



ESTUDO DE CASO PRELIMINAR DA APLICAÇÃO DO MÉTODO PINCH EM UMA MÁQUINA DE PRODUÇÃO DE PAPEL

¹ Bárbara Gonçalves Prates (Universidade de Vassouras) – babi_26@hotmail.com; ¹ Hídila Souza Teixeira da Silva (Universidade de Vassouras) – hidila2@gmail.com; ¹ Camilla Rocha de Oliveira Fontoura (Universidade de Vassouras) – camilla.rchfontoura@gmail.com; ¹ Elisa Barbosa Marra (Universidade de Vassouras) – elisabmarra@gmail.com; ¹ Cristiane de Souza Siqueira Pereira (Universidade de Vassouras) – crispereirauss@gmail.com; ² Pedro Ricciardone (PEA/UFRJ) – pedroricciardone@gmail.com; ² Fernando Luiz Pellegrini Pessoa (UFRJ) – fernando.pessoa@fieb.org.br

Resumo:

A indústria de papel é essencial para o desenvolvimento econômico do Brasil. As principais mudanças tecnológicas são resultantes do aperfeiçoamento de equipamentos e técnicas, dessa forma, um fator relevante na estruturação do custo final dos produtos é o consumo de energia. O objetivo do trabalho foi elaborar um estudo de caso sobre a aplicação dessa ferramenta de integração energética em uma máquina de produção de papel. Para levantamento de informações foi realizada uma coleta de dados na empresa através dos operadores e análise documental do processo. Para construção do diagrama de troca térmica e cálculo da quantidade mínima de trocadores foi utilizado o método heurístico e a comparação dos resultados na simulação dos softwares Hint e ProSimPlus.

Palavras-Chaves: *Pinch*; integração de processos; ProSimPlus; trocador de calor; *Hint*

PRELIMINARY CASE STUDY OF THE APPLICATION OF THE PINCH METHOD IN A PAPER PRODUCTION MACHINE

Abstract:

The paper industry is essential for Brazil's economic development. The main technological changes are the result of the improvement of equipment and techniques, thus, a relevant factor in structuring the final cost of the products is the energy consumption. The objective of this work was to elaborate a case study on the application of this energy integration tool in a papermaking machine. In order to gather information, a data collection was performed in the company from the operators and documentary analysis of the process. For the construction of the thermal exchange diagram and calculation of the minimum number of heat exchangers, the heuristic method was used and the comparison results in the simulation of the softwares Hint and ProSimPlus.

Keywords: *Pinch*; process integration; ProSimPlus; heat exchanger; *Hint*



1. INTRODUÇÃO

O segmento de papel e celulose colabora de forma essencial para o desenvolvimento econômico do Brasil. Como seu processo se estabeleceu em um mercado de grande competitividade e globalização, as principais mudanças tecnológicas ocorridas nos últimos anos são resultantes do aprimoramento de equipamentos e técnicas, com a finalidade de se obter tecnologias mais eficientes. Em 2014, o Brasil se encontrava em 9º lugar no ranking de produção deste mesmo ramo, e em 2018, verifica-se que este setor ainda continua significativo na economia brasileira [1,2].

Um fator de grande relevância na estruturação do custo final dos produtos é o consumo de energia. Por essa razão, a crise energética nos anos 70 e o aumento da competitividade global, foram grandes propulsoras ao aumento da eficiência dos processos produtivos relacionadas diretamente à redução do seu consumo energético [3].

A Integração de Processos (IP) é um termo que, desde o surgimento vem crescendo fortemente no âmbito da engenharia de processos. Os benefícios de sua aplicação traduzem-se na maior parte dos casos em processos mais competitivos e atualizados em várias áreas do ramo industrial, além de exercer um papel decisivo na prevenção de danos ambientais. Portanto, pode-se dizer que a integração energética de processos tem como finalidade o aproveitamento do potencial térmico do processo, o que conduz à menor necessidade de utilidades exteriores, ou seja, quanto menor for o consumo de energia, menor é a geração de resíduos [4,5].

Desse modo, um exemplo de integração energética, ocorre por meio dos fluxos de processo onde é realizada através de sequência de trocadores de calor, os quais recuperam energia entre as correntes do processo, transferindo o calor excedente das correntes quentes para as correntes frias, operando assim a troca de calor. O aproveitamento do potencial térmico do processo é de fundamental importância [6,7].

Por isso, entre os métodos de elaboração para a otimização de rede de trocadores de calor (RTC) estão inclusos: técnicas computacionais, utilizando simuladores e conceitos termodinâmicos inseridos às regras heurísticas onde a aplicação desses conceitos e regras acarretou no desenvolvimento de uma tecnologia de fácil aplicação, mais conhecida como tecnologia *Pinch*. Em virtude disso, tornou-se mundialmente conhecida [5-7].

Portanto, este trabalho apresenta uma análise preliminar da avaliação do método *Pinch* em uma rede de trocadores de calor em uma unidade fabril de produção de papel, com o objetivo principal de analisar o método e sua eficiência dentro do problema estipulado.

2. METODOLOGIA

2.1. Obtenção dos dados do processo

Inicialmente, realizou-se um levantamento de dados do processo avaliado, tais como especificação técnica dos trocadores de calor, instruções operacionais, banco de dados contendo o histórico de operação da linha de produção, além de dados coletados com os colaboradores da indústria. A empresa possui diversas



máquinas produtoras de papel e com diversos trocadores nas diferentes etapas de processo.

Para o presente estudo e análise inicial, considerou-se apenas uma máquina produtora de papel que possui em sua operação 4 trocadores de calor. Nesta etapa, observou-se que os trocadores de calor da linha de produção estudada apresentavam correntes quentes que precisavam de resfriamento e que os mesmos operavam em malha aberta. Então, de acordo com os dados disponibilizados pela empresa, foi possível elaborar a Tabela 1 que contém os valores das correntes presentes no processo avaliado para a posterior aplicação do método *Pinch*. As utilidades utilizadas no processo são: ar, óleo lubrificante e água.

Tabela1. Dados de temperatura e vazão dos trocadores de calor

Corrente	T entrada (°C)	T saída (°C)	Vazão (kg/s)	Condição
1	55,00	34,00	2,19	Quente
2	15,00	23,00	3,33	Fria
3	40,00	30,00	2,19	Quente
4	14,50	20,00	3,33	Fria
5	21,00	15,40	0,01	Quente
6	12,60	14,90	1,78	Fria
7	23,00	17,20	0,01	Quente
8	12,60	14,70	1,43	Fria

2.2. Aplicação do método *Pinch* – método heurístico

Os cálculos do método heurístico proposto por Gundepsen [8], foram realizados em uma planilha de Excel. Algumas premissas necessárias à aplicação do método são necessárias como a escolha de um ΔT_{\min} , que é de grande importância, pois todos os passos posteriores estão correlacionados a ele. Por isso, é importante que se tenha um valor de ΔT_{\min} que auxilie na diminuição do custo da rede de trocadores de calor [8,9].

2.3. Aplicação do método *Pinch* – simulação

Nesta etapa, os cálculos desenvolvidos em uma planilha de Excel foram corroborados através da simulação computacional utilizando o simulador Hint e ProSimPlus. O simulador Hint foi desenvolvido pela Faculdade de Ciências da Universidade de Valladolid, é um software educacional, disponível em versão gratuita que utiliza a metodologia *Pinch* para estudos energéticos de um processo industrial [10]. Já o simulador ProSimPlus é um software pago e possui o Simulis *Pinch*, este permite uma aplicação fácil da tecnologia *Pinch*, a fim de encontrar as melhores trocas de energia possíveis entre os fluxos e determinar seu desempenho máximo de energia, estimando a eficiência energética real do processo [12].

Inicialmente, um fluxograma da RTC foi identificado incluindo as correntes de operação com as temperaturas de entrada e saída e vazões mássicas de cada correntes. Para efeito de comparação, foi utilizado o software Hint. Em ambos os simuladores os resultados são disponibilizados através de gráficos, como por exemplo, curvas compostas e diagramas em cascata [10].



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de demonstrar as condições do sistema, a descrição de cada corrente é representada na tabela 2.

Tabela 2. Dados de Cp, mCp, Q e h das correntes

Corrente	Condição	Cp (kJ/kg °C)	mCp (kW/°C)	Q (kW)	h (kW/m ² /°C)
1	Quente	1,67	3,66	-76,80	0,12
2	Fria	4,18	13,94	111,49	0,02
3	Quente	1,67	3,66	-36,57	0,12
4	Fria	4,18	13,94	76,65	0,02
5	Quente	1,05	0,01	-0,08	0,01
6	Fria	4,18	7,46	17,15	0,02
7	Quente	1,05	0,01	-0,07	0,01
8	Fria	4,18	5,99	12,58	0,02

A partir dos resultados obtidos, com o auxílio do simulador Hint, foi construído um diagrama em cascata conforme ilustrado na tabela 3.

Tabela 3. Diagrama em cascata

T (°C)	Intervalo	$T_{(i+1)} - T_i$ (°C)	Cascata	Cascata acumulada
50			▼	0,000
	1	15	2,612	2,612
35			▼	2,612
	2	6	3,239	3,239
29			▼	5,852
	3	1	0,366	0,366
28			▼	6,217
	4	3	-4,129	-4,129
25			▼	2,088
	5	5	-21,380	-21,380
20			▼	-19,292
	6	0,1	-0,253	-0,253
19,9			▼	-19,545
	7	0,2	-1,155	-1,155
19,7			▼	-20,700
	8	0,2	-1,726	-1,726
19,5			▼	-22,426
	9	1,5	-9,143	-9,143
18			▼	-1,569
	10	0,4	-2,437	-2,437
17,6			PINCH ▼	-34,003
	11	1,6	0,003	0,003
16			▼	-33,985
	12	3,8	0,018	0,018
12,2			▼	-33,985
	13	1,8	0,005	0,005



As correntes são geralmente representadas como "degraus" ao lado das condições do sistema, de modo que, estes são inseridos em um diagrama de cascata do processo.

Tabela 4. Temperatura *Pinch*, mínimo de utilidades e número mínimo de trocadores de calor obtidos no Hint

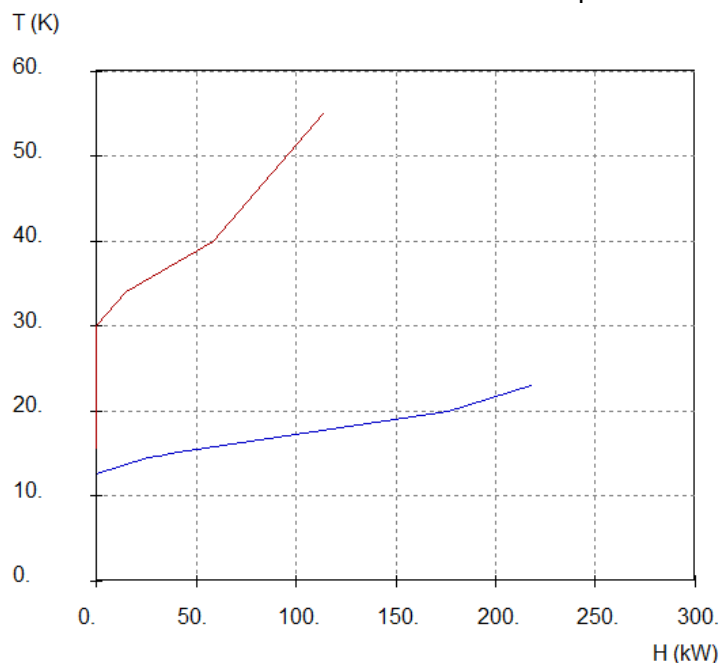
	Valores	Unidades
dT min	10	°C
Min utilidade quente	104,43	kW
Min utilidade frio	0,15	kW
Temperatura <i>Pinch</i>	17,6	°C
Min de trocadores de calor	9	

Tabela 5. Representação da cascata de Temperatura obtida no Excel

Correntes	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	
Tipo	T (°C)	QUENTE	FRIO	QUENTE	FRIO	QUENTE	FRIO	QUENTE	FRIO
	55	●							
1	40	↓		●					
2	34	↓		↓					
3	30			↓					
4	23		▲					●	
5	21		↑					↓	
6	20		↑		●			↓	
7	17,2		↑	▲				↓	
8	15,4		↑	↑	↓				
9	15		●						
10	14,9						▲		
11	14,7						↑		▲
12	14,5				●				↑
13	12,6						●		●



Gráfico 1. Gráfico de curva composta



Para análise do problema inicial, considerou-se um $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$. Após a integração energética realizada nos simuladores, os resultados indicaram uma temperatura *Pinch* de $17,6^{\circ}\text{C}$, em ambas as simulações.

Com relação a quantidade mínima de trocadores para a integração energética, o problema inicial considerava 4 trocadores de calor, porém os resultados indicaram uma rede mínima contendo 9 trocadores de calor (simulado no Hint) e 10 trocadores de calor (simulado no ProSimPlus).

De acordo com Aragão [11], o desempenho de uma rede de trocadores de calor é afetado por variações nas condições de operações dos processos industriais. No presente estudo os trocadores estudados operam em malha aberta, ou seja, há uma oscilação nas vazões de entrada dos trocadores [11].

4. CONCLUSÃO

Os resultados preliminares obtidos estão de acordo com o objetivo esperado, em que foi possível identificar as correntes quentes e frias do processo, construir o diagrama de correntes e avaliar a quantidade mínima de trocadores de calor. Após aplicação do método *Pinch*, observou-se que para a rede indicada, o número de trocadores de calor é maior que o número total de trocadores do processo estudado.

O estudo contribuiu para ampliar o conhecimento de uma ferramenta de melhoria de processo além de levar a empresa à discussão da busca de novas tecnologias necessárias ao setor produtivo. Novos estudos serão realizados a fim de avaliar novos cenários de integração e aperfeiçoar toda a rede de trocadores de calor da fábrica.



5. REFERÊNCIAS

- ¹ BARBELI, M. C. Indústria de papel e celulose: estado da arte das tecnologias de co-geração de energia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 107-122, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.pgsskroton.com.br/seer/index.php/rcext/article/view/2371/2275>> Acesso em: 18 jul. 2018.
- ² VOGT, Mara et al. Evidenciação dos fatores de riscos nas empresas brasileiras e americanas do setor de papel e celulose. **Revista de Contabilidade da UFBA**, v. 12, n. 1, p. 157-185, Blumenau, 2018. Disponível em: <<https://rigs.ufba.br/index.php/rcontabilidade/article/view/21614/15836>> Acesso em: 19 jul. 2018.
- ³ SACHS, Ignacy. A revolução energética do século XXI. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 21-38, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/ea/v21n59/a03v2159.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- ⁴ BAUM, Daniel. Reúso de água na indústria química-estudo de caso de uma unidade produtiva de nitrocelulose. Dissertação. **USP**, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-09032012145822/en.php>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- ⁵ RESENDE, Marina Garcia et al. Desenvolvimento de um programa computacional em Scilab® baseado no método Pinch de integração energética. Dissertação. **UFSCar**, São Carlos, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4109>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- ⁶ OLIVEIRA, Andre Bello de. Avaliação da eficiência energética em um sítio industrial utilizando análise pinch com heurísticas e técnicas de projeto. Dissertação. **UFRGS**, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/7239>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- ⁷ RAVAGNANI, Mauro Antonio da Silva Sa et al. Projeto e otimização de Redes de Trocadores de Calor. Dissertação. **UNICAMP**, Campinas, 1994. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266488>>. Acesso em: 17 jul. 2018.
- ⁸ GUNDEPSEN, T.; NAESS, L. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: An industrial review of the state of the art. **Computers & chemical engineering**, v. 12, n. 6, p. 503-530, 1988. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0098135488870029>>. Acesso em: 27 jul 2018.
- ⁹ PIRES, Victor Flores da Matta et al. Análise energética global de um complexo petroquímico. Dissertação. **UNICAMP**, Campinas, 2003. Disponível em:



<<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266128>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

¹⁰ PFEIFER, Adriene Artiaga et al. Estudo da Integração Energética de Processos Químicos utilizando Simuladores Computacionais. **Anais COBEQ**, 2016. Campinas, Galoá, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobeq/cobeq-2016/papers/estudo-da-integracao-energetica-de-processos-quimicos-utilizando-simuladores-computacionais>> Acesso em: 27 jul. 2018.

¹¹ ARAGÃO, Marcelo Escobar. Síntese simultânea de redes de trocadores de calor com considerações operacionais: flexibilidade e controlabilidade. Dissertação. **UFRGS**, Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/32019>>. Acesso em: 27 jul. 2018.

¹² PROSIM. **Simulis Pinch, Energy Integration of Processes**. Disponível em: <<http://www.prosim.net/en/software-simulis-pinch-process-energy-integration-in-microsoft-excel-13.php>>. Acesso em: 27 jul. 2018.