

Síntese de rede de trocadores de calor para uma biorrefinaria de cana-de-açúcar

Cássia Maria de Oliveira^a; Antonio José Gonçalves Cruz^b; Caliane Bastos Borba Costa^c

^aUniversidade Federal de São Carlos, cassiaoliveira@ifsp.edu.br

^bUniversidade Federal de São Carlos, ajgcruz@ufcar.br

^cUniversidade Estadual de Maringá, cbbcosta@ufscar.br

Resumo: O Brasil tem grande importância no mercado de biocombustíveis, especialmente na produção de etanol a partir de cana-de-açúcar. Variações nos preços da energia elétrica e do etanol podem motivar variações nas condições operacionais do processo integrado da biorrefinaria de cana-de-açúcar, a qual produz etanol de primeira e segunda geração e energia elétrica. Contudo, a rede de trocadores de calor (RTC) de tal processo deve ser capaz de atender a essas variações. Este trabalho teve como objetivo a síntese de uma RTC com múltiplos períodos de operação em uma biorrefinaria de cana-de-açúcar, sendo que os períodos indicam diferentes condições de operação da planta. Para cada período, um problema de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) foi resolvido para minimizar o Custo Total Anualizado (CTA) e mecanismos de compartilhamento de tempo foram utilizados para integrar as RTCs de todos os períodos em uma RTC multiperíodica. Os problemas de otimização foram resolvidos em dois níveis, utilizando os algoritmos Busca Tabu e Otimização por Exame de Partículas. Para o processo com a rede multiperíodica, a economia de CTA e na demanda de vapor pode alcançar valores acima 44% e 41% em relação ao processo comumente encontrado nas usinas brasileiras, respectivamente. A economia na demanda de vapor permite desviar mais bagaço para a produção de etanol de segunda geração ou de energia elétrica. Além disso, a integração energética em biorrefinarias oferece melhor gerenciamento da energia e redução nos custos de operação e de capital.

Palavras-chave:

Etanol 1G/2G, Integração energética, Programação Não Linear Inteira Mista, Otimização por Exame de Partículas, Busca Tabu.

Introdução

Em busca de diversificação da matriz energética, conservação e melhor aproveitamento dos recursos naturais, o Brasil tornou-se o segundo maior produtor de etanol do mundo. No Brasil, o etanol é produzido principalmente a partir do caldo de cana-de-açúcar, em um processo conhecido como processo de produção de etanol de primeira geração (1G). Nas últimas décadas estudos têm demonstrado o potencial da utilização do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração (2G). No entanto, esta ainda não é uma tecnologia consolidada e requer estudos que proponham melhorias a fim de permitir uma produção integrada de etanol 1G/2G mais sustentável e econômica.

Dentre as técnicas de integração de processos que visam propor melhorias aos processos em termos econômicos e ambientais, tem-se a integração energética através da síntese de rede de

trocadores de calor (RTC). Embora esta área seja explorada desde a década de 1970, muitas das contribuições apresentadas não consideram oscilações no processo, o que pode ocorrer devido às mudanças nas condições ambientais, qualidade das matérias-primas ou dos produtos, demanda de mercado e distúrbios no processo. Para lidar com este problema, foram desenvolvidas metodologias para a síntese de redes multiperíodicas, as quais operam em condições estabelecidas. Essas condições de operação são denominadas de períodos e podem apresentar alterações na temperatura, capacidade calorífica, coeficiente convectivo de transferência de calor e/ou número de correntes.

Os problemas de síntese de RTC podem ser resolvidos por métodos determinísticos ou metaheurísticos. Uma alternativa para resolver problemas de síntese de RTC é a otimização em dois níveis via abordagens metaheurísticas híbridas, as quais demonstraram melhorias em projetos de RTC quando comparadas aos resultados com algoritmos determinísticos. Estratégias para a síntese de RTC com abordagens metaheurísticas híbridas foram utilizadas com o Algoritmo Genético (Lewin, 1998), Evolução Diferencial (Yerramsetty e Murty, 2008) e Enxame Caótico de Formigas (Zhang, Cui e Peng, 2016) em ambos os níveis do problema. Recentemente, estudos combinaram os métodos Algoritmo Genético e Otimização por Enxame de Partículas (Pavão, Costa e Ravagnani, 2016), Recozimento Simulado e Otimização por Enxame de Partículas (Pavão, Costa e Ravagnani, 2017) e Recozimento Simulado e Otimização por Fogos de Artifício (Pavão et al., 2017).

A síntese de RTC em biorrefinarias tem como um dos principais objetivos reduzir o consumo de vapor no processo. Assim, menor quantidade de bagaço precisa ser queimada para gerar vapor e o excedente pode ser desviado para a produção de etanol 2G ou de energia elétrica, dependendo da demanda de mercado. 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. O presente trabalho apresenta um estudo de caso de síntese de RTC multiperíodica em uma biorrefinaria de cana-de-açúcar, o qual não foi explorado em outros trabalhos, bem como a utilização de uma nova abordagem metaheurística híbrida para a síntese de RTC. Esta abordagem combina os algoritmos Busca Tabu e Otimização por Enxame de Partículas e pode ser usada para problemas de síntese de RTC de larga escala.

Metodologia

O problema de síntese de RTC foi resolvido via modelo matemático de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM), no qual o Custo Total Anualizado (CTA) da RTC é minimizado.

A fim de reduzir a complexidade da síntese de RTC multiperiódica, um problema de PNLIM foi resolvido para cada período, separadamente. A superestrutura utilizada neste estudo baseia-se na superestrutura de Yee e Grossmann (1990), porém foi considerada mistura não isotérmica. Detalhes do modelo matemático podem ser consultados em Oliveira et al. (2018). Os valores mínimos e máximos para as áreas de trocadores de calor são iguais a $1,0 \text{ m}^2$ e 5.500 m^2 , respectivamente (essa suposição visa tornar a RTC mais factível do ponto de vista prático). Mais hipóteses incluem calor latente equivalente a uma grande capacidade de calor em uma pequena diferença de temperatura (geralmente igual a $1,0 \text{ K}$), capacidades térmicas específicas constantes, coeficientes convectivos de transferência de calor constante, trocadores de calor em contra corrente, mistura não isotérmica, não consideração de efeitos de incrustação e da queda de pressão e não inclusão de custos de tubulação na função de CTA. Essas suposições foram usadas neste estudo para simplificar os cálculos.

Abordagens metaheurísticas indicam uma tendência recente na área de integração energética e têm alcançado soluções promissoras. Neste trabalho, uma nova abordagem metaheurística híbrida foi usada para resolver o modelo de PNLIM em cada período. Este método combina os algoritmos Busca Tabu (BT) no nível superior para as variáveis inteiras e Otimização por Enxame de Partículas (OEP) no nível inferior para as variáveis reais. A Tabela 1 apresenta os parâmetros de ajuste para BT e OEP. Estes valores foram escolhidos com base em testes preliminares realizados pelos presentes autores. Para integrar as redes de trocadores de calor dos períodos em uma única rede, mecanismos de tempo compartilhado, apresentados por Jiang e Chang (2013), foram utilizados. O modelo e os métodos matemáticos, bem como o procedimento de integração das redes foram escritos em linguagem C++. O Ambiente de Desenvolvimento Integrado Dev C++ e o Compilador GCC foram utilizados para desenvolvimento e execução do código, os quais são programas livres. Estas são características interessantes neste trabalho, uma vez que vários estudos usam métodos matemáticos incorporados em programas comerciais (por exemplo, DICOPT++ do GAMS).

Tabela 1. Parâmetros de ajuste para os algoritmos BT e OEP.

Busca Tabu		Otimização por Enxame de Partículas						
BTmax	TL	N(s)	Iter	Npt	w_{\min}	w_{\max}	c_1	c_2
2	35	I·J·K	100	300	0.4	0.9	1.1	1.1

* BTmax: número de iterações sem alteração da melhor solução; TL: tamanho da vizinhança; N(s): tamanho da população; Iter: número de iterações; Npt: número de partículas; w_{\min} : peso de inércia mínimo; w_{\max} : peso de inércia máximo; c_1 : coeficiente de cognição e c_2 : coeficiente de comportamento social; I: número de correntes quentes; J: número de correntes frias; K número de estágios da superestrutura.

Resultados e Discussão

Neste estudo, a biorrefinaria de cana-de-açúcar refere-se ao processo de produção de etanol 1G/2G e energia elétrica. A fração líquida da etapa de pré-tratamento da biomassa (pré-tratamento hidrotérmico), rica em xilose, é usada na produção de biogás, sendo empregado como uma das fontes de energia da caldeira. A fim de comparar os processos, neste trabalho, algumas denominações foram realizadas. O diagrama representado na Figura 1 corresponde ao processo de produção de etanol 2G integrado ao processo de produção de etanol 1G comumente encontrado nas usinas brasileiras, onde já existe integração energética entre algumas correntes. Esta biorrefinaria é nomeada de “processo com integração de projeto” (S2). Em biorrefinarias sem qualquer integração energética, todo aquecimento e resfriamento de correntes é fornecido por utilidades quentes e frias, o que é denominado de “processo sem integração energética” (S1). Além disso, outras duas terminologias para biorrefinarias são utilizadas neste estudo. A biorrefinaria com a RTC projetada individualmente para cada período é denominada de “processo com a RTC de período único” (S3) e a biorrefinaria com a RTC multiperiódica é nomeada de “processo com a RTC multiperiódica” (S4).

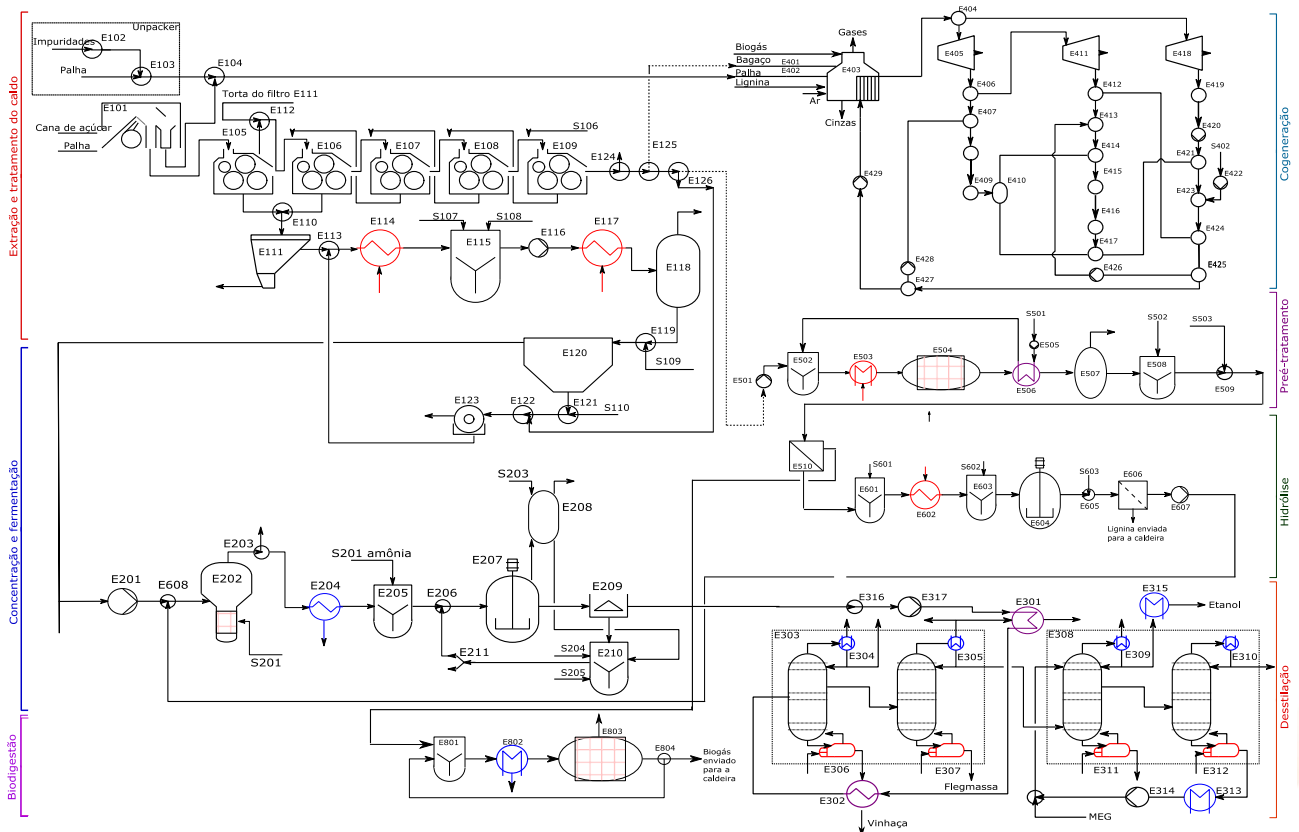


Figura 1. Diagrama do processo de produção de etanol 1G/2G e energia elétrica.

No Período 1, todo o bagaço é desviado para a seção de cogeração de energia (ou seja, não há produção de etanol 2G). No Período 3, 78% de todo o bagaço é desviado para a produção de etanol 2G. Este valor é a máxima quantidade de bagaço que pode ser desviada para a seção de etanol 2G, garantindo a autossuficiência energética do processo. No Período 2, metade da fração máxima de bagaço, ou seja, 39% de todo o bagaço é desviado para a produção de etanol 2G. Oito correntes quentes, 7 correntes frias e 4 estágios da superestrutura estão presentes no Período 1, o que implica em um modelo matemático com 896 variáveis. O número de variáveis no modelo matemático é quase o dobro (1.600 variáveis) nos Períodos 2 e 3, pois eles têm 10 correntes quentes, 10 correntes frias e 4 estágios. A Tabela 2 apresenta os dados das correntes para os três períodos.

Neste trabalho, somente uma utilidade quente (vapor saturado a 17,4 bar) e uma utilidade fria (água de resfriamento a 298 K, a qual é aquecida até 305 K) foi considerada no modelo de síntese de RTC. Os custos de utilidade quente (c_{hu}) e de utilidade fria (c_{cu}) foram estimados em 96 USD/kW.ano e 50 USD/kW.ano, respectivamente. Os coeficientes para custos anuais de investimento em trocadores de calor são $a = 4.897$ USD/ano, $b = 33$ USD / $m^{1,56}$.ano e $c = 0,78$.

Tabela 2. Dados para as correntes da biorrefinaria de cana-de-açúcar.

Corrente	Equipamento	T ⁰ (K)	T ^{final} (K)	CP (kW/K)			h (kW/m ² K)	
				Período 1	Período 2	Período 3		
H1	Caldo concentrado	E204	388	306	638	724	816	1.38
H2	Vapor do topo da Coluna D (Condensador D)	E304	358	357	11,661	13,316	15,094	1.38
H3	Vapor do topo da Coluna B (Condensador B)	E305/E301	355	354	60,307	67,021	74,164	1.38
H4	Vapor do topo da coluna extrativa (Condensador DEH1)	E309	351	350	24,592	27,298	30,174	1.38
H5	Vapor do topo da coluna de recuperação (Condensador DEH2)	E310	333	332	2,074	2,302	2,545	1.38
H6	Vinhaça	E302	385	363	747	880	1,028	1.38
H7	Monoetilenoglicol	E313	421	353	33	37	41	1.38
H8	Etanol anidro	E315	351	308	43	51	53	1.38
H9	Bagaço pré-tratado	E506	468	353	-	604	1,247	1.38
H10	Xilose	E705	344	313	-	674	1,390	1.38
C1	Caldo	E114	321	343	1,256	1,256	1,256	1.38
C2	Caldo	E117	343	378	1,288	1,288	1,288	1.38
C3	Vinho	E301/E302	303	362	867	1,010	1,181	1.38
C4	Líquido do fundo da Coluna A (Refervedor A)	E306	384	385	67,968	78,239	89,594	1.38
C5	Líquido do fundo da Coluna B1 (Refervedor B)	E307	381	382	22,466	23,622	24,776	1.38
C6	Líquido do fundo da coluna extrativa (Refervedor DEH1)	E311	379	407	352	391	432	1.38
C7	Líquido do fundo da coluna de recuperação (Refervedor DEH2)	E312	411	421	335	371	411	1.38
C8	Bagaço + água de embebição	E503	439	468	-	602	1,241	1.38
C9	Água de embebição	E506	303	458	-	481	993	1.38
C10	Fração sólida (celulose + lignina)	E602	315	323	-	237	488	1.38

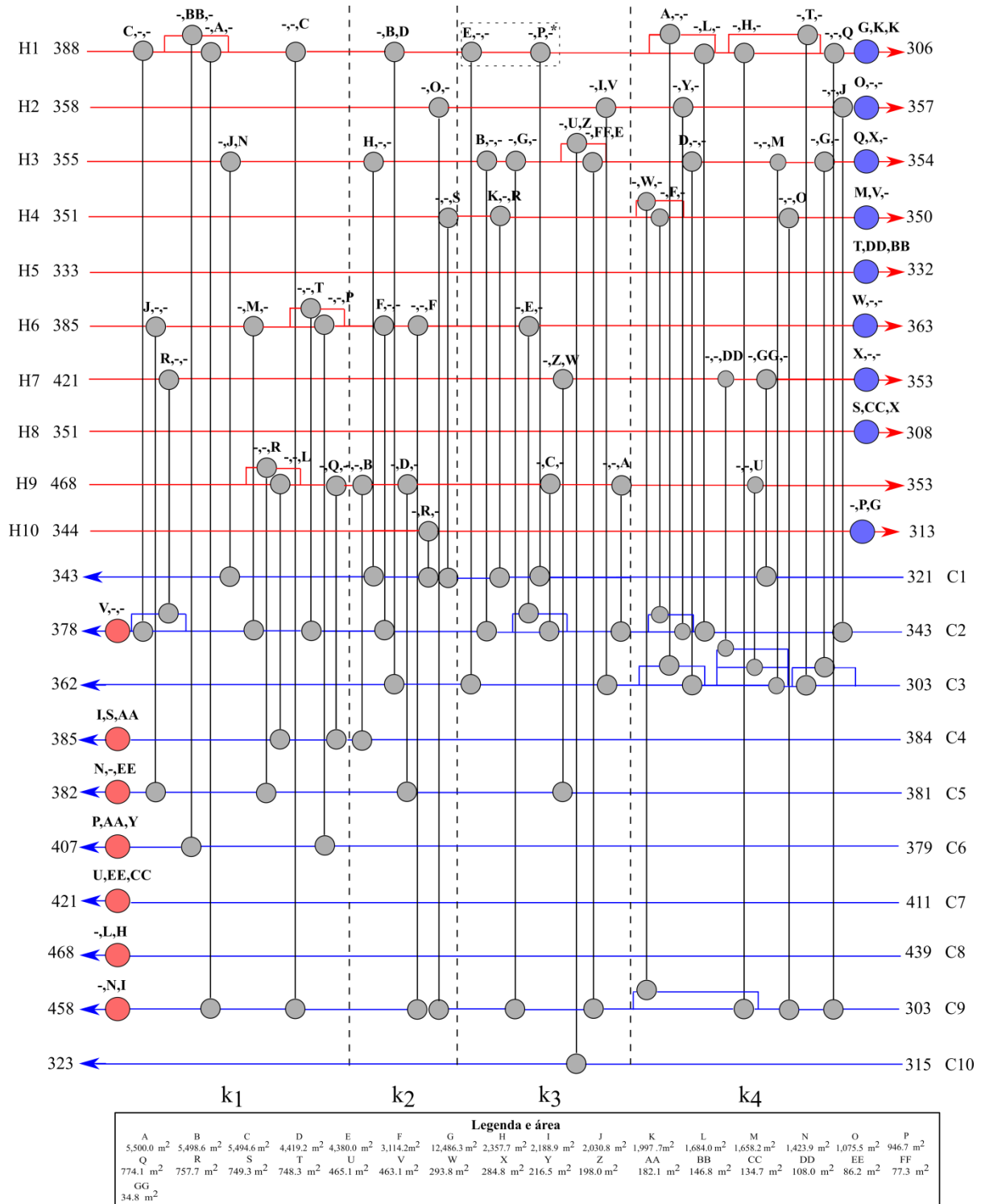


Figura 2. Rede multiperódica.

Para biorrefinaria sem integração energética (S1), o CTA é de 30,5, 47,2 e 65,1 milhões de USD/ano para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente. No processo com integração energética de

projeto (S2), o CTA é de 23,0, 28,4 e 34,1 milhões de USD/ano, respectivamente. Para a integração energética, o tempo médio de processamento do algoritmo foi de 25, 84 e 56 minutos nos períodos 1, 2 e 3, respectivamente. O CTA do processo com a RTC de período único (S3) é de 12,7, 14,2 e 16,8 milhões de USD/ano para esses períodos. A Tabela 3 apresenta o número de equipamentos de troca térmica, área e custos para cada período de operação.

Para a RTC multiperiódica (S4), apresentada na Figura 2, o custo de capital estimado é de 468.916 USD/ano com área total de 51.976,9 m² e 33 equipamentos de troca térmica. O custo operacional e o CTA da HEN multiperiódica são de 14.184.039 USD/ano e 14.652.954 USD/ano, respectivamente, na situação hipotética em que os três períodos têm o mesmo tempo de operação. Há uma superdimensionamento de área de 102%, 23% e 3% para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente. Em termos de economia, o processo com a RTC projetada para operar nos três períodos apresenta uma redução no CTA de 58%, 69% e 74% quando comparado ao processo sem integração energética para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente. O processo com a RTC multiperiódica apresenta redução no CTA de 44%, 50% e 51% quando comparado ao processo com integração de projeto para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente. Além disso, para esses processos, as economias de vapor chegam a 54%, 67% e 71% quando comparadas ao processo sem integração energética, e 41%, 46% e 47% quando comparadas ao processo com integração projeto para os Períodos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Número de equipamentos de troca térmica, área total, custo de capital (CC), custo operacional (CO) e custo total anualizado (CTA) para a RTC de período único.

	Unidades	Área total requerida (m ²)	CC (USD/ano)	CO (USD/ano)	Solução de CTA para a rede projetada individualmente (USD/ano)
Período 1	24	25.99,1	279.117	12.468.797	12.747.915
Período 2	33	42.348,0	424.612	13.737.335	14.161.947
Período 3	31	50.440,1	447.269	16.345.985	16.793.254

Conclusão

A indústria da cana-de-açúcar no Brasil é responsável por colocar o Brasil em segundo lugar na lista dos maiores produtores de etanol do mundo. Assim, a redução dos custos relacionados à demanda de energia nos processos de produção de etanol é importante para a área. A economia no CTA pode chegar a 74% no processo com a RTC multiperiódica quando comparada ao processo sem integração energética e a 51% quando comparado ao processo com a integração de projeto. Além disso, o processo com a RTC multiperiódica pode economizar até 71% e até 47% de vapor em relação a processos sem integração energética e com integração energética de projeto,

respectivamente. A redução específica na demanda de vapor permite aumentar a produção de etanol 2G. Além disso, a integração energética proporciona melhor aproveitamento dos recursos ambientais e segurança energética. Como consequência, todas as melhorias obtidas pela integração energética em biorrefinarias contribuem com o processo de produção de etanol 1G/2G e energia elétrica. Além disso, o método híbrido apresentado neste trabalho, combinando os algoritmos BT e OEP, mostrou-se eficiente para resolver problemas de síntese de RTC em larga escala.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio financeiro da FAPESP (Processo 2013/21343-3) e CAPES, ao PPGEQ-UFSCar e ao IFSP.

Referências

- LEWIN, D. R. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization — II.: The synthesis of cost-optimal networks. *Computers & Chemical Engineering*, v. 22, p. 1387–1405, 1998.
- 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.
- PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A. da S. S. Automated heat exchanger network synthesis by using hybrid natural algorithms and parallel processing. *Computers & Chemical Engineering*, v. 94, p. 370–386, 2016.
- PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A. da S. S.; JIMÉNEZ, L. Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization. *AIChE Journal*, v. 63, n. 5, p. 1582–1601, 2017.
- PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A. S. S. Heat Exchanger Network Synthesis without stream splits using parallelized and simplified Simulated Annealing and Particle Swarm Optimization. *Chemical Engineering Science*, v. 158, p. 96–107, 2017.
- YEE, T. F.; GROSSMANN, I. E. Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, v. 14, p. 1165–1184, 1990.
- YERRAMSETTY, K. M.; MURTY, C. V. S. Synthesis of cost-optimal heat exchanger networks using differential evolution. *Computers & Chemical Engineering*, v. 32, n. 8, p. 1861–1876, 2008.
- ZHANG, C.; CUI, G.; PENG, F. A novel hybrid chaotic ant swarm algorithm for heat exchanger networks synthesis. *Applied Thermal Engineering*, v. 104, p. 707–719, 2016.