

## **Simulação de rede de integração energética nas etapas de pré-aquecimento e dessalinização do petróleo**

### **Simulation of energy integration network in the oil preheating and desalination stages**

DOI:10.34117/bjdv7n9-115

Recebimento dos originais: 09/08/2021

Aceitação para publicação: 09/09/2021

#### **Sabrina Franceschi**

Graduanda em Engenharia Química

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: Rua Fernando de Noronha, km 573, Margens da BR-282. Pinhalzinho – SC

E-mail: [sabrinafranceschi.eq@gmail.com](mailto:sabrinafranceschi.eq@gmail.com)

#### **Heveline Enzweiler**

Doutora em Engenharia Química

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Endereço: Rua Fernando de Noronha, km 573, Margens da BR-282. Pinhalzinho – SC

E-mail: [heveline.enzweiler@udesc.br](mailto:heveline.enzweiler@udesc.br)

#### **RESUMO**

O consumo energético tem crescido consideravelmente e a indústria química está entre as grandes consumidoras de energia. Esse fato pode gerar diversos impactos nos âmbitos ambientais e econômicos. A integração energética visa o melhor aproveitamento do calor disponível no processo, evitando desperdícios. Redes de integração energética tem um papel de grande importância e consistem basicamente no aproveitamento da energia de correntes que precisam ser resfriadas fornecendo calor para as correntes que necessitam ser aquecidas. Neste trabalho foi utilizada a tecnologia Pinch para a síntese de uma rede de trocadores de calor com integração energética nas etapas de pré-aquecimento e dessalinização do petróleo. Através da análise dos dados de correntes de processo obtidos na literatura, foi proposto um arranjo de trocadores de calor. O ponto de estrangulamento térmico (Pinch) foi identificado nas temperaturas de 43,1 °C (correntes frias) e 63,1 °C (correntes quentes). A rede proposta é composta por cinco trocadores de calor de integração energética e três trocadores operando com utilidades e possibilitou consumo de utilidades similar ao consumo mínimo previsto pelo modelo de transbordo para o conjunto de correntes consideradas. Foi realizado o dimensionamento dos trocadores de calor da rede e a simulação do sistema considerando possíveis oscilações na temperatura de entrada do petróleo cru. Este estudo possibilitou uma experiência interdisciplinar dentro da Engenharia Química, garantindo a integração de conteúdos relacionados com diferentes disciplinas da grade curricular.

**Palavras-Chave:** Tecnologia Pinch, Trocadores de calor, Engenharia Química.

#### **ABSTRACT**

Energy consumption has grown considerably and the chemical industry is among the major energy consumers. This may generate various impacts on environmental and economic domains. Energy integration is aimed at better use of available heat in the

process, avoiding waste. Energy integration networks play a very important role and basically consist in the use of energy from currents that need to be cooled providing heat for the currents that need to be heated. In this work Pinch technology was used to synthesize a network of heat exchangers with energy integration in the oil preheating and desalination stages. Through the analysis of process currents data obtained in the literature, an arrangement of heat exchangers was proposed. The Pinch was identified at temperatures of 43.1 °C (cold currents) and 63.1 °C (hot currents). The proposed network is composed of five energy integration heat exchangers and three exchangers operating with utilities and allowed for utility consumption similar to the minimum consumption predicted by the transshipment model for the considered set of currents. The dimensioning of the heat exchangers in the network and the simulation of the system were carried out considering possible fluctuations in the inlet temperature of crude oil. This study allowed an interdisciplinary experience in the Chemical Engineering, ensuring the integration of content related to different subjects of the curriculum.

**Keywords:** Pinch Technology, Heat exchangers, Chemical Engineering.

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo energético passa por um contínuo aumento devido às diferentes atividades desenvolvidas pela sociedade. Na antiguidade, até o início da era moderna a principal fonte de recursos energéticos era a madeira. Com a revolução industrial, este quadro foi modificado e o uso do carvão começou a ganhar força e dar origem a diferentes máquinas térmicas com a geração do vapor. Após isso, no início do século XX, a descoberta e o início da produção em larga escala do petróleo deram origem a uma nova revolução que modificou todo o sistema industrial. Plantas químicas são tradicionalmente grandes consumidoras de energia e este fato acarreta, dentre outros problemas, em elevados custos para o processo industrial.

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2008, p. 38) embora a expansão acentuada do consumo energético possa vir a ser um reflexo da melhoria da qualidade de vida e do aquecimento econômico, ela acarreta também em diversos aspectos negativos. Dentre eles tem-se: o impacto ambiental, a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais e também os elevados investimentos na construção de novas usinas e busca de novas fontes. Além disto, a sociedade pressiona cada vez mais para um melhor desempenho industrial no que diz respeito ao meio ambiente. São exigidos novos enfoques de desenvolvimento. Processos ambientalmente amigáveis ganham mais espaço e são uma tendência econômica.

A estratégia da integração energética é usada amplamente nas plantas industriais devido ao seu potencial de aumentar a eficiência energética dos processos, reduzindo os

custos com utilidades e evitando desperdícios. Sua utilidade pode ser implementada tanto na adoção de novos processos quanto nas alterações na estrutura dos processos já existentes.

A síntese de um processo é a etapa em que são definidas no projeto as unidades de processamento e as correntes entre esses elementos, visando obter um sistema estruturado e ordenado. A síntese de processos engloba diversas metodologias e alternativas. Já a análise de processos consiste em decompor estes elementos e avaliar seu desempenho. Perlingeiro (2005, p.121) também relata que o problema da síntese consiste em gerar diversos fluxogramas possíveis, para que a análise determine qual dentre estes exibe maior lucratividade, menor custo de operação ou de melhor utilização de recursos.

As respostas do processo são previstas usando técnicas de análise envolvendo modelos matemáticos, correlações empíricas e ferramentas computacionais. Onde o maior foco é o uso eficiente da energia, com a consequente redução dos impactos ambientais (ANAPOLSKI et.al, 2015).

É de grande importância para a redução do consumo energético em uma indústria o emprego de redes de trocadores de calor de integração energética. Usualmente, as plantas que buscam este tipo de tecnologia têm estes projetos relacionados à melhoria da operação, remoção de gargalos da planta, melhoria da eficiência com relação à energia e matéria-prima utilização e a introdução de nova tecnologia em um processo existente (GUNDERSEN, 2002). As metas de desempenho de rede visam um mínimo consumo de utilidades, uma área de troca térmica mínima e um número mínimo também de unidades de troca térmica. A metodologia mais utilizada para a síntese de redes de integração energética é a Tecnologia Pinch, desenvolvida por Linnhof e Hindmarsh, que identifica um gargalo para a recuperação de calor disponível no projeto da rede (LINNHOF e HINDMARSH, 1981). A tecnologia Pinch define um ou mais pontos de estrangulamento energético, que são o ponto onde o projeto de rede deve ser iniciado, e estes simbolizam as regiões em que a força motriz para transferência de calor entre as correntes quentes e frias é mínima.

A determinação da quantidade mínima de utilidade quente e fria é importante análise para síntese da rede de trocadores de calor. Isso porque o consumo mínimo de utilidades de uma rede corresponde à integração energética máxima. Os valores mínimos consumo de utilidades podem ser obtidos através do Modelo de Transbordo (PAPOULIAS e GROSSMANN, 1983). Neste modelo há a divisão das correntes por intervalos de temperaturas. As temperaturas de todos os fluxos do processo são colocadas

em escala e são classificadas para determinar intervalos entre uma temperatura e a temperatura adjacente, e um balanço de energia pode ser realizado para cada um destes intervalos. É através destes balanços que se torna possível identificar o ponto de Pinch. Considerando que o calor não pode ultrapassar este ponto de estrangulamento térmico, o modelo permite que as sub-redes possam ser tratadas de forma independente. (PAPOULIAS e GROSSMANN, 1983).

Um segmento da indústria química em que a integração energética está muito presente é a do refino de petróleo. Dentro da indústria do petróleo, desde a crise do segmento na década de 70, os gastos energéticos têm sido foco de atuação e aprimoramentos a nível mundial. Com ênfase em estudos e análises do aumento da eficiência energética dos processos e na redução dos gastos. O aproveitamento do calor presente nas correntes de refino é uma técnica amplamente utilizada em refinarias de petróleo. (OLIM et al, 2002)

O petróleo é extraído do solo por meio da perfuração de poços que podem ser localizados em alto mar (QUEIROZ et al, 2019). Este petróleo cru é tratado nas refinarias onde é separado em diversas frações no processo de destilação. O processo que envolve a separação inicial de frações é a Destilação Atmosférica. Esta operação unitária separa os constituintes do petróleo cru devido as diferenças entre seus pontos de ebulição. Mesmo que a destilação seja considerada o primeiro passo no refino de petróleo bruto, deve-se reconhecer a necessidade da retirada da água salgada que contamina o poço de petróleo. Se este processo não ocorrer, o sal presente pode vir a formar incrustações ou corroer os materiais que constituem os tubos dos trocadores de calor e de alimentação da coluna de destilação. (SPEIGHT, 2017).

Como explicado por OLIM e colaboradores (2002), as correntes provenientes da destilação do petróleo constituem oferta energética significativa para o aquecimento do óleo cru. Como o petróleo cru se encontra nas condições de estocagem e necessita atingir as temperaturas compatíveis com a alimentação da torre de destilação, utilizar correntes de calor provenientes das frações já destiladas e de refluxos circulantes para o pré-aquecimento do petróleo cru é uma alternativa muito utilizada e que garante a redução do consumo de utilidades.

Considerando estes fatores, foi aplicada a tecnologia Pinch para realizar a síntese de rede de integração energética utilizando correntes típicas dos processos de Pré-Aquecimento e Dessalinização do Petróleo. A partir da rede sintetizada, foram realizados o dimensionamento dos trocadores de calor e a simulação da rede, para possibilitar a

análise dos efeitos gerados por possíveis modificações na temperatura da corrente de alimentação do petróleo cru. Este trabalho possibilitou o estudo mais completo de uma rede de integração energética aplicada em um importante processo químico de grande relevância, além de integrar os conhecimentos de diferentes áreas clássicas da Engenharia Química de forma dinâmica.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 SÍNTESE DA REDE DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

As correntes utilizadas no processo foram reportadas na literatura por Narasimhan e Jordache (2000, p.335 - 343). Estas correntes foram apresentadas como parte de um modelo de integração energética nas zonas de pré-aquecimento e dessalinização de petróleo. As correntes frias representam o petróleo cru que necessita ser aquecido para ser alimentado à torre de destilação. As correntes quentes são formadas por frações do petróleo que já sofreram o processo de destilação e necessitam ser resfriadas para que sigam cada qual em seu processo de refino dentro da indústria.

Foram obtidos os dados de fluxo, temperaturas de entrada e saída das correntes e os valores das constantes para cálculo do calor específico médio ( $C_p$  médio) para cada corrente. Os valores selecionados estão listados na Tabela 1. A diferença mínima de temperatura nas extremidades dos trocadores de calor, aquecedores e refrigeradores é o  $\Delta T_{min}$  e para este tipo de processo será considerado como 20°C. As correntes F1 e F2 fazem referência as correntes frias de petróleo cru. Já as correntes de Q1 a Q5 representam as correntes quentes que são as frações do petróleo oriundas do processo de destilação atmosférica.

Na síntese de redes de trocadores de calor é possível determinar os limites mínimo e máximo de consumo de utilidades através do Modelo de Transbordo. Neste modelo há a divisão das correntes por intervalos de temperaturas. Em cada intervalo serão realizados balanços de energia para analisar sua demanda energética. Considerando assim, toda a energia necessária para aquecer as correntes frias, e toda a demanda de calor que pode ser ofertada pelas correntes quentes. Os limites superiores de consumo energético correspondem à ausência absoluta de integração energética e os limites inferiores ao consumo mínimo de utilidades de uma rede, ou seja, à sua integração energética máxima.

Tabela 1: Correntes quentes e frias utilizadas para síntese da rede de integração energética para dessalinização e pré-aquecimento do petróleo.

Corrente		Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de saída (°C)	Cp médio (kcal kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	Vazão (kg s <sup>-1</sup> )
frias	F1	43,075	128,625	0,529	113,769
	F2	127,608	274,859	0,645	113,769
quentes	Q1	194,983	61,750	0,575	16,301
	Q2	302,300	229,492	0,669	15,146
	Q3	195,533	168,833	0,630	126,416
	Q4	283,885	152,550	0,619	30,555
	Q5	302,300	233,075	0,671	29,652

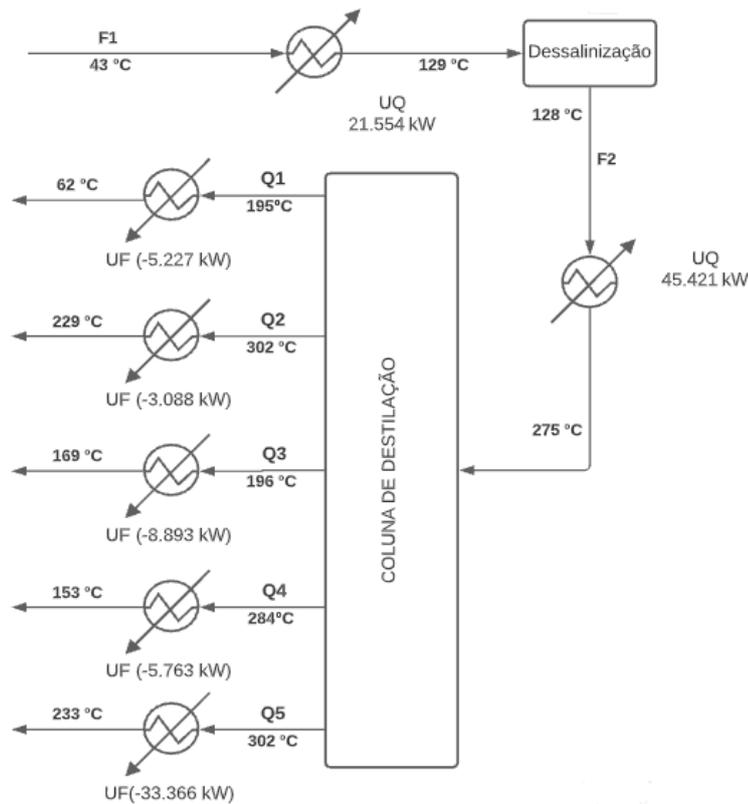
Fonte: Adaptado de Narasimhan e Jordache (2000, p.335 - 343)

O esquema representando as correntes sem a otimização energética é apresentado na Figura 1. Estas demandam de 7 trocadores de calor. De acordo com o observado na Figura 1, pode-se afirmar que a quantidade total de energia a ser fornecidas por Utilidades Quentes necessária para aquecer a corrente de petróleo cru até a coluna de destilação (F1 e F2) é de 66.775,299 kW. De mesma forma que, na Figura 1 a quantidade total de calor a ser removido do processo utilizando Utilidades Frias para resfriar as correntes Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5 é de 33.366,248 kW.

Para a elaboração da rede de trocadores de calor, há uma gama de possibilidades de pareamento de correntes, incluindo possibilidades de divisão de correntes. Para tanto, é necessário que sejam respeitadas algumas regras para organizar as redes de trocadores de calor em sistemas com integração energética, conforme a Tecnologia Pinch (LINNHOFF e HINDMARSH, 1981):

- Não devem ser realizadas trocas de calor através do Pinch;
- A rede deve ser montada a partir da temperatura de estrangulamento térmico e seguir se afastando dela;
- O número de correntes que saem do Pinch deve maior ou igual ao número de correntes que chegam ao ponto Pinch, ou seja, acima do Pinch, o número de correntes quentes do processo deve ser menor ou igual ao número de correntes frias do processo. De igual forma, abaixo do Pinch, o número de correntes quentes necessita ser maior ou igual ao de correntes frias.
- Quando houver mais de um par de correntes de processo viável para a integração, é necessário priorizar a troca que permitir esgotar uma corrente quente acima do estrangulamento ou uma corrente fria abaixo do Pinch. (PERLINGEIRO, 2005).

Figura 1: Fluxograma das correntes do processo sem integração energética.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Inicia-se a síntese da rede, considerando apenas o uso de trocadores de calor do tipo casco e tudo, de passo simples, operando com escoamento em contracorrente. Em cada trocador é necessário que se faça uma análise para evidenciar se o  $\Delta T_{\min}$  é respeitado em ambas as extremidades do trocador.

A síntese da rede foi realizada com o auxílio da ferramenta computacional F<sup>2</sup>EPI desenvolvida em Portugal pela Agência para a Energia (ADENE), em parceria com o Instituto Superior Técnico (IST). Através desta ferramenta é possível calcular a temperatura do estrangulamento térmico, gerar a cascata de calor e as curvas compostas, que contribuem na análise das condições do processo em que se propõe aplicar a Tecnologia Pinch. A ferramenta auxilia ainda na visualização do arranjo da rede de integração, contudo, a divisão de correntes, o pareamento das correntes e a quantidade de energia a ser trocada em cada trocador são definidos pelo usuário.

## 2.2 DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DA REDE

As temperaturas de saída das correntes, assim como as vazões de separação das correntes frias acima do Pinch foram calculadas através da equação da taxa de

transferência de calor (FOUST, 2012) apresentada na Equação (1). Nesta  $q$  é assumido como a mínima quantidade de calor entre a oferta e a demanda,  $m$  é a vazão mássica,  $C_p$  é a capacidade calorífica do fluido em questão e o  $\Delta T$  é a diferença de temperatura no trocador.

$$q = m C_p \Delta T \quad (1)$$

Os cálculos de projetos para trocadores de calor são baseados na equação da taxa de transferência de calor, utilizando o Método LMTD (Log Mean Temperature Difference) apresentado nas Equações 2 e 3. O diferencial deste método é que ele considera a variação de temperatura do fluido ao longo do trocador e por isso apresenta resultados mais seguros que a utilização da equação geral da taxa de transferência de calor. (FOUST, 2012).

$$q = -U \cdot A \cdot \text{LMTD} \quad (2)$$

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta T_{\text{MAIOR}} - \Delta T_{\text{MENOR}}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{\text{MAIOR}}}{\Delta T_{\text{MENOR}}} \right)} \quad (3)$$

Os  $\Delta T$ 's maior e menor são determinados pelas diferenças máximas e mínimas de  $(T_{Q_e} - T_{F_s})$  e  $(T_{Q_s} - T_{F_e})$ . A maior destas diferenças será o  $\Delta T_{\text{MAIOR}}$  e a menor será o  $\Delta T_{\text{MENOR}}$ .  $U$  é o coeficiente global de troca térmica, e  $A$  é a área de troca térmica.  $T_{Q_e}$  representa a Temperatura de entrada da corrente quente,  $T_{Q_s}$  a temperatura de saída da corrente quente,  $T_{F_e}$  a temperatura de entrada da corrente fria e  $T_{F_s}$  a temperatura de saída da corrente fria.

Para a aplicação deste método é necessário considerar que os calores específicos não variam com as mudanças de temperatura e que os coeficientes de troca de calor são constantes ao longo do trocador.

Quando se trata de dimensionamento de um trocador de calor, o coeficiente global de troca térmica é uma variável de grande importância. Ele é definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos (INCROPERA, 2008). Este fato exige uma análise aprofundada da situação e se torna inviável de ser realizada com os dados encontrados na literatura para o desenvolvimento da rede de trocadores de calor deste trabalho. Para tanto, serão utilizados os dados aproximados da literatura como referência. O coeficiente global típico de transmissão de calor para petróleo, considerando trocadores casco e tubo, foi assumido como  $U = 340,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  (FOUST, 2012).

A simulação do comportamento da rede foi realizada variando a temperatura de entrada da corrente de petróleo cru, nomeada corrente F1, entre 25 e 50 °C, considerando possíveis oscilação da temperatura no tanque de armazenamento. A partir desta variação, observaram-se as modificações na temperatura de saída da corrente de petróleo cru da operação de dessalinização e estas alterações também foram consideradas para a simulação. Foram mantidas constantes as áreas de troca térmica dos trocadores de integração energética e as temperaturas de entrada e saída das correntes quentes. Para a análise da simulação foi verificado o comportamento das temperaturas de saída das correntes frias dos trocadores de calor ( $TF_s$ ) e as diferenças de temperatura entre as correntes nas extremidades dos trocadores ( $\Delta T$ ), dadas por  $(TQ_e - TF_s)$  e  $(TQ_s - TF_e)$ , considerando operação em contracorrente com passe único. Adicionalmente, foi observada a variação no consumo de utilidade quente provocada pelas oscilações de temperatura da corrente de alimentação do processo.

O dimensionamento e a simulação da rede foram realizados com o auxílio do software Scilab, versão 6.1.0.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 SÍNTESE DA REDE DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

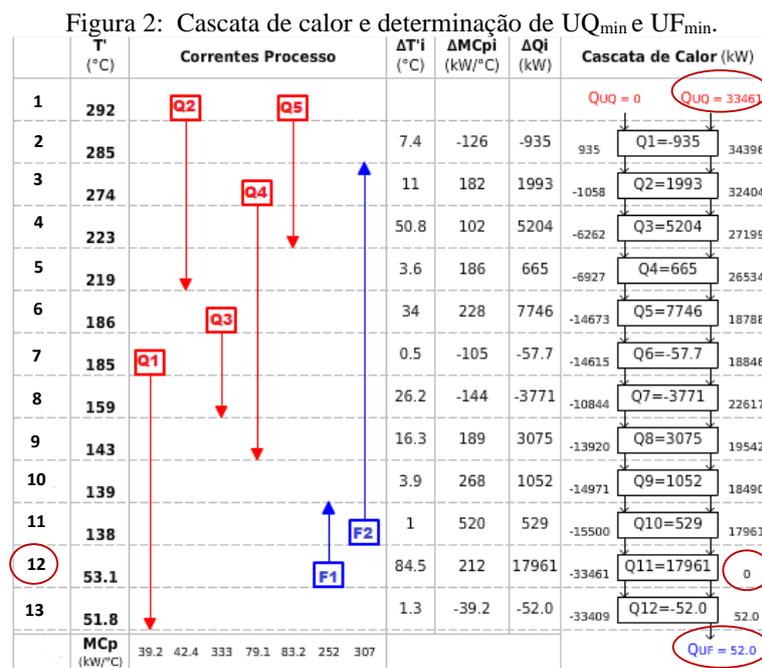
O consumo mínimo de utilidades considerando as correntes de processo selecionadas (Tabela 1) foi determinado com o auxílio do Modelo de Transbordo (PAPOULIAS e GROSSMANN, 1983). Utilizando a ferramenta computacional FI2EPI, foi possível desenvolver a cascata de calor do processo, como mostrado na Figura 2. Na imagem  $UQ_{\min}$  é representado por  $Q_{UQ} = 33.461$  kW e corresponde à demanda mínima de utilidades quentes. Já  $UF_{\min}$  é representado por  $Q_{UF} = 52$  kW e corresponde à demanda mínima de utilidades frias. Foram definidos 13 intervalos de temperatura, conforme as temperaturas de entrada e saída das correntes.

Através da cascata de calor da rede é possível observar a separação das correntes pelos intervalos de temperaturas, sendo um balanço de calor realizado para cada um destes intervalos. É por meio da análise destes balanços que se pode observar que no intervalo 12 a oferta de calor é esgotada. Nesse caso a demanda deve ser atendida através do emprego de utilidade quente. Já no último intervalo (13), a oferta de calor é superior à demanda e como não há intervalo para onde transferir o resíduo energético, este será removido do sistema através do emprego de utilidade fria.

A fronteira entre os intervalos 12 e 13 divide a tabela, pois não há fluxo de calor através dela. Esta fronteira é chamada de gargalo ou de estrangulamento térmico (Pinch) e ela é identificada pelas temperaturas limítrofes das correntes quentes e frias, sempre respeitando a diferença igual ao  $\Delta T_{min}$ . Neste caso, caracterizado pelas temperaturas de 43,1°C, para as correntes frias, e 63,1°C, para as correntes quentes.

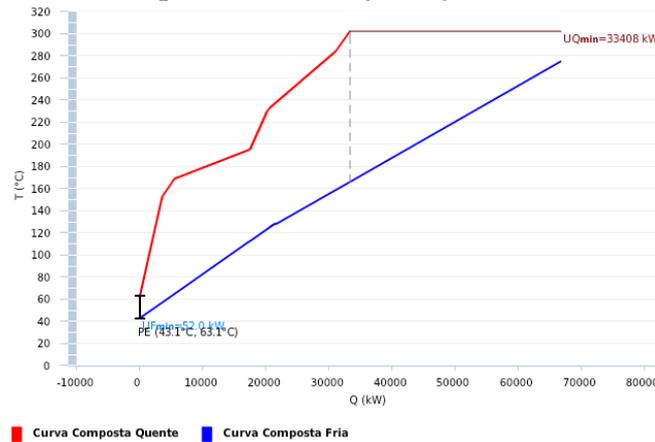
A representação gráfica dos perfis de temperatura associados ao calor disponível no processo é dada pela Curva Composta. Esta foi obtida também com o auxílio do software FI<sup>2</sup>EPI e é apresentada na Figura 3. Os valores mínimos de utilidades quentes e frias necessárias são observados pela sobreposição das curvas compostas, separando-as pelo ponto de estrangulamento térmico (PE).

Através da análise das Figuras 2 e 3, pode-se afirmar que a demanda mínima de Utilidade Quente ( $UQ_{min}$ ) corresponde a 33.408 kW, assim como a demanda mínima de Utilidade Fria ( $UF_{min}$ ) corresponde a 52 kW.



Fonte: Elaborado pelas autoras utilizando a ferramenta computacional FI<sup>2</sup>EPI.

Figura 3: Curva composta Quente e Fria



Fonte: Elaborado pelas autoras utilizando a ferramenta computacional FI²EPI.

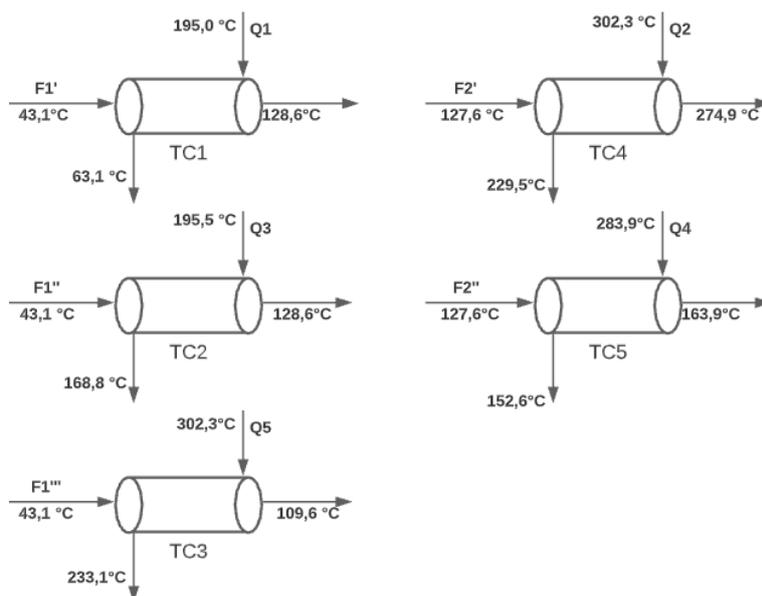
Para síntese da rede de integração energética foram avaliadas diversas possibilidades de pareamento de correntes. Dentre elas a possibilidade de pareamento sem a divisão das correntes frias. Este formato utilizava de trocadores em série nas correntes F1 e F2. Optou-se pelo arranjo apresentado na Tabela 2, onde as correntes frias, F1 e F2, foram divididas, ajustando a vazão mássica, para que suas demandas energéticas esgotassem as ofertas das correntes quentes com as quais foram combinadas. Este arranjo foi o que melhor satisfaz os requisitos da metodologia Pinch. Na Figura 4 são apresentadas as combinações de correntes consideradas nos trocadores de calor (TC) da rede de integração energética proposta. São indicadas ainda as temperaturas de entrada e saída de cada corrente.

Tabela 2: Dados dos trocadores de calor

Trocador de calor	Correntes	mCp (kJ s <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	m (kg s <sup>-1</sup> )	Q (kW)
TC1	F1'	60,487	27,339	5227,603
	Q1	39,237	16,301	
TC2	F1''	103,847	46,937	8892,588
	Q3	333,056	126,416	
TC3	F1'''	86,578	39,132	5762,798
	Q5	83,247	29,652	
TC4	F2'	20,952	7,759	3088,180
	Q2	42,415	15,147	
TC5	F2''	285,994	105,902	10395,08
	Q4	79,149	30,555	

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Figura 4: Temperaturas de entrada e saída das correntes nos trocadores de calor da rede.

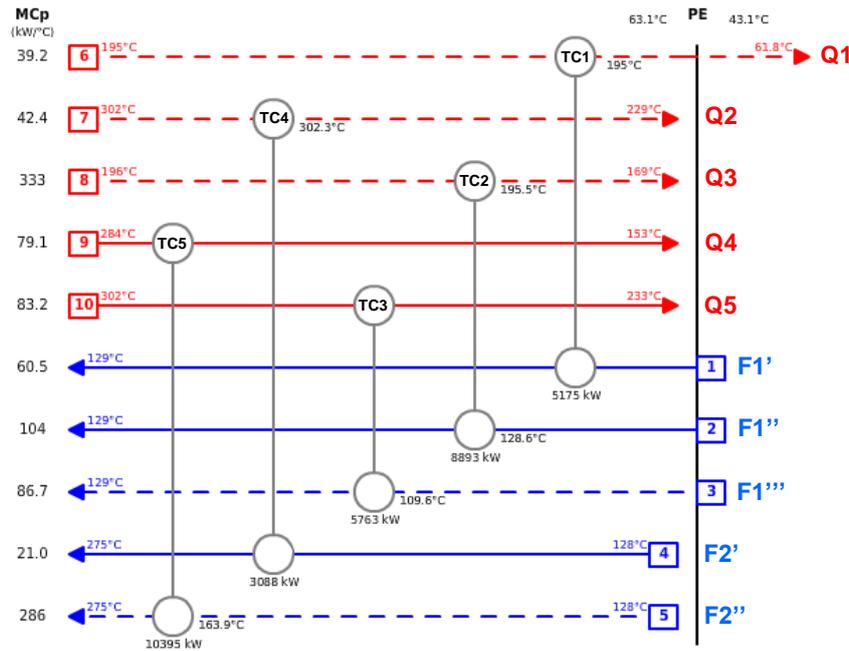


Fonte: Elaborado pelas autoras

O Diagrama da Rede é a representação esquemática da rede de trocadores de calor propriamente dita. Este diagrama é composto pelas correntes quentes como setas vermelhas da esquerda para a direita e as correntes frias em azul no sentido oposto, com suas respectivas temperaturas iniciais e finais. O diagrama é sempre dividido em duas partes: acima (temperaturas superiores) e abaixo (temperaturas inferiores) do Pinch. Os trocadores de calor também são representados no diagrama de rede. Na Figura 5 pode ser observado o Diagrama da Rede, desenvolvido com o auxílio do software FI<sup>2</sup>EPI. As cores azuis, representam as correntes frias já divididas, F1', F1'', F1''', F2' e F2''. Já as correntes quentes Q1, Q2, Q3, Q4 e Q5 são representadas em vermelho. Neste diagrama é possível observar que todos os trocadores de calor se encontram acima do Pinch. Abaixo, como há apenas uma corrente quente, só devem ser consideradas trocas térmicas com utilidade fria.

Pode-se observar que as correntes Q1, Q2 e Q3 se apresentam em linha tracejada, simbolizando que não foram esgotadas em seu máximo potencial. Isso ocorre devido aos arredondamentos realizados pelos cálculos internos do programa FI<sup>2</sup>EPI. Já em F1''' e F2'' há uma demanda de calor remanescente significativa, de 1651,075 e 31758,215 kW, respectivamente, que será suprida pelo uso de Utilidade Quente.

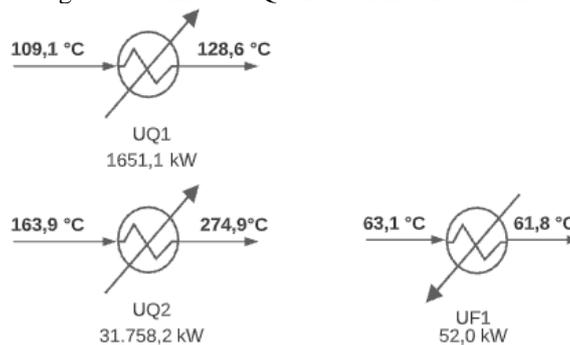
Figura 5: Diagrama de rede de trocadores de calor.



Fonte: Elaborado pelas autoras utilizando a ferramenta computacional FI2EPI.

Para suprir a demanda energética remanescente neste sistema, identificada através do modelo de transbordo e evidenciada no diagrama da rede, serão utilizados três trocadores de calor empregando Utilidades, dois aquecedores (UQ1 e UQ2) e um resfriador (UF1), como mostrado na Figura 6. A carga térmica de cada trocador é também indicada na figura, assim como as temperaturas de entrada e saída das correntes de processo.

Figura 6: Utilidades Quentes e Frias necessárias



Fonte: Elaborado pelas autoras

Na comparação dos valores de demanda mínima de utilidades previstos pelo Modelo de Transbordo, tem-se que  $UQ_{min} = 33.408,000$  kW enquanto que a soma das cargas térmicas dos aquecedores UQ1 e UQ2 é de 33.409,290 kW, apresentando um desvio de 0,00386%. Em relação ao consumo de utilidade fria, o  $UF_{min}$  é igual a 52,000

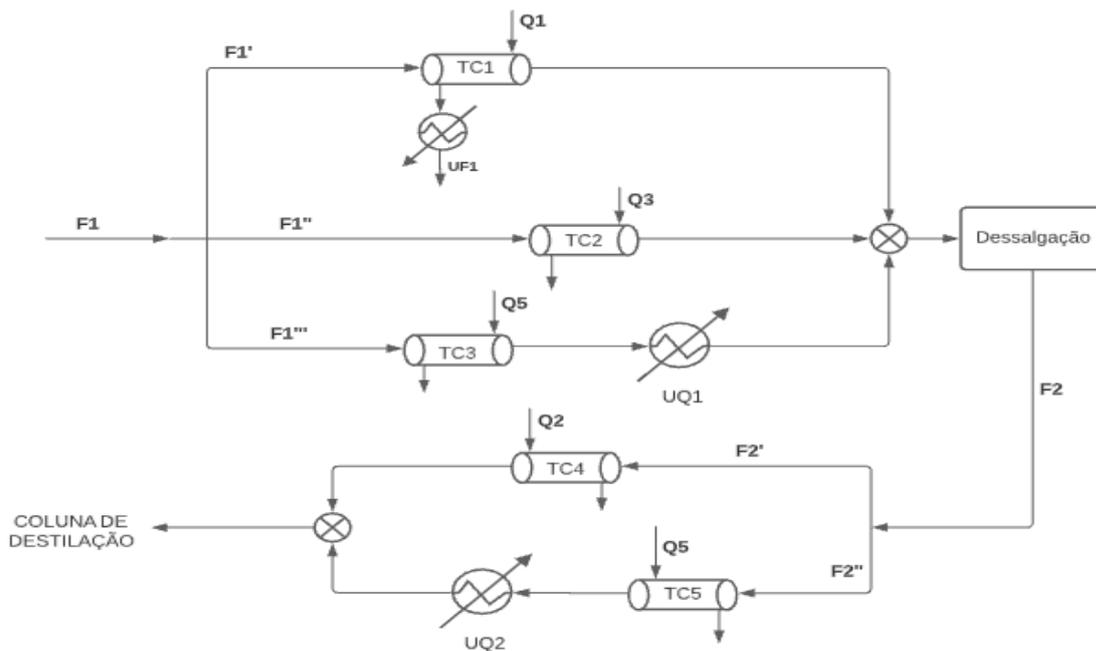
kW e a carga térmica prevista para o resfriador UF1 é de 53,029 kW, um desvio de 1,98%. Estes resultados indicam que o consumo previsto de utilidades na rede de trocadores de calor proposta se aproxima significativamente da condição de consumo mínimo, ou seja, de integração energética máxima.

O arranjo da rede de trocadores de calor de integração energética sintetizado pode ser melhor observado no fluxograma de processo apresentado na Figura 7. Nela encontram-se as correntes e seus trocadores de calor no processo de dessalinização e pré-aquecimento do petróleo. Os trocadores TC1, TC2 e TC3 antecedem o processo de dessalinização e os trocadores TC4 e TC5 a coluna de destilação.

Considerando a ausência de trocadores de calor de integração energética, utilizando a Equação 1, pode-se analisar que a quantidade de energia necessária a ser provida para fazer com que a corrente de petróleo cru seja aquecida de 43,075 °C a 274,859 °C seria de 66.775,299 kW. Já com o emprego da rede de integração energética proposta, a demanda de calor a ser suprida por utilidade quente é de 33.409,290 kW, reduzindo em 49,97% a demanda energética de utilidade quente deste processo.

De forma análoga, a demanda de utilidade fria que seria necessária no processo para resfriar as cinco correntes quentes após o processo de destilação soma um total de 33.366,248 kW. Comparando com o resultado obtido de 53,029 kW, obteve-se uma redução de 99,84% da necessidade do uso de utilidade fria no processo.

Figura 7: Fluxograma de processo da rede de integração energética sintetizada.



Fonte: Elaborado pelas autoras.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO E SIMULAÇÃO DA REDE DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

Os resultados para o dimensionamento dos trocadores de calor com integração energética são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Dimensionamento dos trocadores de calor com integração energética.

Trocador de calor	Área de troca térmica (m <sup>2</sup> )
TC1	407,6
TC2	279,6
TC3	88,3
TC4	159,6
TC5	503,8

Fonte: Elaborado pelas autoras.

As áreas de troca térmica variam de 88,3 m<sup>2</sup> à 503,8 m<sup>2</sup> entre os cinco trocadores de calor dimensionados. Foi considerado que para a aplicação da Tecnologia de Pinch, os trocadores apresentam apenas passo simples em contracorrente.

Dentre os trocadores de calor, o TC5 é aquele que requer maior área de troca térmica. Neste trocador, uma vazão de 105,9 kg/s de petróleo dessalinizado, corrente F2', deverá ser aquecida de 127,6 °C até 163,9 °C por uma corrente de fração de petróleo proveniente da coluna de destilação, Q5. A corrente quente empregada neste trocador possui uma vazão de 30,55 kg/s e é resfriada de 283,9 °C até 152,6 °C.

Já TC3 é o de menor área de troca térmica, trocando calor da fonte quente proveniente da coluna de destilação com uma vazão de 29,65 kg/s, a corrente Q5, sendo resfriada até 233,1 °C utilizando a corrente de petróleo cru F1'', na etapa que antecede a dessalinização, que sai de 43,1 °C e é aquecida até 109,1 °C.

Apesar do dimensionamento ser realizado considerando condições nominais, durante a operação da planta podem ocorrer oscilações nessas condições, o que conseqüentemente afeta as temperaturas das correntes. Para fazer a análise dessas possíveis oscilações, a rede é simulada com o auxílio da ferramenta computacional Scilab.

Foi assumido que as correntes quentes são oriundas do processo que possui um controle de temperatura rígido para que ocorra o fracionamento do petróleo, deste modo estas correntes não deverão apresentar oscilações significativas nas suas temperaturas de entrada na rede de integração energética. Já a temperatura de entrada da corrente F1, formada por petróleo cru oriundo do processo de extração e normalmente armazenada em tanques externos nas refinarias está sujeita a variações significativas ao longo do tempo

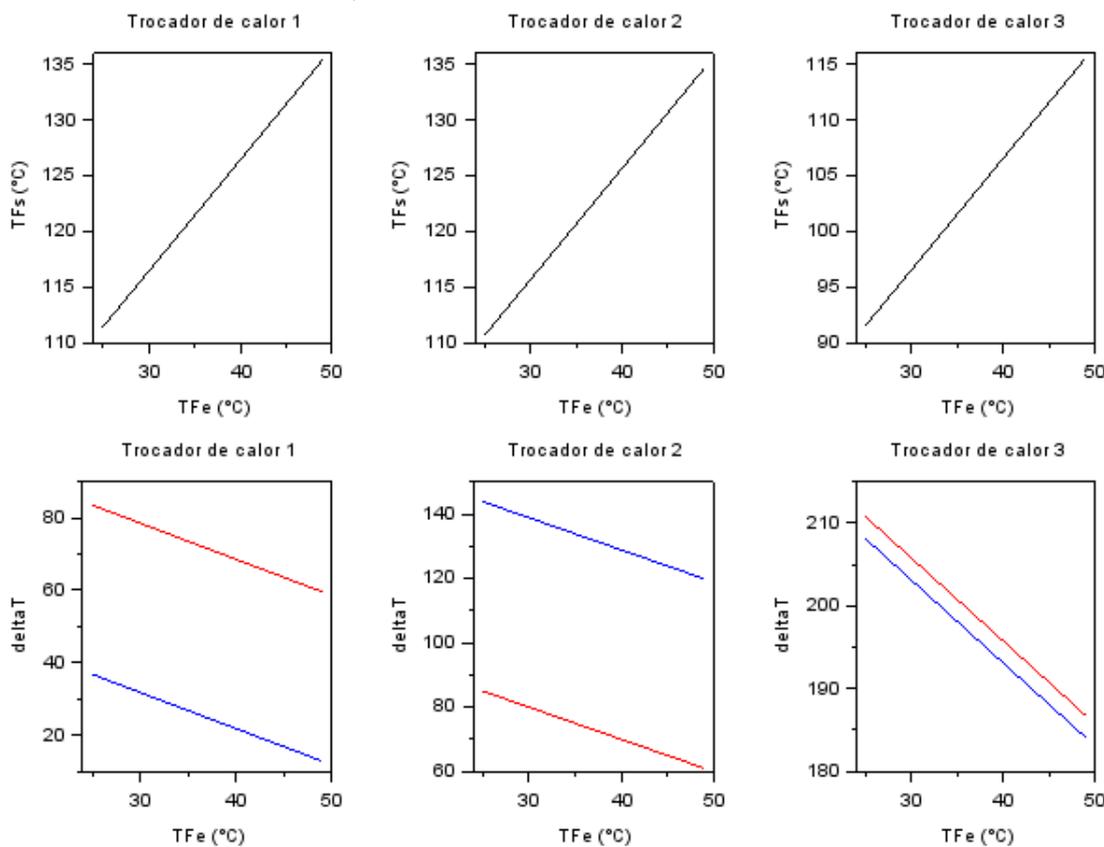
de operação da rede, alterando conseqüentemente as temperaturas de saída dos trocadores e o também o consumo de Utilidades na rede.

Alterando os valores da temperatura de entrada de F1 de 25 a 50 °C, foram obtidos os gráficos apresentados na Figura 8, representando a alteração das temperaturas de saída das correntes e as respectivas diferenças de temperatura nas extremidades dos trocadores (deltaT), dadas por  $(TQ_e - TF_s)$ , em vermelho, e  $(TQ_s - TF_e)$ , em azul.

Com estes resultados, verificamos a resposta que esta oscilação causará na temperatura de entrada de F2. A temperatura de entrada de F2 será alterada de 110 até 135 °C, conforme a apresentado na Figura 9.

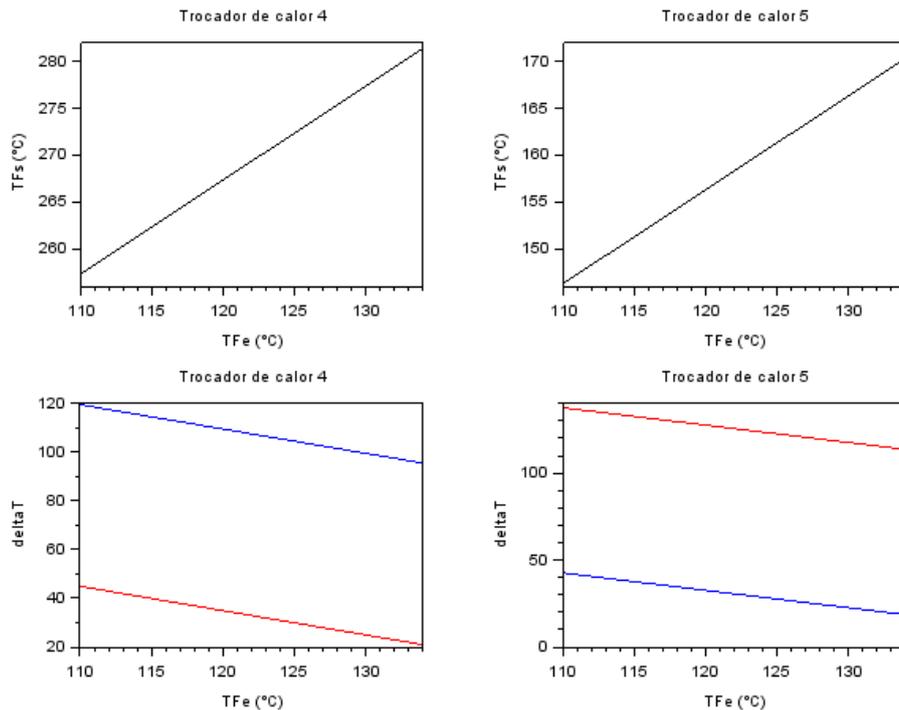
Os gráficos da variação da temperatura de saída em relação a oscilação da temperatura de entrada apresentaram um comportamento linear, visto que os cálculos utilizados na simulação se baseiam na Equação 1.

Figura 8: Variação das temperaturas de saída das correntes frias e diferenças de temperatura nas extremidades dos trocadores TC1, TC2 e TC3.



Fonte: Elaborado pelas autoras com auxílio da ferramenta computacional Scilab.

Figura 10: Variação das temperaturas de saída das correntes frias e diferenças de temperatura nas extremidades dos trocadores TC4 e TC5.



Fonte: Elaborado pelas autoras com auxílio da ferramenta computacional Scilab

É possível observar que os trocadores 2 e 3 respeitam o  $\Delta T_{\min}$  (mantendo este valor superior a 20 °C) para a variação de temperatura de alimentação de petróleo cru proposta na simulação de 25 a 50 °C. De mesma forma, os trocadores de calor 4 e 5 não apresentam limitações em relação ao  $\Delta T_{\min}$  para esta variação na condição de operação. Já no trocador de calor 1, em temperaturas de entrada da corrente quente acima de 42 °C, a troca térmica pode se tornar ineficiente devido à redução da diferença de temperatura abaixo de 20 °C. Ou seja, para a manutenção da eficiência nesta rede, a temperatura de entrada de F1 não deve ser superior a 42 °C.

Estas oscilações de temperatura afetam diretamente o consumo de utilidades quentes do processo, e como consequência disto, o consumo energético. Para o aquecedor UQ1 a temperatura de saída de F1'' variará de 94 a 115 °C, e a temperatura de saída desejada dessa corrente, conforme Tabela 1, é de 129°C. Já para o aquecedor UQ2 a temperatura de saída de F2'' varia de 146 °C a 170 °C, e a temperatura desejada desta corrente é de 275 °C.

A variação da temperatura de entrada está relacionada a variações climáticas ou do processo de extração do petróleo. Sendo assim, afirma-se que se trata de processos cotidianos e que necessitam de um planejamento e estudo para evitar desperdícios ou elevados custos energéticos.

O reconhecimento da necessidade da interdisciplinaridade é evidenciado em todas as áreas. Neste trabalho há a análise da realidade através do estudo de um caso prático dos pontos experimentais de uma refinaria de petróleo e a integração de diversas disciplinas da Engenharia Química para a síntese da rede, dimensionamentos e análises do processo. Isso garante não somente uma maior abrangência acerca do tema, como também uma possibilidade de integração de assuntos e conteúdos de uma forma didática e diversificada.

#### 4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi possível observar a aplicação da tecnologia Pinch para a síntese de rede de integração energética utilizando correntes típicas dos processos de Pré-Aquecimento e Dessalinização do Petróleo. Através da análise de dados da literatura, foi sintetizada uma rede de trocadores de calor com integração energética, conforme metodologia característica da Tecnologia Pinch.

Foram determinados os limites mínimos de consumo de utilidades através do Modelo de Transbordo. A rede elaborada apresentou um consumo de utilidade quente de 33.409,290 kW, apresentando um desvio em relação ao consumo mínimo previsto pelo modelo de transbordo de 0,00386%. O consumo de utilidade fria na rede sintetizada foi previsto em 53,029 kW, apresentando um desvio de 1,98% em relação ao consumo correspondente à integração energética máxima. A fronteira de estrangulamento térmico, Pinch, foi identificada nas temperaturas de 43,1 e 63,1 °C, para as correntes frias e quentes, respectivamente. Quanto a redução da demanda energética do processo como um todo, obteve-se uma redução de 49,97% de utilidades quentes e de 99,84% de utilidades frias em relação ao processo sem nenhuma integração energética.

O dimensionamento dos trocadores de calor da rede foi realizado com base no Método LMTD para evitar aproximações muito grosseiras do processo e considerar as alterações de temperaturas ao longo do trocador de calor. Foram dimensionados cinco trocadores de calor de integração energética e foi possível observar que as áreas de troca térmica variam de 88,3 m<sup>2</sup> até 503,8 m<sup>2</sup> dentre os trocadores de calor dimensionados.

Na simulação, foi avaliado o comportamento das temperaturas de saída das correntes frias geradas por possíveis oscilações na temperatura de entrada do petróleo cru no sistema, promovendo alterações nas temperaturas de saída das correntes frias nos trocadores de integração energética e no consumo das Utilidades. Verificou-se que, para

a garantia da eficiência da rede proposta, a temperatura de entrada da corrente de petróleo cru no processo não deve exceder 42 °C.

Este trabalho possibilitou a integração de conhecimentos de diferentes áreas clássicas da Engenharia Química para permitir a análise completa de uma rede de integração energética aplicada a um importante processo químico. Isto garante uma análise interdisciplinar do processo e constitui-se em um interessante exemplo de aplicação de conhecimentos teóricos em problemas reais.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas da Energia Elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: Centro de Documentação, 2008.

ANAPOLSKI, José Luis Potrich; INDRUSIAK, Maria Luiza Sperb. SÍNTESE ENERGÉTICA DE UMA REDE DE TROCADORES DE CALOR DE UM PROCESSO DE REFINO DE ÓLEO DE SOJA. *Perspectiva*, Erechim, v. 39, n. 146, p. 27-42, 7 maio 2015.

AMARAL, Thiago Paulo. INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE UNIDADES DE DESTILAÇÃO E COQUEAMENTO: ESTUDO DE RETROFIT E DE ASPECTOS DE PROCESSO. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

ANDRADE, J. A. N.; LOPES, N. C.; CARVALHO, W. L. P. Uma análise crítica do laboratório didático de Física: a experimentação como uma ferramenta para a cultura científica. In: VII ENPEC – ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS. Florianópolis, 2009.

ARAGÃO, Marcelo Escobar. Síntese Simultânea de Redes de Trocadores de Calor com considerações Operacionais: Flexibilidade e Controlabilidade. 2011. 290 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

COIMBRA, J. A. A. Considerações sobre a interdisciplinaridade. In: PHILIPPI JR., A. *Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais*. São Paulo: Signus, 2000.

FAGUNDES, Diego da Rocha. APLICAÇÃO DE INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA EM UM PROCESSO AGROINDUSTRIAL. 2016. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agroindustrial – Agroquímica, Universidade Federal do Rio Grande, Santo Antônio da Patrulha, 2016.

FOUST, Alan S et al. *Princípios das operações unitárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 670 p.

GUNDERSEN, T. *A Process Integration PRIMER. Implementing Agreement on Process Integration*, May, p. 90, 2000.

GUNDERSEN, Truls et al. *A Process Integration PRIMER: Implementing Agreement on Process Integration*. 3. ed. [S. l.]: SINTEF Energy Research, 2002. 18 p.

IKARIMOTO, Cesar Sussumu. Otimização em Linha (RTO) de Rede de Trocadores de Calor de uma Refinaria de Petróleo. 2019. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

INCROPERA, Frank P; DEWITT, David P; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.. *Transferência de Calor e Massa*. 6. ed. Rio de Janeiro: Abdr, 2008.

LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. The Pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, Great Britain, v. 38, n. 5, p. 745-763, 19 ago. 1981. DOI: 0009-2509/83/050745-19

MORAN, J. Mudando a educação com metodologias ativas. In: SOUZA, Carlos Alberto; MORALES, Ofelia Elisa Torres (Org.). In: *Coleção Mídias Contemporâneas. Convergências Midiáticas, Educação e Cidadania: aproximações jovens*. v. II. Ponta Grossa: Foca Foto PROEX/UEPG, 2015.

NARASIMHAN, Shankar; JORDACHE, Cornelius. **Data Reconciliation & Gross Error Detection**: an intelligent use of process data. Houston: Gulf Publishing Company, 2000. 393 p.

NETO, J. N. DE S. Metodologia Para Aplicação De Integração Energética Numa Planta Industrial. p. 72, 2005. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

NOVAZZI, L. F. Dinâmica e Controle de Redes de Trocadores de Calor. 2007. 145 f. Tese - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2007.

PAPOULIAS, S.A., e GROSSMANN, I. E. (1983). A structural optimization approach in process synthesis-I. utility systems. *Computers and Chemical Engineering*, 7, 695-706.

PINTO, Marcelo Luiz de Moura. Simulação de Trem de Pré Aquecimento de Petróleo Visando Estudo da Incrustação. 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Área de Concentração: Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

QUEIROZ, H. R. et al. Sistemas marítimos de produção de petróleo: um exemplo de interdisciplinaridade do ciclo básico das engenharias. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 9, p. 17157-17168, 2019. DOI:10.34117/bjdv5n9-236

SPEIGHT, James G. *Handboof of Petroleum Refining*. London: Crc Press, 2017. 726 p.  
ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa**: uma abordagem prática. 4. ed. Nova Iorque: AMGH Editora Ltda, 2012. 795 p.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto. Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos. Rio de Janeiro: Blucher, 2005. 208 p.

OLIM, J.S.S; HADDAD, J; VIANNA, A.N.C; MARTINS, A.R.S. Conservação de Energia em Refinarias de Petróleo. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. p.1. 2002.