2	S3/S2
Excedente de etanol (m³/h)	-	7,4	9,1
Excedente de energia elétrica (MW)	22,3	16,9	21,8
Excedente de etanol (%)	-	8,5	10,1
Excedente de energia elétrica (%)	14,4	18,1	28,6

Fonte: Elaborada pelas autoras

Conclusão

Este estudo teve por objetivo realizar a integração energética de biorrefinarias virtuais de cana. Os resultados demonstraram que é possível reduzir o consumo de energia em até 43% de utilidade quente e 57% de utilidade fria em relação à biorrefinaria com especificações mais próximas ao processo encontrado nas usinas brasileiras. Um excedente de até 10,1% de etanol ou 28,6% de energia elétrica pode ser alcançado. As estimativas demonstram o potencial de otimização de processo das biorrefinarias de cana-de-açúcar que ainda pode ser alcançado, o que pode auxiliar na viabilização da produção de etanol de segunda geração, redução do consumo de recursos naturais e emissão de poluentes. Contudo, este ainda é um estudo preliminar que pode complementado com a síntese da rede de trocadores de calor, estimativa

dos custos de capital envolvidos e simulação dos processos com as redes projetadas, a fim de avaliar a viabilidade técnica e econômica.

Referências

EPE. **Matriz energética e elétrica**. 2016. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acessado em: 11 mai. 2020.

FURLAN, F. F.; COSTA, C. B. B.; CRUZ, A. J. G.; SECCHI, A. R.; SOARES, R. P.; GIORDANO, R. C. Integrated tool for simulation and optimization of a first and second generation ethanol-from-sugarcane production plant. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 30, p. 81–85, 2012.

FURLAN, F. F.; TONON FILHO, R.; PINTO, F. H.; COSTA, C. B.; CRUZ, A. J.; GIORDANO, R. L.; GIORDANO, R. C. Bioelectricity versus bioethanol from sugarcane bagasse: is it worth being flexible? **Biotechnology for Biofuels**, v. 6, n. 1, p. 142, 2013.

KLEMEŠ, J. J.; KRAVANJA, Z. Forty years of Heat Integration: *Pinch* Analysis (PA) and Mathematical Programming (MP). **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 2, n. 4, p. 461–474, 2013.

KLEMEŠ, J. J.; VARBANOVA, P. S.; KRAVANJA, Z. Recent developments in Process Integration. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 91, n. 10, p. 2037–2053, 2013.

MARTÍN, A.; MATO, A. F. Hint: An educational software for heat exchanger network design with the *Pinch* method. **Education for chemical engineers**, v. 3, p. e6-e14, 2008.

MORAR, M.; AGACHI, P. S. Review: Important contributions in development and improvement of the heat integration techniques. **Computers & Chemical Engineering**, v. 34, n. 8, p. 1171–1179, 2010.

OLIVEIRA, C. M.; CRUZ, A. J. G.; COSTA, C. B. B. Improving second generation bioethanol production in sugarcane biorefineries through energy integration. **Applied Thermal Engineering**, v. 109, p. 819–827, 2016.

OLIVEIRA, C. M.; PAVÃO, L. V.; RAVAGNANI, M. A. da S. S.; CRUZ, A. J. G.; COSTA, C. B. B. Process Integration of a Multiperiod Sugarcane Biorefinery. **Applied Energy**, v. 213, p. 520-539, 2018.

OLIVEIRA, C. M.; B. Energy Integration of Sugarcane Biorefineries with Multiperiod Operation. **Tese** (Doutorado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2018.

PARDALOS, P. M.; DU, D.-Z. **Handbook of combinatorial optimization**. 1. ed. [s.l.] Kluwer Academic Publishers, 1998.

PINA, E. A.; PALACIOS-BERECHE, R.; CHAVEZ-RODRIGUES, M. F.; ENSINAS, A. V.; MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Thermal integration of different plant configurations of sugar and ethanol production from sugarcane. **Chemical Engineering Transactions**, v. 39, p. 1147–1152, 2014.

PINA, E. A.; PALACIOS-BERECHE, R.; CHAVEZ-RODRIGUEZ, M. F.; ENSINAS, A. V.; MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations. **Energy**, 2015.

RAVAGNANI, M. A. S. S.; CABALLERO SUÁREZ, J. A. **Redes de cambiadores de calor**. [s.l.] Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2012.

SANTOS, F. A. Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia), Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica, Universidade de São Paulo, 2012.

SIENIUTYCZ, S.; JEŻOWSKI, J. **Energy optimization in process systems and fuel cells**. [s.l.] Elsevier Science, 2013.

SMITH, R. **Chemical Process: Design and Integration**. [s.l.] Wiley, 2014.