

ABORDAGEM PARA REUTILIZAÇÃO DE TROCADORES EM SÍNTESE E RETROFIT DE REDES DE TROCADORES DE CALOR

Gustavo Scarparo Pandolfo, scarparopgustavo@gmail.com¹

Valter Bravim Junior, valter_bravim@hotmail.com¹

Roger Josef Zemp, zemp@unicamp.br¹

¹UNICAMP. Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Av. Albert Einstein, 500. SP 13083-852, Brasil.

Resumo: A síntese e otimização de redes de trocadores de calor tem um papel de grande importância na engenharia de processos por minimizar o gasto energético e econômico através da integração energética, assim também reduzindo impactos ambientais relacionados ao emprego de utilidades em processos de troca térmica. Dentro dos métodos de integração energética desenvolvidos nas últimas décadas, o Retrofit permite a alteração de redes de trocadores de calor de forma retroativa, pela realocação ou adição/remoção de trocadores ou a modificação das tubulações de processo, para tornar a rede mais energeticamente eficiente. O presente artigo apresenta um método desenvolvido para alocar trocadores de calor já disponíveis para uso, com dimensões e propriedades conhecidas, em um sistema de correntes de processo para a síntese de uma rede de trocadores de calor otimizada. Em comparação a outros métodos de integração energética, como a metodologia Pinch, este método visa o aproveitamento de equipamentos à disposição, otimizando a alocação dos mesmos, ao invés de focar no cálculo para aquisição de novos trocadores de calor. Esse modelo foi desenvolvido a partir da formulação de um algoritmo computacional, onde as equações de balanço de energia e restrições presentes no sistema são resolvidas por um método numérico simultâneo baseado em programação não-linear inteira mista (MINLP), em que a otimização desse sistema de equações é feita com a ajuda do software GAMS. Essas equações são organizadas com o auxílio do conceito de superestruturas, para determinar as possibilidades de alocação dos trocadores de calor na rede resultante. O algoritmo foi construído progressivamente e testado para diferentes estudos de caso para verificar sua utilidade em cenários gradativamente mais complexos, levando em conta condições como a natureza das correntes envolvidas e a divisão de correntes para alocação de trocadores em paralelo. Ao final do estudo, o algoritmo resultante será aplicado em um último estudo de caso mais complexo, retirado da literatura sobre o Retrofit de redes de trocadores de calor, onde se espera expor a praticidade e utilidade do algoritmo para o fim de aproveitamento de trocadores de calor disponíveis, comparando-o aos métodos clássicos encontrados na literatura sobre a síntese de redes de trocadores de calor.

Palavras-chave: redes de trocadores de calor, retrofit, superestrutura, abordagem simultânea, otimização de processos

1. INTRODUÇÃO

Os processos químicos na indústria, em geral, requerem a troca de calor entre correntes de processo para ajustar suas temperaturas até níveis desejados. A integração energética em plantas químicas permite a máxima recuperação energética nesses processos industriais. Alocando trocadores de calor em posições apropriadas, correntes quentes e frias vão trocar calor de forma mais eficiente, a depender do método de integração energética, assim minimizando o custo econômico com utilidades quentes e frias, como vapor de alta pressão e água de resfriamento. Tal diminuição no consumo de utilidades também representa um menor impacto ambiental.

No desenvolvimento de modelos de integração energética, metodologias vem sido propostas na literatura desde o século passado, tendo como precursores trabalhos como o de Linnhoff and Flower (1978). A análise Pinch é uma das pioneiras nesse campo, considerando metas de energia e outros conceitos termodinâmicos para a alocação ótima dos trocadores no sistema. Ao longo dos anos, outros avanços foram feitos para aprimorar os métodos aplicados nessa área, cada um tendo suas vantagens e desvantagens em relação à solução do problema de síntese das redes de trocadores de calor e sua otimização. Por exemplo, a análise Pinch, apesar de ser precursora para problemas de otimização energética, apresenta muitas vezes soluções complexas com várias unidades de troca de calor, desconsiderando fatores como correntes que não podem ser misturadas devido a sua natureza ou disposição geográfica na planta, além da dificuldade de aplicação em redes de trocadores já existentes. Sendo assim, a tecnologia Pinch gera uma proposta que deve ser refinada pelo olhar crítico do engenheiro de processos.

Posteriormente, outros métodos começaram a surgir com o avanço dos recursos computacionais. A programação matemática apresenta algoritmos que otimizam as redes de trocadores de calor por meio da resolução de sistemas de equações. Tais métodos podem ser categorizados entre métodos simultâneos, que resolvem todas as equações da modelagem de uma vez; ou sequenciais, que dividem o problema de otimização em pequenos passos e os resolvem como subproblemas. A montagem das redes por esses métodos se mostra mais complicada e demorada, mas também gera resultados mais objetivos quando utilizada com sucesso.

Os métodos de programação matemática são, muitas vezes, utilizados juntamente com métodos termodinâmicos, tais como a tecnologia Pinch, de forma a otimizar a síntese de redes de trocadores de calor. Considerando sistemas já existentes, é interessante o estudo de adição ou realocação de trocadores de calor dessas redes. Tais métodos, que englobam essa característica de modificação retroativa das redes, são chamados de métodos de Retrofit. Trabalhos como o desenvolvido em Tjoe and Linnhoff (1986) mostram essa análise Pinch aplicada em um processo de Retrofit.

Dentre os métodos de integração energética apresentados na literatura, as equações dos modelos matemáticos são, geralmente, resolvidas considerando todas as possíveis alocações dos trocadores de calor. Isso pode ser feito pela utilização de superestruturas, que são modelos que englobam todas as possíveis associações de trocadores em um só esquema. Sendo assim, a rotina computacional tende a solucionar os cálculos de troca de calor em cada ramo dessa superestrutura, com base nos resultados que retornam o melhor aproveitamento energético associado ao menor custo possível.

Métodos de integração energética por Retrofit, no entanto, podem se tornar bastante complexos, e várias proposições de modelos utilizando abordagens heurísticas, algoritmos genéticos e outras ferramentas robustas foram feitas para solucionar essas situações, como citado em Chin *et al.* (2020). Conseguiríamos, no entanto, resolver tais problemas onde conhecemos os dados dos trocadores de calor já disponíveis em um processo, com uma abordagem mais simples do que tais métodos complexos citados na literatura?

Esses métodos complexos, como algoritmos genéticos, são abordados na literatura visando construir uma rede de trocadores de calor calculando as áreas desses novos trocadores para otimizar o custo energético. Nosso foco, no entanto, é diferente. E se possuímos trocadores de calor já disponíveis em uma planta, pronto para serem utilizados? Conhecendo as propriedades desses trocadores de calor, o que muda na abordagem para a síntese de uma rede onde esses trocadores de calor possam ser alocados em um sistema para minimizar o gasto com utilidades, ao invés de calcular uma rede de trocadores novos do zero?

O objetivo desse artigo é desenvolver e aplicar um método para alocar trocadores de calor disponíveis e de dados conhecidos em um sistema existente. A síntese dessa rede de trocadores de calor será feita através de um algoritmo simples que utilizará como ferramenta as superestruturas para definir um modelo com equações que descrevam o processo de troca térmica, utilizando um método numérico com a ajuda de um software computacional. Esse método, mais simples do que alguns dos métodos aplicados no Retrofit de redes na literatura, difere desses métodos tradicionais por aproveitar trocadores que já possam estar disponíveis na planta onde se deseja fazer a integração energética.

O presente trabalho mostrará a metodologia básica para a formulação do modelo matemático e de implementação do algoritmo na seção a seguir. Nas seções 3, 4 e 5, teremos a aplicação desse algoritmo desenvolvido em estudos de caso progressivamente mais complexos, com as devidas modificações importantes do algoritmo explicitadas no texto de cada seção, bem como a discussão dos resultados desses estudos de caso.

2. METODOLOGIA BÁSICA PARA IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Um algoritmo de integração energética pode ser proposto, essencialmente, pelo cálculo de balanços de energia. Sendo assim, o alicerce do algoritmo será a implementação de um modelo que leve em conta os balanços de calor globais (para cada corrente) e cada troca térmica realizada entre um par de correntes, para cada trocador de calor existente no processo.

Além de definir como será a estrutura desse algoritmo, em termos das equações que serão implementadas, também deve-se levar em conta quais serão os parâmetros de entrada, quais são as variáveis envolvidas e quais são as variáveis a serem otimizadas.

Como dados de entrada, consideramos um número de trocadores de calor, correntes quentes e correntes frias e utilidades disponíveis. O código a ser proposto pode otimizar a alocação de cada trocador de calor (ou conjunto de trocadores) na rede de processo com esses dados iniciais.

A forma como essas alocações serão feitas, considerando as equações de balanço de energia, leva em conta uma ferramenta que possibilita comparar todas as combinações possíveis em que os trocadores de calor podem ser inseridos na rede, que são as superestruturas. As superestruturas são utilizadas para contemplar todas as possíveis distribuições dos trocadores de calor na rede. A Fig. 1 abaixo apresenta um exemplo de superestrutura para um sistema de duas correntes quentes, duas correntes frias e dois trocadores de calor.

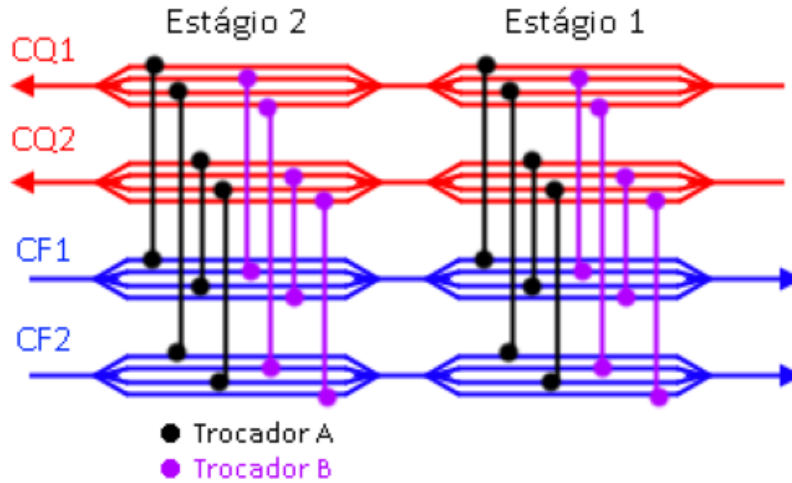


Figura 1. Exemplo de superestrutura.

No exemplo da Fig. 1, as diferentes possibilidades de alocação de cada trocador são ilustradas, dependendo de qual trocador está alocado em cada estágio, e quais são as correntes envolvidas para essa troca. Nesse exemplo simples, são 8 possibilidades de alocação, caso eles estejam presentes na rede final, e uma quantidade ainda maior se considerarmos as diferentes combinações que existem. Para exemplos mais complexos, essa quantidade de combinações é ainda maior, o que justifica a utilização de códigos computacionais para encontrar a melhor rede resultante, levando em conta as metas de eficiência energética para o processo. Porém, para qualquer rede, utilizando esse modelo de superestrutura, as equações podem ser generalizadas para qualquer número de correntes de processo e trocadores de calor.

Visto que a força motriz das trocas térmicas é a diferença de temperatura, as temperaturas depois de cada estágio de transferência de calor serão um ponto chave do sistema de equações formado pelo modelo.

A função objetivo do algoritmo proposto pode ser definida para minimizar os custos de utilidade ou, então, o mínimo custo econômico para sintetizar/modificar a rede de trocadores de calor. A rede que retorne a melhor resposta dada a condição será definida pela otimização numérica simultânea dos sistemas de equação em cada nó da superestrutura. Sendo assim, o código será resolvido usando programação não-linear inteira mista (MINLP) para encontrar a solução da melhor rede em termos de gasto de utilidade quente.

O software GAMS será utilizado para resolver as equações desse algoritmo de otimização das redes, retornando as melhores alocações dos trocadores de calor de acordo com cada caso. Algumas restrições adicionais podem ser impostas para aumentar a complexidade e o alcance do modelo. A implementação do algoritmo tem como base o programa HXSUPER disponível em Shenoy (1995). O equacionamento foi desenvolvido abaixo com auxílio na teoria de síntese de redes de trocadores de calor disponível em Kemp (2006).

2.1. Equacionamento do modelo geral

Os parâmetros conhecidos do sistema, tais como temperaturas de entrada e saída das correntes, suas respectivas capacidades térmicas e seus coeficientes de transferência de calor são tomados como dados de entrada para o programa, além dos dados referentes aos trocadores de calor disponíveis.

A partir desses dados, são definidos os balanços de energia globais e por cada estágio na superestrutura. O balanço de energia global de uma corrente quente jh qualquer é definido abaixo, em função da sua capacidade térmica (mcp), das suas temperaturas de entrada e saída (T_{in} e T_{out}), do calor total trocado em cada estágio i da superestrutura ($Q_{j,i}$) e do calor trocado entre a corrente quente jh e a utilidade fria CU . Para uma corrente fria jc , o cálculo é análogo, mas considerando o calor trocado entre a corrente fria com a utilidade quente HU .

$$mcp_{jh}(T_{jh,in} - T_{jh,out}) = \sum_i Q_{jh,i} + Q_{jh,CU} \quad (1)$$

$$mcp_{jc}(T_{jc,out} - T_{jc,in}) = \sum_i Q_{jc,i} + Q_{jc,HU} \quad (2)$$

O balanço de energia em cada estágio ($Q_{jh,i}$ para uma corrente quente, $Q_{jc,i}$ para uma corrente fria) é definido como o somatório do calor trocado em cada ramo da superestrutura, que representa uma possibilidade de alocação de um

trocador de calor integrado. Esse parâmetro, definido como $Q_{jh,jc,i}$, representa o calor trocado entre a corrente jh e uma corrente jc no estágio i .

$$Q_{jh,i} = mcp_{jh}(T_{jh,i} - T_{jh,i+1}) = \sum_{jc} Q_{jh,jc,i} \quad (3)$$

$$Q_{jc,i} = mcp_{jc}(T_{jc,i} - T_{jc,i+1}) = \sum_{jh} Q_{jc,jh,i} \quad (4)$$

O balanço de energia das utilidades ($Q_{jh,CU}$ e $Q_{jc,HU}$) são determinados a partir da temperatura de saída do último estágio i' para cada corrente e da temperatura de saída final da corrente, inserida como parâmetro no programa (T_{out}).

$$Q_{jh,CU} = mcp_{jh}(T_{jh,i'} - T_{jh,out}) \quad (5)$$

$$Q_{jc,HU} = mcp_{jc}(T_{jc,out} - T_{jc,i'}) \quad (6)$$

Essas definições para o cálculo dos balanços de energia representam as principais equações a serem resolvidas pelo algoritmo de otimização. Além dessas definições, foram feitas algumas considerações sobre o processo, na forma de restrições. Para cada estudo de caso a ser apresentado, um conjunto diferente de restrições foi aplicado.

Por fim, para determinar a existência de um trocador de calor em um certo ramo da superestrutura, foram utilizadas variáveis binárias. O calor máximo que pode ser trocado entre duas correntes em cada estágio também é definido como restrição, levando em conta o coeficiente binário $y_{jh,jc,i,k}$. A definição atribuída a esse coeficiente binário é a de que seu valor é 1 caso o trocador k esteja alocado entre as correntes jh e jc no estágio i , e 0 caso ele não esteja integrando essas correntes nesse estágio.

$$Q_{jh,jc,i} \leq \sum_k y_{jh,jc,i,k} * \min(Q_{jh}, Q_{jc}) \quad (7)$$

A área do trocador de calor alocado entre a corrente quente jh e a corrente fria jc no estágio i e o coeficiente global de troca de calor U para esse trocador estão relacionados da seguinte forma com o calor transferido:

$$UA_{jh,jc,i} = \frac{Q_{jh,jc,i}}{\frac{2}{3}\sqrt{\Delta T_i \Delta T_{i+1}} + \frac{\Delta T_i + \Delta T_{i+1}}{6} + 10^{-6}} \quad (8)$$

Para correlacionar a área calculada com a área disponível do trocador disponível k (A_k), fornecido como dado de entrada, usa-se o coeficiente binário.

$$\sum_{jh,jc,i} y_{jh,jc,i,k} * A_{jh,jc,i} = A_k \quad (9)$$

Com a implementação dessas equações e com os devidos ajustes no código, agora podemos aplicá-lo a um estudo de caso onde se conheçam as áreas de troca dos trocadores de calor disponíveis, e o programa poderá calcular a rede de trocadores de calor em que a configuração desses trocadores disponíveis seja a mais econômica possível.

2.2. Validação do código

Como um primeiro teste do algoritmo, consideramos um problema de duas correntes, uma corrente fria e uma quente, com trocadores de calor de diferentes áreas de troca. Nesse caso, consideramos U constante para todos os trocadores envolvidos e alocação de trocadores apenas em série. Os dados de entrada desse teste se encontram na Tab. 1.

Tabela 1. Dados de entrada do estudo do primeiro teste.

Corrente	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	mcp (kW/°C)
CQ1	150	50	10
CF1	50	150	10
UQ	200	199	-
UF	15	25	-

Inserindo como dados de entrada, também, dois trocadores de calor de áreas conhecidas (50 m² e 100 m², respectivamente), o programa retorna a rede representada pela Fig. 2. Inserindo quatro trocadores de calor, mas permitindo apenas a alocação de dois deles, o código gera a rede representada pela Fig. 3.

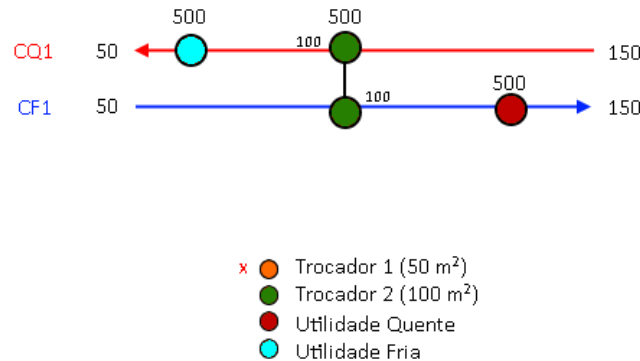


Figura 2. Rede de trocadores de calor proposta para um trocador de calor permitido.

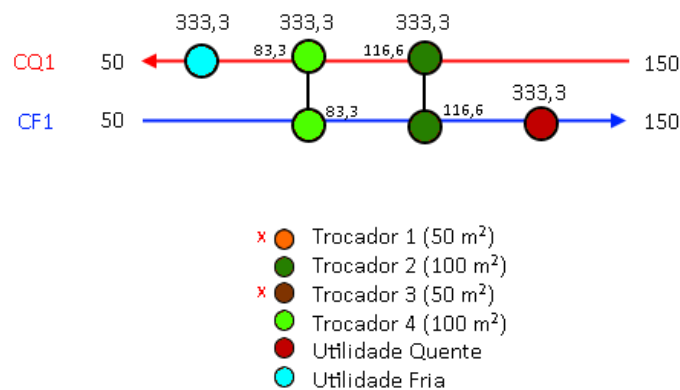


Figura 3. Rede de trocadores de calor proposta para dois trocadores de calor permitidos.

Para a primeira simulação, o código gera corretamente a configuração que retorna o menor gasto possível com utilidades, considerando os dados dos trocadores disponíveis. Já a segunda simulação demonstra que apenas os dois trocadores de maior área disponível foram alocados, limitando o número de trocadores a serem alocados para dois.

Para um sistema simples, o código retorna a rede de trocadores de calor otimizada em um caso de uma corrente quente e uma corrente fria, sendo capaz de selecionar os melhores trocadores dentre um conjunto de trocadores fornecidos.

Tendo em vista que o código funcionou para esse teste, foram feitas as modificações necessárias para aplicá-los a estudos de caso cada vez mais complexos.

3. ESTUDO DE CASO 01: ALOCAÇÃO DE TROCADORES LEVANDO EM CONTA O COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA PARA UM PROBLEMA DE MÚLTIPLAS CORRENTES

No caso 01, definimos uma forma de atribuir um coeficiente global de transferência de calor para os trocadores de calor. O coeficiente global U_k de cada trocador de calor k será estimado através dos coeficientes de troca de calor por convecção das correntes quente e fria, h_{jh} e h_{jc} , respectivamente.

$$\frac{1}{U_k} = \frac{1}{h_{jh}} + \frac{1}{h_{jc}} \quad (10)$$

Os coeficientes de troca de calor por convecção de cada corrente devem ser fornecidos como dado de entrada no programa, juntamente aos demais dados (temperaturas, capacidade térmica) referentes às correntes. Podem ser usados valores típicos ou estimados pelo engenheiro.

O estudo de caso em que a nova metodologia foi testada é adaptado de Shenoy (1995). São consideradas duas correntes quentes, duas correntes frias, desejando-se alocar dois trocadores de calor disponíveis, com áreas conhecidas e cargas térmicas variáveis, de acordo com a alocação que forem a eles atribuída. Os dados de entrada se encontram na Tab. 2.

Tabela 2. **Dados de entrada do estudo de caso 01.**

Corrente	T_{in} (°C)	T_{out} (°C)	mc_p (kW/°C)	h (kW/m ² .°C)
CQ1	175	45	10	0,1
CQ2	125	65	40	0,2
CF1	20	155	20	0,3
CF2	40	112	15	0,4
UQ	180	179	-	0,2
UF	15	25	-	0,2

O código foi primeiramente testado para valores extremos de área de troca térmica, para verificar se o algoritmo funcionava corretamente. Tanto valores muito grandes quanto valores muito pequenos de área de troca retornaram os resultados esperados. Sendo assim, foi realizado um teste com áreas de troca reais para verificar a rede resultante.

3.1 Dois trocadores de calor de igual U

Aplicamos o algoritmo para o estudo de caso considerando quatro trocadores de calor disponíveis na planta, mas colocando a restrição de que apenas dois podem ser alocados na rede. Todos os trocadores foram considerados tendo igual coeficiente global de troca térmica U . A rede resultante se encontra na Fig. 4.

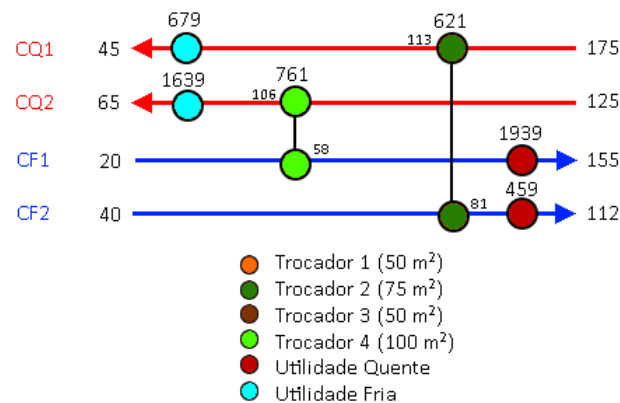


Figura 4. **Rede de trocadores de calor realista, 2 trocadores permitidos.**

Observamos que o código funciona de acordo com o esperado para estes valores, alocando os trocadores com maior área disponível. Assim, está constatado que o algoritmo funciona bem para problemas de múltiplas correntes, podendo alocar os trocadores de calor selecionando o melhor par de correntes disponível para minimizar o consumo de utilidades.

Repetindo o processo do último caso, mas agora variando o coeficiente global de transferência de calor de acordo com cada trocador disponível, obtemos mais duas redes:

3.2 Trocador de maior área com maior U

Para este caso, consideramos o trocador de 100 m² como tendo um U dez vezes superior ao trocador de 75 m².

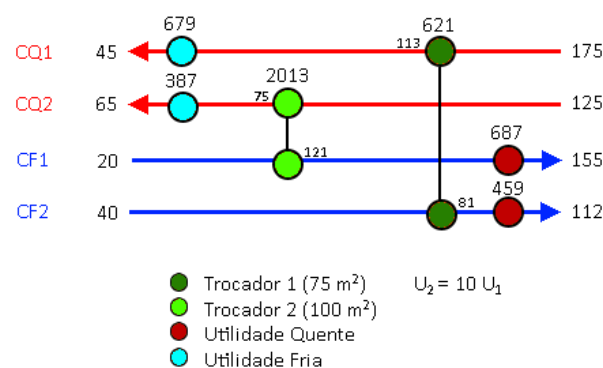


Figura 5. **Rede de trocadores de calor com 2 trocadores, onde $U_2 > U_1$**

Obtemos a mesma rede do caso anterior, mas agora o trocador de 100 m² apresenta uma carga térmica ainda maior, visto que seu coeficiente de transferência de calor é mais alto.

3.3 Trocador de maior área com menor U

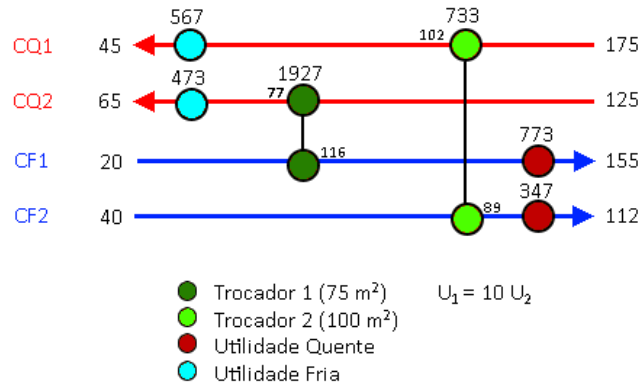


Figura 6. Rede de trocadores de calor com 2 trocadores, onde $U_2 < U_1$

Invertendo os valores de U para os trocadores, no entanto, também invertemos a alocação dos trocadores 1 e 2 com relação às correntes. Portanto, o modelo descreve bem a montagem da rede considerando trocadores de calor com coeficientes globais de transferência de calor diferentes para casos de múltiplas correntes.

Nosso primeiro estudo de caso constata que o algoritmo se comporta bem para casos de múltiplas correntes, considerando somente a alocação de trocadores em série. O próximo passo, então, é considerar que possa existir alocação em paralelo na rede otimizada.

4. ESTUDO DE CASO 02: ALTERAÇÃO DO CÓDIGO PARA PERMITIR ALOCAÇÃO DE TROCADORES EM PARALELO

Uma estratégia para considerar a alocação em paralelo de trocadores de calor na superestrutura requer o cálculo do coeficiente de transferência de calor em cada subdivisão das correntes. Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor em um escoamento turbulento, a equação de Dittus-Boelter pode ser utilizada:

$$\frac{hd}{k} = 0,023(Re)^{0,8}(Pr)^n \quad (11)$$

Onde Re e Pr são os números adimensionais de Reynolds e Prandtl, respectivamente, k é a condutividade térmica e d o diâmetro do tubo. Como simplificação para o algoritmo, consideramos que a variação das propriedades térmicas das correntes é desprezível na faixa de temperatura trabalhada. Além disso, como simplificação adicional no código, considerou-se que o h é diretamente proporcional ao número de Reynolds no escoamento. Sendo assim, considerando uma mistura isotérmica nas divisões de correntes possíveis em uma associação de trocadores de calor em paralelo, os coeficientes h serão proporcionais à razão de divisão da vazão nos tubos.

Aplicando essa nova equação ao algoritmo, consideramos um novo exemplo com os dados dispostos na Tab. 3.

Tabela 3. Dados de entrada do estudo de caso 02.

Corrente	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	mc _p (kW/°C)	h (kW/m ² .°C)
CQ1	150	50	20	0,2
CF1	50	150	10	0,2
CF2	50	150	10	0,2
UQ	200	199	-	0,2
UF	15	25	-	0,2

Considerando três trocadores de calor, de áreas 50, 75 e 100 m², e assumindo que a estrutura só pode possuir dois estágios, a rede resultante está exposta na Fig. 7.

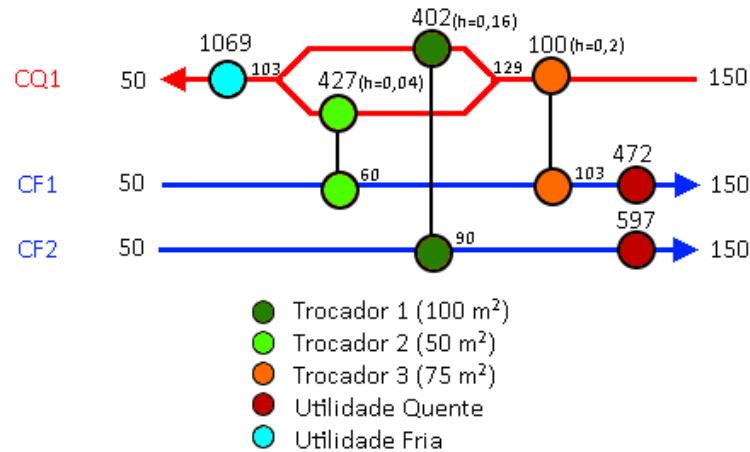


Figura 7. Rede de trocadores para dois estágios permitidos.

Verifica-se que, ao permitir apenas dois estágios na estrutura da rede, o algoritmo força a alocação em paralelo dos trocadores 1 e 2. Com as devidas modificações no algoritmo, agora é possível construir redes que considerem a alocação tanto em série, quanto em paralelo dos trocadores de calor, levando em conta as considerações citadas durante a modelagem (mistura isotérmica, propriedades como viscosidade e capacidade térmica pouco variáveis na faixa de temperatura considerada). Com a confirmação de que o algoritmo funciona bem para todos os tipos de associação de trocadores de calor, o passo final é aplicá-lo a um exemplo mais complexo retirado da literatura.

5. ESTUDO DE CASO 03: APLICAÇÃO DO ALGORITMO PARA UM MODELO COMPLEXO DA LITERATURA

Após verificar o funcionamento do algoritmo para casos com múltiplas correntes, inclusive variando os coeficientes de transferência de calor em cada corrente e trocador, bem como permitindo a alocação em série e em paralelo, o estudo de caso final foi a aplicação do algoritmo em um exemplo presente em Kemp (2006), para comparação do algoritmo com um método de Retrofit tradicional presente na literatura. Os dados de entrada do exemplo original estão presentes na Tab. 4. Por sua vez, os dados dos trocadores de calor disponíveis no exemplo original estão presentes na Tab. 5. Os dados foram inseridos no algoritmo para que este pudesse realocar os trocadores para encontrar uma rede de trocadores de calor o mais otimizada possível. O resultado dessa rede se encontra na Fig. 8.

Tabela 4. Dados de entrada do estudo de caso 03.

Corrente	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	mc _p (kW/°C)
CQ1	159	77	2,285
CQ2	267	80	0,204
CQ3	343	90	0,538
CF1	16	117	0,933
CF2	118	265	1,941
UQ	300	299	-
UF	15	25	-

Tabela 5. Dados dos trocadores de calor do estudo de caso 03.

Trocador	1	2	3
A (m ²)	890	1280	480

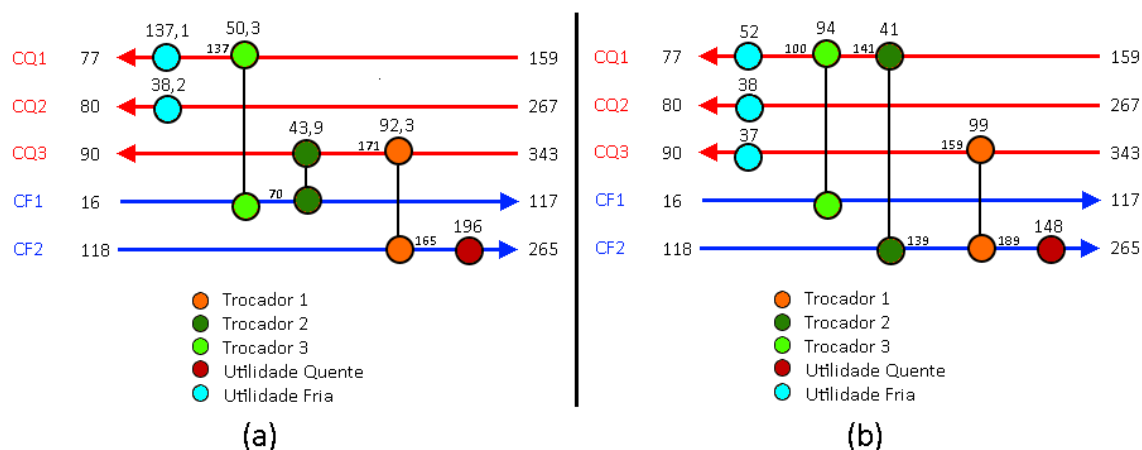


Figura 8. Comparação das redes obtidas entre o exemplo original de Kemp (2006) (a) e a rede gerada pelo algoritmo do presente artigo (b).

Pela Fig.8, pode-se notar a diferente configuração da rede de trocadores de calor obtida para os mesmos trocadores de calor encontrados no exemplo original, apenas variando o método de síntese da rede. Foi possível alocar os trocadores em um arranjo diferente, de tal forma a encontrar uma rede com menor gasto com utilidade quente do que o exemplo presente em Kemp (2006). É pertinente observar que, ainda que o algoritmo desenvolvido neste artigo contenha algumas simplificações, a rede construída apresenta uma economia de cerca de 25% em termos de consumo de utilidade quente, sem a necessidade de um método complexo de Retrofit para realocar os trocadores disponíveis.

6. CONCLUSÕES

A integração energética é uma área de extrema importância para a otimização energética dos sistemas químicos. Apesar de vários métodos já existirem para a síntese de redes de trocadores de calor, muitos deles são complexos e tem uma abordagem em que trocadores de calor são projetados do zero. No presente artigo, um método foi desenvolvido para aproveitar trocadores de calor já disponíveis para a síntese de uma rede, se utilizando de um algoritmo baseado em superestruturas que se mostrou eficaz quando aplicado aos diferentes estudos de caso. Tal algoritmo foi testado para diversos casos, progressivamente mais complexos, para mostrar que é eficiente na síntese de uma rede que aproveite os trocadores existentes e faça sua alocação no sistema para sintetizar uma rede mais eficiente energeticamente. Esse estudo se mostra bastante promissor ao ter uma abordagem diferente de outros estudos de Retrofit, que sintetizam a rede levando em conta trocadores novos, e para isso utilizou uma abordagem simples baseada em balanços de energia e uma modelagem matemática embasada em conceitos termodinâmicos simples na área de transferência de calor. Sendo assim, esse método é uma ferramenta muito interessante para um engenheiro realizar a integração energética em um sistema químico usando somente trocadores já existentes na fábrica, sem a necessidade de calcular e comprar novos trocadores de calor. Quando aplicado ao estudo de caso de Kemp (2006), também, demonstrou-se que o método é eficiente para métodos de Retrofit onde se deseja realocar os trocadores de calor já existentes em uma rede.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES e a CNPQ pelo financiamento da pesquisa de mestrado que resultou no projeto elaborado no presente artigo.

8. REFERÊNCIAS

- Chin, H.H., Wang, B., Varbanov, P.S., Klemeš, J.J., Zeng, M., Wang, Q.W., 2020. “Long-term investment and maintenance planning for heat exchanger network retrofit”. *Applied Energy*. V. 279, 115713.
- Kemp, I.C., 2006. *Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. Ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 416 p.
- Linnhoff, B., Flower, J.R., 1978. “Synthesis of heat exchanger networks: Systematic generation of energy optimal networks”. *AIChE Journal*. V. 24. P.633-642.
- Shenoy, U.V., 1995. *Heat Exchanger Network Synthesis: Process Optimization by Energy and Resource Analysis*. Ed. Gulf Professional Publishing, Houston, USA, 642 p.
- Tjoe, T.N., Linnhoff, B., 1986. “Using pinch technology for process retrofit”. *Chemical Engineering*. V. 93, P. 47–60.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A HEAT EXCHANGER NETWORK SYNTHESIS AND RETROFIT APPROACH BY REUTILIZING AVAILABLE HEAT EXCHANGERS

Gustavo Scarparo Pandolfo, scarparopgustavo@gmail.com¹

Valter Bravim Junior, valter_bravim@hotmail.com¹

Roger Josef Zemp, zemp@unicamp.br¹

¹State University of Campinas, Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Av. Albert Einstein, 500. SP 13083-852, Brasil.

Abstract. Heat exchanger networks synthesis and optimization have an important place in process engineering, since it reduces energetic and economic costs, as well as it lessens possible environmental impacts. The Retrofit analysis is one of such heat integration methods, which modifies an existing network retroactively by adding, removing or switching heat exchangers around. This article presents a new method to allocate available heat exchangers in an existing process in order to optimize energetic costs. Comparing this method with other classic methodology present in literature, such as the Pinch analysis, the present approach works by utilizing heat exchangers that are already available for use, instead of calculating and purchasing new heat exchangers. This model was developed as an algorithm where the energy balances and restrictions present in that system are accounted for, resulting in a set of equations that are solved simultaneously via a numeric method using Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP). This optimization is done within the software GAMS. These equations are determined using the concept of superstructures, which is a tool that accounts all possible combinations of heat exchanger allocations in the resulting network. The algorithm was assembled step-by-step, by being tested in different case studies, which get more complex progressively by implementing new conditions each time, like stream splitting. The final case study presents a Retrofit example found in the literature, where the algorithm developed in the present work is tested and compared to the original network. This result enables the comparison between the developed model and classic methods found in the literature for heat exchanger networks synthesis, proving its utility for cases where there are available heat exchangers that are ready to be allocated in an existing process.

Keywords: heat exchanger networks (HEN), retrofit, superstructure, simultaneous approach, process optimization.