

# **ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL EM SCILAB® PARA CÁLCULOS BÁSICOS DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA**

M. G. RESENDE<sup>1</sup> e W. H. KWONG<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química  
E-mail para contato: <sup>1</sup>marinagr.eq@hotmail.com e <sup>2</sup>wu@ufscar.br

**RESUMO** – Reduzir o desperdício e os custos com energia tem sido prioridade para as indústrias. A redução de perdas de energia no processo produtivo é uma meta que vem sendo perseguida por indústrias de diferentes setores, seja por questões ambientais ou meramente financeiras. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa computacional, utilizando a linguagem de programação do software Scilab®, que calcula automaticamente os valores relacionados à primeira etapa de resolução da metodologia Pinch, isto é, as metas energéticas do processo. Além destes resultados, o programa desenvolvido também mostra ao usuário a localização das correntes no diagrama de grade do processo, facilitando a síntese de uma rede de trocadores de calor, etapa futura de resolução do problema. Ademais, o programa também gera as curvas compostas balanceadas do problema. Um estudo de caso foi aplicado e os resultados obtidos foram condizentes com a literatura.

## **1. INTRODUÇÃO**

A aliança entre desenvolvimento sustentável e progresso tecnológico torna-se cada dia mais evidente e necessária na sociedade atual. Por conseguinte, há a necessidade constante de estudos e pesquisas relacionados ao tema. No contexto de Engenharia Química, particularmente referente à área de otimização de processos químicos, um problema comum e de extrema importância é destacado neste trabalho: a minimização do consumo de energia em processos químicos industriais.

Tratando-se de processos industriais, existe a necessidade de aquecer e resfriar fluidos. Para tanto, é preciso lançar mão de equipamentos que sejam capazes de realizar trocas térmicas. Em sua maioria, tais transferências térmicas ocorrem em trocadores de calor. Como existem diversas correntes dentro de um processo, geralmente são necessários vários equipamentos de troca térmica. A configuração dos equipamentos envolvidos, a estruturação das trocas ocorridas entre as correntes e a escolha dos fluidos são etapas fundamentais da chamada síntese da rede de trocadores de calor (Ravagnani, 2012).

O problema de síntese de uma rede de trocadores de calor envolve a minimização do consumo de energia. Basicamente, pode ser solucionado através de dois tipos de métodos: sequenciais ou simultâneos. Os métodos simultâneos não decompõe o problema em subproblemas, obtendo uma rede

diretamente. Geralmente, neste caso, o problema é modelado utilizando programação não linear inteira mista (PNLIM). Os métodos sequenciais, por outro lado, baseiam-se na estratégia de dividir o problema em várias etapas, de modo a reduzir sua complexidade. Cada uma destas etapas tem um objetivo diferente, levando em consideração as variáveis que tem maior impacto no custo total anual da rede (Ravagnani, 2012).

No que se refere a métodos sequenciais, uma das principais tecnologias utilizadas é a do ponto *Pinch* (conhecido também por ponto de estrangulamento energético), na qual a primeira etapa é solucionar o problema de minimização do consumo de energia em redes de trocadores de calor. Através do uso de princípios termodinâmicos e de otimização de processos, a análise *Pinch* mostra-se uma ferramenta eficiente de integração energética, capaz de economizar energia e capital em uma planta de processos químicos.

Ademais, uma nova norma referente à integração energética em indústrias foi publicada pela *International Organization for Standardization* em 15 de Junho de 2011, a ISO 50001, cujo objetivo é influenciar empresas a reduzirem seus gastos energéticos. Empresas públicas e privadas deverão, então, estabelecer planos para a implementação, manutenção e melhoria da utilização de seus recursos energéticos (Croft, 2012).

Portanto, é necessário que estudos científicos a fim de explorar o universo de possibilidades da análise *Pinch* sejam continuamente realizados. Além disso, é importante a busca de melhoramentos para a mesma, sempre tendo como principal objetivo a economia energética de acordo com os limites impostos pelo meio ambiente.

Levando em consideração o que foi exposto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo baseado em Kemp (2007) utilizando o software Scilab®, cujo alvo principal é o cálculo das metas energéticas do processo, primeira etapa da análise *Pinch* de integração energética. O programa também fornece outras informações relevantes ao usuário, como a localização das correntes no diagrama de grade do processo e também as curvas compostas balanceadas do mesmo. Todos estes resultados favorecerão o cálculo das próximas etapas da metodologia *Pinch* para que, finalmente, seja realizada uma posterior síntese de uma rede de trocadores de calor.

## **1.1. Princípios Básicos da Análise *Pinch***

Segundo Furman e Sahinidis (2002), o trabalho de Hohmann (1971) forneceu a base para a criação da tecnologia *Pinch*, pois apresentou a possibilidade de estipular metas energéticas antes mesmo da etapa de síntese da rede. Conhecendo-se apenas as variáveis e parâmetros relacionados às correntes de processo e a diferença mínima de temperatura entre os terminais dos trocadores de calor da futura rede, é possível calcular as quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento externo do processo, conhecidas como utilidades quentes e frias (Ravagnani, 2012).

A análise *Pinch* de integração energética é baseada em princípios termodinâmicos, fato este que a torna uma metodologia de estimativa de resultados confiável. No entanto, vale lembrar que o objetivo de toda e qualquer modelagem é a criação de um modelo o mais próximo possível do real, não

garantindo que os resultados sejam exatamente os mesmos, e sim assegurando uma boa aproximação. Este é o objetivo da metodologia *Pinch*.

Após a determinação da máxima recuperação energética que pode ser obtida na rede, as próximas etapas são: obtenção do número mínimo de equipamentos na rede, determinação da área mínima para troca térmica e obtenção da diferença mínima de temperatura antes da própria síntese da rede de trocadores de calor. Além disso, se dados relativos a custos estiverem disponíveis, o cálculo do custo total anual aproximado para a rede também pode ser efetuado (Ravagnani, 2012).

Tratando-se da primeira etapa de resolução referente à análise *Pinch*, o cálculo de metas energéticas para o processo pode ser realizado através de duas ferramentas básicas (Smith, 2005): os métodos gráficos (representados pelo diagrama de temperatura *versus* entalpia, curvas compostas quentes e frias e grande curva composta) e o método analítico (representado pelo diagrama de calor em cascata obtido através do chamado algoritmo da Tabela Problema).

Após fixadas as metas energéticas do processo, o valor da diferença mínima de temperatura entre as correntes e sua localização determinada a partir das curvas compostas possui grande relevância para o projeto da rede de trocadores de calor (Smith, 2005). O ponto no qual há maior aproximação entre as curvas compostas quentes e frias do processo é chamado de ponto de estrangulamento energético do processo, ou ponto *Pinch*. A partir desta localização, é possível dividir o problema em duas partes: acima e abaixo do *Pinch*, onde poderá ser realizada a locação dos trocadores de calor necessários à rede, concluindo, então, a síntese da rede de trocadores de calor.

Os cálculos relacionados à primeira etapa da análise *Pinch* são relativamente simples e podem ser feitos manualmente. No entanto, se houver um número elevado de correntes de processos, estes cálculos tendem a consumir muito tempo do usuário. Desta forma, a aliança entre a metodologia *Pinch* e a programação computacional torna-se essencial. Por isso, neste trabalho, baseado em um algoritmo de Kemp (2007), foi desenvolvido um programa computacional em Scilab®, que fornece ao usuário as metas energéticas iniciais do processo, a partir de dados relativos às correntes do mesmo e da diferença mínima de temperatura entre as correntes. As etapas de desenvolvimento do algoritmo estão detalhadas na Seção 2.

## **2. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO EM SCILAB®**

O algoritmo foi desenvolvido utilizando-se o software Scilab® versão 5.4.0, através do aplicativo *Scinotes*. A entrada de dados pode ser feita no próprio *Scinotes*, por meio do qual o usuário poderá executar o programa e inserir os dados necessários conforme forem solicitados. Outra maneira de inserção é por intermédio do software Excel®, disponível no pacote Microsoft Office®. Neste caso, o usuário poderá introduzir os dados em uma planilha, salvá-la e associá-la com o aplicativo *Scinotes*, possibilitando sua leitura e aplicação ao algoritmo desenvolvido.

Os dados de entrada necessários para gerar a solução do algoritmo são os seguintes: número total de correntes do processo; número total de correntes quentes e frias (separadamente); temperaturas iniciais e finais (em °C), vazões mássicas (em kg/s) e calores específicos (em kJ/kg°C) de todas as

correntes; temperaturas iniciais e finais das utilidades quentes e frias disponíveis para o processo (em °C); e, finalmente, a diferença de temperatura mínima entre as correntes de processo (em °C).

Após a inserção dos dados de entrada, o algoritmo fornece como solução, automaticamente, as metas energéticas do processo. Estas foram possíveis de serem obtidas a partir da grande curva composta e do diagrama em cascata da Tabela Problema, cujo fluxograma resumido de programação pode ser observado na Figura 1.

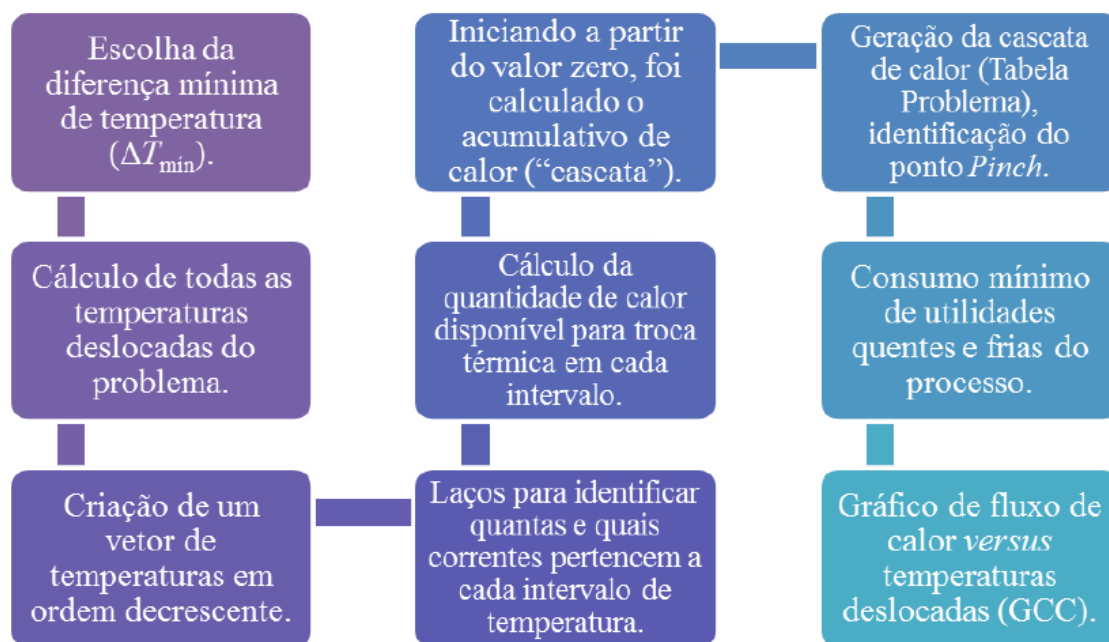


Figura 1 – Fluxograma da programação utilizada para geração da grande curva composta e do diagrama de calor em cascata baseado no algoritmo da Tabela Problema (Resende e Kwong, 2013).

Há também a geração das curvas compostas quentes e frias, cuja programação está detalhada nas Figuras 2, 3 e 4. É importante ressaltar que o programa foi desenvolvido baseado no algoritmo de Kemp (2007).

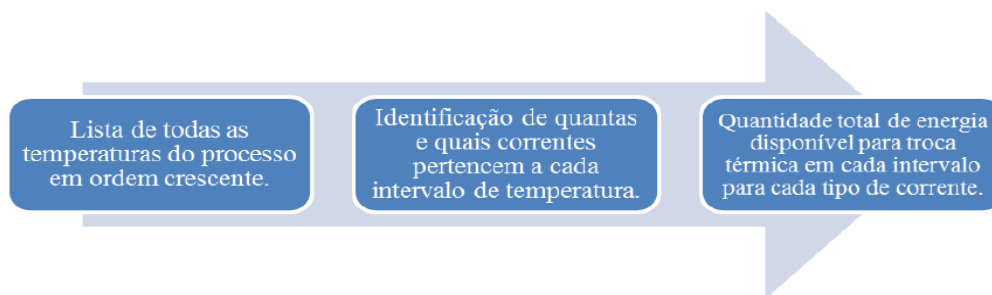


Figura 2 – Etapas da primeira parte do algoritmo para geração das curvas compostas quentes e frias (Resende e Kwong, 2013).

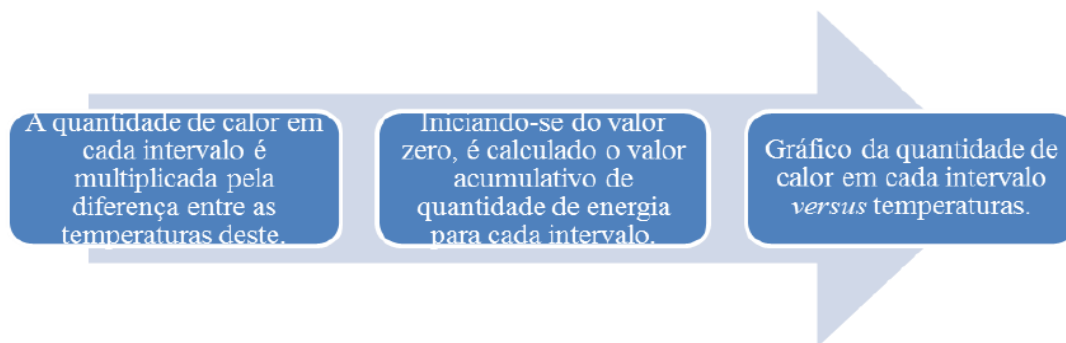


Figura 3 – Etapas da segunda parte do algoritmo – geração das curvas compostas quentes (Resende e Kwong, 2013).

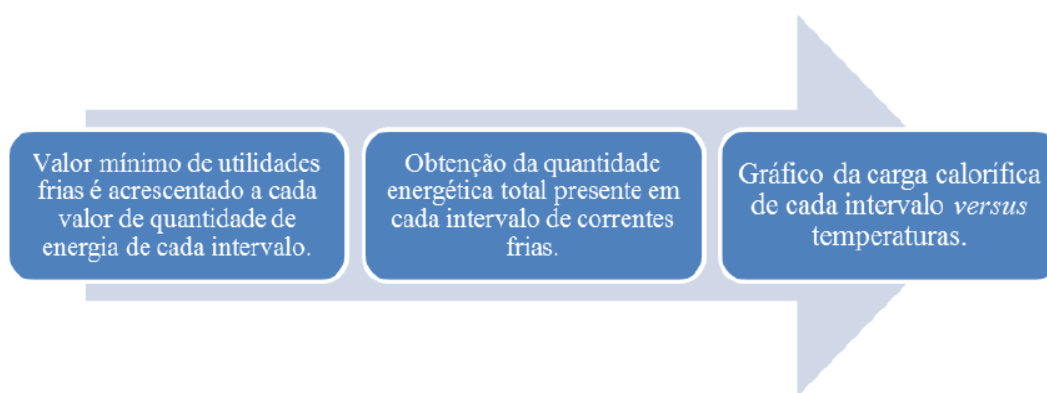


Figura 4 – Etapas da segunda parte do algoritmo – geração das curvas compostas frias (Resende e Kwong, 2013).

Para a implementação das curvas no diagrama de grade do processo foi utilizado um algoritmo simples, utilizando o laço *if*, mediante comparações entre as temperaturas de cada corrente e a temperatura *Pinch* do processo, já obtida anteriormente. É importante ressaltar que o algoritmo fornece a localização apenas mediante frases como “acima do ponto *Pinch*”, “abaixo do ponto *Pinch*” e “acima e abaixo do ponto *Pinch*”, com a utilização do comando *printf()* (Resende e Kwong, 2013). Já para a construção das curvas compostas balanceadas quentes e frias, a partir do cálculo das quantidades mínimas de utilidades do processo, as quantidades de calor obtidas e as temperaturas de cada uma das utilidades foram acopladas nos vetores referentes à entalpia e temperaturas das curvas compostas quente e fria, respectivamente. A Seção 3 trata a aplicação de um estudo de caso ao programa desenvolvido e os respectivos resultados que foram obtidos.

### 3. ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO E RESULTADOS

O estudo de caso em questão foi adaptado de Khorasany e Fesanghary (2009), contendo quatro correntes de processo, além de água de resfriamento e vapor d'água disponíveis para serem usados como utilidades térmicas. A variável "FCp" representa o produto entre o calor específico e a vazão mássica de cada uma das correntes, variável frequentemente utilizada em integração de processos, com o objetivo de facilitar os cálculos. Os dados relativos a este exemplo podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados relativos ao estudo de caso em questão (Adaptado de Khorasany e Fesanghary, 2009).

	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	FCp (kW/°C)
H1	260	160	3,0
H2	250	130	1,5
C1	120	235	2,0
C2	180	240	4,0
Água	50	70	---
Vapor	280	279	---

A solução obtida pelo algoritmo para os dados em questão pode ser observada nas Figuras 5 (curvas compostas quentes e frias do processo), 6 (grande curva composta), 7 (curvas compostas quentes e frias balanceadas), 8 (quantidades mínimas de aquecimento e resfriamento externo para o processo e ponto *Pinch*), 9 (diagrama de calor em cascata obtido pelo algoritmo da Tabela Problema) e 10 (localização das correntes no diagrama de grade do processo).

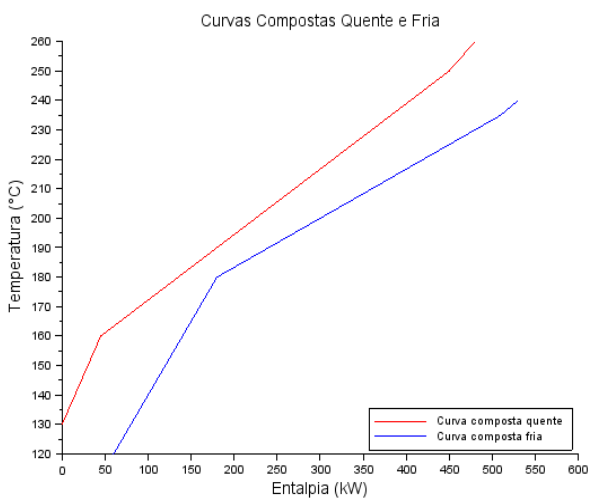


Figura 5 – Curvas compostas quentes e frias.

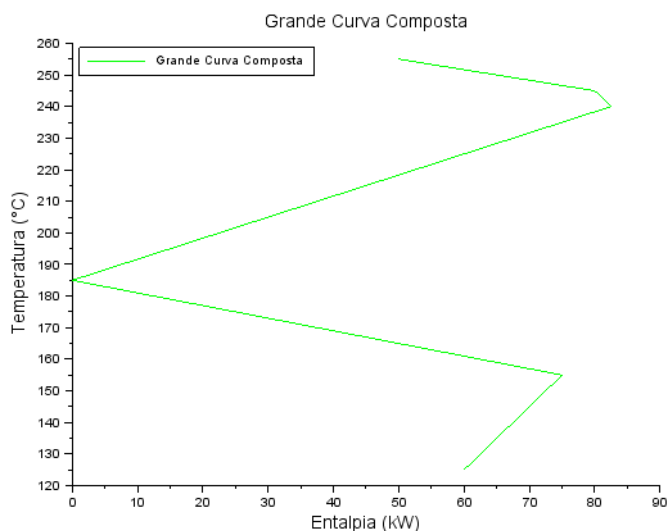


Figura 6 – Grande curva composta.

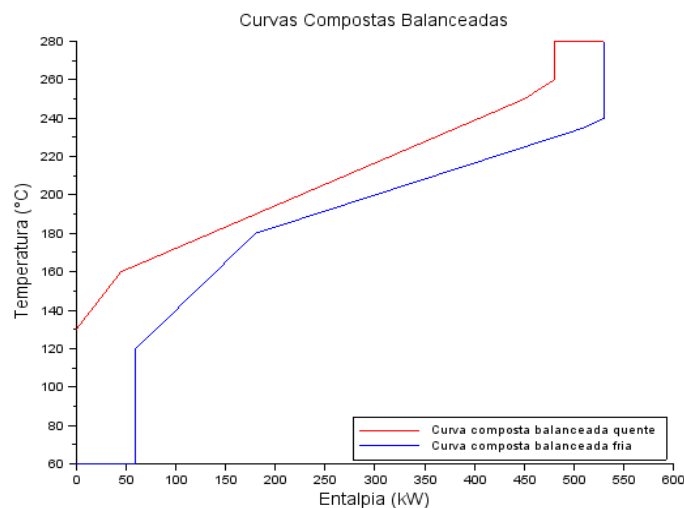


Figura 7 – Curvas compostas balanceadas.

-----  
Temperatura Pinch --> 185 °C  
-----  
Quantidade mínima de aquecimento externo --> 50 kW  
Quantidade mínima de resfriamento externo --> 60 kW  
-----

Figura 8 – Metas energéticas e ponto *Pinch*.

-----  
Diagrama baseado no Algoritmo da Tabela Problema:

T (°C) --- Q (kW)

255 ----- 50

245 ----- 80

240 ----- 82.5

185 ----- 0

155 ----- 75

125 ----- 60  
-----

Figura 9 – Diagrama de calor em cascata.

-----  
Localização das correntes no Diagrama de Grade do processo:

-----  
Corrente quente 1 ---> acima e abaixo do Pinch.

Corrente quente 2 ---> acima e abaixo do Pinch.

-----  
Corrente fria 2 ---> acima do Pinch.

-----  
Corrente fria 1 ---> acima e abaixo do Pinch.  
-----

Figura 10 – Localização das correntes.

## 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pelo programa desenvolvido em Scilab® foram condizentes com a literatura. Os mesmos dados foram utilizados por Ahmad (1985) para análise de metas energéticas do processo, e foi obtido um total de 50 kW de utilidades quentes e 60 kW de utilidades frias, exatamente o mesmo resultado encontrado neste trabalho. Isto demonstra que o algoritmo desenvolvido por Kemp (2007) foi implementado corretamente no software Scilab®.



Por conseguinte, conclui-se que o novo programa desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado para cálculo de quantidades mínimas de utilidades quentes e frias para um determinado processo químico. Além disso, a partir do gráfico das curvas compostas quentes e frias balanceadas, o usuário pode obter os pontos e as quantidades de calor necessárias para facilitar o cálculo da área mínima de troca térmica do processo.

Finalmente, o programa mostra-se uma eficiente ferramenta para estudante de integração energética de processos e também para projetistas mais experientes, contribuindo para minimização de energia em processos, e, conseqüentemente, para preservação do meio ambiente. Ademais, permite que o usuário tenha livre acesso às linhas de código e possa aprimorar o programa computacional sempre que necessário.

## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de estudos concedida, tornando possível a realização deste trabalho, bem como ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ – UFSCar).

## **6. REFERÊNCIAS**

- AHMAD, S. *Heat exchanger networks: Cost trade-offs in energy and capital*. Tese de PhD – UMIST, Manchester, Reino Unido, 1985.
- CROFT, N. APCER BRASIL. *O modelo de gestão de energia de acordo com a norma ISO 50001*. Disponível em: <<http://www.apcer.com.br>>. Acesso em: 30 set. 2012.
- FURMAN, K. C.; SAHINIDIS, N. V. A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20<sup>th</sup> century. *Ind. Eng. Chem*, v. 41, p. 2335-2370, 2002.
- HOHMANN, E. C. *Optimum network for heat exchange*. Tese de PhD – University of Southern California, Los Angeles, CA, 1971.
- KEMP, I. C. *Pinch analysis and process integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy*. Grã-Bretanha: Editora ELSEVIER, 2007.
- KHORASANY, R. M.; FESANGHARY, M. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks. *Comp. and Chem. Eng.*, v. 33, p. 1363-1330, 2009.
- RAVAGNANI, M. A S. S.; SUÁREZ, J. A. C. *Redes de trocadores de calor*. Maringá: Editora Eduem, 2012.
- RESENDE, M. G.; KWONG, W. H. *Desenvolvimento de um Programa Computacional em Scilab® Baseado no Método Pinch de Integração Energética*. Dissertação de Mestrado, DEQ/UFSCar, São Carlos – SP, 2013.
- SMITH, R. *Chemical process design and integration*. Inglaterra: Editora John Wiley and Sons Ltd., 2005.