

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ARNALDO MARQUES DE OLIVEIRA JUNIOR

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA *PINCH* EM UMA REDE DE TROCADORES DE
CALOR NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ANILINA**

FRANCISCO BELTRÃO

2022

ARNALDO MARQUES DE OLIVEIRA JUNIOR

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA *PINCH* EM UMA REDE DE TROCADORES DE CALOR NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ANILINA

***Pinch* Methodology applied in the design of a heat exchanger network in the aniline production process**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): André Zuber.

FRANCISCO BELTRÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ARNALDO MARQUES DE OLIVEIRA JUNIOR

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA *PINCH* EM UMA REDE DE TROCADORES DE CALOR NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA ANILINA

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 23/junho/2022

Orientador: Prof. Dr. André Zuber
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Membro da Banca: Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Membro da Banca: Prof. Dr. Douglas da Costa Ferreira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

FRANCISCO BELTRÃO

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grato a Deus pelo dom da vida, pela força, sabedoria e paciência que foi me dado para continuar e conquistar mais essa etapa importante da minha vida.

Agradeço a minha família, minha mãe Sidineide, meu pai Arnaldo, a minha irmã Maisa, meu cunhado Alan, minha avó Sebastiana e meus sobrinhos Rafael e Gabriel, por me proporcionarem a viver esta experiência, por toda a educação que recebi e por me apoiarem desde o começo da minha jornada, sempre me dando forças para continuar e jamais desistir.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. André Zuber, por aceitar o meu convite para me orientar e pela ajuda em todas as etapas de desenvolvimento desse trabalho, com toda sabedoria e paciência, características que o determina como um excelente professor e orientador. Obrigado pelo seu apoio do começo ao fim.

Sou grato pelo Prof. Dr. Douglas Junior Nicolin e Prof. Dr. Douglas da Costa Ferreira pela disponibilidade de avaliação, suas considerações contribuíram para melhorias ao longo do meu trabalho. Agradeço também a Prof^a. Dra Ana Paula Romio, pelas contribuições feitas no meu projeto, pois ajudaram muito na conclusão deste trabalho.

A todos os meus amigos que conheci dentro e fora da universidade, que me apoiaram a concluir este trabalho, direta ou indiretamente, cada um foi muito importante e levarei para o resto da minha vida. Muito obrigado!

RESUMO

Devido à emissão de gases poluentes e alto uso de água, a indústria química em geral está sendo estimulada a buscar soluções viáveis, técnica e economicamente, para alcançar a sustentabilidade em seus processos. Com o objetivo de reduzir a demanda de vapor e água de resfriamento para a produção de anilina, através da hidrogenação do nitrobenzeno, o presente trabalho utilizou a metodologia *pinch* utilizando o *software Hint* para realizar as análises necessárias. Criando dois cenários para a análise de *pinch*, onde no primeiro considera-se o trocador de calor com maior demanda energética do processo e no segundo desconsidera-se o trocador de calor com maior requisição. Nem todos os fluxos do processo foram utilizados, devido a alguns fluxos pertencentes a condensadores e evaporadores parciais presentes em algumas colunas de processo, gerando complexidade para a análise *pinch*. Devido a problemas com os dados originais do processo, foi necessário simular dois trocadores de calor, desta forma o software COCO foi utilizado para simular e obter os dados para realizar a integração energética. Com a aplicação do método *pinch*, obteve-se uma redução de 26,5% de energia para a primeira configuração e 11,7% para a segunda configuração. Quanto à viabilidade econômica, o presente trabalho mostrou uma economia de 21,6% com utilidade fria (água de resfriamento), 34,3% com utilidade quente (vapor) e no total uma economia de 33,9% nos gastos com vapor e água. Esses resultados demonstraram a eficiência da integração energética como solução para as indústrias químicas, tanto técnica quanto economicamente, além de preservar o meio ambiente reduzindo a emissão de gases poluentes e reduzindo a necessidade de uso de água para resfriar correntes de processo.

Palavras-chave: integração energética; metodologia *pinch*; anilina; *software hint*.

ABSTRACT

Due to the emission of polluting gases and high use of water, the chemical industry in general is being encouraged to seek viable solutions, technically and economically, to achieve sustainability in its processes. In order to reduce the demand for steam and cooling water for the production of aniline, through the hydrogenation of nitrobenzene, the present work used the pinch methodology using the Hint software to perform the necessary analyses. Creating two scenarios for the pinch analysis, where in the first one considers the heat exchanger with the highest energy demand of the process and in the second one disregards the heat exchanger with the highest request. Not all process streams were used, due to some streams belonging to condensers and partial evaporators present in some process columns, generating complexity for the pinch analysis. Due to problems with the original process data, it was necessary to simulate two heat exchangers, in this way the COCO software was used to simulate and obtain the data to perform the energy integration. With the appliance of the pinch method, a reduction of 26.5% of energy was obtained for the first setting and 11.7% for the second setting. The economic viability, the present work showed savings of 21.6% with cold utility (cooling water), 34.3% with hot utility (steam) and in total a savings of 33.9% in steam and water expenses. Proving the efficiency of energy integration as a solution for the chemical industries, both cases technically and economically, in addition to preserving the environment by reducing the emission of polluting gases and reducing the need to use water to cool process streams.

Keywords: energy systems integration (ESI); pinch analysis; aniline; hint software.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção da anilina	14
Figura 2 - Trocador de calor casco e tubo.....	17
Figura 3 - Curvas compostas	21
Figura 4 - Cascata de calor	23
Figura 5 - Diagrama de grades.....	23
Figura 6- Gráfico do custo total	25
Figura 7 - Pacote de propriedades do trocador (E-1).....	29
Figura 8 - Pacote de propriedades do trocador (E-3).....	30
Figura 9 - Simulação do trocador de calor (E-1).....	31
Figura 10 - Adicionando as correntes para realizar a integração energética	32
Figura 11 - Adicionando a corrente 2-3 do trocador E-1	33
Figura 12 - Sugestão de integração de acordo com o <i>Hint</i>	34
Figura 13 - Adição do segundo intercambiador na rede de trocadores de calor	35
Figura 14 - Inserindo as utilidades na rede de trocadores de calor	36
Figura 15 - Simulação do trocador de calor (E-1) e os dados obtidos.....	41
Figura 16 - Simulação do trocador de calor (E-3) e os dados obtidos.....	43
Figura 17 - Diagrama de grades considerando o trocador de calor (E-3)	44
Figura 18 - Diagrama de grades finalizado com a corrente 6-7.....	45
Figura 19 - Diagrama de grades finalizado sem a corrente 6-7.....	46
Figura 20 - Geração do gráfico Custos x ΔT_{min} considerando (E-3)	50
Figura 21 - Gráfico Custos x ΔT_{min} considerando (E-3).....	51
Figura 22 - Violação da segunda lei da termodinâmica.....	52
Figura 23 - Gráfico Custos x ΔT_{min} sem o trocador de calor (E-3).....	53
Figura 24 - Gráfico Número mínimo de trocadores x ΔT_{min} com o trocador de calor (E-3)	54
Figura 25 - Gráfico Número mínimo de trocadores x ΔT_{min} sem o trocador de calor (E-3)	55
Figura 26 - Curvas compostas com a corrente 6-7	56
Figura 27 - Curvas compostas sem a corrente 6-7	57
Figura 28 - Cascata de energia gerada pelo <i>Hint</i> com o trocador (E-3)	58
Figura 29 - Cascata de energia gerada pelo <i>Hint</i> sem o trocador (E-3)	59

Figura 30 - Novo layout do processo de produção da anilina63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados iniciais para a análise <i>pinch</i>	40
Tabela 2 - Dados iniciais corrigidos para a análise <i>pinch</i>	43
Tabela 3 - Correlação para o custo capital total	48
Tabela 4 - Coeficientes convectivos de transferência de calor.....	49
Tabela 5 - Aproveitamento dos trocadores de calor do primeiro cenário	60
Tabela 6 - Aproveitamento dos trocadores de calor do segundo cenário	61
Tabela 7 - Comparação da redução energética de cada caso estudado	61
Tabela 8 - Comparação econômica do processo sem e com integração energética	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo Geral.....	12
1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Processo de produção da anilina	14
2.2	Trocadores de calor.....	16
2.3	Integração Energética	19
2.3.1	Curva composta	20
2.3.2	Cascata de calor.....	21
2.3.3	Diagrama de grade.....	23
2.3.4	Análise Econômica	24
2.4	Estado da Arte.....	26
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	28
3.1	Aquisição dos dados do processo	28
3.1.1	Simulação dos trocadores utilizando o software COCO	29
3.1.2	Inserção dos dados das correntes no <i>software Hint</i>	31
3.1.3	Inserção dos trocadores de calor e utilidades no <i>software Hint</i>	34
3.2	Cascata de calor e curvas compostas.....	36
3.3	Diagrama de grades	37
3.4	Determinação do ΔT_{otm} e análise econômica	37
3.4.1	Custos para a análise econômica.....	38
3.4.2	Coeficiente convectivo de transferência de calor	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Dados do processo.....	40

4.1.1	Simulação com o software COCO.....	40
4.2	Integração energética com o software <i>Hint</i>	44
4.2.1	Diagrama de grades.....	44
4.3	Diferença de temperatura ótima para o processo.....	47
4.3.1	Parâmetros de custos.....	47
4.3.2	Coefficiente convectivo de transferência de calor.....	48
4.3.3	Gráfico Custo anual <i>versus</i> ΔT_{\min}	49
4.3.4	Número mínimo de trocadores de calor.....	54
4.3.5	Curvas compostas.....	56
4.3.6	Cascata de calor.....	58
4.4	Viabilidade econômica.....	60
4.4.1	Trocadores de calor.....	60
4.4.2	Análise Econômica.....	62
4.4.3	Novo <i>layout</i> do processo de produção.....	62
5	CONCLUSÃO	65

1 INTRODUÇÃO

Na atualidade os engenheiros enfrentam problemas no consumo de energia nos processos de produção de diversos produtos. Fatores como o crescimento contínuo do custo de insumos energéticos, redução na tolerância para emissões de poluentes e redução da disponibilidade dos combustíveis utilizados na indústria, fazem com que investimentos na otimização energética de plantas industriais sejam cada vez mais crescentes (SILVA, 2009).

No geral, existem dois problemas na indústria relacionados à energia. Primeiramente, quando se precisa resfriar um fluido, a água de resfriamento será necessária para que o calor de uma determinada corrente seja transferido para essa corrente de água. Entretanto, pode ocorrer que a temperatura dessa água de resfriamento seja maior do que a temperatura necessária para poder lançá-la novamente ao meio ambiente. Ou no caso da geração de vapor, onde é necessário queimar algum combustível para gerar determinada energia, porém, gerando também gases poluentes que deverão ser tratados para atender às condições ambientais impostas por órgãos reguladores, gerando mais custos para a indústria (NAVARINI, 2019).

Para resolver esses problemas de ordem energética, a tecnologia *pinch* é utilizada atualmente para a redução dos custos referentes à energia em uma determinada planta industrial. Sendo a indústria química um dos setores que mais necessita de energia para realizar as atividades de aquecimento e resfriamento, a integração energética é uma excelente ferramenta para minimizar custos (TONIAL, 2018).

Essa tecnologia foi desenvolvida por Linnhoff e Flower na década de 70, onde o mundo enfrentava uma crise energética do petróleo. Resumidamente, a tecnologia aproveita o excesso de calor de uma determinada corrente quente para aquecer outra corrente com temperatura inferior e assim economizar com utilidades quentes e frias no processo.

Neste trabalho, o processo de produção da anilina foi integrado energeticamente utilizando o *software Hint*, que faz uso da tecnologia *pinch*. Essa tecnologia permite que as correntes do processo troquem calor entre si, necessitando cada vez menos de utilidades quentes ou frias, ou seja, vapor ou água

de resfriamento. Desta forma, reduzindo os impactos ambientais causados pela geração de vapor e captação de água para resfriamento.

A anilina, também conhecida como aminobenzeno e fenilamina, é uma substância altamente utilizada na indústria, sendo precursora de mais de 300 produtos entre fármacos, polímeros, explosivos, produtos agrícolas, corantes e pigmentos, antioxidantes e antidegradantes. Pertencente à família das aminas, é uma molécula com o grupo amina ligada ao anel benzênico, de fórmula molecular $C_6H_5NH_2$. Outra aplicação importante da anilina é a fabricação de MDI (metileno difenil diisocianato). Segundo Forezi (2011), o MDI é responsável por mais de 75% do consumo de toda anilina produzida mundialmente e faz com que a demanda de anilina venha crescendo desde 1982. O MDI posteriormente é utilizado na síntese de poliuretano, que é aplicado como isolante térmico na fabricação de móveis, na indústria automotiva e de construção (JÚNIOR *et al.*, 2016).

A produção de anilina era realizada de forma batelada até a década de 60, usando um tratamento ácido do nitrobenzeno. Atualmente, a produção industrial é contínua e existem dois processos catalíticos com nitrobenzeno, sendo a substância inicial, que são utilizados majoritariamente, podendo ser em fase vapor ou líquida (JÚNIOR *et al.*, 2016).

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho de conclusão de curso de Engenharia Química visa aplicar a tecnologia *pinch* em uma planta industrial de anilina a fim de permutar energia entre as correntes do processo, modificando o design da planta formando uma rede de trocadores de calor, para assim reduzir os impactos ambientais e custos de operação do processo.

1.2 Objetivos Específicos

Para realizar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- ✓ Extrair os dados das correntes do processo por meio do balanço de massa e balanço de energia;
- ✓ Determinar o ΔT_{min} , construir as curvas compostas e elaborar a cascata de calor;

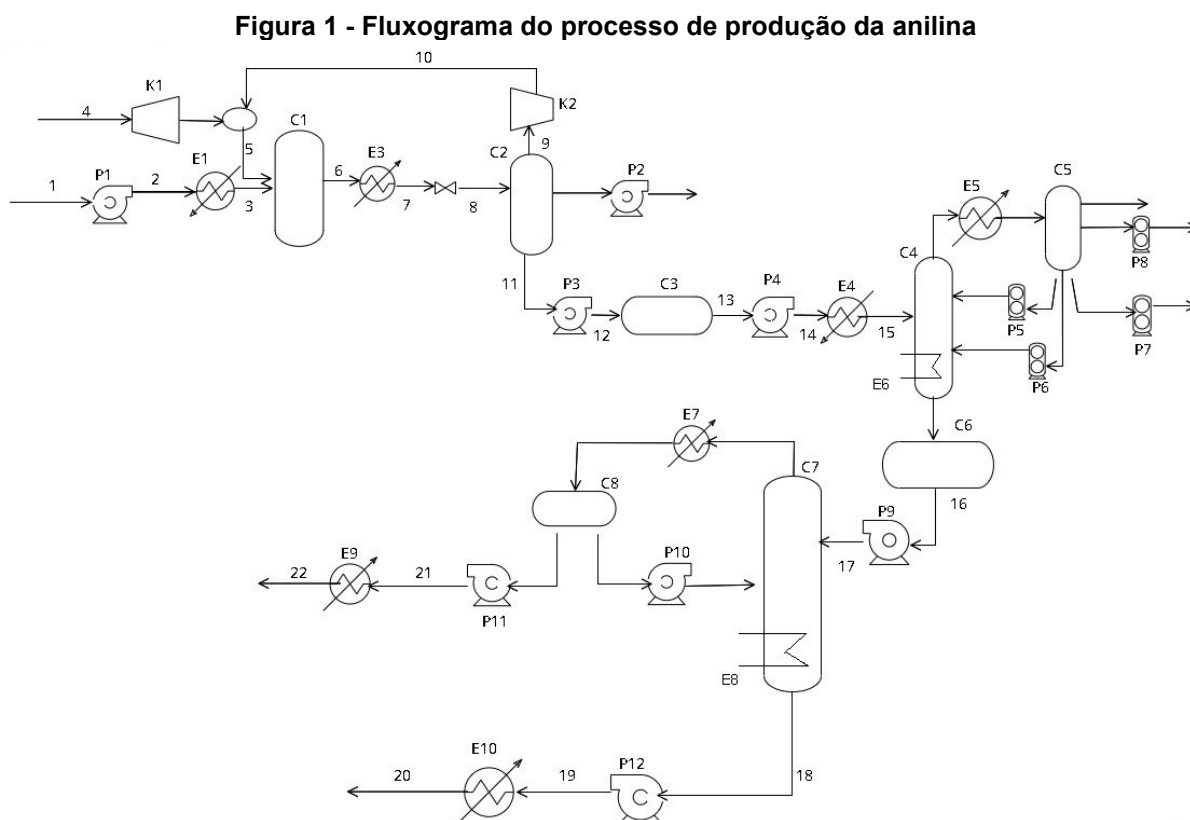
- ✓ Identificar a temperatura em que ocorre o ponto de estrangulamento (ponto *pinch*), juntamente com a quantidade de utilidades quentes e frias que serão necessárias após a integração;
- ✓ Elaborar uma rede de trocadores de calor em que possa ocorrer a integração energética, utilizando o diagrama de grades;
- ✓ Analisar a viabilidade econômica desta rede de trocadores de calor;
- ✓ Apresentar a redução dos custos com energia da nova planta;
- ✓ Montar e apresentar um novo fluxograma para a produção de anilina integrada energeticamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentam-se os conteúdos teóricos essenciais para o desenvolvimento e entendimento do trabalho, como o processo de produção de anilina, o conhecimento teórico do funcionamento de um trocador de calor, assim como a descrição das etapas da metodologia *pinch* e uma breve revisão bibliográfica de trabalhos que utilizaram a tecnologia.

2.1 Processo de produção da anilina

Segundo o trabalho de Júnior *et al* (2016), o processo de produção da anilina consome anualmente 20000 toneladas de nitrobenzeno, operando durante 7500 horas por ano. A produção é realizada a partir da hidrogenação do nitrobenzeno. Sendo as matérias-primas do processo o próprio nitrobenzeno, hidrogênio e catalisador de cobre suportado em sílica. A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo.



Fonte: Júnior *et al* (2016)

O processo inicia-se com a alimentação de nitrobenzeno na coluna de leito fluidizado (C-1), porém, essa corrente é proveniente de um tanque de armazenamento e está em temperatura ambiente e pressão atmosférica, precisando passar por uma bomba (P-1) e um trocador de calor (E-1) para se adequar às condições da coluna. Por outro lado, o hidrogênio necessita apenas de uma queda na pressão para entrar na coluna, sendo assim, a corrente de hidrogênio aciona uma turbina gerando energia e diminuindo a pressão. O produto da coluna (C-1) é resfriado pelo trocador de calor (E-3) e tem a pressão diminuída pela válvula (V-1).

Na próxima etapa do processo, existe um separador (C-2) que gera três correntes. A primeira corrente encontra-se na fase vapor, que após passar por um compressor (K-2) retorna para o reator. A segunda corrente é aquosa e segue para o tratamento. E por fim, a corrente orgânica contendo a anilina é bombeada (P-3) para o tanque pulmão (C-3) com o objetivo de manter a alimentação constante da coluna de destilação empacotada (C-4). Antes da entrada na coluna (C-4), a corrente passa pela bomba (P-4) e o trocador de calor (E-4) para ajustar a pressão e a temperatura.

A coluna de destilação empacotada contém um refeedor interno (E-6) e um condensador parcial (E-5), que não serão considerados na análise *pinch* devido à complexidade de integração energética neste tipo de trocador de calor. O condensado gerado pelo trocador (E-5) destina-se para um tanque pulmão (C-5) que funciona também como um separador, formando duas correntes na fase líquida, uma corrente orgânica e outra aquosa. Essas duas correntes são parcialmente refluxadas para a coluna pelas bombas (P-5) e (P-6). A outra parte de cada uma das correntes são transportadas pelas bombas (P-7) e (P-8) para uma coluna de adsorção para a remoção de impurezas contidas na água e reaproveitar no processo. O produto de fundo da coluna de destilação empacotada (C-4), rico em anilina e nitrobenzeno, é transportado para o tanque pulmão (C-6) e após a passagem pela bomba (P-9) tem a pressão aumentada para a entrada adequada na coluna de destilação com pratos (C-7).

O principal objetivo da coluna de destilação com pratos (C-7) é separar o nitrobenzeno residual da anilina e atingir a pureza necessária. Assim como na coluna de destilação empacotada (C-4), a coluna de destilação com pratos também conta com um refeedor interno (E-8) e um condensador total (E-7). Porém, devido

à complexidade de realizar a integração nesses tipos de trocadores de calor, não serão considerados na análise *pinch*.

Após a operação da coluna (C-7) são geradas duas correntes. A corrente de topo é condensada e transportada para um tanque pulmão (C-8) e parte dessa corrente é refluxada para a coluna (C-7) com auxílio da bomba (P-10). A outra parte é transportada através da bomba (P-11) para o trocador de calor (E-9) para ser resfriada e armazenada em um tanque. Esta corrente armazenada no tanque é o produto do processo, anilina a 99,9% de pureza. A segunda corrente gerada no fundo da coluna (C-7), rica em nitrobenzeno, é transportada por meio da bomba (P-12) e encaminhada para o trocador de calor (E-10) para ser resfriada e destinada para um tratamento com o objetivo de recuperar a anilina.

2.2 Trocadores de calor

A integração energética deve ser analisada a partir de uma rede de trocadores de calor. Utilizado em larga escala na indústria em geral, este equipamento é responsável pela facilitação da troca térmica entre dois fluidos que se encontram em temperaturas diferentes. A transferência de calor acontece por convecção e condução através da parede que separa os dois fluidos (ÇENGEL, 2012).

Na indústria, existem diversos tipos de trocadores de calor utilizados, que são classificados de acordo com o tipo de construção e forma de escoamento dos fluidos. Basicamente, pode-se obter um trocador de calor utilizando dois tubos concêntricos para a passagem do fluido quente ou frio no tubo interno, que estará em contracorrente ou paralelo ao fluido presente no tubo externo. Caso os fluidos estejam no mesmo sentido, entrarão e sairão pelo mesmo extremo do equipamento, caso contrário, uma extremidade do trocador será a entrada de um fluido e a outra extremidade a entrada de outro fluido. Este tipo de trocador de calor é conhecido como tubo duplo (INCROPERA, 2008).

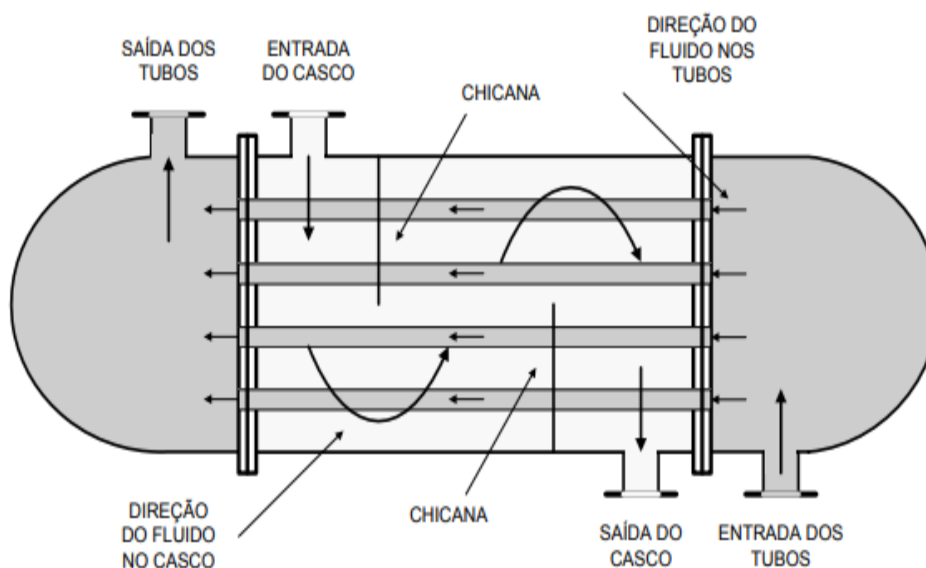
Além do tubo duplo, os trocadores mais conhecidos são: casco e tubo, trocador de calor a placas e trocadores compactos.

O modelo mais utilizado na indústria é o casco e tubo. Este equipamento, normalmente, consiste em centenas de tubos armazenados em um casco. A troca

térmica ocorre quando o fluido que está presente no casco escoar e tem contato com os tubos que contêm o outro fluido (ÇENGEL, 2012).

Um mecanismo frequentemente utilizado no trocador casco e tubo são as chicanas. Esse mecanismo nada mais é do que um suporte para os tubos dentro do casco para reduzir as vibrações causada pelo escoamento, além de expandir a turbulência dentro do trocador de calor, favorecendo o aumento do coeficiente convectivo do fluido que se encontra no casco (INCROPERA, 2008). A Figura 2 ilustra um trocador de calor casco e tubo.

Figura 2 - Trocador de calor casco e tubo



Fonte: SILVA (2009)

Existe ainda uma classificação para os trocadores do tipo casco e tubos. Essa classificação se refere ao número de passes do equipamento, por exemplo, trocadores nos quais os tubos realizam meia volta dentro do casco, são chamados de trocadores de calor de um passe no casco e dois passes nos tubos. Seguindo a lógica, quando temos o casco realizando meia volta e os tubos efetuando quatro passes, o equipamento é chamado de trocador de calor dois passes no casco e quatro passes nos tubos (ÇENGEL, 2012).

Existem dois métodos para realizar a análise em um trocador de calor. Dependendo do objetivo desejado, cada método apresenta melhor eficiência. O primeiro é o método da diferença de temperatura média logarítmica (LMTD), utilizado quando as temperaturas, tanto de entrada quanto de saída são conhecidas de

ambos os fluidos, quente e frio, assim como as vazões mássicas e o coeficiente global de transferência de calor, para assim determinar facilmente a área necessária para realizar a troca térmica. É possível determinar a diferença de temperatura média logarítmica e a área pelas equações (1) e (2):

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (1)$$

$$Q = UA\Delta T_{lm} \quad (2)$$

Na primeira equação, os termos ΔT_1 e ΔT_2 representam as diferenças de temperatura dos fluidos em ambas as extremidades do equipamento. Na segunda, o termo Q é a taxa de transferência de calor em Watt (W), o termo U representa o coeficiente global de transferência de calor ($W/m^2 K$), o termo A é a área (m^2) e por fim o termo ΔT_{lm} representa a diferença de temperatura média logarítmica (K).

O segundo método para avaliação de trocadores de calor é o método da efetividade-NTU. Esse método é utilizado para indicar a eficiência da transferência de calor do equipamento, neste caso, o parâmetro área de troca térmica é conhecido, entretanto, as temperaturas de saída são desconhecidas (ÇENGEL, 2012).

O método fundamenta-se no termo de efetividade da transferência de calor ε , que é adimensional e é definido pela Equação (3):

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (3)$$

em que Q é a taxa real de transferência de calor, obtida a partir do balanço de energia do fluido quente ou frio e Q_{max} , é a máxima troca térmica possível. Neste balanço, a energia cinética e energia potencial são consideradas como nulas. Desta forma, é gerada a seguinte equação:

$$Q = C_c(T_{c,sai} - T_{c,entra}) = C_h(T_{h,entra} - T_{h,sai}) \quad (4)$$

Sendo $C_c = \dot{m}.c_{pc}$ e $C_h = \dot{m}.c_{ph}$. Onde \dot{m} é a vazão mássica, $T_{c,sai}$ é a temperatura de saída da corrente fria, $T_{c,entra}$ é a temperatura de entrada da corrente fria, $T_{h,entra}$ é a temperatura de entrada da corrente quente e $T_{h,sai}$ é a temperatura de saída da corrente quente.

Para a determinação da taxa máxima de transferência de calor, temos duas possibilidades. A primeira situação é quando o fluido quente é resfriado até a temperatura do fluido frio na entrada do trocador, ou a segunda situação, quando o fluido frio é aquecido até chegar à temperatura de entrada do fluido quente. Somente se as taxas de capacidade térmica dos fluidos forem iguais, os dois eventos acontecerão simultaneamente. Caso contrário, sendo diferentes, a menor taxa de capacidade térmica terá uma mudança de temperatura maior, chegando à temperatura máxima (ÇENGEL, 2012).

2.3 Integração Energética

De acordo com Kemp (2007), a técnica de análise *pinch* em redes de trocador de calor foi desenvolvida por Linnhoff e Flower na década de 70 durante uma crise energética do petróleo que o mundo enfrentava. Com o objetivo de otimizar energeticamente os processos industriais, fazendo com que a redução de gastos fosse alcançada, o método *pinch* foi criado. A tecnologia *pinch* é a recuperação de energia das correntes de um determinado processo por meio da análise das curvas compostas, que constitui o máximo possível de energia recuperada. Em outras palavras, é o aproveitamento de energia de correntes quentes transferida para as correntes frias, sendo a diferença de temperatura a força motriz para a transferência ocorrer.

A tecnologia *pinch* é considerada um método sequencial, na qual são empregados conceitos termodinâmicos e regras heurísticas para assim utilizar a estratégia de dividir o problema da rede de trocadores de calor em subproblemas, reduzindo a carga computacional. Entretanto, com o avanço da computação o método simultâneo é uma alternativa para problemas de integração energética, porém, é menos intuitivo que a análise *pinch*. São problemas de otimização que envolvem programação matemática, tais como, programação linear (PL),

programação não linear (PNL), programação inteira (PI) e programação inteira mista (PIM) (SANTANA, 2012).

Para melhor entender a análise *pinch*, alguns conceitos devem ser esclarecidos. O termo corrente é designado para quando um fluxo precisa ser aquecido ou resfriado sem mudar a composição química. Se esse fluxo precisa ser aquecido, temos uma corrente fria, caso contrário, se precisar ser resfriado, tem-se uma corrente quente. Quando não é possível a troca térmica entre essas duas correntes, utiliza-se as correntes de utilidades para aquecer ou resfriar (SANTANA, 2012).

Segundo Kemp (2007), para realizar a análise *pinch* são necessárias as seguintes etapas:

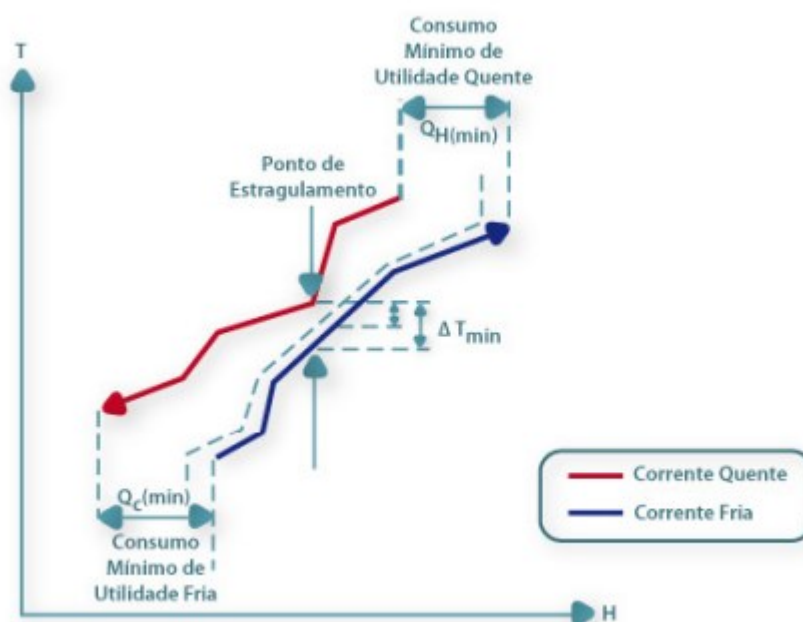
- Determinar o balanço de massa e energia;
- Extrair os dados das correntes quentes e frias do processo;
- Selecionar um delta de temperatura mínimo (ΔT_{\min})
- Calcular metas de energia e a temperatura do ponto *pinch*;
- Examinar as oportunidades de mudanças no processo;
- Considerar a possibilidade de realizar integração com outras plantas no local;
- Projetar a rede de trocadores de calor para recuperar o calor dentro do processo;
- Projetar os sistemas de utilidades para fornecer aquecimento e resfriamento restantes.

2.3.1 Curva composta

A construção da curva composta é parte fundamental na análise de um problema de integração. Esse desenvolvimento é feito relacionando-se a temperatura e entalpia das correntes quentes e frias do processo. A curva composta é representada pela Figura 3, onde se tem a sobreposição da curva quente na curva fria. A região vertical entre as curvas representa a possibilidade da recuperação de energia da corrente quente. Horizontalmente, cada vez que as curvas se aproximam maior a possibilidade de a troca térmica ocorrer. O ponto onde a menor distância

vertical é permitida, é conhecido como ponto *pinch* ou ponto de estrangulamento. Quando se atinge o ponto *pinch*, a energia restante deve ser satisfeita pelas correntes de utilidades, tanto para aquecimento, quanto para resfriamento (HUGENTHOBLE, 2020).

Figura 3 - Curvas compostas



Fonte: HUGENTHOBLE (2020)

O ponto de estrangulamento mostrado na Figura 2 cria duas regiões, a região acima do *pinch* e região abaixo do *pinch*. Acima do *pinch* tem-se déficit de energia, sendo necessária utilidade quente para fornecer calor para a corrente fria. Diferentemente da região abaixo do *pinch*, onde temos excesso de energia da corrente quente que será transferida para a utilidade fria (HUGENTHOBLE, 2020).

2.3.2 Cascata de calor

A cascata de calor, conhecida também como algoritmo tabular, é um método alternativo para obter metas de energia para valores de ΔT_{\min} . Esse método foi desenvolvido por Linnhoff e Flower na década de 70, com a finalidade de facilitar a obtenção das metas de energia quando se têm diversas correntes no processo, visto

que pelo método das curvas compostas esse procedimento ficaria muito impreciso devido ao número de correntes presentes no processo ser elevado (SANTANA, 2012).

Basicamente, o objetivo desse método é transferir o excesso de entalpia disponível de um nível térmico para o próximo nível imediatamente inferior.

Segundo Santana (2012), os passos para o algoritmo são:

- Dividir o processo em intervalos de temperatura. Corrigir as temperaturas para assegurar que todas as correntes presentes no mesmo intervalo respeitem o ΔT_{\min} . Sendo assim, as correntes quentes são deslocadas em $\Delta T_{\min}/2$ para baixo e as correntes frias deslocadas $\Delta T_{\min}/2$ para cima.
- Efetuar um novo balanço de energia para os intervalos com as temperaturas corrigidas.
- Realizar a transferência de calor de um intervalo para outro intervalo inferior, até o último intervalo no qual a troca térmica será com a utilidade fria.
- Determinar qual intervalo possui maior demanda de energia. Essa demanda deverá ser fornecida ao sistema pela utilidade quente.
- Realizar um novo balanço energético, onde a primeira transferência de calor da cascata será realizada pela utilidade quente com o valor da maior demanda encontrada no item anterior.
- Identificar o ponto *pinch*, onde não ocorre a troca térmica. Como as temperaturas foram deslocadas, para determinar o ponto *pinch* basta adicionar e subtrair $\Delta T_{\min}/2$ da temperatura deste intervalo.

A Figura 4 ilustra todo esse procedimento. Neste exemplo o ΔT_{\min} é 20 °C, ou seja, as temperaturas corrigidas para as correntes quentes foram subtraídas 10 °C e somadas 10°C para correntes frias.

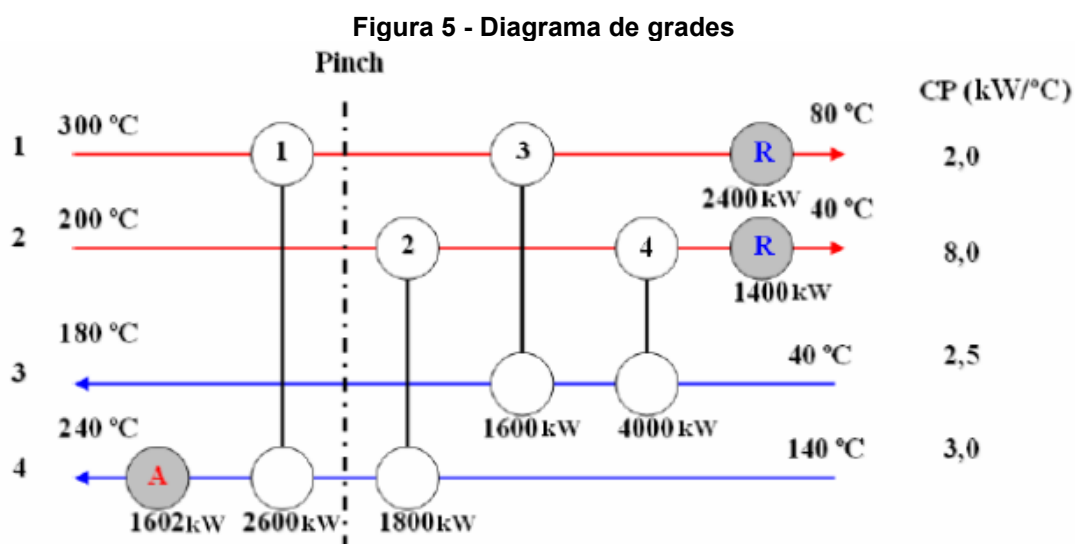
Figura 4 - Cascata de calor

Inter- valos	Temperatura Deslocada / °C	$(T_{(i+1)} - T_i) / °C$	Corrente				CP intervalo	$\Delta H / kW$		Cascata inviável	Cascata viável	
			H1	H2	C1	C2						
			18	22	20	50						
1	260	40					18,0	720,0	excesso	▼ 0	▼ 720	Utilidade quente
	220									▼ 720	▼ 1720	
2	210	10					-52,0	-520,0	demanda	▼ -520	▼ -520	
	170									▼ 200	▼ 1200	
3	170	40					-30,0	-1200,0	demanda	▼ -1200	▼ -1200	
	150									▼ -1000	▼ 0	PINCH
4	150	20					20,0	400,0	excesso	▼ 400	▼ 400	
	150									▼ -600	▼ 400	
5	60	90					2,0	180,0	excesso	▼ 180	▼ 180	
	60									▼ -420	▼ 580	
6	50	10					22,0	220,0	excesso	▼ 220	▼ 220	Utilidade fria
	50									▼ -200	▼ 800	

Fonte: SANTANA (2012)

2.3.3 Diagrama de grade

O diagrama de grade também é um mecanismo apresentado pelo trabalho de 1978 por Linnhoff e Flower. De acordo com Fernandes (2009), o diagrama de grade é uma forma de representar a rede de trocadores de calor e conhecer quais correntes irão realizar a troca térmica. A Figura 5 apresenta um exemplo do diagrama.



Fonte: FERNANDES (2009)

Segundo Fernandes (2009), para realizar a construção desse diagrama, as correntes devem ser colocadas na horizontal de tal forma que na parte superior

fiquem as correntes quentes e abaixo as correntes frias, sendo respeitado o sentido de cada corrente.

É de extrema importância seguir algumas regras para a construção da rede de trocadores de calor e que garantam assim as metas de consumo mínimo de energia (SANTANA, 2012). São elas:

- Não transferir calor através do ponto *pinch*, ou seja, a troca só deve ocorrer com as correntes presentes na mesma região, seja abaixo ou acima do *pinch*;
- Acima do *pinch* só utilizar utilidade quente, onde tem-se déficit de energia para transferir calor para as correntes frias;
- Abaixo do *pinch* só utilizar utilidade fria, onde será necessário resfriar o calor restante das correntes quentes;
- Acima do *pinch*, o número de correntes quentes deve ser menor ou igual ao número de correntes frias, além da capacidade calorífica global (mC_p) da corrente quente ser menor ou igual a da corrente fria;
- Abaixo do *pinch*, o número de correntes frias deve ser menor ou igual ao número de correntes quentes, já a capacidade calorífica da corrente fria deve ser menor ou igual ao da corrente quente.

Caso as regras de capacidade calorífica global ou número de correntes não estejam de acordo no diagrama de grandes, é necessário realizar a divisão de correntes, visto que a capacidade calorífica global nada mais é que a vazão mássica multiplicada pelo calor específico.

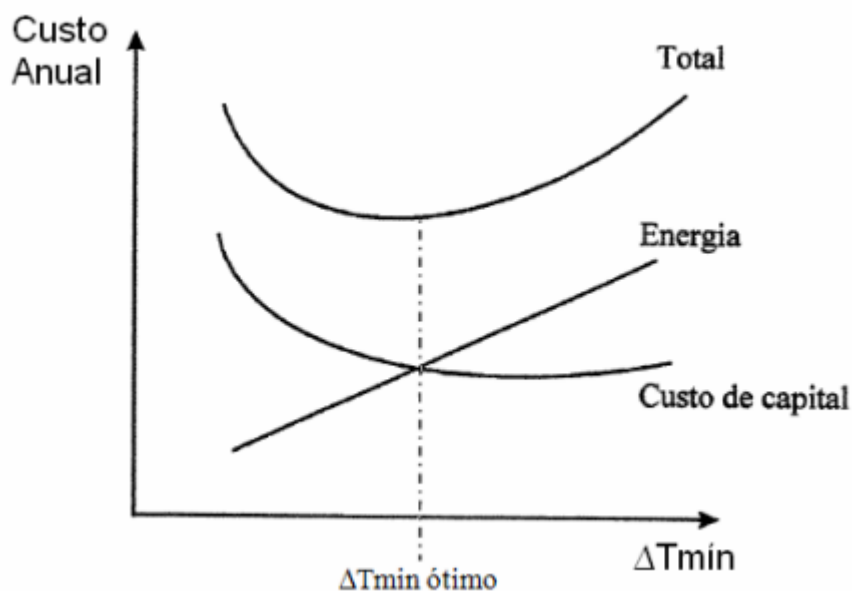
2.3.4 Análise Econômica

A análise financeira de um processo químico onde ocorrerá a integração energética, tem como fundamento a determinação do ΔT_{otm} , que é uma combinação entre os custos com utilidades e custos com os trocadores de calor. Esta variação da temperatura está diretamente ligada ao quanto de energia consegue-se

economizar em um processo, denominando-se de metas energéticas. Sabe-se que quanto menor o valor do ΔT_{\min} maior será o custo com trocadores de calor, pois necessitam de uma área de troca térmica maior. Por outro lado, o custo com utilidades será menor, visto que as correntes do processo conseguem ter um maior aproveitamento na troca térmica. Assim, o custo com utilidades energéticas é o custo operacional para manter o processo em funcionamento e o custo capital é o custo com os trocadores de calor para implementar a nova rede de trocadores.

Desta forma a Figura 6 ilustra o gráfico do custo em função do ΔT_{\min} , onde são apresentados os custos com energia, custos de capital e o custo total.

Figura 6- Gráfico do custo total



Fonte: FERNANDES (2009)

Nota-se que na curva do custo total há um mínimo, este ponto mínimo representa o ΔT_{otm} , sendo a combinação do menor custo possível com utilidades e custos de capital.

O custo de capital é composto pelo custo de capital fixo e custo de giro. O custo de capital fixo está diretamente relacionado com o custo que se necessita para implementar o projeto. Já o custo de giro é o custo necessário para manter o processo em funcionamento com as devidas manutenções, sendo este considerado 15% do custo de capital fixo (FERREIRA, 2020).

2.3.4.1 Número mínimo de trocadores de calor

Um parâmetro fundamental para a análise financeira é o número mínimo de trocadores de calor. É um parâmetro de fácil determinação e se relaciona diretamente com os custos da integração energética. Este parâmetro pode ser calculado pela Equação 5.

$$N_{min} = N_S + N_U - 1 \quad (5)$$

Sendo o N_{min} o número mínimo de trocadores de calor, N_S o número de correntes do processo que será integrado e N_U o número total de utilidades quentes e frias (KWONG, 2013).

A determinação deste parâmetro é importante devido à redução que poderá ser realizada referentes ao custo com trocadores de calor, ou seja, custo capital, como também a redução do custo operacional, que seriam as utilidades do processo. Sendo o custo capital referentes aos trocadores de calor, que tem em cada equipamento suas tubulações, válvulas, mão de obra, manutenções, entre outros fatores que afetam o custo capital (CARDOSO, 1999).

2.4 Estado da Arte

A seguir serão apresentados casos em que a tecnologia *pinch* foi utilizada em alguns processos industriais e os resultados desta aplicação.

Recentemente, Oliveira (2021) implementou a metodologia *pinch* no processo de hidrodealquilação do tolueno. A hidrodealquilação é uma reação química onde um hidrocarboneto aromático, como por exemplo, o tolueno, reage com gás hidrogênio com objetivo de convertê-lo para um hidrocarboneto aromático mais simples possível, sem nenhum grupo funcional. Entretanto, para esse processo ocorrer, um alto custo energético é exigido. O trabalho realizado apresentou números interessantes, como o custo anual para a produção, sendo que R\$ 51.761.843,07 antes da integração e R\$ 33.442.242,35 após a integração, representando uma economia de 35,40% com gastos energéticos.

Navarini (2019) realizou o estudo da integração energética em uma planta de produção de Dimetil Éter, possibilitando a redução de 55,31% no custo de utilidades, que representa uma economia de R\$ 760.580,88 por mês. A eficiência do método *pinch* é alta, em apenas 12 dias é possível obter o retorno do investimento necessário para realizar a integração, que é de R\$ 299.925,60 para esse processo.

No mesmo ano Prado (2019) aplicou a tecnologia *pinch* no processo de produção do ácido sulfúrico, um composto amplamente utilizado na indústria. Utilizando um ΔT_{\min} de 10 °C, obteve-se um resultado extremamente satisfatório de 97% na economia dos custos anuais entre utilidades quentes e frias.

Um ano antes Tonial (2018) integrou energeticamente uma planta industrial de produção da acetona reduzindo em 53% o consumo energético, sendo essa redução de R\$ 1.851.901,58 para R\$ 869.630,02.

No processo industrial de produção da amônia, Deveque (2019) fez o custo anual cair de US\$ 96.000,00 para US\$ 48.000,00, representando aproximadamente 55% de economia com energia.

Módenes *et al.* (2011) demonstrou que na etapa de extração de óleo de soja, pode-se obter uma redução de 77,5% em relação ao processo não integrado energeticamente, considerando uma planta que opera 24h/dia, 335 dias/ano com eficiência de 95%, sendo que a taxa de retorno no investimento seria de 3 meses.

Batista e Oliveira (2020) realizaram a análise *pinch* em uma biorrefinaria de cana-de-açúcar com um ΔT_{\min} de 10 °C, resultando em economia de 43% de utilidade quente e 57% de utilidade fria após a processo ser integrado.

Sendo assim, é possível comprovar a importância da aplicação da tecnologia *pinch* nos processos industriais, pois é um ganho econômico e um ganho ambiental, favorecendo as duas áreas. Além disso, gera-se mais competitividade entre as empresas, o que conseqüentemente diminui o preço final para o consumidor, gerando mais vendas e aumentando o lucro. A questão ambiental já é levada em consideração no projeto de processo, a implementação do método *pinch* e análise das utilidades quentes e frias fazem parte desta consideração do projeto.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção, é apresentada a metodologia para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

3.1 Aquisição dos dados do processo

Primeiramente, o processo de produção da anilina foi escolhido para realizar o estudo da viabilidade de integração energética, visto que na planta há aquecedores e resfriadores nas correntes do processo. O fluxograma foi coletado do trabalho “Planta de Produção de Anilina”, Júnior et al. (2016). O trabalho, além de apresentar o layout da planta, apresenta os dados do processo, ou seja, as folhas de especificações de balanço de massa, balanço de energia, trocadores de calor, entre outros.

Alguns dos dados, fundamentais para a análise da integração energética, presentes no trabalho “Planta de Produção de Anilina”, Júnior et al. (2016), apresentaram divergências no valor, como por exemplo, o calor específico da corrente orgânica que passa pelo trocador E-3. A folha de especificação do próprio trocador de calor informa que o valor é de 478,5 kcal/kg.°C na corrente de saída. Já a folha do balanço de energia informa outro valor de 0,452 kcal/kg.°C, ou seja, um valor completamente diferente, além do fato de ocorrer mudança de fase nos trocadores de calor, o que acaba ocasionando em variações do calor específico.

No caso da mudança de fase, utilizou-se da estratégia de dividir a corrente em três seções, onde considera a primeira subcorrente no estado líquido, a segunda subcorrente em equilíbrio líquido/vapor e a terceira subcorrente no estado vapor, isso se a corrente for fria para ser aquecida. Caso a corrente que passe por mudança de fase seja do tipo quente e precise de resfriamento, a primeira subcorrente encontra-se no estado vapor, a segunda no equilíbrio vapor/líquido e por fim a terceira subcorrente no estado líquido. Para determinar o calor específico em cada etapa, principalmente o calor específico do equilíbrio, utiliza-se o calor específico das subcorrentes já conhecidas por meio da Equação 6:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

em que Q é a taxa de calor, \dot{m} é a vazão mássica, C_p é o calor específico e ΔT a variação de temperatura.

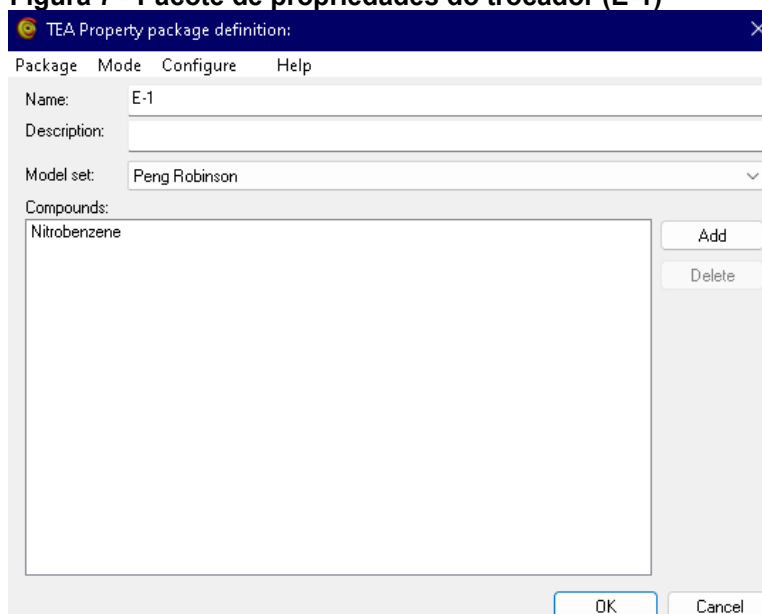
Em cada região dessa corrente dividida, onde ocorre a mudança de fase, obtém-se a taxa de calor, para determinar o calor específico do equilíbrio basta realizar o somatório de cada taxa de calor, visto que a taxa de calor total já é conhecida

Dessa forma, para corrigir estes problemas, se faz necessária a simulação dos trocadores de calor.

3.1.1 Simulação dos trocadores utilizando o *software* COCO

Com o *software* COCO aberto, primeiramente foi informado ao *software* as duas composições presentes nos trocadores E-1 e E-3. Desta forma, no menu superior clicou-se em “Flowsheet” e depois em “Configure”. Na aba “Property Packages” foram adicionados dois pacotes com as composições dos trocadores E-1 e E-3 como representado nas Figuras 7 e 8.

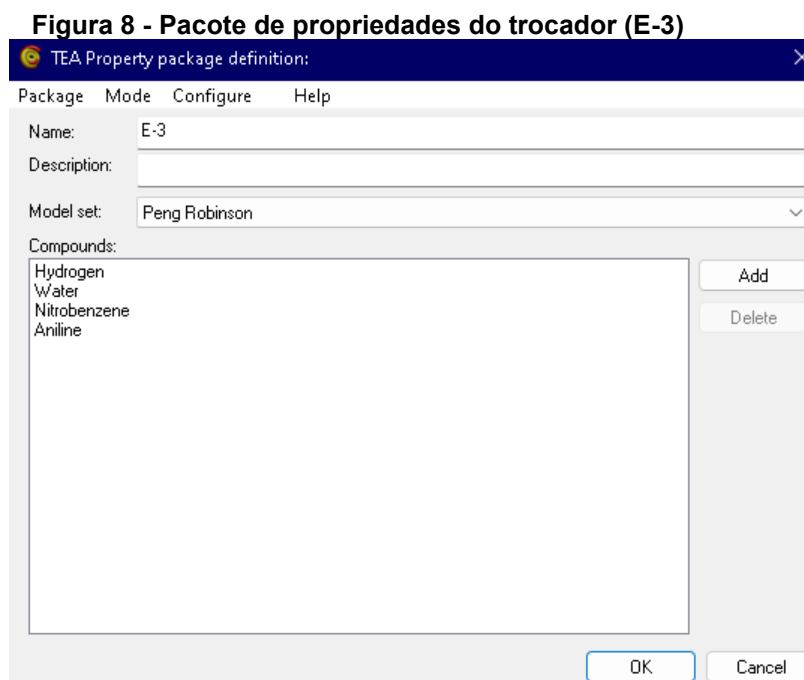
Figura 7 - Pacote de propriedades do trocador (E-1)



Fonte: Autoria própria (2022)

Como visto, as correntes do trocador E-1 são compostas apenas pelo nitrobenzeno e o modelo de equação de estado utilizado foi o de Peng-Robinson.

O mesmo procedimento foi feito para adicionar o pacote de propriedades das correntes presentes no trocador de calor E-3. Como representado na Figura 8.



Fonte: Autoria própria (2022)

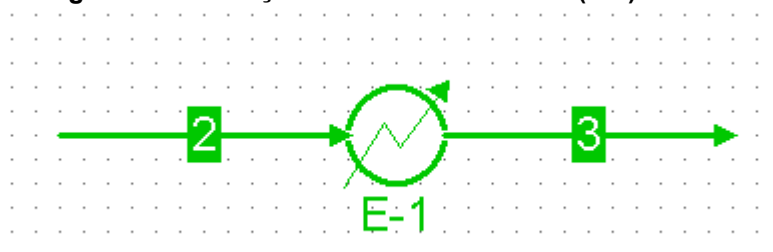
Essa corrente é composta por hidrogênio, água, nitrobenzeno e anilina, o modelo termodinâmico utilizado foi o mesmo, Peng-Robinson.

Seguindo, foram inseridas as correntes de entrada e de saída do trocador de calor E-1 na tela inicial do *software*. No menu superior clicou-se em “Insert” e depois em “Stream”. Nesta etapa, ao clicar duas vezes em cada corrente adicionada, é importante selecionar os pacotes que foram criados anteriormente, além das características físicas de cada uma das correntes, tais como, temperatura, composição, pressão e vazão mássica.

Para adicionar o trocador de calor na simulação, clicou-se em “Insert” no menu superior e depois em “Unit operation...”. Na pasta “Heaters, Coolers & Heat exchangers” foi selecionado “HeaterCooler”. Para conectar as correntes do processo em seus respectivos trocadores de calor, basta deslocar as extremidades de entrada

e saída das correntes com a extremidade do trocador de calor, como ilustrado na Figura 9, a simulação. O mesmo procedimento ocorreu para o trocador (E-3).

Figura 9 - Simulação do trocador de calor (E-1)



Fonte: Autoria própria (2022)

Após as correntes estarem conectadas aos trocadores de calor, a simulação é realizada apertando “F5” (Solve) e todos os dados referentes as correntes estarão apresentados, entre eles, o calor específico da corrente de entrada e saída dos trocadores de calor que apresentam mudanças de fases, (E-1) e (E-3).

3.1.2 Inserção dos dados das correntes no *software Hint*

Iniciando a integração com o *software Hint*, primeiramente é necessário adicionar as correntes que serão integradas energeticamente. Para isso, com o *software* aberto, selecionou-se no menu superior a aba “Streams” e clicou-se em adicionar “Add...”. A Figura 10 representa a aba do *software* aberta para informar os dados e adicionar as correntes do processo.

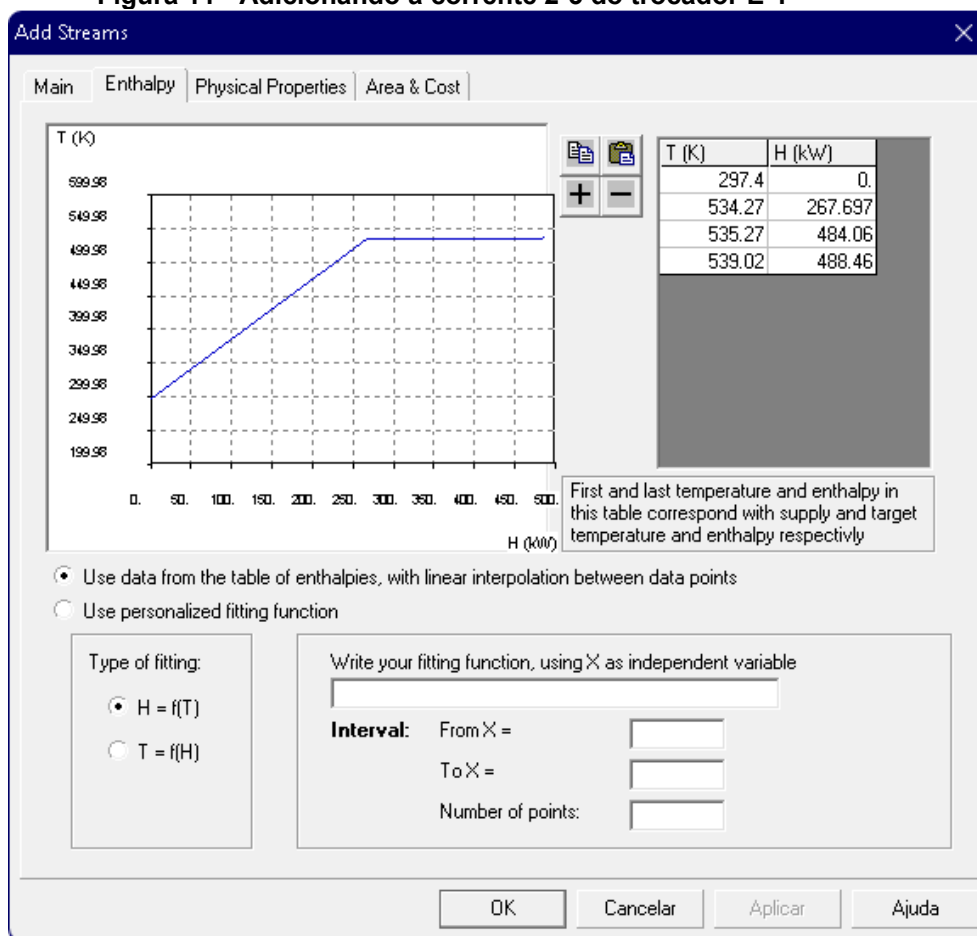
Figura 10 - Adicionando as correntes para realizar a integração energética

The image shows a software dialog box titled "Add Streams" with a close button (X) in the top right corner. The dialog has four tabs: "Main", "Enthalpy", "Physical Properties", and "Area & Cost". The "Main" tab is selected. In the "Main" tab, there is a "Stream number" input field containing the value "1" and an "Add" button. Below this is a "Description:" text box. There are two main sections for stream types, each with a radio button. The first section, "Linear Stream (constant m cp)", is selected. It contains the following fields and options: "Supply Temperature:" with a value of "0" and unit "K"; "Target Temperature:" with a value of "1" and unit "K"; "Heat Transferred:" with two radio buttons, "m cp" (unselected) and "H" (selected), and a value of "0" with unit "kW/K" for "m cp" and "kW" for "H"; "Stream Type:" with two radio buttons, "Hot" (selected) and "Cold" (unselected); and "Heat Type:" with two radio buttons, "Sensible" (selected) and "Latent" (unselected). The second section, "Non-Linear Stream (variable m cp)", is unselected and contains the text: "Use the 'Enthalpy' Tab to define the thermic characteristics of the stream". At the bottom of the dialog, there are four buttons: "OK", "Cancelar", "Aplicar", and "Ajuda".

Fonte: Autoria própria (2022)

Para a primeira corrente, 2-3, a mudança de fase acontece e o calor específico não é constante. Dessa forma, dentro da janela “Add Streams”, como demonstrado pela Figura 7, foi selecionado a opção “Non-Linear Stream (variable m.cp)”. Dentro da mesma janela, na aba “Enthalpy” foram passados os dados de temperatura e carga térmica, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Adicionando a corrente 2-3 do trocador E-1



Fonte: Autoria própria (2022)

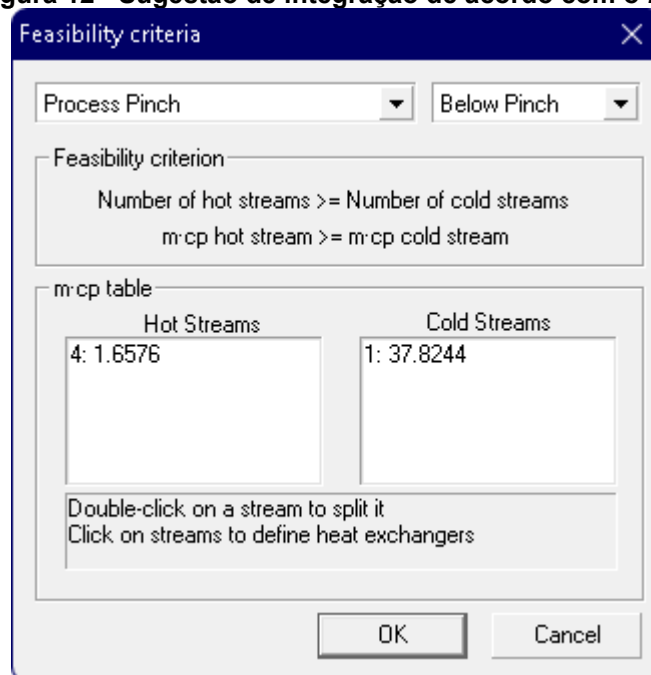
Assim, a corrente 2-3 foi adicionada no *software*. O mesmo procedimento é repetido para a corrente 6-7 do trocador de calor E-3, no qual também ocorre a mudança de fase.

Para as demais correntes, onde não há variações significativas do calor específico, ou seja, se mantém em um mesmo estado físico na corrente de entrada e na corrente de saída do trocador de calor, a adição no *software* é realizada selecionando a opção “Linear Stream (constant m.cp)” como representado na Figura 10. Após essa seleção, é necessário informar a temperatura de entrada em “Supply Temperature”, a temperatura de saída em “Target Temperature”, a troca térmica envolvida no trocador de calor em “Heat Transferred” selecionando a opção “H” entalpia em kW (kilowatts), o tipo da corrente em “Stream Type” e por fim, o tipo de calor em “Heat Type”.

3.1.3 Inserção dos trocadores de calor e utilidades no *software Hint*

Os intercambiadores são os trocadores de calor que conectam as correntes do processo que serão integradas energeticamente. Para isso, o *software* faz sugestões de possíveis conexões entre as correntes, clicando em “Streams” no menu superior e depois na aba “Feasibility” é possível escolher em qual região começar a integração, acima ou abaixo do *pinch*. É muito importante lembrar que essas sugestões que o *software* dispõe, são sugestões fundamentadas na teoria da própria metodologia *pinch*, por exemplo, como explicado anteriormente, sabe-se que acima do ponto *pinch* somente utilidade quente será utilizada para aquecer as correntes frias devido ao déficit energético desta região. Outro fundamento é referente a capacidade calorífica global (mCp) das correntes quentes serem menores ou iguais a capacidade calorífica das correntes frias na região acima do *pinch*. Desta forma, como representado na Figura 12, no caso da consideração da corrente 6-7, a região acima do *pinch* apresenta apenas a corrente 1 (2-3), sendo assim a integração acontece apenas na região abaixo do *pinch*. Inicialmente, o *software* sugere a integração entre as correntes 2-3 e 6-7 do processo, como demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Sugestão de integração de acordo com o *Hint*



Fonte: Autoria própria (2022)

Assim, o primeiro intercambiador é posto no diagrama de grades. Os demais intercambiadores, são postos clicando em “Heat Exchangers” na barra superior e depois em “Add...”. A Figura 13 apresenta a janela criada pelo *software* para a adição do segundo intercambiador.

Figura 13 - Adição do segundo intercambiador na rede de trocadores de calor

The image shows a software window titled "Heat Exchangers" with a close button (X) in the top right corner. The window has three tabs: "Specifications", "Area and Cost", and "Results". The "Specifications" tab is selected. Inside the window, there are several input fields and buttons:

- Heat Exchanger Number:** A text box containing the number "2" and a "Delete" button.
- Cold Stream:** A dropdown menu showing "6 E-4" and a "Properties" button.
- Hot Stream:** A dropdown menu showing "2 E-9" and a "Properties" button.
- Specifications type:** A dropdown menu showing "User supplied temperatures".
- Enthalpy:** A checkbox labeled "Enthalpy:" followed by a text box containing "88.388" and the unit "kW".
- Cold Stream section:**
 - Inlet Temperature:** A checked radio button next to a text box containing "317.5" and the unit "K". Other options are "Pinch Temperature", "Outlet temperature of HE No.", and "Cold stream supply temperature".
 - Outlet Temperature:** A checked radio button next to a text box containing "417.45" and the unit "K". Other options are "Pinch Temperature", "Inlet temperature of HE No.", and "Cold stream target temperature".
- Hot Stream section:**
 - Inlet Temperature:** A checked radio button next to a text box containing "456.66" and the unit "K". Other options are "Pinch Temperature", "Outlet temperature of HE No.", and "Hot stream supply temperature".
 - Outlet Temperature:** An unchecked radio button next to a text box containing "379.982" and the unit "K". Other options are "Pinch Temperature", "Inlet temperature of HE No.", and "Hot stream target temperature".

At the bottom of the window, there are four buttons: "OK", "Cancelar", "Aplicar", and "Ajuda".

Fonte: Autoria própria (2022)

Passando as informações sobre quais correntes irão trocar calor, fornecendo os dados de temperatura de entrada e temperatura de saída, da corrente quente e da corrente fria, o segundo intercambiador foi adicionado.

Para adicionar as utilidades, clicou-se em “Utilities” e depois em “Add...”, é necessário informar ao *software* a temperatura de entrada e de saída de cada utilidade e também o tipo de calor, latente ou sensível. A Figura 14 apresenta as utilidades que estão no processo.

Figura 14 - Inserindo as utilidades na rede de trocadores de calor



Fonte: Autoria própria (2022)

É importante ressaltar que os dados energéticos das utilidades na Figura 14, foram calculados considerando um ΔT_{\min} igual a 10 °C, como geralmente é utilizado na literatura. Porém, em breve, com a adição dos parâmetros de custos e coeficientes convectivos de transferência de calor para cada corrente, será possível determinar o ΔT_{otm} .

3.2 Cascata de calor e curvas compostas

Após adicionar os dados das correntes no *software Hint*, o mesmo gerará as curvas compostas e irá elaborar a cascata de energia. Porém, o princípio é o

mesmo, é elaborada uma tabela contendo os intervalos de temperaturas ajustadas, todas as correntes quentes e frias juntamente com o CP (capacidade calorífica global) de cada intervalo para determinar a entalpia nestes intervalos, construindo assim a cascata inviável. Com esta cascata inviável, é possível analisar e utilizar a maior demanda de energia encontrada para ser atribuída no início da nova cascata de calor, ou seja, a cascata viável. Analisa-se, então, a cascata viável e determina-se o ponto em que a demanda é zero. Desta forma encontra-se o ponto de estrangulamento (*pinch*) e o valor de consumo de utilidades quentes e frias do processo integrado.

3.3 Diagrama de grades

Identificado o ponto *pinch*, inicia-se a montagem do diagrama de grades, que também acontece após a inserção dos dados no *software*. Nesta etapa começará a construção da rede de trocadores de calor, separando-se as correntes quente e frias horizontalmente, de tal forma que as correntes quentes fiquem na parte superior e as correntes frias na parte inferior. Para isso clicou-se em “*Diagram*” no menu superior e depois em “*Format*”, com a janela de formatação aberta, selecionou-se “*Arrange in hot and cold streams*”. No diagrama de grades separa-se também verticalmente as regiões acima do *pinch* e abaixo do *pinch*. Desta maneira, consegue-se determinar rearranjos de redes de trocadores de calor e avaliar qual a rede mais viável para o projeto.

3.4 Determinação do ΔT_{otm} e análise econômica

Em seguida, desenvolvem-se as estimativas de custos do projeto que determinará o ΔT_{otm} , os valores reduzidos de gastos com os insumos energéticos (utilidades quentes e frias), bem como o investimento necessário para realizar este projeto, juntamente com o tempo de retorno do investimento. O próprio *software Hint* plota um gráfico dos custos em função do ΔT_{min} .

3.4.1 Custos para a análise econômica

Todos os parâmetros relacionados a custos foram retirados do trabalho de Ferreira (2020). O *software Hint* utiliza-se desses parâmetros para realizar a análise econômica e obtenção do ΔT_{otm} de um projeto de rede de trocadores de calor, a Equação 7 demonstra a correlação genérica utilizada pelo *software*.

$$C = a + b \cdot A^c \quad (7)$$

Onde o C é o custo de capital total anual, A é a área de troca térmica e os parâmetros a, b e c dependem de fatores como o tipo do trocador de calor, material de construção, área de troca térmica, propriedades de fluxo, dentre outros fatores (FERREIRA, 2020).

3.4.2 Coeficiente convectivo de transferência de calor

Outro parâmetro que o *software Hint* necessita para realizar a análise para determinar o ΔT_{otm} é o coeficiente convectivo de transferência de calor. É necessário estimar o valor para cada corrente do processo que será integrada energeticamente.

Para isso, calcula-se a diferença de temperatura média logarítmica de cada trocador de calor, como demonstrado na Equação (1) a fim de determinar o coeficiente global de transferência de calor, por meio da Equação (2).

Com o coeficiente global, é possível estimar o coeficiente convectivo de transferência de calor para cada uma das correntes do processo, quentes ou frias, por meio da Equação 8.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_Q} + \frac{1}{h_F} \quad (8)$$

Sendo U o coeficiente de transferência de calor global, h_Q o coeficiente convectivo de transferência de calor referente à corrente quente ou utilidade quente

e h_F o coeficiente convectivo de transferência de calor referente à corrente fria ou utilidade fria.

Ressaltando a idealidade considerada para realizar a estimativa, tais como, operação em estado estacionário, variações de energia cinética e potencial desprezíveis e não ocorrer perdas de calor para a vizinhança.

Por fim, será apresentado um novo fluxograma para o processo de produção da anilina contendo a rede de trocadores de calor integrada energeticamente pela tecnologia *pinch*, utilizando o *software Hint*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como descrito nos procedimentos metodológicos, primeiramente, para realizar a integração energética, foi necessário o levantamento dos dados de balanço de massa e energia do processo de produção da anilina, obtidos através do trabalho de Júnior *et al.* (2016).

4.1 Dados do processo

Para determinar os principais dados do processo na intenção de realizar a integração energética, foram necessários alguns ajustes e simulações no *software* COCO, como dito anteriormente. De forma geral, a Tabela 1 apresenta todas as correntes utilizadas no processo, apenas com os dados brutos iniciais, sem levar em consideração as mudanças de fases das correntes 2-3 e 6-7.

Tabela 1 - Dados iniciais para a análise pinch

Trocador de Calor	Número da Corrente	Tipo da Corrente	Estado Físico	Vazão Mássica (kg/h)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Carga Térmica (kW)
E-1	2-3	Fria	L-V	2667	24,25	265,87	488,46
E-3	6-7	Quente	L-V	3019	270	50	1221,15
E-4	14-15	Fria	L	2122	44,35	144,3	176,776
E-9	21-22	Quente	L	1818,8	183,51	24,1	183,754
E-10	19-20	Quente	L	160,61	245,72	24,1	22,097

Fonte: Autoria própria (2022)

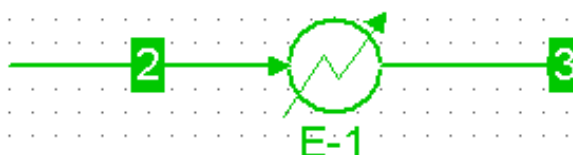
4.1.1 Simulação com o *software* COCO

A simulação ocorreu seguindo as informações de temperaturas dos trocadores de calor, vazões mássicas, quedas de pressões e as composições das correntes presentes no trabalho.

Na primeira corrente que é aquecida no trocador de calor (E-1), ocorre mudança de fase e existe uma variação considerável do calor específico, que se fez necessário a divisão da corrente em três seções de acordo com o estado físico. Vale

lembrar que essa corrente é composta apenas por nitrobenzeno. A primeira subcorrente gerada, se mantém na fase líquida, a segunda subcorrente se encontra em equilíbrio líquido/vapor, e por fim, a terceira subcorrente se encontra apenas em fase vapor. A simulação do trocador (E-1) é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Simulação do trocador de calor (E-1) e os dados obtidos



Stream	2	3	Unit
Pressure	3.73829	3.04202	bar
Temperature	24.25	265.87	°C
Flow rate	2667	2667	kg / h
Mole frac Nitrobenzene	1	1	
Flow Nitrobenzene	2667	2667	kg / h
Vapor phase			
HeatCapacityCp		1.58393	kJ / kg °C
Liquid phase			
HeatCapacityCp	1.52551		kJ / kg °C

Fonte: Autoria própria (2022)

Como visto, a simulação gerou o calor específico da corrente 2 e 3, porém, como existe a mudança de fase, precisa-se determinar o calor específico do estado de equilíbrio líquido/vapor. Este cálculo foi realizado utilizando a seguinte Equação 6.

Para a primeira subcorrente, com os dados de vazão mássica (2667 kg/h), calor específico (1,52551 kJ/kg.°C) e variação de temperatura (261,12 °C – 24,25 °C), foi possível calcular a taxa de calor deste intervalo, Q_1 , obtendo o valor igual a 267,6965 kW. Ressaltando que a determinação da temperatura de 261,12 °C, foi obtida pela simulação do trocador de calor (E-1) no *software* COCO. Essa temperatura é a temperatura de bolha ou orvalho, visto que são iguais devido a fração molar do nitrobenzeno ser 1, ou seja, a corrente é pura.

Da mesma forma foi realizado o cálculo da taxa de calor da terceira subcorrente, Q_3 , com os dados de vazão mássica (2667 kg/h), calor específico (1,58393 kJ/kg.°C) e variação de temperatura (265,87 °C – 262,12 °C), o valor obtido para esse intervalo foi de 4,4003 kW. Considerando o valor de 262,12 °C para a temperatura inicial dessa terceira subcorrente.

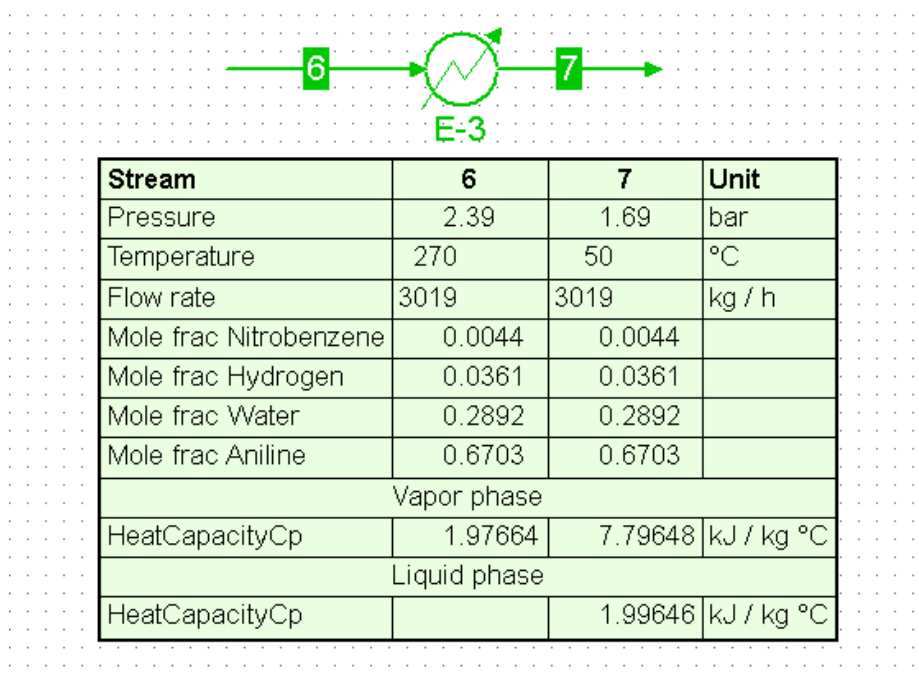
Conhecendo a taxa de calor total do trocador de calor (E-1), Q_T , igual a 488,46 kW, juntamente com a taxa de calor calculado em cada intervalo, foi possível determinar a taxa de calor na segunda subcorrente, Q_2 , pela Equação 9:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (9)$$

Desta forma, o valor de 216,3632 kW é atribuído a taxa de calor da segunda subcorrente. Assim, pela Equação 9, determinou-se o calor específico na seção de equilíbrio líquido/vapor, considerando como intervalo de temperatura de 261,12 °C a 262,12 °C e vazão mássica 2667 kg/h, resultando em um valor de 289,12 kJ/kg.°C.

Seguindo a mesma lógica para a corrente 3-4, que passam pelo trocador de calor (E-3), o calor específico resultou em valor de 1020,2717 kJ/kg.°C. Porém, na simulação, existe uma mistura de vapor e líquido na corrente de saída (corrente 7), mas essa mistura é composta por uma fração molar da fase vapor muito pequena, de aproximadamente 3,98%, podendo ser desconsiderada devido à complexidade de cálculo para continuidade do processo de integração. Sendo assim, considerou-se a mudança de fase completa e dividiu-se em três seções de acordo com o estado físico, a primeira subcorrente se encontra na fase vapor, a segunda subcorrente em equilíbrio vapor/líquido e a terceira subcorrente na fase líquida. A Figura 16 apresenta a simulação do trocador de calor (E-3) pelo *software* COCO, com as informações fundamentais para realizar a integração energética.

Figura 16 - Simulação do trocador de calor (E-3) e os dados obtidos



Fonte: Autoria própria (2022)

Para as outras correntes, 14-15, 21-22 e 19-20, que passam pelos trocadores de calor (E-4), (E-9) e (E10), respectivamente, a simulação não detecta mudanças de fases. Desta forma, a Tabela 2 apresenta cada corrente utilizada no processo, com os seus respectivos dados corrigidos, para realizar a integração energética no *software Hint*.

Tabela 2 - Dados iniciais corrigidos para a análise *pinch*

Trocador de Calor	Número da Corrente	Tipo da Corrente	Estado Físico	Vazão Mássica (kg/h)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Carga Térmica (kW)
E-1	2-3	Fria	L	2667	24,25	261,12	267,70
E-1	2-3	Fria	L-V	2667	261,12	262,12	216,36
E-1	2-3	Fria	V	2667	262,12	265,87	4,40
E-3	6-7	Quente	V	3019	270	203,05	-110,98
E-3	6-7	Quente	V-L	3019	203,05	202,05	-855,61
E-3	6-7	Quente	L	3019	202,05	50	-254,56
E-4	14-15	Fria	L	2122	44,35	144,30	176,78
E-9	21-22	Quente	L	1818,8	183,51	24,1	-183,754
E-10	19-20	Quente	L	160,61	245,72	24,1	22,097

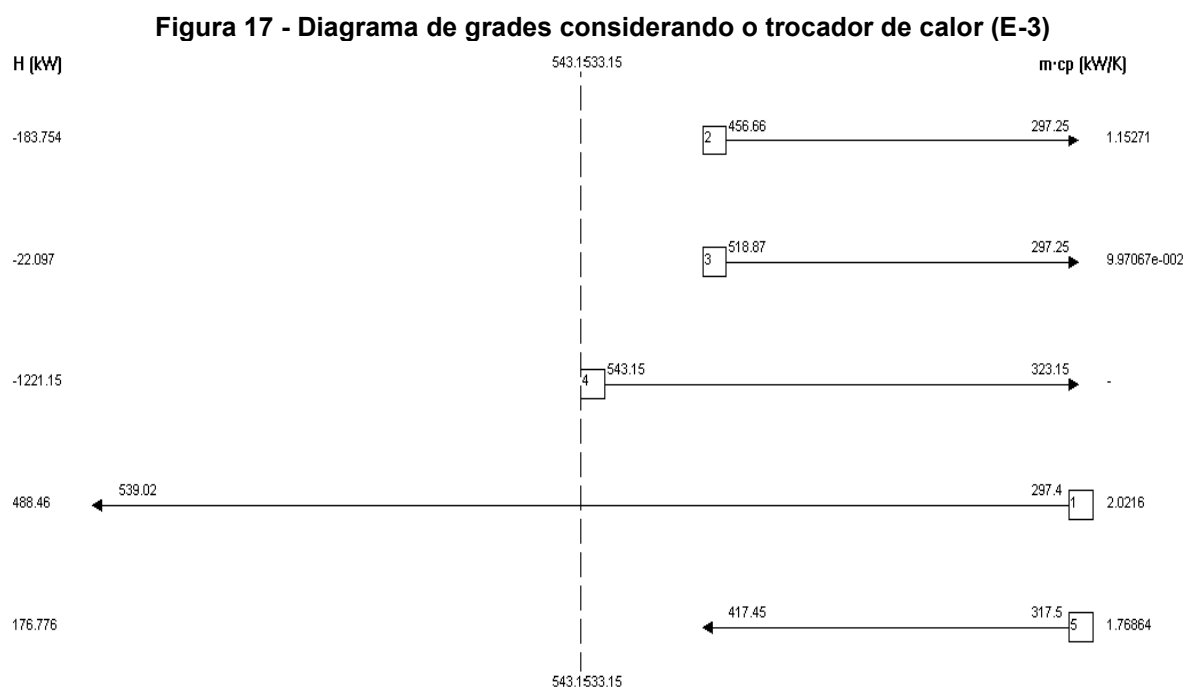
Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Integração energética com o *software Hint*

A análise da integração energética será realizada de duas maneiras, a primeira análise levará em consideração a corrente 6-7 que passa pelo trocador (E-3). Já a segunda análise desconsiderará a corrente 6-7, por possuir o valor de troca térmica elevado se comparado às demais correntes.

4.2.1 Diagrama de grades

Com as correntes adicionadas, seguindo os passos descritos na seção 3.1.2, a próxima ferramenta da metodologia *pinch* utilizada para realizar a integração energética de fato, é o diagrama de grades. O diagrama começa a ser desenhado pelo próprio *software* na medida em que as informações das correntes são introduzidas. Ressaltando que esta primeira análise para cada cenário, considerou-se um ΔT_{\min} igual a 10 °C. A Figura 17 apresenta o diagrama de grades inicial.

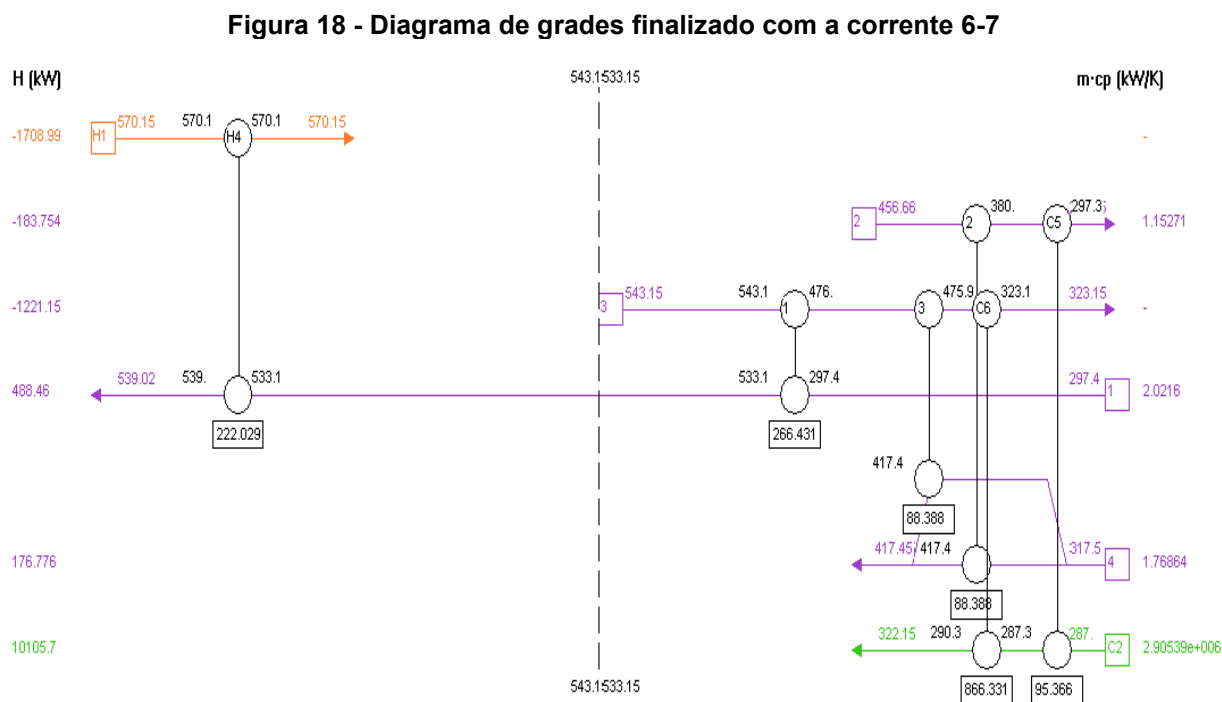


Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar que nesta configuração, considerando o trocador E-3, tem-se apenas uma corrente na região acima do *pinch*, ou seja, a integração

ocorrerá apenas na região abaixo do *pinch*. Em seguida, após todas as correntes estarem inseridas ocorre a adição dos intercambiadores e utilidades no processo, seguindo o procedimento descrito na seção 3.1.3.

Assim, o diagrama de grades para esta primeira integração energética, considerando a corrente 6-7 é apresentado na Figura 18.



Fonte: Autoria própria (2022)

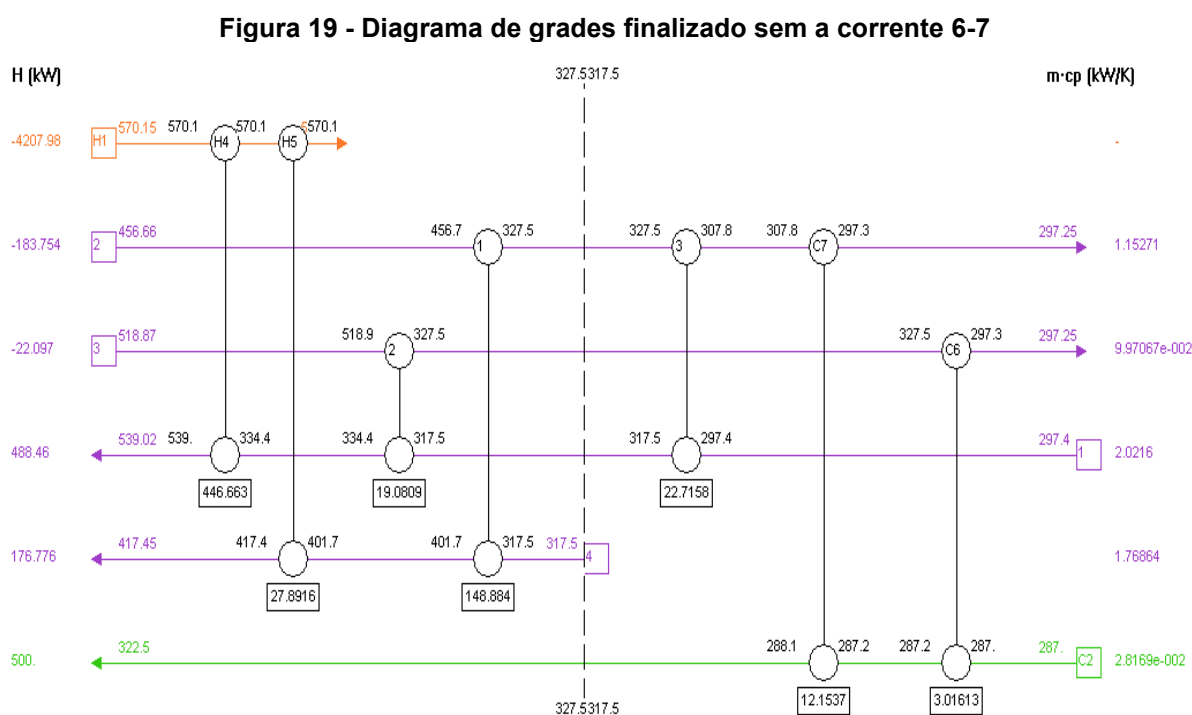
A corrente 4 representada no diagrama de grades do *software*, que é a corrente 14-15 do trocador de calor (E-4), precisou ser dividida em uma proporção de 50% para que a taxa de capacidade calorífica global ($\dot{m}C_p$) seja menor do que das correntes quentes, apenas para seguir o fundamento da metodologia, onde se diz que a taxa de capacidade calorífica global das correntes frias deve ser menor que a taxa de capacidade calorífica global das correntes quentes. Nota-se que o diagrama integrado, não contém a corrente 19-20 presente no trocador (E-10). Essa corrente não altera a integração pois não integra com nenhuma outra corrente apenas com a utilidade fria com uma carga térmica de 22,097 kW, ou seja, a mesma carga do processo original sem a integração energética, podendo ser descartada desta primeira análise.

Acima do *pinch*, tem-se apenas um trocador de calor H4 com uma carga térmica de 222,03 kW. Já abaixo do *pinch* encontra-se a integração energética, onde

a corrente de número 1, representando a corrente 2-3 do processo, troca calor com a corrente 3 (6-7 do processo) com um valor energético de 266,43 kW no intercambiador 1. A corrente 3 segue trocando calor com parte da corrente 14 no intercambiador 3 em uma troca térmica de 88,39 kW e por fim necessita de um resfriador C6 de carga 866,33 kW para atingir a temperatura especificada do processo. A corrente de número 2, representada pela corrente 21-22 do processo, troca calor com a outra parte da corrente 14 que necessitou ser dividida, essa troca envolve um valor energético de 88,39 kW no intercambiador 2 e no resfriador C5 uma carga térmica de 95,37 kW para resfriar e atingir as especificações.

O *software* indica que a integração energética está concluída, pois como calculado pela cascata de calor, o gasto com utilidade quente é de 222,03 kW (H4) e o gasto com utilidade fria é de 961,70 kW, somando as cargas térmicas dos resfriadores (C5) e (C6), se considerar o ΔT_{\min} igual a 10 °C.

Para a segunda integração energética, desconsiderando a corrente 6-7 do trocador de calor (E-3), seguindo o mesmo procedimento, foram adicionadas as correntes do processo juntamente com a adição dos intercambiadores, gerando assim o seguinte diagrama de grades, representado pela Figura 19.



Neste segundo diagrama de grades, diferentemente da primeira rede, a integração energética acontece acima e abaixo do ponto *pinch*. A rede também é composta por 3 intercambiadores, sendo o primeiro intercambiador responsável pela troca térmica envolvendo as correntes 2 e 4 do diagrama, que representam as correntes 21-22 e 14-15 do processo, respectivamente, esta troca tem carga de 148,88 kW. Já o segundo intercambiador com carga térmica de 19,08 kW envolve as correntes 3 e 1 do diagrama de grades, que são as correntes 19-20 e 2-3, respectivamente.

Na região abaixo do *pinch* encontra-se o terceiro intercambiador, envolvendo as correntes 1 e 2 do diagrama de grades em uma troca térmica de carga igual a 22,71 kW. Por fim, as utilidades quentes na região acima do *pinch* (H4) e (H5), com cargas térmicas de 446,66 kW e 27,89 kW, respectivamente, para aquecer as correntes 1 e 4 e atingir as especificações do processo. Na região abaixo do *pinch* tem-se os resfriadores (C6) e (C7), respectivamente, de cargas 3,01 kW e 12,15 kW para resfriar as correntes 3 e 2 do diagrama de grades.

A integração energética está concluída pelo somatório das cargas térmicas de cada utilidade, quente e fria, 474,55 kW e 15,17 kW, respectivamente, calculadas pela cascata de calor, considerando inicialmente um ΔT_{\min} de 10 °C.

4.3 Diferença de temperatura ótima para o processo

Para determinar o ΔT_{otm} da rede de trocadores de calor e obter a maior redução energética, é necessário informar ao *software* alguns parâmetros de custos, além do coeficiente convectivo de transferência de calor de cada corrente presente no processo. Em seguida, informar ao *software* todos os dados calculados para a geração do gráfico de custos em função do ΔT_{\min} .

4.3.1 Parâmetros de custos

Como dito anteriormente os parâmetros *a*, *b* e *c*, presentes na Equação 7, foram retirados do trabalho de Ferreira (2020), onde considerou-se fatores para

estimar o custo de capital total, tais como, a correção das mudanças econômicas em relação ao tempo, o material de construção dos trocadores de calor, a localização tendo como base os custos referentes a região da Costa do Golfo dos Estados Unidos, entre outros. A partir desses parâmetros, construiu-se toda a análise para a determinação do ΔT_{otm} e toda análise econômica da nova rede de trocadores de calor. Para cada corrente presente na análise e para cada utilidade, utilizou-se as correlações apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Correlação para o custo capital total	
Correntes	Correlação para o custo capital (US\$)
2-3	$27.793 + 61A^{1,2}$
6-7	$27.793 + 61A^{1,2}$
14-15	$27.793 + 61A^{1,2}$
21-22	$27.793 + 61A^{1,2}$
19-20	$27.793 + 61A^{1,2}$
Utilidade quente	$27.793 + 61A^{1,2}$
Utilidade fria	$27.793 + 61A^{1,2}$

Fonte: Autoria própria (2022)

Para os custos operacionais considerou-se também os mesmos do trabalho de Ferreira (2020), sendo o custo para o vapor saturado de alta pressão de 17,70 US\$/GJ e 0,354 US\$/GJ para água de resfriamento, porém no trabalho de Júnior *et al* (2016), propõe-se que a planta de produção da anilina opere 7500 horas/ano. Como o *Hint* trabalha em base anual, necessitou-se converter esses valores e adequando-se às unidades do *software*, resultando em um valor de 477,90 \$/kWa para o vapor saturado e 9,56 \$/kWa para a água de resfriamento.

4.3.2 Coeficiente convectivo de transferência de calor

Para estimar o coeficiente convectivo de transferência de calor, utilizou-se a Equação 8, considerando a idealidade e desprezando fatores como resistência térmica de possíveis incrustações presentes nos trocadores de calor e resistência térmica das paredes das tubulações.

Sendo assim, calculou-se a diferença de temperatura média logarítmica de cada extremidade em cada trocador, considerando o fluxo contracorrente. Em seguida, determinou-se para cada trocador o coeficiente convectivo de transferência de calor global, para assim utilizar a Equação 8 e estimar o valor do coeficiente de cada corrente.

Na Equação 8, nota-se a presença do coeficiente convectivo de transferência de calor quente e frio. Este coeficiente trata do valor das utilidades presentes no processo. Se a corrente em que se quer determinar o coeficiente for uma corrente quente, o coeficiente h_f é o valor referente a água. Já se a corrente for do tipo fria, o coeficiente h_q é o valor referente ao vapor. Segundo Smith (2005), os valores dos coeficientes convectivos da água e do vapor estão em uma faixa de 2 a 6 ($\text{kW/m}^2\cdot^\circ\text{C}$) e 5 a 15 ($\text{kW/m}^2\cdot^\circ\text{C}$), respectivamente. Para o cálculo do coeficiente das correntes, utilizou-se o limite superior de cada uma das faixas, a fim de diminuir os coeficientes das correntes para se obter uma maior aproximação da realidade, visto que são inversamente proporcionais.

Desta forma a Tabela 4 apresenta cada uma das correntes do processo com seus respectivos coeficientes convectivos de transferência de calor.

Tabela 4 - Coeficientes convectivos de transferência de calor	
Correntes	Coeficientes Convectivos de Transferência de calor ($\text{kW/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)
2-3	1,0657
6-7	0,7969
14-15	1,0835
19-20	0,3361
21-22	0,3235
Utilidade quente	15
Utilidade Fria	6

Fonte: Autoria própria (2022)

4.3.3 Gráfico Custo anual *versus* ΔT_{\min}

Nesta seção, analisa-se o comportamento gráfico do custo anual em função do ΔT_{\min} , levando em consideração o trocador de calor e desconsiderando o mesmo.

4.3.3.1 Gráfico Custo anual versus ΔT_{\min} considerando (E-3)

Para gerar o gráfico do custo anual em função do ΔT_{\min} inseriu-se as correlações de custos em cada corrente e em cada utilidade, com seus respectivos coeficientes convectivos de transferência de calor e analisou o comportamento do gráfico. Nessa geração do gráfico, foi utilizado a variação de 1 °C a 50 °C referentes ao ΔT_{\min} e 80 pontos para plotar o gráfico, além de considerar um pay-back de 5 anos, considerando 0% de taxa de juros, ou seja, o dinheiro investido parte da própria indústria sem a necessidade de empréstimos e fator de Lang igual 3,4 como sugerido pelo próprio *software*. A Figura 20 apresenta a janela para plotagem do gráfico.

Figura 20 - Geração do gráfico Custos x ΔT_{\min} considerando (E-3)

The screenshot shows a dialog box titled "Total cost vs DT min" with the following fields and values:

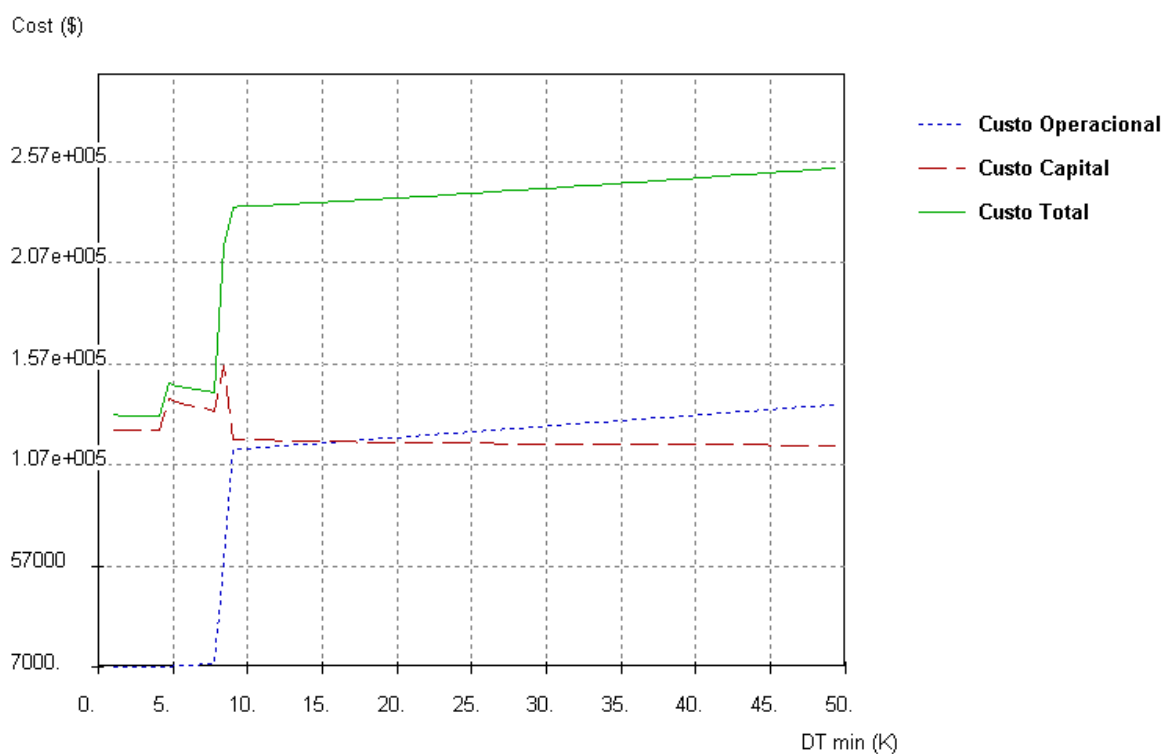
- Minimum temperature difference:**
 - Initial minimum temperature difference: 1 K
 - Final minimum temperature difference: 50 K
 - Number of points: 80
- Operating cost:**
 - Heating cost: 477.9 \$/kW-yr
 - Cooling cost: 9.558 \$/kW-yr
- Capital cost:**
 - Pay - back time: 5 Years
 - Interest rate: 0 %
 - Lang factor: 3.4
- Stream number:** 1
- Heating utility:**
 - a: 27793
 - b: 61
 - c: 1.2
- Cooling utility:**
 - a: 27793
 - b: 61
 - c: 1.2
- Cost correlation:** $C = a + b \cdot A^c$
A | = m²; C | = \$
- Heat transfer coefficients:** (button)

Buttons: OK, Cancel

Fonte: Autoria própria (2022)

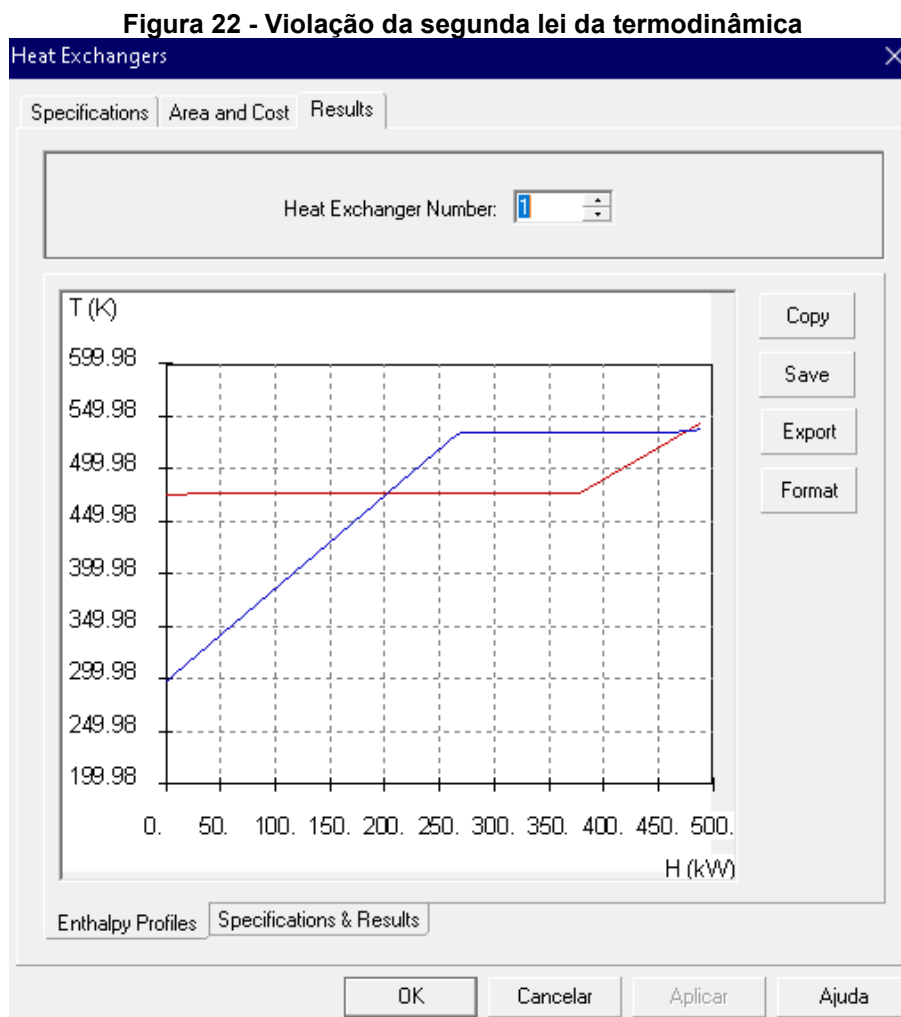
Para obter uma análise melhor, foram exportados os dados do gráfico para o *software Microsoft Excel* e utilizou-se a função mínimo para determinar o ΔT_{otm} . Dessa forma, o gráfico apresentado na Figura 21 é a relação dos custos com o ΔT_{min} de acordo com o gráfico gerado pelo *software Hint*.

Figura 21 - Gráfico Custos x ΔT_{min} considerando (E-3)



Fonte: Autoria própria (2022)

A função mínima utilizada pelo Microsoft Excel encontrou um valor para o ΔT_{otm} de 4°C. Porém, este valor quando utilizado no *software Hint* apresentou erro de especificações de temperatura da troca térmica entre os trocadores de calor (E-1) e (E-3), ou seja, a violação da segunda lei da termodinâmica. Pode-se observar na Figura 22 o erro para um ΔT_{min} de 4 °C.



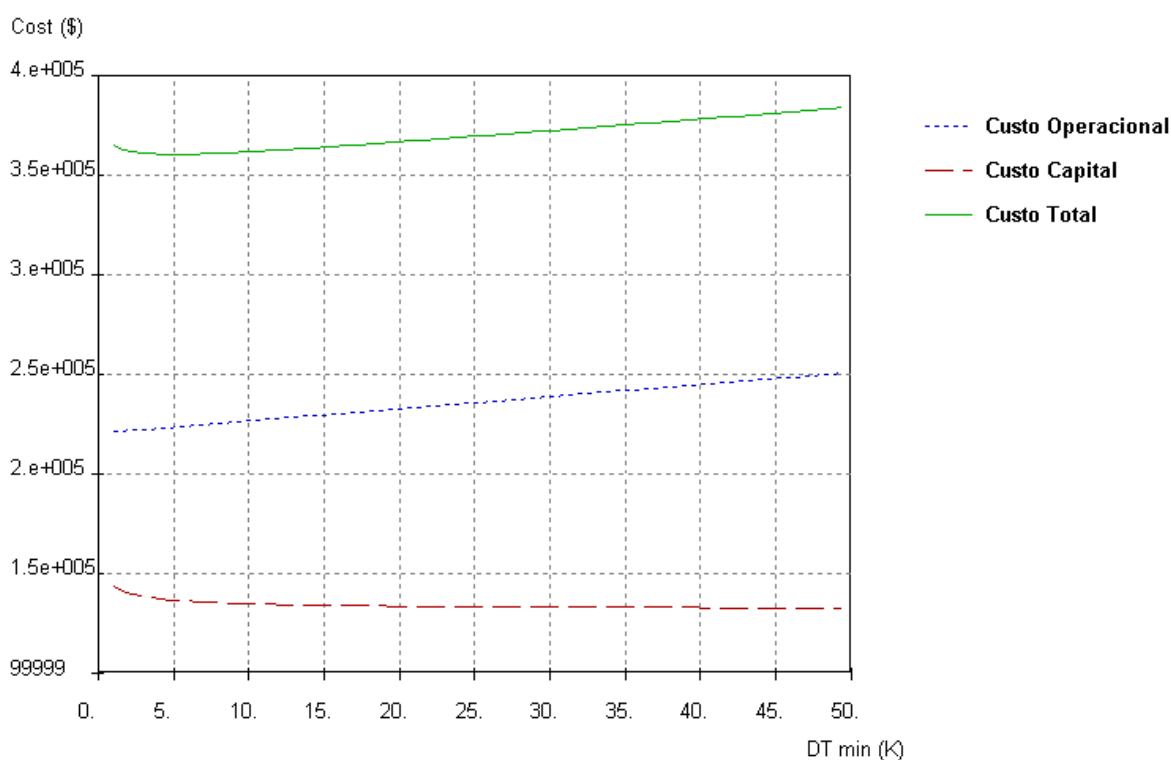
Fonte: Autoria própria (2022)

Como sabe-se o calor só é transmitido do corpo mais quente para o corpo mais frio, desta forma ocasionando a violação e impossibilitando a análise para este ΔT_{\min} de 4 °C. Sendo assim, o menor valor possível para o ΔT_{\min} onde não ocasiona nenhuma violação é de 9 °C, para esta primeira análise considerando o trocador de calor (E-3). Com uma visão da engenharia, uma outra análise fundamental sobre utilizar um ΔT_{\min} de 4 °C é a realidade do processo, o *software* não considera fatores como incrustação por exemplo, com o processo sendo operado dia a dia, com o tempo irá ocorrer incrustação e uma diferença de temperatura de 4 °C não representará a realidade devido ao aumento da resistência térmica, sendo muito arriscado para o processo.

4.3.3.2 Gráfico Custo anual versus ΔT_{\min} desconsiderando (E-3)

Na análise desconsiderando o trocador (E-3), utilizou-se os mesmos parâmetros. Considerou-se a variação de ΔT_{\min} de 1 °C a 50 °C, 80 pontos, *pay-back* de 5 anos, sem taxas de juros e fator de Lang igual à 3,4. A Figura 23 apresenta o gráfico plotado de acordo com o *software Hint*.

Figura 23 - Gráfico Custos x ΔT_{\min} sem o trocador de calor (E-3)



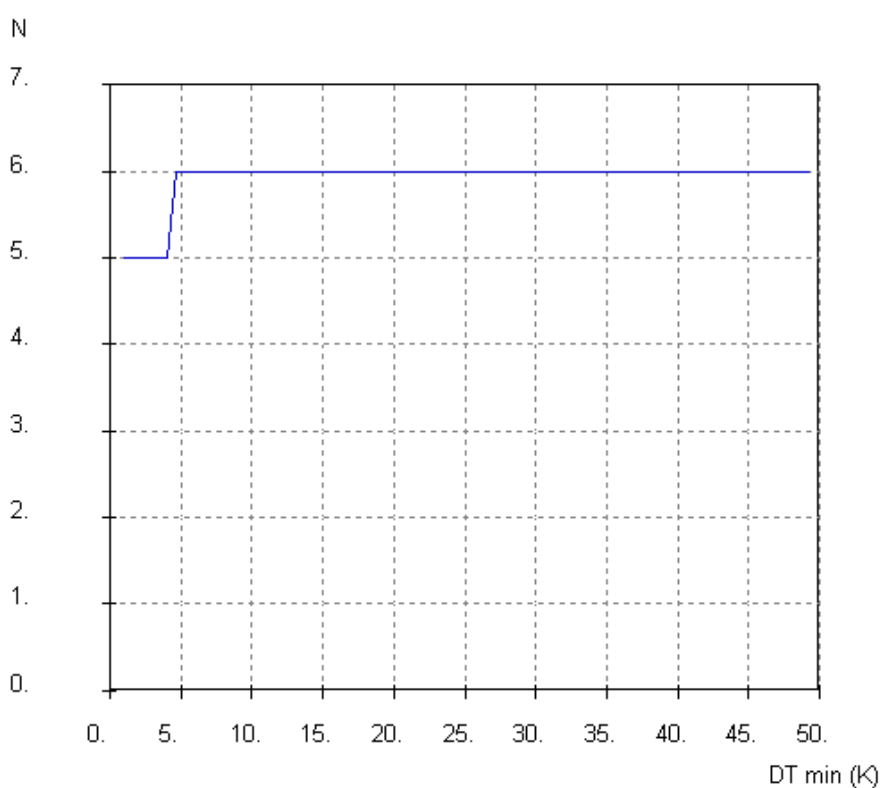
Fonte: Autoria própria (2022)

Para a determinação do ΔT_{otm} utilizou-se da mesma ferramenta do *software Microsoft Excel*. Exportando os dados do gráfico e calculando o mínimo, obteve-se um valor de diferença mínima de temperatura ótima igual à 5 °C, porém nota-se que existe uma variação pequena no custo total que não influencia tanto no intervalo de 5 °C a 10 °C. Entretanto, por mais que o ΔT_{otm} seja de 5 °C, as mesmas observações valem para esse cenário da integração. Com um valor baixo do ΔT_{otm} , o processo poderá ser comprometido com a não idealidade que o *software* desconsidera.

4.3.4 Número mínimo de trocadores de calor

Outro parâmetro importante para realizar a viabilidade econômica do projeto é o número mínimo de trocadores de calor. Foi gerado para cada análise, com e sem o trocador de calor (E-3), o gráfico de número mínimo em função do ΔT_{\min} , como apresentado na Figura 24 considerando primeiramente o trocador de calor (E-3).

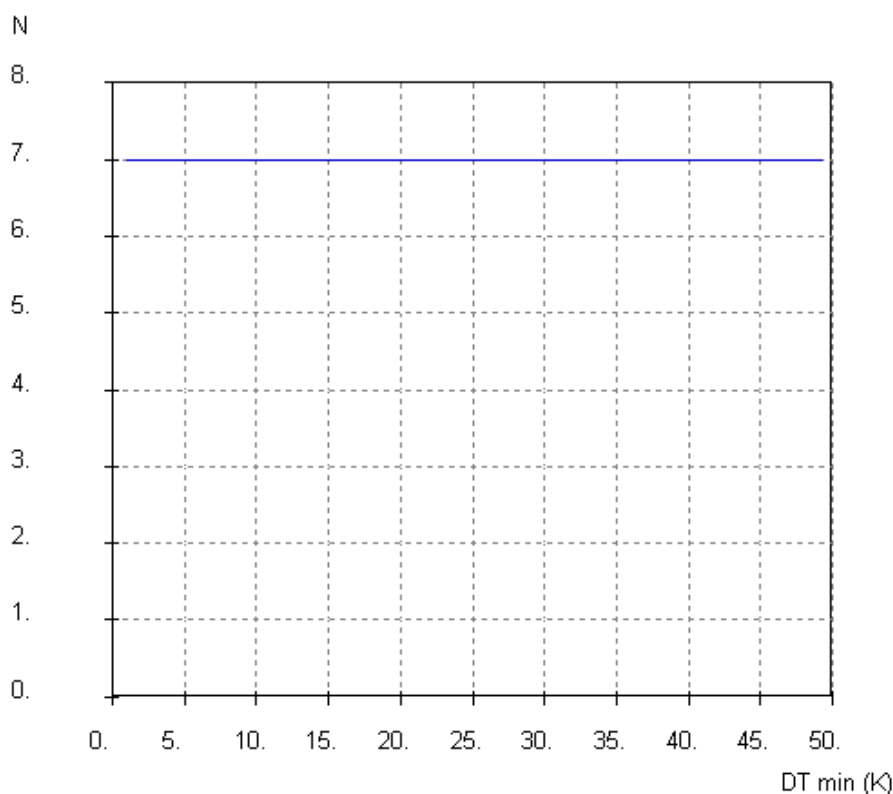
Figura 24 - Gráfico Número mínimo de trocadores x ΔT_{\min} com o trocador de calor (E-3)



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se observar que o número mínimo de trocadores de calor indica um valor de 5, porém para este primeiro caso, como discutido na seção 4.3.3.1 quando se tem um ΔT_{\min} menor que 9, as trocas térmicas envolvendo os trocadores (E-1) e (E-3) acabam violando a segunda lei da termodinâmica. Desta forma, com um ΔT_{\min} de 9 °C o número mínimo de trocadores de calor permanece constante até 50 °C.

No segundo caso, onde o trocador de calor (E-3) é desconsiderado, obteve-se um gráfico com o comportamento apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Gráfico Número mínimo de trocadores x ΔT_{\min} sem o trocador de calor (E-3)

Fonte: Autoria própria (2022)

Em uma faixa de 1 °C a 50 °C o número mínimo se apresentou como constante em 7 trocadores de calor, ou seja, não interferindo na escolha do ΔT_{otm} .

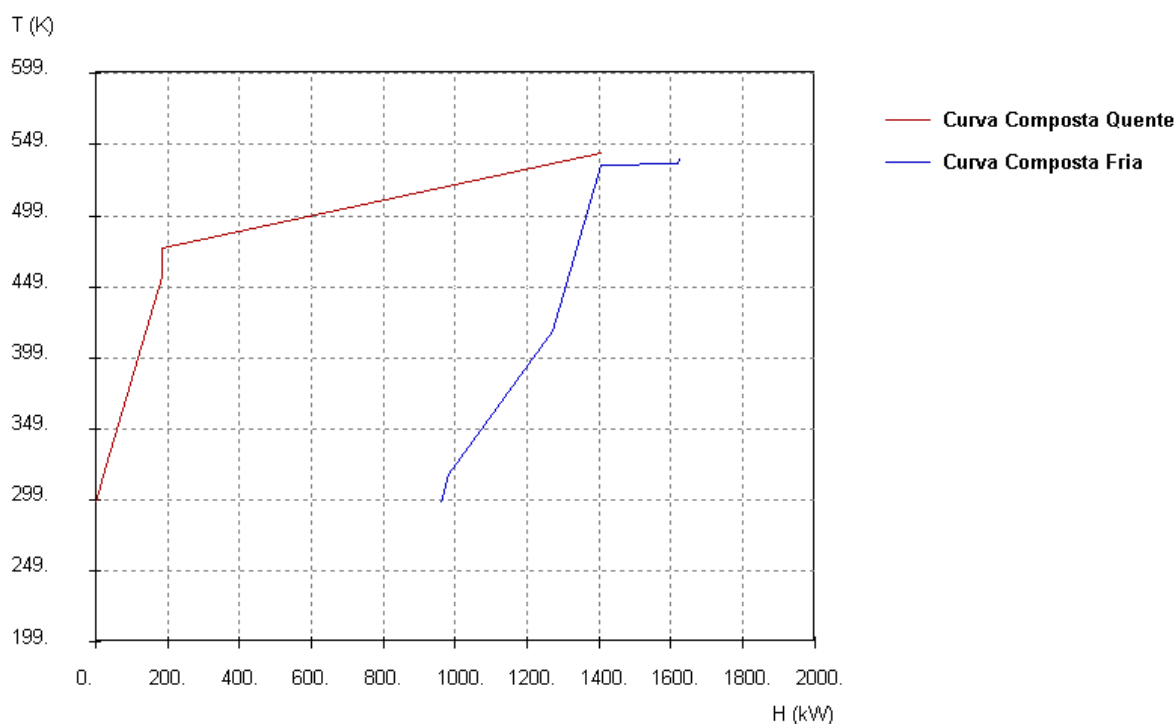
Os dois gráficos plotados pelo próprio *software* foram obtidos clicando-se na aba “Diagram” presente no menu superior, em seguida clicando-se em “DT min analysis” e por fim em “Minimum Number of Heat Exchangers”. Na geração dos gráficos considerou o intervalo de 1 °C a 50 °C e 80 números de pontos para plotagem.

Desta forma, os gráficos confirmam que a rede de trocadores de calor está construída de acordo com o mínimo de trocadores possíveis para obter uma melhor redução com utilidades quentes e frias e claro, obter um menor investimento para implementação da nova rede.

4.3.5 Curvas compostas

Com a determinação do ΔT_{otm} para cada um dos casos analisados, primeiramente é possível realizar uma análise gráfica do comportamento da temperatura em função da entalpia da curva composta, como ilustrado na Figura 26 gerada pelo próprio *Hint*. O gráfico foi gerado clicando na barra superior em “*Diagram*” e depois em “*Composite Curves*”. Ressaltando que o gráfico gerado é referente a análise da integração considerando a corrente 6-7 que passa pelo trocador de calor (E-3).

Figura 26 - Curvas compostas com a corrente 6-7

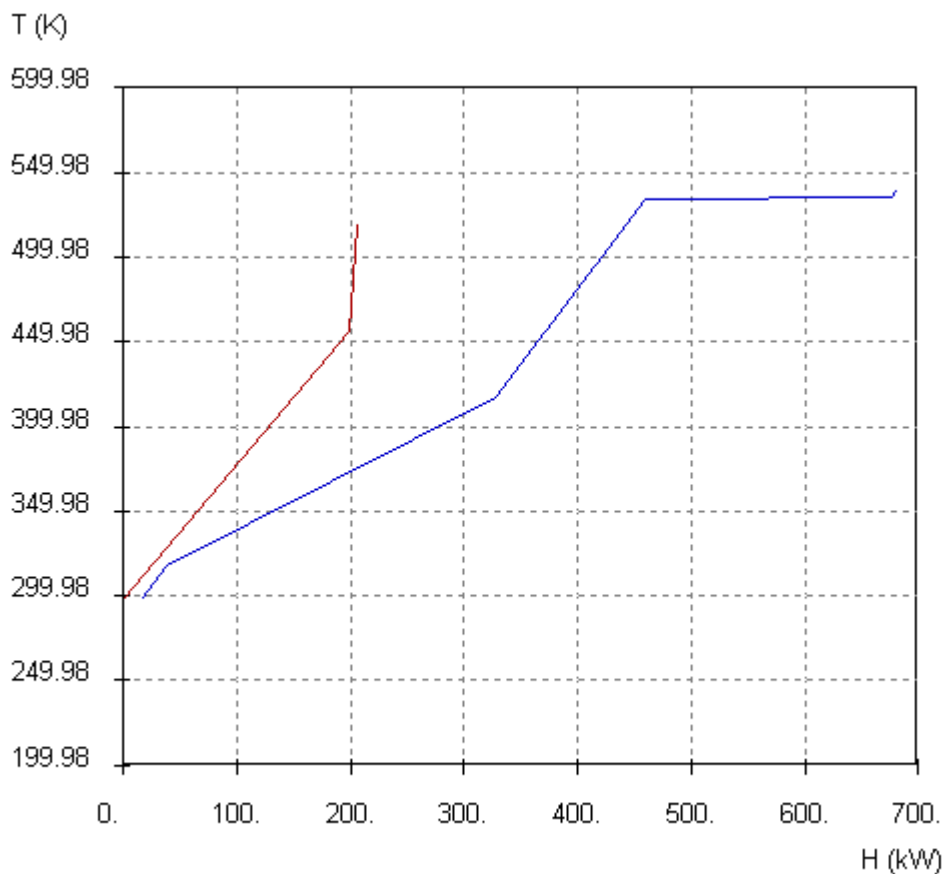


Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando o gráfico, fica claro que, com essas correntes inseridas, a integração energética terá uma economia com utilidades quentes e frias, mas a economia mais significativa será com utilidade quente, se comparado com a utilidade fria. Justifica-se por grande parte da corrente fria estar sotoposta à corrente quente, necessitando de pouca utilidade quente para aquecer a área não sobreposta, entretanto, necessitando de muita utilidade fria para resfriar a corrente quente não sobreposta.

Já a análise considerando a ausência da corrente 6-7 do processo. Gerou-se o gráfico das curvas compostas que está apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Curvas compostas sem a corrente 6-7



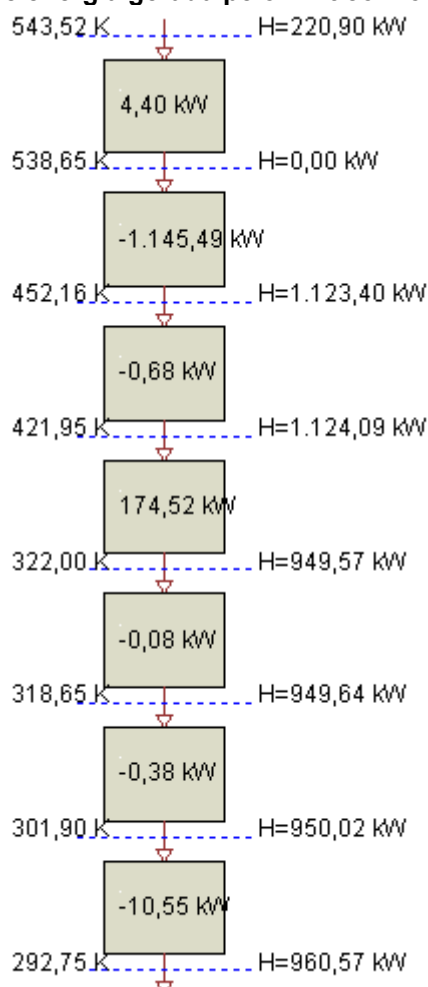
Fonte: Autoria própria (2022)

Com a ausência da corrente 6-7 do trocador de calor (E-3), percebe-se que a integração energética envolvida muda completamente se comparado com a análise considerando a corrente 6-7. Desta forma, o processo tem uma economia mais significativa com utilidade fria se comparado com a utilidade quente, pois a área de troca térmica quase elimina toda a corrente quente, restando uma pequena área não sobreposta, enquanto a corrente fria necessita de utilidade quente para aquecer e chegar nas especificações do processo.

4.3.6 Cascata de calor

Como dito anteriormente, a análise gráfica das curvas compostas é pouco precisa, por isso a metodologia *pinch*, por meio da cascata de calor, quantifica a energia que será gasta com utilidades fria e quente. Sendo assim, o *software Hint* informa que será gasto 220,899 kW e 960,567 kW com utilidade quente e fria, respectivamente. Ressaltando que esses valores são referentes à integração energética considerando a corrente 6-7 do trocador de calor (E-3) e utilizando o ΔT_{otm} de 9 °C. A informação referente as utilidades quente e fria, ficam na parte esquerda superior do layout do *software* selecionando o modo “Cascade”, a Figura 28 apresenta a cascata de energia calculada pelo *software*.

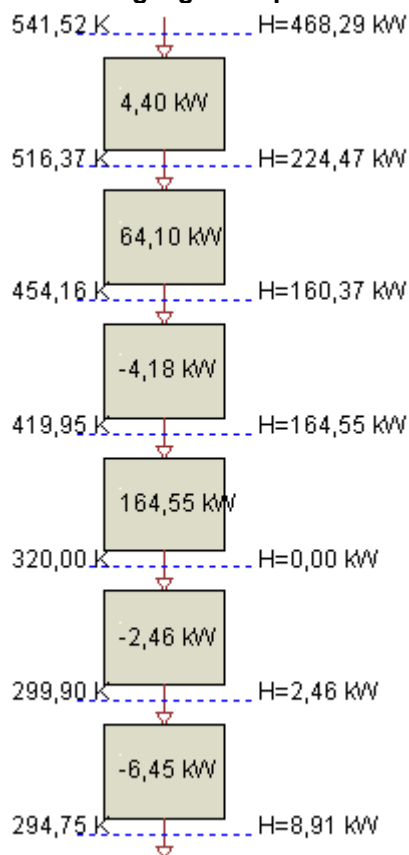
Figura 28 - Cascata de energia gerada pelo *Hint* com o trocador (E-3)



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a integração energética desconsiderando a corrente 6-7 e utilizando o ΔT_{otm} de 5 °C, o *software* informou que será gasto 468,29 kW com utilidade quente e 8,91 kW com utilidade fria, como demonstrado na Figura 29.

Figura 29 - Cascata de energia gerada pelo *Hint* sem o trocador (E-3)



Fonte: Autoria própria (2022)

É importante lembrar que, a cascata de energia informa também o ponto *pinch* em cada integração realizada. No primeiro caso, com a corrente 6-7, o ponto *pinch* ocorre em 538,65 K. Já no segundo caso, em 320,00 K, na ausência do trocador (E-3).

4.4 Viabilidade econômica

A avaliação econômica foi feita com base nos dados de operação do trabalho de Júnior *et al* (2016), considerando que o processo opera durante 7500 horas por ano.

4.4.1 Trocadores de calor

Outra informação importante foi a possibilidade de utilizar os trocadores de calor já presentes no processo na nova rede de trocadores de calor. No primeiro cenário, onde considerou-se o trocador (E-3), conseguiu-se o aproveitamento de 4 trocadores de calor presentes do processo inicial. A Tabela 5 apresenta a relação dos trocadores de calor e intercambiadores com suas respectivas áreas.

Tabela 5 - Aproveitamento dos trocadores de calor do primeiro cenário

Trocadores de calor antes da integração	Área (m²)	Intercambiadores depois da integração	Área (m²)
E-1	4,41	C5	3,67
E-3	17,00	C6	13,67
E-4	1,50	3	1,27
E-9	12,40	1	10,34

Fonte: Autoria própria (2022)

Os intercambiadores 2 e H4 com áreas de 2,54 m² e 9,48 m², respectivamente, deverão ser comprados para que esta integração seja aplicada.

No segundo caso, tem-se um aproveitamento de 4 trocadores de 7 presentes na integração. Apenas os intercambiadores 1, 3 e C6 de áreas 31,04 m², 17,62 m² e 0,18 m², respectivamente, deverão ser adquiridos no investimento deste segundo cenário. A Tabela 6 apresenta dos trocadores de calor originais da planta que serão aproveitados com suas respectivas áreas assim como os intercambiadores necessários para a aplicação desta rede de trocadores de calor.

Tabela 6 - Aproveitamento dos trocadores de calor do segundo cenário

Trocadores de calor antes da integração	Área (m ²)	Intercambiadores depois da integração	Área (m ²)
E-1	4,41	2	1,54
E-4	1,50	C7	0,74
E-9	12,40	H4	6,36
E-10	1,1	H5	0,20

Fonte: Autoria própria (2022)

O somatório energético de todos os trocadores presentes na planta original, contabilizando também os trocadores de calor que não estão presentes na análise *pinch*, juntamente com cada cenário estudado é apresentado na Tabela 7 em comparação com o processo sem a integração.

Tabela 7 - Comparação da redução energética de cada caso estudado

Rede de trocadores de calor	Energia referente a utilidade fria (kW)	Energia referente a utilidade quente (kW)	Energia total (kW)
Sem integração	2060,84	1294,43	3355,27
Análise com E-3	1616,51	850,09	2466,60
Análise sem E-3	1863,90	1097,48	2961,38

Fonte: Autoria própria (2022)

Para o segundo cenário, onde desconsiderou-se as correntes 6-7 do trocador de calor (E-3), obteve-se uma redução de 11,74%. Dessa forma, devido ao primeiro cenário ser mais favorável para a integração energética, com redução de 26,5% do gasto energético preferiu-se realizar a análise econômica deste caso.

Para a primeira análise de integração energética, deve-se investir nos trocadores de calor 2 e H4, com áreas de 2,54 m² e 9,48 m², respectivamente. Este custo foi estimado de acordo com a correlação presente no trabalho de Ferreira (2020), a qual é demonstrada na Equação 10.

$$C = 1650 + 2171A \quad (10)$$

Onde essa correlação é utilizada para trocadores de calor com áreas menores que 10 m². Desta forma estima-se um custo de capital para os trocadores 2 e H4 de US\$ 7.161,34 e US\$ 22.231,08.

4.4.2 Análise Econômica

Partindo-se do princípio de que a planta já está instalada e funcionando, estima-se o custo com utilidade quente, utilidade fria e custo total do processo antes e depois da integração energética. A Tabela 8 apresenta os dados referentes à operação de 7500 horas por ano.

Tabela 8 - Comparação econômica do processo sem e com integração energética

Rede de Trocadores de Calor	Custo com utilidade fria (US\$/ano)	Custo com utilidade quente (US\$/ano)	Custo total (US\$/ano)
Sem integração	19697,49	618607,60	638305,09
Com integração	15450,59	406257,68	421708,27

Fonte: Autoria própria (2022)

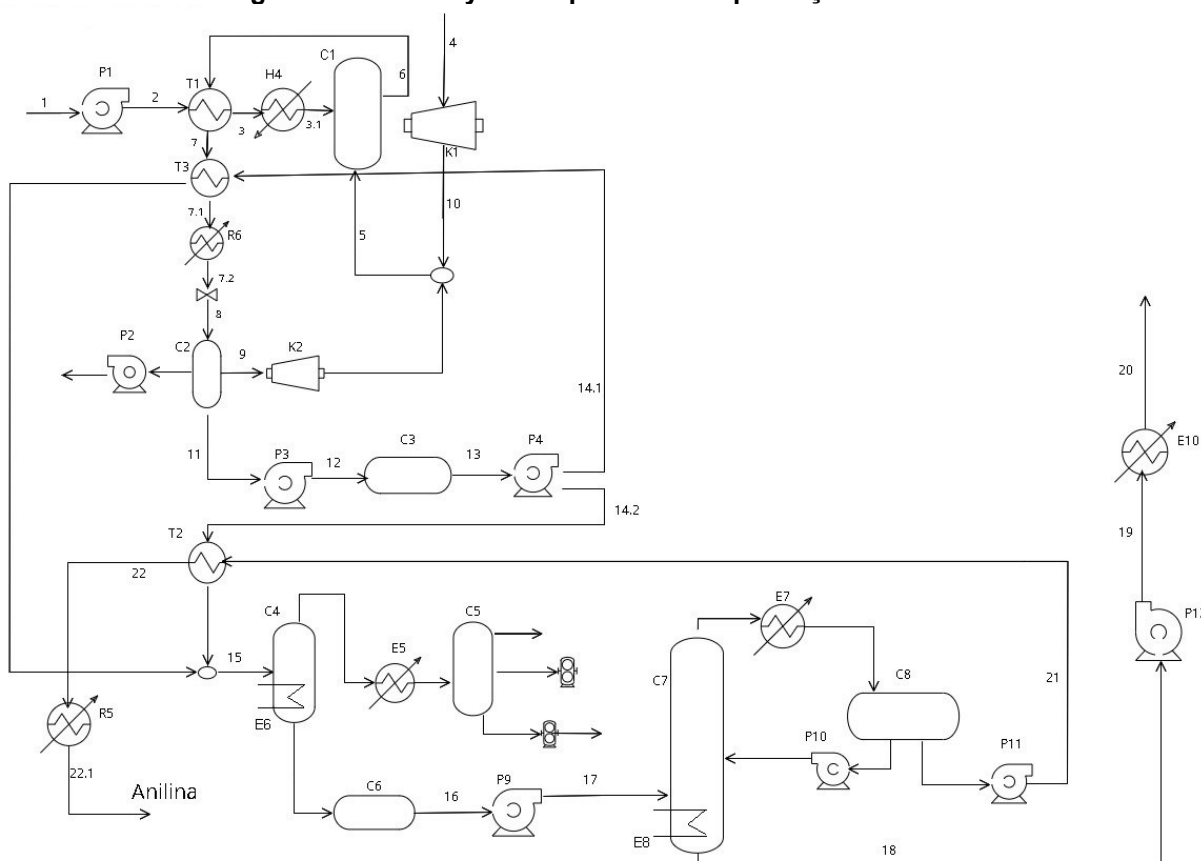
Nota-se que com a integração energética implementada no processo, obteve-se uma economia de 21,6 % com utilidade fria, 34,3% com utilidade quente e aproximadamente 34% com custo total de utilidades quentes e frias no processo em geral.

Para a nova rede de trocadores de calor ser implementada, necessita do investimento de 2 novos trocadores de calor, que no total daria um investimento de US\$ 29.392,42, sendo este valor pago já no primeiro ano de operação, devido ao aproveitamento dos trocadores de calor já presentes no processo atual. Desta forma, demonstra-se como a técnica de integração energética pode ser explorada para o processo e obter economia de gastos com utilidades, vapor ou água, além de ajudar o meio ambiente na redução de emissão de gases e redução do uso da água.

4.4.3 Novo *layout* do processo de produção

O novo fluxograma para o processo de produção da anilina é apresentado na Figura 30.

Figura 30 - Novo layout do processo de produção da anilina



Fonte: Autoria própria (2022)

Onde os intercambiadores 1, 2 e 3 como apresentados no diagrama de grades, estão representados pelos trocadores de calor T1, T2 e T3, respectivamente. Sendo os trocadores H4 e T2 os novos trocadores para instalar neste fluxograma.

O processo inicia-se com o bombeamento da corrente 1-2 para o intercambiador T1, que troca calor com a corrente 6-7 que sai da coluna C1, porém necessita de um aquecedor para entrar na coluna com a temperatura especificada. A corrente 7 troca calor com parte da corrente 14 e é resfriada pelo R6 para entrar com a temperatura correta na coluna C2 após a passagem pela válvula.

Como considerado no *software Hint*, a divisão da corrente 14 está em proporção de 50% de fluxo para cada uma das duas correntes geradas pela divisão, 14.1 e 14.2, considerando que as duas correntes sigam as mesmas composições, que é majoritariamente anilina com 93,48% em massa e o restante de água. A corrente 14.1 segue para realizar a troca térmica com 7 no intercambiador T3. Já a corrente 14.2 troca calor com a corrente 21 do produto, anilina, que sai da coluna

C8. Para a corrente 22 do produto, após a troca térmica com 14.2, necessita de um resfriador R5 para atingir a temperatura especificada do processo. Já a corrente 20, segue para o tratamento com o objetivo de recuperar a anilina residual e obter um maior rendimento.

No fluxograma estão representados também os condensadores parciais (E-5) e (E-7), assim como os evaporadores parciais (E-6) e (E-8) presentes nas colunas C4 e C8, respectivamente, que não foram considerados na análise *pinch*.

5 CONCLUSÃO

A integração energética provou-se mais uma vez, com a utilização da metodologia *pinch* por meio do *software Hint*, ser uma ferramenta fundamental para problemas como a emissão de gases poluentes e utilização de água, visto que órgãos ambientais estão impondo medidas cada vez mais restritivas e incentivando as indústrias a buscarem meios para reduzir a poluição em geral.

O presente trabalho demonstrou que mesmo com um ΔT_{otm} de 5 °C para o segundo cenário, considerando muita idealidade, o primeiro cenário ainda foi mais efetivo na redução de energia e com um ΔT_{otm} de 9 °C que não foge da idealidade, podendo ser aplicado no processo de produção da anilina, por meio da hidrogenação do nitrobenzeno. Sendo que, essa redução alcançada no primeiro cenário é mais do que o dobro da redução do segundo caso, ocasionando em uma economia de US\$ 216.596,86 ao ano de diferença entre o processo sem integração e o processo integrado energeticamente.

Outro ponto relevante, foi a possibilidade de utilizar os trocadores de calor já presentes no processo original, necessitando da compra de apenas 2 novos trocadores para instalar a nova rede, o que fez com que o investimento para aplicar esta integração energética fosse reduzido significativamente.

Destaca-se a importância do *software Hint* que, mesmo sendo um *software* livre, dispõe de todas as ferramentas necessárias para o estudo da integração energética, necessitando da compreensão e conhecimento por parte do usuário. O mesmo destaque aplica-se para o *software* COCO, que foi utilizado neste trabalho. Tanto o *software Hint* como o *software* COCO demonstram a importância de *software* para o uso na engenharia química e demais engenharias, sendo necessários e fundamentais para facilitar o trabalho. Entretanto, os conceitos devem ser conhecidos pelo engenheiro para evitar interpretações equivocadas.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, T. P. **Integração energética de unidades de destilação e coqueamento: Estudo de *Retrofit* e de aspectos de processo.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 98 p. Rio de Janeiro, 2013.
- BATISTA, K. A.; OLIVEIRA, C. M. **Análise energética de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar.** Revista Cogitare, v. 3, n. 1, p. 68-84. Matão. 2020.
- CALESTINI, E. D. N. **A questão dos créditos de carbono e sua viabilidade econômica ambiental.** Dissertação (Mestrado em Geografia Física). Universidade de São Paulo. 195 p. São Paulo, 2012.
- CARDOSO, R. **Integração energética da etapa de separação do solvente do processo de extração de óleo de soja.** 1999. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 1999.
- ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** Editora McGraw Hill. 4 ed. 902 p. 2012.
- DEVEQUE, R. **Aplicação da metodologia *pinch* de integração energética em um processo de síntese da amônia.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 44 p. Francisco Beltrão, 2019.
- FERNANDES, C. C. J. **Integração Energética da Etapa de Extração de Óleo de Soja, Utilizando a Análise Pinch.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste Do Paraná. Toledo – PR. 2009.
- FERREIRA, J. S. **Aplicação da Análise Pinch no Estudo da Integração Energética do Processo de Produção de Formol Utilizando o Software Hint.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 98 p. Francisco Beltrão, 2020.
- FOREZI, L. S. M. **Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos.** Revista Virtual de Química, v. 3, n. 6, p. 496-503. Niterói. 2011.
- HUGENTHOBLE, M. W. **Integração energética de uma planta petroquímica de Aromáticos através da técnica de Sítio Total.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 102 p. Porto Alegre, 2020.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** Editora LTC. 6 ed. 643 p. 2008.
- JÚNIOR, F. A. N.; ARAÚJO, G. G.; SILVA, J. T., CARVALHO, K. M.; SUZUKI, L. L. **Planta de Produção de Anilina.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade de Brasília. 183 p. Brasília, 2016.

KEMP, I. C. **Pinch analysis and process integration: A user guide on process integration for the eficiente use of energy**. Editora Butterworth-Heinemann. 2 ed. 396p. 2007.

KWONG, W. H. **Integração energética: Redes de trocadores de calor**. São Carlos: EdFUSCar, 2013.

MÓDENES, A. N.; JUNIOR, C. C. F.; BAZARIN, G.; ESPINOZA-QUINÕES, F. R.; BORBA, C. E. **Integração energética da etapa de extração de óleo de soja utilizando análise pinch**. Revista Engevista, v. 13, n. 2, p. 91-101. Toledo. 2011.

NAVARINI, C. **Integração energética e análise de viabilidade econômica em uma planta de dimetil éter**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 62 p. Francisco Beltrão, 2019.

OLIVEIRA, F. M. M. **Estudo de caso da integração energética em uma planta industrial de hidrodealquilação (HDA) do tolueno**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal do Pampa. 56 p. Bagé, 2021.

PRADO, A. D. **Integração energética da rede de trocadores de calor em uma planta química de produção de ácido sulfúrico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 54 p. Francisco Beltrão, 2019.

SANTANA, M. F. **Síntese automática de redes de trocadores de calor a partir de análise *Pinch* e programação matemática**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas. 107 p. Campinas, 2012.

SILVA, A. P. **Projeto ótimo de redes de trocadores de calor utilizando técnicas não determinísticas**. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 122 p. Rio de Janeiro, 2009.

SMITH, R. **Chemical process design and integration**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

TONIAL, G. M. B. **Integração energética em uma rede de trocadores de calor de uma planta de produção de acetona**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 82 p. Francisco Beltrão, 2018.