

INCERTEZAS NA SÍNTESE DE REDE DE TROCADORES DE CALOR: ESTUDOS DE CASO

Eduardo M. Queiroz* (UFRJ), Victor R. R. Ahón (Consultor Técnico) e André L. H. Costa (UERJ)

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, Centro de Tecnologia, Bloco E, Escola de Química,
CEP 21949-900, Rio de Janeiro, RJ, e-mail: mach@eq.ufrj.br

O aumento dos custos de energia, a necessidade de redução das emissões de CO₂ e o acirramento da competição entre as empresas são manifestações típicas do atual cenário que a indústria do petróleo enfrenta. Como uma das consequências destes novos desafios, a racionalização do consumo de energia tornou-se uma necessidade. Entre os vários avanços tecnológicos disponibilizados com este objetivo, destacam-se as técnicas de integração energética, cujo objetivo é projetar redes de trocadores de calor que permitam reduzir o consumo de utilidades em uma planta industrial, como por exemplo, a tecnologia *pinch*. Um exemplo importante de uma rede de trocadores de calor no refino de petróleo consiste na bateria de trocadores de calor de pré-aquecimento de óleo cru para a coluna de destilação atmosférica. Neste caso, as correntes quentes de produto e os refluxos circulantes da coluna são utilizados para aquecer a corrente de óleo cru que alimenta a unidade. Uma vez que as incertezas sobre os dados de processo podem ser um obstáculo relevante para a obtenção de uma solução ótima no problema de síntese de redes de trocadores de calor, este trabalho investiga, através de estudos de caso, como as incertezas sobre os dados de processo podem influenciar na solução do problema de integração energética. Considerando variações nos dados relativos à formulação do problema (por exemplo, vazão, temperatura de entrada, temperatura de saída), um procedimento de síntese de redes de trocadores de calor é aplicado, sendo os resultados comparados com base no desempenho econômico atingido por cada alternativa de rede encontrada. Os resultados permitem ilustrar o impacto que as incertezas na etapa de formulação do problema afetam o potencial retorno financeiro previsto durante a síntese da rede. A comparação entre diferentes casos sujeitos a perturbações indica que os resultados econômicos podem diferir de forma relevante, havendo modificações no custo total anualizado de até 30% e na área total da rede de até 25%.

integração energética, tecnologia pinch, síntese de redes de trocadores de calor.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a racionalização do consumo de energia tem sido uma crescente preocupação nas indústrias de processamento de uma forma geral e na indústria do petróleo em particular. Este esforço vem como consequência de um cenário que contempla o aumento dos custos de energia, preocupações ambientais cada vez mais agudas em relação às emissões relativas ao efeito estufa e uma competição cada vez mais acirrada entre as empresas a nível global.

Uma importante abordagem para redução do consumo de energia em unidades industriais corresponde à síntese de sistemas de integração energética. Através da transferência de calor entre correntes de processo, é possível alcançar uma redução significativa do consumo de utilidades. No refino de petróleo, destacam-se as redes de trocadores de calor no pré-aquecimento de óleo cru até a temperatura de alimentação na coluna de destilação atmosférica, utilizando as correntes quentes de produto e os refluxos circulantes.

Entre as várias técnicas de integração energética desenvolvidas na literatura, a tecnologia *pinch* (tecnologia do ponto de estrangulamento energético) (Linnhoff e Hindmarsh, 1983) tem apresentado bons resultados em várias aplicações em problemas reais (Liporace e Marques, 2001; Matijasevicius e Othman, 2002; Wang et al., 2003; Souza Neto et al., 2004; Pires e Zemp, 2004). Baseada nos princípios fundamentais da termodinâmica, a tecnologia *pinch* permite determinar, de forma relativamente simples e rápida, a rede associada ao mínimo consumo de utilidades. Simplificações adicionais desta rede podem levar eventualmente a resultados ainda melhores do ponto de vista econômico.

O ponto de partida do problema de síntese da rede envolve a determinação do quadro de correntes envolvidas na integração, contendo informações sobre a vazão mássica, capacidade calorífica e temperaturas iniciais e finais. Estes dados podem ser obtidos a partir do projeto do processo, no caso de uma nova planta, ou de um balanço de massa e energia operacional, no caso de uma planta já existente. Contudo, algumas destas informações podem estar sujeitas a um considerável grau de incerteza em função de uma série de fatores: problemas na avaliação das propriedades físicas das correntes, alterações no valor operacional de variáveis de processo em relação à base do projeto da unidade, restrições relativas à capacidade dos equipamentos, danos de equipamentos, etc. Exemplos de trabalhos na literatura que lidam com o gerenciamento da incerteza na síntese

de redes de trocadores de calor podem ser encontrados em Saboo e Morari (1984), Cerda e Galli (1990) ou Aguilera e Nasini (1996).

Neste contexto, este trabalho tenta ilustrar como incertezas em relação a dados de entrada relativos ao quadro de correntes podem afetar os resultados da síntese. Através de um conjunto de estudos de caso, é possível verificar que soluções diferentes, determinadas via tecnologia *pinch*, são obtidas quando há variações relativamente pequenas nos dados de entrada de determinadas correntes. Adota-se como ponto de partida o trabalho de Oliveira Filho et al. (2006), onde este assunto é abordado do ponto de vista da análise do mínimo consumo de utilidades e da localização da temperatura *pinch*.

2. CASO BASE

As correntes do Caso Base (três correntes quentes e quatro correntes frias), descrito inicialmente em Oliveira Filho et al. (2006), estão apresentadas na Tabela 1. Este problema possui um mínimo consumo de utilidades quente e fria igual a 180 kW e 860 kW, respectivamente, com a temperatura *pinch* se localizando a 140 °C / 130 °C para um diferencial mínimo de temperatura ($\Delta T_{\min}$) de 10 °C. A natureza do problema também pode ser observada através das curvas compostas apresentadas na Figura 1.

Tabela 1. Caso Base

Correntes	Taxa de capacidade calorífica (kW/°C)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
H1	4	80	40
H2	18	140	40
H3	9	260	140
C1	2	30	130
C2	10	70	190
C3	5	70	130
C4	11	190	250

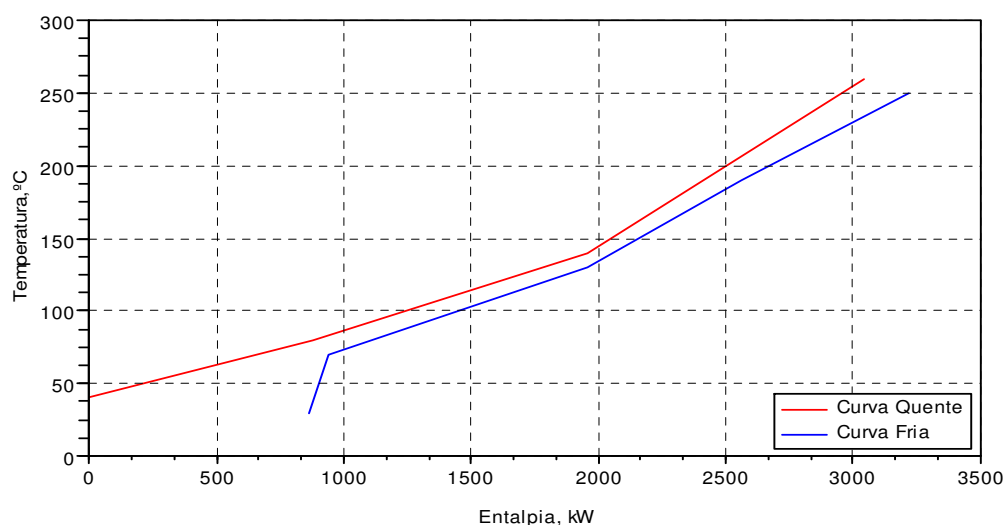


Figura 1. Curvas compostas para o Caso Base

3. CASOS MODIFICADOS

Considera-se no presente trabalho possíveis modificações nos parâmetros na entrada do processo, ou seja, em temperaturas de entrada e em taxas de capacidade calorífica. As alterações aplicadas em cada exemplo são estabelecidas de forma arbitrária, tentando reproduzir o impacto de eventuais incertezas reais nos dados de processo em determinadas situações. A modificação em uma temperatura de entrada de uma corrente (Caso CM 01) é representada por uma mudança na temperatura de entrada da corrente H2 de 140 °C para 135 °C. Esse tipo de modificação desloca a corrente em termos das temperaturas relativas entre correntes e muda a sua carga

térmica. A modificação na taxa de capacidade calorífica é exemplificada por uma redução de 10% na vazão da corrente H2 (Caso CM 02) e por um aumento de 25% na vazão da corrente H3 (Caso CM 03). Modificações nas taxas de capacidades caloríficas mantêm a posição relativa da corrente em relação às temperaturas, mas geram mudanças nas cargas térmicas, bem como podem ter influência no desempenho termofluidodinâmico, através de mudanças nas resistências convectivas correspondentes a essa corrente nos diversos equipamentos.

Na Tabela 2 são apresentadas as modificações analisadas e suas consequências em relação ao ponto de *pinch* do problema e aos respectivos consumos de utilidades quente e fria.

A diminuição na temperatura de entrada da corrente H2 em 5 °C leva a uma redução equivalente da localização do *pinch*, associada a uma pequena queda no mínimo consumo de utilidade fria e um sensível aumento no consumo de utilidade quente.

A diminuição da vazão da corrente H2 em 10% altera sensivelmente o ponto de *pinch*, modificando a posição de algumas correntes em relação a esse parâmetro da rede. No Caso Base, a corrente fria C2 atravessava o *pinch* e a corrente fria C3 estava abaixo do *pinch* e, após as perturbações, ambas passaram a se localizar acima do *pinch*. Essa posição relativa ao *pinch* é importante na síntese da rede de menor custo. Há ainda um aumento 27% no consumo mínimo de utilidade quente e uma redução de 15% no consumo mínimo de utilidade fria.

No caso do aumento da vazão da corrente H3 em 25%, observa-se o desaparecimento do *pinch*, com a conseqüente não necessidade de utilização de utilidade quente, enquanto o consumo mínimo de utilidade fria aumenta para 950 kW (+10%).

Tabela 2. Caso Base x Casos Modificados

Caso	Modificação	Temperatura <i>pinch</i> (°C)	Mínimo consumo de utilidade quente (kW)	Mínimo consumo de utilidade fria (kW)
Base	---	140 / 130	180	860
CM 01	Redução de 5 °C na temperatura de entrada da corrente H2	135 / 125	265	855
CM 02	Redução de 10% da vazão da corrente H2	80 / 70	228	728
CM 03	Aumento de 25% da vazão da corrente H3	Sem <i>pinch</i>	---	950

4. PROCEDIMENTO DE SÍNTESE

O procedimento de síntese é baseado na tecnologia *pinch*, com a síntese envolvendo as correntes afastadas do *pinch* usando a regra heurística de Rudd, que indica a preferência de troca entre as correntes quentes e frias com maior temperatura de entrada. É utilizado o software AtHENS, desenvolvido no DEQ/EQ/UFRJ (Liporace et al., 2001). Quando houve divisão de corrente na síntese próxima ao *pinch*, houve sempre a preferência por unir essas correntes antes da síntese afastada do *pinch*.

Para a síntese, efetuada de forma tradicional, sem a realização do projeto detalhado de seus equipamentos, há necessidade de dados econômicos, assim como das condições operacionais das utilidades empregadas, importantes na determinação dos custos relacionados aos aquecedores e resfriadores da rede. Esses dados propostos são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3. Dados econômicos

Item	Dado
Preço da utilidade quente (\$ / MW ano)	60.000,00
Preço da utilidade fria (\$ / MW ano)	6.000,00
Investimento (\$)	10.000,00 + 350,0 A(m ²)
Vida útil dos equipamentos	5 anos
Taxa de retorno	0,0%

Tabela 4. Dados das utilidades

Utilidade	Coefficiente de convecção (W/(m ² °C))	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)
Quente	8000	280	280
Fria	1000	15	20

Na síntese das redes, adota-se um valor de 800 W/(m²°C) para o coeficiente de transferência de calor nas correntes de processo. No presente trabalho não são consideradas possíveis influências da variação das propriedades físicas com a temperatura. Assim, somente se considerou variação no coeficiente de transferência de calor em função de variação em sua vazão. Considerando-se o escoamento turbulento, essa correção é feita de forma simplificada, com base na Equação 1:

$$h_{cor} = h_{bas} (m_{cor} / m_{bas})^{0,8} \quad (1)$$

onde o subscrito *cor* indica o valor corrigido e *bas* o valor no caso base. Na Tabela 5 são apresentados os novos valores (corrigidos) das vazões e respectivos coeficientes de transferências de calor nos casos onde há mudanças na taxa de capacidade calorífica.

Tabela 5. Vazões (*m*) e Coeficientes de convecção (*h*) dos casos investigados

Corrente	Caso Base		Caso CM 01		Caso CM 02		Caso CM 03	
	<i>m</i> (kg/s)	<i>h</i> (W/m ² °C)	<i>m</i> (kg/s)	<i>h</i> (W/m ² °C)	<i>m</i> (kg/s)	<i>h</i> (W/m ² °C)	<i>m</i> (kg/s)	<i>h</i> (W/m ² °C)
H2	9,0	800	9,0	800	8,1	735	9,0	800
H3	4,5	800	4,5	800	4,5	800	5,6	956

5. RESULTADO DA SÍNTESE

Nas Figuras 2 a 5 são apresentadas as redes finais obtidas com o critério de mínimo custo total para o Caso Base e os Casos Modificados. Nessas figuras as linhas horizontais representam as correntes (azuis as frias e vermelhas as quentes) e as linhas verticais amarelas representam os trocadores de calor de integração energética entre correntes. Os círculos vermelhos são aquecedores (trocas com a utilidade quente), enquanto os círculos azuis são resfriadores (trocas com a utilidade fria).

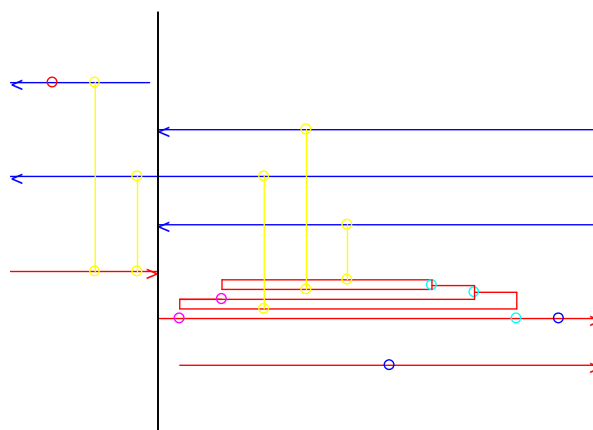


Figura 2. Estrutura da rede final para o Caso Base

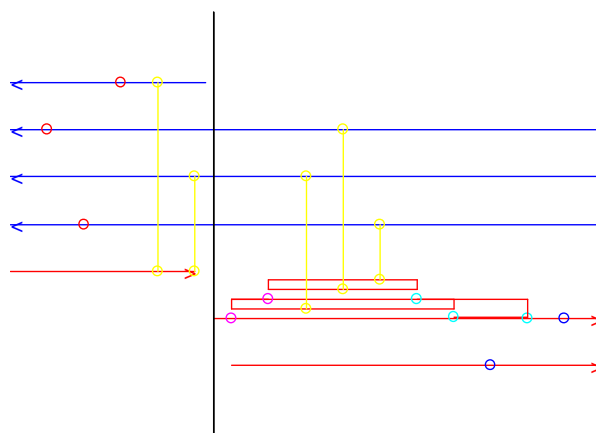


Figura 3. Estrutura da rede final para o Caso CM 01

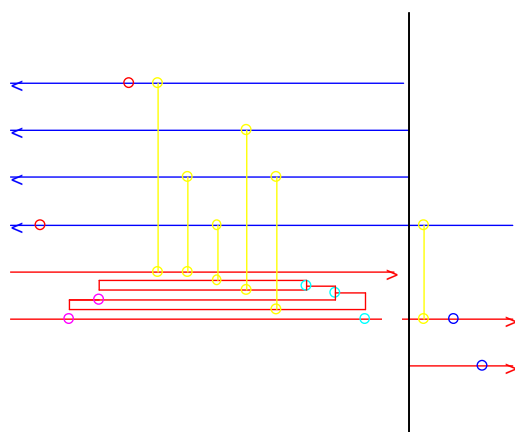


Figura 4. Estrutura da rede final para o Caso CM 02

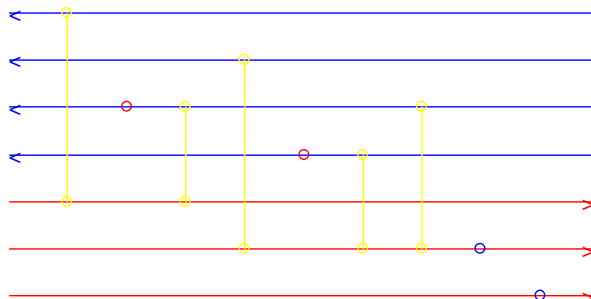


Figura 5. Estrutura da rede final para o Caso CM 03

Como as redes mostradas nas Figuras 2 a 5 são variações de um Processo com 7 correntes de processo e duas utilidades, o número mínimo de equipamentos em termos globais é o mesmo para todas, sendo igual a 8. Assim, observa-se que somente não há ciclos na rede final para o Caso Base, que possui exatos 8 equipamentos. Os ciclos presentes nas outras redes permanecem em função do critério usado na quebra de ciclos durante a evolução das correspondentes redes de mínimo consumo de utilidades, que foi de quebra somente quando há diminuição no custo total anual.

As diferenças estruturais principais são representadas pela presença de mais ou menos aquecedores e/ou resfriadores. No processo analisado e nas modificações introduzidas, apesar de significativas modificações no valor do *pinch*, não se observam grandes modificações nas combinações entre as correntes de processo, havendo uma predominância da indicação para a corrente quente H1 trocar calor com as correntes frias C1 e C3, a corrente quente H2 apresenta a necessidade de ser dividida, mas troca calor preferencialmente com as correntes frias C2, C3 e C4, não necessariamente na mesma ordem, enquanto a corrente quente H3 troca calor exclusivamente com a utilidade fria.

Comparando as soluções do Caso Base e dos casos modificados, verifica-se que os resultados econômicos podem diferir de forma relevante, havendo modificações no custo total anualizado de até 30% e na área total da rede de até 25%.

Para mais comparações das redes geradas, a questão do número de equipamentos e o total de suas áreas é explicitada na Tabela 6, enquanto a Tabela 7 apresenta os resultados relativos ao desempenho econômico das diferentes soluções encontradas.

Tabela 6. Descrição das redes sintetizadas

Caso	Equipamentos de integração		Aquecedores		Resfriadores		Rede completa	
	Número	A_{total} (m ²)	Número	A_{total} (m ²)	Número	A_{total} (m ²)	Número	A_{total} (m ²)
Base	5	418,6	1	6,6	2	48,8	8	474,0
CM 01	5	356,9	3	8,3	2	48,6	10	413,8
CM 02	6	427,8	2	6,7	2	44,2	10	478,7
CM 03	5	291,2	2	2,5	2	57,7	9	351,4

Tabela 7. Desempenho das redes sintetizadas

	Custo Anual (\$/ano)	Área total (m ²)	Utilidade quente (kW)	Utilidade fria (kW)
Base	30603	474,0	180	860
CM 01	39852	413,8	265	855
CM 02	36576	478,7	218	728
CM 03	36982	351,4	191	1141

6. CONCLUSÕES

No processo analisado as diferenças estruturais não são significativas com as incertezas analisadas, mas é importante chamar atenção para as diferenças de áreas entre equipamentos de integração e aquecedores / resfriadores, bem como nos custos da rede.

Não foram analisadas influências em incertezas de mais de uma variável simultaneamente, situação na qual pode haver um significativo impacto na rede final em função do efeito cumulativo, como também esse impacto pode não ser grande em função da compensação das diversas consequências.

7. AGRADECIMENTOS

Eduardo Mach Queiroz agradece ao CNPq e ao PRH/ANP pelo apoio financeiro.

8. REFERÊNCIAS

- AGUILERA, N. E.; NASINI, G. Flexibility Test for Heat Exchanger Networks with Non-overlapping Inlet Temperature Variations, **Computers and Chemical Engineering**, v. 20, n. 10, p. 1227-1240, 1996.
- CERDÁ, J.; GALLI, M. R. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks – II. Nonconvex Networks with Large Temperature Variations, **Computers and Chemical Engineering**, v. 14, n. 2, p. 213-225, 1990.
- LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks, **Chemical Engineering Science**, v. 38, p. 745-763, 1983.
- LIPORACE, F.S., MARQUES, N.A.F. Aplicação da Tecnologia Pinch na Revamp da Bateria de Trocadores de Calor da UFCC da REDUC. **1º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, Natal, 2001.
- LIPORACE, F. S.; PESSOA, F. L. P.; QUEIROZ, E. M. AtHENS (Automatic Heat Exchanger Network Synthesis) Performance. **Latin American Applied Research**, v. 31, n. 5, p. 393-390, 2001.
- MATIJAŠEVIĆ, L.; OTMAČIĆ, H. Energy Recovery by Pinch Technology. **Applied Thermal Engineering**, v.22, p.477-484, 2002.
- OLIVEIRA FILHO, L. O.; AHÓN, V. R. R.; COSTA, A. L. H.; QUEIROZ, E. M. Avaliação do Impacto das Incertezas sobre os Dados de Processo em uma Análise via Tecnologia Pinch. **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ**, Santos, 2006.
- PIRES, V. F. M.; ZEMP, R. J. Análise Energética Global de um Complexo Petroquímico. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ**, 15, 2004.
- SABOO, A. K.; MORARI, M. Design of Resilient Process Plants – IV, Some New Results on Heat Exchanger Network Synthesis, **Chemical Engineering Science**, v. 39, n. 3, p. 579-592, 1984.
- SOUZA NETO, J. N.; PACHECO, J. G.; SACRAMENTO, L. A.; KALID, R.; MAGALHÃES, S. L. F.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. Metodologia para Aquisição e Validação de Dados Operacionais para Aplicação da Tecnologia Pinch numa Planta de Polietileno. **XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Curitiba, 2004.
- WANG, Y.; DU J.; WU, J.; HE, G.; KUANG, G.; FAN, X.; YAO, P.; LU, S.; LI, P.; TAO, J.; WAN, Y.; KUANG, Z.; TIAN, Y. Application of Total Process Energy-Integration in Retrofitting an Ammonia Plant. **Applied Energy**, v.76, p.467-480, 2003.

UNCERTAINTIES IN THE HEAT EXCHANGER NETWORK SYNTHESIS: CASE STUDIES

The increase of energy prices, the demand for CO₂ reduction and harder market competition are typical aspects of the modern scenario which the petroleum industry must deal with. As one of the consequences of these new challenges, the energy consumption rationalization has become a must. Among the several technological advances with this objective, energy integration is an important approach, which aims to design heat exchanger networks that allow the reduction of the energy consumption in an industrial plant. One of the most used integration tool is the pinch technology. An important example of a heat exchanger network in the petroleum

refining industry consists in the crude preheat train for atmospheric distillation. In this case, the hot product streams and pumparounds are employed to heat the feed crude stream. Since, the uncertainties of process data can be an important obstacle to reach an optimal solution of the heat exchanger network synthesis problem, this work analyses, through case studies, how these uncertainties can impact the energy integration solution. Considering variations in the data related to the problem formulation, (for example, flow rate, inlet temperature and outlet temperature), a synthesis procedure is applied and the results are compared according to the economical performance of each alternative solution found. The results allow illustrating that the impact of the uncertainties in the problem formulation can affect the potential economic return predicted during the network synthesis. The comparison between different cases subject to disturbances indicates that the economic results can be significantly different; there are modifications in the annualized total cost of until 30% and in the total network area of until 25%.

Energy integration, pinch technology, heat exchanger network synthesis.

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.