



FABIANA ANDRADE BORGES

**INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA EM USINA DE
BENEFICIAMENTO DE LEITE**

**LAVRAS – MG
2021**

FABIANA ANDRADE BORGES

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA EM USINA DE BENEFICIAMENTO DE LEITE

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof (a). Dr (a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél
Orientadora

**LAVRAS – MG
2021**

FABIANA ANDRADE BORGES

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA EM USINA DE BENEFICIAMENTO DE LEITE

Monografia apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do Curso
de Engenharia Química, para a
obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 18 de maio de 2021

Prof. Dr. João Moreira Neto UFLA

Prof. Dr. Gilson Campani Junior UFLA

Prof (a). Dr (a). Lidja Dahiane Menezes Santos Borél

Orientadora

LAVRAS – MG

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e força dada todos os dias ao longo da caminhada.

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo.

À minha irmã Isabella, por acreditar nos meus passos e estar sempre ao meu lado.

À minha orientadora professora Lidja Dahiane, por toda colaboração, paciência e disponibilidade.

Aos amigos, por terem feito a jornada mais leve, entendível e feliz.

A todos que de alguma forma participaram e contribuíram com a minha formação profissional e pessoal ao longo desses anos.

RESUMO

O Brasil é hoje o quinto maior produtor mundial de lácteos. Considerando que a produção mundial de leite cresceu mais de 59% desde 1988 (530 milhões de toneladas) a 2018 (843 milhões de toneladas), a indústria de laticínios desempenha assim um papel importante para a economia nacional. Como parte do setor de alimentos e bebidas, que está entre os segmentos industriais que demandam a maior parcela da energia elétrica produzida no país, a indústria de laticínios tem se preocupado com a gestão da energia em sua cadeia. A integração de processos é uma ferramenta para reduzir o uso da energia e matérias-primas e projetar processos mais econômicos e sustentáveis. A abordagem mais utilizada para a integração é a análise *Pinch*, que permite identificar possibilidades de recuperação de calor entre as correntes do processo e definir a melhor maneira de se minimizar a demanda por utilidades como vapor e água de resfriamento. Assim para contribuir com o aumento da eficiência energética no setor de laticínios, o objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia *Pinch* para promover integração energética em um processo industrial, utilizando dados de uma usina de beneficiamento de leite situada no interior do estado de São Paulo. Seguiram-se os procedimentos da metodologia *Pinch* desde a extração de dados do fluxograma de processo e análise da energia disponível para recuperação, passando pela determinação das metas de consumo mínimo de utilidades, usando o Método Algébrico de Intervalo de Temperaturas, para posteriormente projetar a rede de troca térmica usando regras heurísticas disponíveis na literatura para o pareamento de correntes. Em seguida, fez-se uma avaliação dos aspectos econômicos para este estudo de caso. Investigou-se assim o efeito do valor de ΔT_{\min} , sobre o custo total da rede obtida, para isso, a metodologia foi aplicada a valores de ΔT_{\min} , iguais a 1, 5 e 10 °C. Com a integração, foi possível alcançar uma redução de 63,52% no custo total das utilidades da rede com $\Delta T_{\min} = 1$ °C. A redução do parâmetro ΔT_{\min} , no entanto, conduziu a uma rede com maior custo de capital, sendo que para $\Delta T_{\min} = 1$ °C o custo foi 393,52% superior ao custo da rede projetada para $\Delta T_{\min} = 10$ °C. Deste modo concluiu-se que a construção de uma rede integrada para este processo usando o parâmetro $\Delta T_{\min} = 10$ °C é a melhor alternativa na faixa investigada e acarretaria uma economia estimada de US\$5,7 bilhões em 10 anos de operação. Verificou-se portanto a importância da integração energética como uma ferramenta para redução dos custos produtivos, pelo aproveitamento máximo da energia do processo, reduzindo conseqüentemente o consumo de fontes externas em uma operação mais ecoeficiente.

Palavras-chave: Análise *Pinch*, Rede de Trocadores de Calor, utilidades.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de envase do leite UHT.	14
Figura 2 - Matriz energética do Brasil em 2019.	16
Figura 3 - Distribuição das fontes de energia consumidas pela indústria em 2019.	16
Figura 4 - Representação esquemática de uma Curva Composta.	20
Figura 5 – Representação esquemática de uma RTC.	22
Figura 6 - Fluxograma simplificado do processo de produção de leite UHT.	25
Figura 7 - Correntes e intervalos de temperatura com $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	26
Figura 8 - (a) Cascata térmica 1. (b) Cascata térmica 2.	28
Figura 9 - Curvas Compostas ($\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$).	29
Figura 10 - Grande Curva Composta ($\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$).	30
Figura 11 - RTC para $\Delta T_{\min} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	31
Figura 12 - RTC para $\Delta T_{\min} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$	32
Figura 13 - RTC para $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	32
Figura 14 – Relação entre os custos de utilidades, capital e total.	37
Figura 15 - Fluxograma da rede integrada.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso de energia da indústria de laticínios.....	14
Tabela 2 - Resumo dos critérios de pareamento.....	23
Tabela 3 - Aplicações da integração energética.	23
Tabela 4 - Correntes de processo.....	25
Tabela 5 - Cargas térmicas por intervalo.....	27
Tabela 6 - Metas de desempenho para os diferentes valores de ΔT_{min}	28
Tabela 7 - Propriedades das utilidades.	30
Tabela 8 - Custos com utilidades por rede.	35
Tabela 9 - Custo de capital das RTC's.....	36
Tabela 10 - Custo das redes em 10 anos de operação.	36

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área de troca térmica	m ²
BEN	Balanço Energético Nacional	-
c _p	Calor específico	J/Kg. K
CP	Capacidade térmica	KW/ °C
ṁc _{p,f}	Capacidade térmica correntes frias	KW/ °C
ṁc _{p,q}	Capacidade térmica correntes quentes	KW/ °C
U	Coefficiente global de troca térmica	kW/m ² °C
Bi	Constantes para o tipo de trocador de calor	-
C _{cap}	Custo de capital	\$/a
C _{BM}	Custo de capital corrigido	\$/a
C _{util}	Custo de utilidades	\$/a
C _T	Custo total	\$/a
CIP	<i>Clean in place</i>	-
ρ _{agua}	Densidade específica da água	kg/m ³
ΔT _{min}	Diferença mínima de temperatura	°C
Q _{rec}	Energia recuperada	KW
λ	Entalpia específica	KJ/kg
f ₀	Fator anual de operação da planta	h/a
F	Fator de correção para escoamento contracorrente	-
F _M	Fator de correção para o tipo de material	-
GCC	Grande Curva Composta	-
IE	Integração Energética	-
MPEE	Método do Ponto de Estrangulamento Energético	-
N _F	Número de correntes frias	-
N _Q	Número de correntes quentes	-
p _i	Preço unitário do item i	\$/kg
PL	Programação linear	-
MILP	Programação linear inteira mista	-
RTC	Rede de Trocadores de Calor	-
q _i	Taxa de consumo por hora do item i	kg/h
Q	Taxa de transferência de calor	KW

T_f	Temperatura final	°C
$T_{f,pinch}$	Temperatura fria do <i>Pinch</i>	°C
T_i	Temperatura inicial	°C
ΔT_{lm}	Temperatura média logarítmica	°C
$T_{q,pinch}$	Temperatura quente do <i>Pinch</i>	°C
UHT	<i>Ultra high temperature</i>	-
$Q_{f,min}$	Valor mínimo de utilidade fria	KW
$Q_{q,min}$	Valor mínimo de utilidade quente	KW
ΔH	Varição de entalpia	KW
ΔT	Varição de temperatura	°C
\dot{m}	Vazão mássica	kg/h

SUMÁRIO

RESUMO	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	8
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 A indústria de laticínios.....	13
2.2 Integração Energética	15
2.3 Aplicação da metodologia <i>Pinch</i>	18
2.3.1 Método do Intervalo de temperatura.....	19
2.3.2 Método das Curvas compostas	20
2.4 Síntese da Rede de Trocadores de Calor	21
2.5 Casos de aplicação de Integração Energética	23
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1 Descrição do processo	24
3.2 Determinação das metas de desempenho	26
3.3 Seleção de Utilidades.....	28
3.4 Projeto da Rede de Trocadores	31
3.5 Estimativa dos custos de rede.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
APÊNDICE A	42

1. INTRODUÇÃO

A competitividade gerada pela atuação das empresas em um mercado globalizado exige contínuo aumento da eficiência dos processos produtivos. Com a variação do preço dos combustíveis, as empresas buscam uma produção que aproveite todos os recursos possíveis, sem desperdícios ou gastos extras. Ao mesmo tempo a escassez dos recursos não renováveis e as mudanças climáticas advindas da industrialização são questões prementes que implicam o aumento do rigor das normas ambientais e da necessidade de uma operação ecoeficiente. Isto tem motivado a preferência dos consumidores por produtos que causam um menor impacto ambiental.

A integração energética de processos é empregada nas indústrias com estes objetivos: diminuir os seus custos produtivos, reduzir a demanda de energia e, assim agregar valor ao produto (TURTON et al., 2018). Por integração de processos entende-se todas as melhorias feitas nos sistemas, suas interações e operações com o objetivo de melhorar e/ou maximizar a eficácia no uso de energia, água e matérias-primas (CANADA, 2003).

A indústria de laticínios tem extrema importância no mercado brasileiro, atingindo um faturamento líquido de R\$ 70,2 bilhões no ano de 2017 (ABIA, 2018) e através da geração de diversos empregos. Neste segmento estima-se que cerca de 80% do consumo total de energia seja térmica proveniente da combustão de combustível fóssil e os 20% restantes, energia elétrica, estando o consumo amplamente relacionado à garantia da qualidade dos produtos (CETESB, 2008).

As emissões atmosféricas advindas das unidades de industrialização do leite tem origem principalmente das caldeiras, onde há queima de combustíveis, como lenha e óleo, para a geração de vapor. A queima resulta na emissão de materiais particulados, óxidos de enxofre e nitrogênio, além do monóxido de carbono (FIEMG, 2015). Quanto mais integrados os processos da indústria estiverem, menores serão seus gastos e menor o seu impacto ambiental.

A abordagem mais utilizada para os processos de integração é a metodologia *Pinch*, que permite investigar fluxos de energia dentro do processo e identificar as melhores maneiras de se minimizar a demanda por produtos externos como vapor e água de resfriamento por exemplo, ao se maximizar a recuperação de calor entre as correntes do processo. O ponto de partida da análise *Pinch* é a determinação das metas de desempenho energético. Em seguida, avalia-se a combinação entre as correntes energéticas através de regras heurísticas para projetar uma Rede de Trocadores de Calor (RTC) viável.

Em vista dos benefícios da integração de processos, o objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia *Pinch* para promover a integração energética em um processo industrial,

utilizando dados obtidos de uma usina de beneficiamento de leite situada no interior do estado de São Paulo. Para isso, teve-se como objetivos específicos:

- i. Extrair os dados de fluxo do fluxograma do processo e avaliar a energia disponível para recuperação;
- ii. Empregar o método do intervalo de temperatura para determinar a meta de consumo mínimo de utilidades;
- iii. Projetar a rede de troca térmica usando as regras heurísticas de pareamento de correntes;
- iv. Avaliar os aspectos econômicos para o estudo de caso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A indústria de laticínios

A indústria de laticínios tem expressiva importância para o mercado nacional. Em 2018, o Brasil produziu 34 bilhões litros de leite, cerca de 7% do total produzido no mundo (EMBRAPA, 2019). Deste modo, a produção leiteira foi responsável por 5,9% do valor bruto da produção agropecuária do país (MAPA, 2015). Em 2017, as empresas de laticínios tiveram faturamento líquido de R\$ 70,2 bilhões, o que representou o segundo maior faturamento da indústria de alimentos no Brasil, ficando atrás apenas do setor de derivados da carne (ABIA, 2018).

Assim a pecuária leiteira, predominantemente constituída de pequenos e médios produtores, é um segmento estratégico para a economia nacional por ser grande geradora de renda, tributos e empregos (BRUNOZI JÚNIOR et al., 2012). Segundo o Censo Agropecuário 2017, havia no Brasil 1,17 milhão de produtores de leite (MDIC, 2018). Para processar o leite, no ano de 2013 existiam no Brasil 6.381 indústrias de laticínios, responsáveis pelo estabelecimento de mais de 100 mil empregos formais (MTE, 2015).

O processo do leite dentro da indústria começa com a recepção do leite “*in natura*” que é transportado por caminhões-tanque isotérmicos, amostras são coletadas para a realização de análises de controle de qualidade. Posteriormente o leite é filtrado e despejado nos silos de recepção de onde segue para as etapas de pasteurização e padronização, ultrapasteurização e envase, conforme ilustra a Figura 1.



Fonte: FIEMG (2015).

Na indústria de laticínios, a utilização da energia está principalmente associada à garantia da qualidade dos produtos, principalmente quando se trata do tratamento térmico, refrigeração e armazenamento. As aplicações mais frequentes de energia no setor de lácteos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Uso de energia da indústria de laticínios.

Tipo de energia	Uso mais frequente	Equipamento
Térmica	Geração de vapor e água quente, limpeza.	Pasteurizadores/esterilizadores, sistemas de limpeza CIP.
Elétrica	Refrigeração, iluminação, ventilação, operação de equipamentos.	Equipamentos elétricos (bombas, misturadores etc.), rede elétrica, ventilação, geração de ar comprimido

Fonte: adaptado de CETESB (2008).

Estima-se que cerca de 80% do consumo total de energia seja térmica proveniente da combustão de combustível fóssil e os 20% restantes, energia elétrica. O consumo energético está também ligado a outros fatores como a idade da instalação, seu grau de automação, as tecnologias usadas, operações de limpeza, medidas adotadas para economia bem como o tipo de produto preparado (CETESB, 2008). Para a maioria das instalações, o consumo total de energia varia entre 0,05 e 0,21 kWh/litro de leite processado (ABIQ, 2007).

As utilidades são insumos essenciais nas indústrias. Os níveis de produtividade e qualidade estão relacionados ao uso de água, vapor, ar comprimido, gases especiais, energia elétrica, entre outros. No ramo alimentício, o cuidado com as utilidades aumenta, visto que se necessita da garantia do fornecimento em qualidade, volume e parâmetros conformes, a fim de assegurar o grau de limpeza adequado e evitar contaminações (SILVA, 2014).

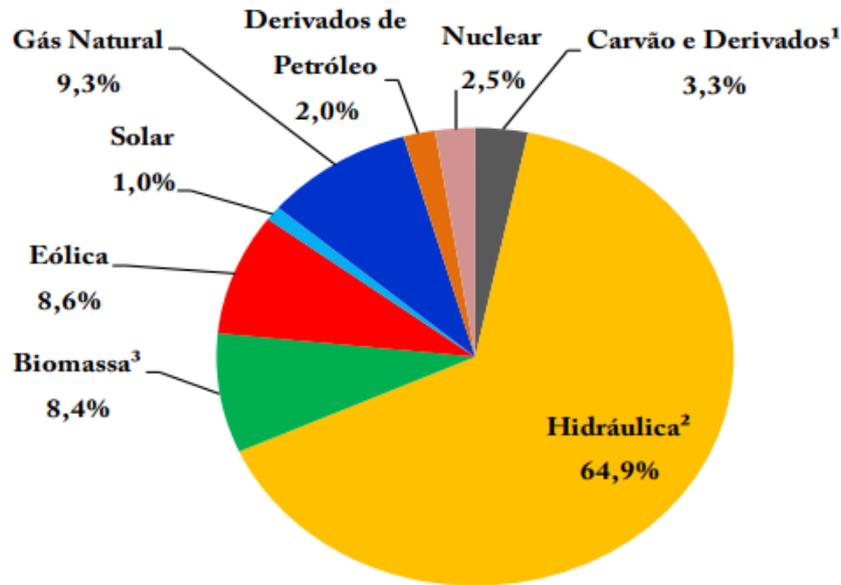
De forma geral, as utilidades são usadas para transferir energia de um ponto a outro ou para fornecer e retirar energia do processo. É importante destacar a relação entre algumas utilidades, um maior consumo de vapor acarreta em um maior consumo de água, que por sua vez aumenta o consumo de energia elétrica (PROCKNOR, 2004).

Os custos com energia, bem como as políticas governamentais e a economia mundial não podem ser controladas pelas organizações, elas podem apenas melhorar o gerenciamento do seu consumo energético. A melhoria do desempenho energético pode trazer benefícios imediatos, através da maximização do uso das fontes de energia e dos bens relacionados, podendo reduzir tanto o custo como o consumo (SILVA, 2014). A organização, com a implantação de um sistema de gestão e reorganização energética, contribui para a redução do uso de recursos energéticos, além de amenizar as contribuições para os efeitos mundiais do uso de energia, como o aquecimento global.

2.2 Integração Energética

Toda atividade industrial demanda energia. Apesar de ser um insumo essencial, no entanto, a geração de energia causa impactos ambientais consideráveis, principalmente quando deriva de fontes não renováveis (FONSECA, 2017). Conforme o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2020, em 2019, 64,9% da energia elétrica consumida no Brasil foi gerada de maneira hidráulica. Na Figura 2 é apresentada a distribuição das fontes de energia no país por fonte no ano de 2018.

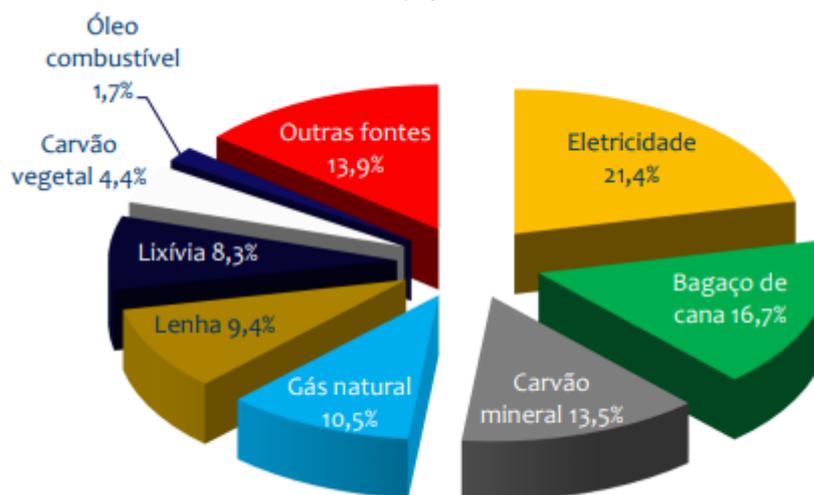
Figura 2 - Matriz energética do Brasil em 2019.



Fonte: EPE (2020).

O setor industrial é o segundo maior consumidor de energia no país, com 30,4%, seguindo o setor de transportes com 32,7%. Na Figura 3 é apresentada a distribuição por fonte da energia usada na indústria, tendo como base o ano de 2019. Observando a cadeia industrial brasileira como um todo, 60,2% do consumo é suprido por de fontes renováveis (eletricidade, bagaço de cana, lenha, lixívia e carvão vegetal).

Figura 3 - Distribuição das fontes de energia consumidas pela indústria em 2019.



Fonte: EPE (2020).

A “integração de processos” visa as melhorias nos sistemas, visando otimizar o uso da energia e matérias-primas (CANADA, 2003), sendo uma ferramenta importante para projetar e também operar processos econômicos e sustentáveis. Geralmente, quando comparado a abordagens tradicionais, o valor agregado da integração de processos é particularmente significativo, pois quanto mais complexo o processo, mais difícil identificar as possibilidades de economia sem que se use abordagens sistemáticas, como a integração (CANADA, 2003).

O estudo da integração energética começou na década de 70 com a crise do petróleo, mas foi nos últimos 25 a 30 anos que ganhou força e começou a ser amplamente difundido. São analisadas configurações de redes de trocadores de calor para correntes que precisam ser resfriadas ou aquecidas aproveitando uma a outra, para reduzir o uso de energia em uma determinada parte do processo (KEMP, 2007).

Segundo Gundersen (2002), as principais ferramentas para os métodos de integração de processo são: as regras heurísticas, baseadas na experiência sobre o projeto, os conceitos termodinâmicos e as técnicas de otimização matemática. Na maior parte das vezes eles são utilizados de maneira combinada para a resolução de um problema.

Os trabalhos de síntese de uma Rede de Troca de Calor podem ser classificados quanto à abordagem, em Abordagem Termodinâmica Heurística-Evolutiva, cujas etapas normalmente passam pela construção de uma rede inicial, seguida de uma evolução estrutural, visando a minimização do custo total. O Método do Ponto de Estrangulamento Energético (MPEE) ou *Pinch* é o mais utilizado dessa abordagem. A outra abordagem é via Técnicas de Otimização, em que cada etapa é resolvida sucessivamente e parte da solução de uma etapa é utilizada na seguinte, através de programação linear (LP), programação linear inteira mista (MILP) ou programação não-linear inteira mista (MINLP) (OLIVEIRA, 2005).

Segundo Turton et al. (2009), os conceitos da análise *Pinch* podem ser aplicados a uma ampla variedade de problemas envolvendo transferência de calor e massa e por fornecer ferramentas que permitem a investigação dos fluxos de energia em um processo, bem como identificar maneiras de reduzir o seu consumo. Se considerarmos uma rede de trocadores, ou seja, um sistema de muitos dispositivos de troca de calor interligados, existirá um ponto do sistema onde a força motriz da transferência é mínima, isto representa um ponto de estrangulamento térmico, o *Pinch*, ou ponto *Pinch*. Um planejamento bem-sucedido dessas redes envolve definir onde esse ponto ocorre e usar tal informação para projetar toda a rede.

O ideal é aplicar a análise *Pinch* durante o planejamento das modificações do processo, antes da finalização do *design*, para assim obter-se melhorias máximas na eficiência energética e os investimentos reduzidos, uma vez que restrições tanto do processo, como do *layout* podem

ser resolvidas. No entanto, na sua aplicação em projetos de modernização de plantas já existentes, a análise *Pinch* pode ter como objetivo específico maximizar o retorno do investimento aplicado, já que a técnica permite avaliar combinações ideais de projetos e projetos conflitantes (CANADA, 2003).

Na atualização de um processo já existente, o chamado *retrofit*, considera-se a reutilização de equipamentos já existentes, o que envolve uma ampla pesquisa sobre as condições existentes no processo e até mesmo a adequação dos materiais de construção dos equipamentos para os novos serviços (TURTON et al., 2018). Como já citado, minimizar o uso de fluxos externos, considerando um *design* de rede já existente pode ser usado para orientar o *retrofit*.

O primeiro conceito importante na análise *Pinch* é o estabelecimento das metas de desempenho energético que são inseridas e estudadas de acordo com o sistema no qual se deve aplicar a análise. A tarefa de projeto é encontrar a melhor rede de trocadores, resfriadores e aquecedores, que lidam com as correntes do sistema, com um custo operacional mínimo, consistente com outros objetivos de projeto, como operacionalidade (KEMP, 2007).

2.3 Aplicação da metodologia Pinch

Com base na aplicação da Primeira e da Segunda Lei da Termodinâmica, Linnhoff et al. (1983) movidos por uma reação à crise energética da época desenvolveram a análise *Pinch*, utilizando ferramentas gráficas e analíticas para definir metas de desempenho energético, auxiliando na síntese de uma rede de trocadores de calor que possibilita máxima troca térmica, e consequentes vantagens econômicas e ambientais (SOUZA NETO, 2005).

Como o ponto *Pinch* é um ponto crítico no processo, ele divide o projeto da rede em duas regiões termicamente independentes uma região acima do *Pinch* (que absorve energia de utilidades quentes) e outra abaixo do *Pinch* (que fornece calor para utilidades frias).

Conhecendo as vazões e as propriedades termodinâmicas das correntes do processo, o primeiro passo é a determinação das metas de desempenho energético para a análise. Isto pode ser feito através de um método algébrico, o método do intervalo de temperatura ou cascata térmica; ou de um método gráfico, o método das curvas compostas.

Em ambos os métodos, a diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}) preestabelecida entre as correntes envolvidas é um parâmetro fundamental na síntese de redes de trocadores (GUNDERSEN, 2002; CANADA, 2003). O ΔT_{\min} determina o grau de recuperação de energia na rede, já que constitui uma restrição à troca de calor nos trocadores nas proximidades do ponto *Pinch* afetando diretamente o custo global da rede. Além disso, todos os passos

posteriores são dependentes desse valor (SILVA, 1995). É comum adotar um ΔT_{\min} igual a 10 °C (CANADA, 2003; KEMP, 2007), entretanto há um valor ótimo de ΔT_{\min} que minimiza o custo total para uma determinada planta.

2.3.1 Método do Intervalo de temperatura

Uma das maneiras de se obter as metas de energia do problema é por meio do diagrama de intervalo de temperatura (LINNHOFF E FLOWER, 1978). Neste método, as correntes são divididas em quentes (cuja temperatura diminui) e frias (cuja temperatura aumenta) e então definem-se os intervalos de temperatura, nos quais as correntes quentes e frias trocam calor entre si, a fim de manter o ΔT_{\min} preestabelecido. Então todas as correntes de processo são representadas no diagrama de intervalo de temperatura (TURTON et al., 2018).

A partir do diagrama construído, calcula-se a quantidade líquida de energia disponível no intervalo ou a variação de Entalpia (ΔH), conforme Equação 1.

$$\Delta H = \sum \dot{m}c_p \Delta T \quad (1)$$

em que \dot{m} é a vazão mássica, c_p é o calor específico e ΔT é a variação de temperatura no intervalo. O produto $\dot{m}c_p$ fornece a capacidade térmica (C_p). Para calcular o somatório, as correntes quentes adicionam energia e as correntes frias subtraem energia.

Em seguida constrói-se o diagrama em cascata, que mostra a quantidade líquida de energia em cada intervalo de temperatura. Como a energia sempre pode ser transferida de um corpo com temperatura mais alta para um corpo com temperatura mais baixa, se houver excesso de energia em um determinado intervalo, essa pode ser transferida (em cascata) ao nível inferior de temperatura.

Nos sistemas em que apenas a energia térmica está sendo transferida, o excesso de energia não pode ser transferido para cima para um intervalo de temperatura mais alto, pois pela Segunda Lei da Termodinâmica, a transferência de energia até um gradiente de temperatura só é possível se o trabalho for realizado no sistema, por exemplo, o uso de uma bomba de calor (TURTON et al., 2018).

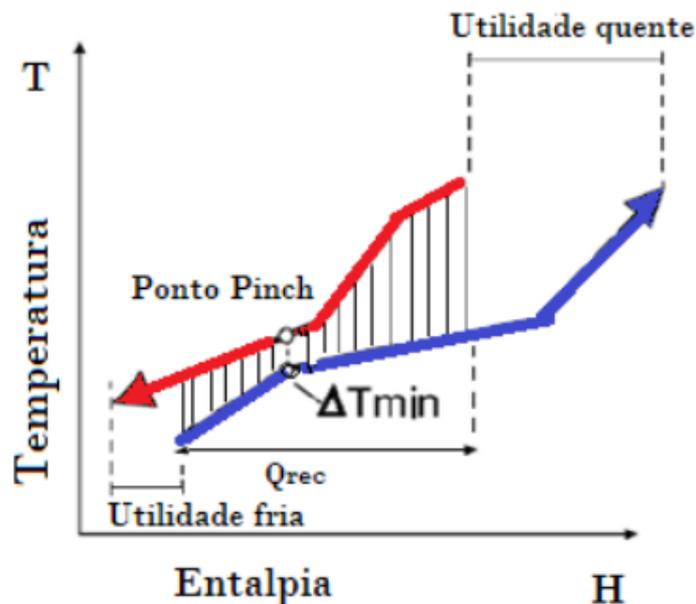
No primeiro diagrama de cascata se obtém a primeira meta de desempenho da análise *Pinch*, chamada “utilidade quente mínima” ($Q_{q,\min}$), trata-se do maior valor em módulo, dos déficits na cascata de energia. O valor $Q_{q,\min}$ corresponde à carga térmica que deve ser suprida por uma utilidade quente adicionada ao processo. Em um segundo diagrama, adiciona-se o valor de $Q_{q,\min}$ antes do intervalo inicial, assim o procedimento de cascatear a energia é igual, sendo a energia final do último intervalo, a segunda meta de desempenho, a “utilidade fria mínima”

($Q_{f,\min}$), isto é, a carga térmica mínima a ser suprida por uma utilidade fria. O ponto *Pinch* é aquele intervalo de temperatura na segunda cascata no qual a variação da energia é igual a zero.

2.3.2 Método das Curvas compostas

O método das Curvas Compostas também permite determinar as metas de energia para o projeto da rede pela metodologia *Pinch*. Este método consiste na elaboração dos perfis de Temperatura vs Entalpia do processo. Primeiramente constrói-se uma curva com as entalpias de todas as correntes quentes em função da temperatura e depois o mesmo é feito com as correntes frias (TURTON et al., 2018) em uma representação esquemática conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática de uma Curva Composta.



Fonte: adaptado de Oliveira (2014).

Na Figura 4 é possível identificar alguns pontos essenciais para a análise *Pinch*. O intervalo em x no qual as curvas quentes e frias se apresentam simultaneamente representa a energia que pode ser recuperada no sistema sem a demanda de utilidades (Q_{rec}). A faixa em que a curva composta fria não está sobreposta pela curva quente representa a necessidade de utilidade quente ($Q_{q,\min}$); de modo similar, a faixa em que a curva composta quente não tem correspondência da curva fria indica a necessidade de utilidade fria ($Q_{f,\min}$). O ponto mais próximo das curvas compostas, ou seja, onde ΔT_{\min} é atingido, tem-se o ponto *Pinch* (CANADA, 2003).

Para que seja possível visualizar o as curvas como mostradas anteriormente é necessário que se desloque uma delas na horizontal, com a finalidade de se observar o ΔT_{\min} entre elas, sendo que o deslocamento horizontal não implica em alteração nas representações das correntes, uma vez que a entalpia representada do eixo x não possui escala absoluta e por isso apenas a sua variação deve ser constante (LINNHOFF et al., 1978).

Segundo Júnior (2009), o método gráfico é fácil de ser aplicado em processos com poucas correntes, se tornando inviável para um grande número de correntes. Neste caso, recomenda-se o uso do Método de Intervalo de Temperatura.

Conhecendo-se o custo da energia e dos trocadores de calor, é possível prever o valor ideal de ΔT_{\min} à frente do *design*. Na prática os especialistas em *Pinch* frequentemente selecionam o valor para um determinado processo olhando para os dois fatores a seguir (MARCH, 1998):

- i. **Forma das curvas compostas:** geralmente um valor mais alto para ΔT_{\min} será escolhido para as curvas que são quase paralelas do que para sistemas que divergem acentuadamente, isso se deve à diferença de temperatura entre fluxos frios e quentes está próxima ao valor do ΔT_{\min} quando as curvas são paralelas, portanto um valor pequeno resultaria em uma grande área de troca térmica para todos os trocadores de calor, gerando um alto investimento.
- ii. **Experiência:** onde há grande índice de incrustação, ou a transferência de calor se dá por baixos coeficientes, valores de ΔT_{\min} de 30–40 °C são usados. Para processos químicos típicos, os valores ΔT_{\min} são normalmente na faixa de 10 a 20 °C. Já para processos com baixa temperatura usando refrigeração, valores entre 3-5 °C são utilizados para minimizar as demandas de energia nos sistemas de refrigeração, que são caras.

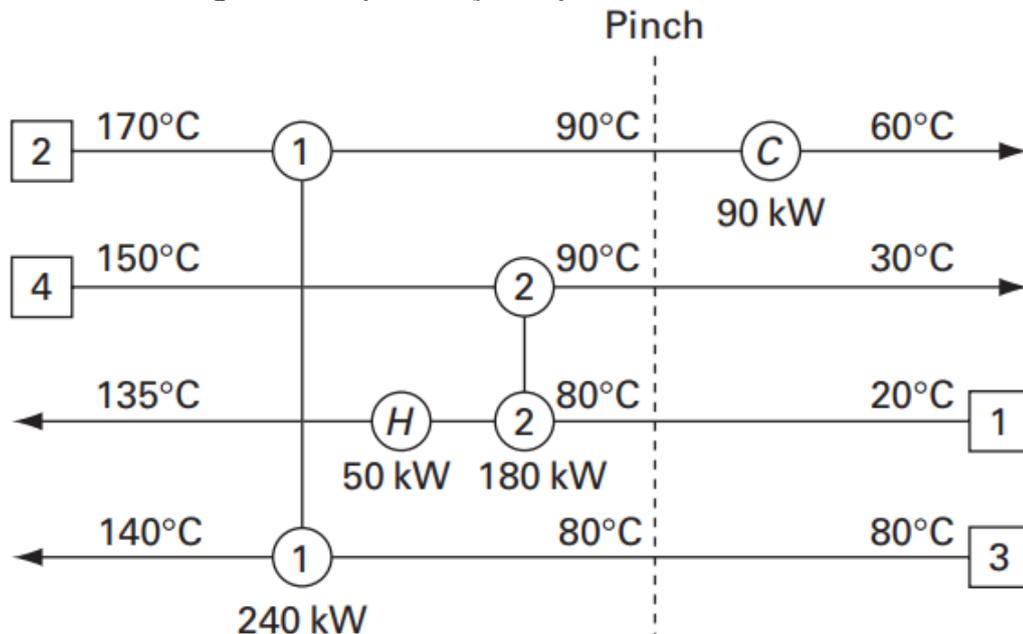
2.4 Síntese da Rede de Trocadores de Calor

Com as metas de energia determinadas, a etapa posterior da integração energética por meio da análise *Pinch* é o pareamento das correntes para que haja a troca energética. O primeiro passo para tal é a fazer a representação da Rede de Trocadores de Calor (RTC). Segundo Júnior (2009), a maneira mais utilizada para isso é o Diagrama de Grade, apresentado em 1978 por Linnhoff e Flower.

Para o tipo de representação citada (Figura 5), as correntes quentes são agrupadas no topo, denotada por setas na direção da esquerda para a direita a partir das suas temperaturas de entrada e chegando nas temperaturas de saída. Já as correntes frias vem logo abaixo, com as

setas da direita para a esquerda. O ponto *Pinch* é representado por uma linha vertical pontilhada, já a existência de um trocador de calor de integração é simbolizada através de dois círculos, um em cada corrente de troca, ligados por uma linha vertical e os círculos sozinhos em uma corrente representam os trocadores de utilidades, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Representação esquemática de uma RTC.



Fonte: Kemp (2007).

A metodologia *Pinch* divide o problema em duas partes, a região acima e abaixo do *Pinch*, sendo tratadas isoladamente, garantindo que não haverá transferência de calor através dele, iniciando o projeto da rede de trocadores próximo ao ponto *Pinch* e caminhando no sentido contrário a ele (TURTON et al., 2018). Assim após a divisão do projeto, o pareamento das correntes para os trocadores deve obedecer três “regras de ouro” a fim de garantir o consumo mínimo de utilidades (KEMP, 2007):

- i. Não transferir calor através do *Pinch*;
- ii. Não usar utilidades frias acima do *Pinch*;
- iii. Não usar utilidades quentes abaixo do *Pinch*.

Então há dois critérios de viabilidade para os pareamentos. O primeiro se refere às C_P 's que é o produto da vazão mássica (\dot{m}), com o calor específico (c_p) das correntes. Acima do *Pinch*, deve-se combinar uma corrente quente com C_P menor ou igual ao da corrente fria e abaixo, o C_P da corrente quente deve ser maior ou igual ao da corrente fria, caso contrário, deve-se dividir correntes quentes ou frias para que a regra possa ser seguida.

O segundo critério é o do número de correntes, sendo que o número das correntes quentes (N_Q) na região acima do *Pinch*, não deve exceder o número de correntes frias (N_F), e abaixo, o número de correntes quentes deve ser maior ou igual ao número de correntes frias. Caso as situações mencionadas não ocorram, uma corrente necessariamente precisa ser dividida para que seja conseguido o mínimo uso de utilidades.

Como resumo dos dois critérios apresentados, tem-se a Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo dos critérios de pareamento.

Região	Número de correntes	Capacidades térmicas
Acima do <i>Pinch</i>	$N_Q \leq N_F$	$\dot{m}c_{p,q} \leq \dot{m}c_{p,f}$
Abaixo do <i>Pinch</i>	$N_Q \geq N_F$	$\dot{m}c_{p,q} \geq \dot{m}c_{p,f}$

2.5 Casos de aplicação de Integração Energética

Na literatura é possível encontrar vários estudos de caso de aplicação da integração energética, por meio da análise *Pinch* em diferentes ramos industriais, visto isso, foi elaborada a Tabela 3 que apresenta alguns casos, bem como a economia gerada por tal ação.

Tabela 3 - Aplicações da integração energética.

Referência	Indústria	Economia
Júnior (2009)	Fabricação de óleo de soja - etapa de extração	5,3% no consumo de vapor global da planta
Oliveira (2005)	Produção de polietilenos	500 kg/h de vapor de baixa pressão
Madureira (2018)	Planta de fertilizantes	81,4% do custo de utilidades
Oliveira (2014)	Biorrefinaria de cana-de-açúcar	50% no consumo de energia, comparada aos mesmos processos sem IE
Tonial (2018)	Planta de produção de acetona	53% do uso de utilidades
Walmsley et al. (2015)	Láctea- evaporador de leite	até 67% no uso de energia térmica

Fonte: Da autora (2020).

Analisando as informações contidas na Tabela 3, reforça-se o fato de que os métodos de integração energética podem ser aplicados nos mais diversos tipos de indústrias e suas contribuições tem impacto positivo, no que se trata de redução no uso de utilidades em geral, implicando em uma redução de custo do processo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do processo

Visando aplicar a metodologia *Pinch* para promover integração energética em um processo industrial obtiveram-se os dados de requisitos de temperatura das correntes e de vazão em uma Usina de Beneficiamento de Leite situada em Itapetininga, São Paulo, com capacidade de processamento diário de até 1.500.000 L/dia.

Neste processo, o leite recebido é resfriado em linha, por meio de trocadores de calor a placas, e armazenado em silos de 150.000 L a uma temperatura máxima de 4 °C. O leite cru armazenado é então direcionado para o pasteurizador.

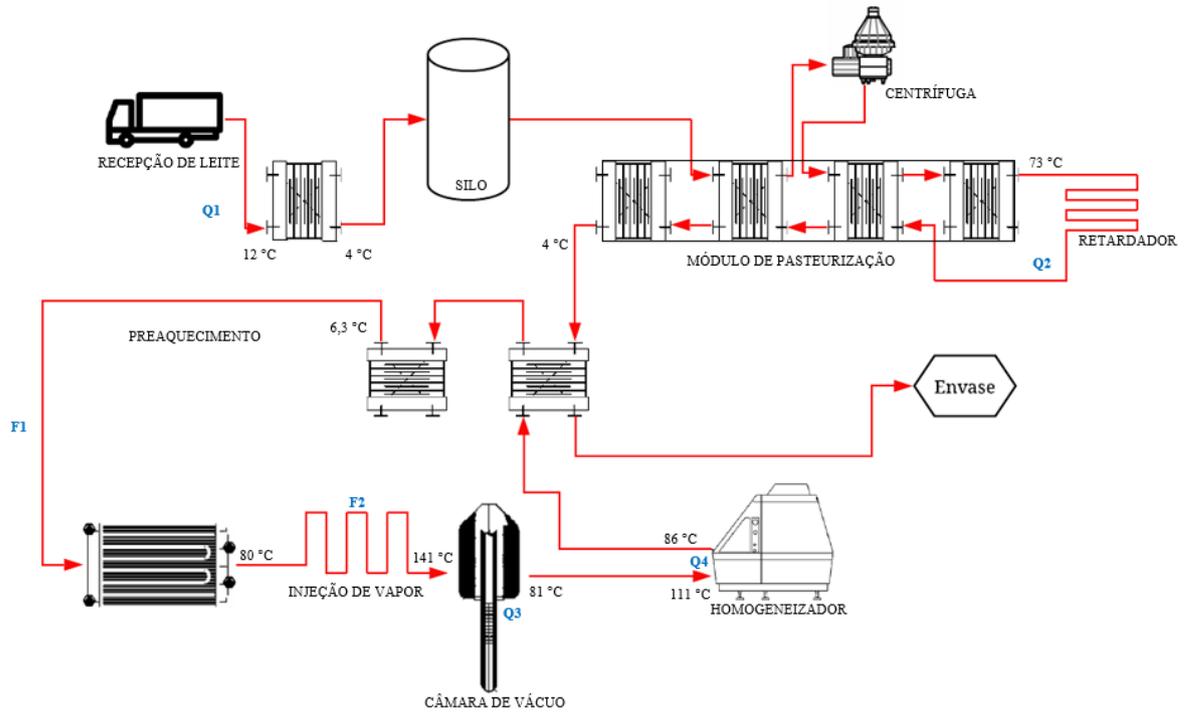
Na pasteurização deve-se garantir a inativação de microrganismos indesejáveis e patogênicos, sem causar danos ao produto. A temperatura de pasteurização é 75 °C, depois de atingida a temperatura final de aquecimento, o produto passa pelo retardador, onde permanece por um tempo de 20 segundos à temperatura de pasteurização. Saindo do retardador, passa pelas seções de regeneração, onde se inicia o processo de resfriamento, e pela seção de resfriamento final com água gelada, atingindo a temperatura de 4 °C. O módulo de pasteurização conta com uma centrífuga tipo bactofuga, que tem a função de reduzir a carga microbiológica e uma centrífuga desnatadeira, responsável pela separação do creme, rico em gordura do leite.

Após a pasteurização vem a esterilização do leite, em que vapor é injetado rapidamente no produto e instantaneamente aquece de 80 °C até a temperatura ultra-alta (UHT), entre 130 e 150 °C, seguido por condensação (somente 0,1 segundo) e por temperatura de equilíbrio. A combinação de uma alta temperatura de esterilização e de um tempo curto de aquecimento garante que microrganismos e esporos sejam desativados com impacto mínimo no sabor e na cor do produto.

O envase do leite em embalagens de 1 L é realizado em máquinas assépticas. As embalagens são posteriormente colocadas em palete para armazenamento, onde ficam retidas por no mínimo 5 dias que é o tempo para se realizar as análises do controle de qualidade do produto acabado e posterior liberação para transporte e comercialização.

A planta é projetada para receber, armazenar, pasteurizar e esterilizar leite em processo contínuo. A Figura 6 apresenta um fluxograma do processo, do qual foram retirados os principais dados para a realização do estudo. A escolha das correntes foi realizada com base nas informações com acesso autorizado que estavam disponíveis na planta.

Figura 6 - Fluxograma simplificado do processo de produção de leite UHT.



Fonte: Da autora (2021).

Os dados extraídos do processo referentes às demandas energéticas do processo de produção do leite UHT, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Correntes de processo.

Local	Corrente	Tipo	Descrição	Vazão (Kg/h)	T _i (°C)	T _f (°C)	CP (MW/K)	ΔH (MW)
Recepção	Q1	Quente	Leite cru	51.600	12	4	202,79	1.622,30
Pasteurização	Q2	Quente	Leite pasteurizado	41.280	73	4	162,23	11.193,90
Ultrapasteurização	F1	Fria	Leite no preaquecimento	16.512	6,3	80	64,89	4.782,6
	F2	Fria	Leite na injeção de vapor	16.512	80	141	64,89	3.958,4
	Q3	Quente	Leite na câmara de vácuo	16.512	141	81	64,89	3.893,5
	Q4	Quente	Leite no homogeneizador	16.512	111	86	64,89	1.622,3

Fonte: Da autora (2021).

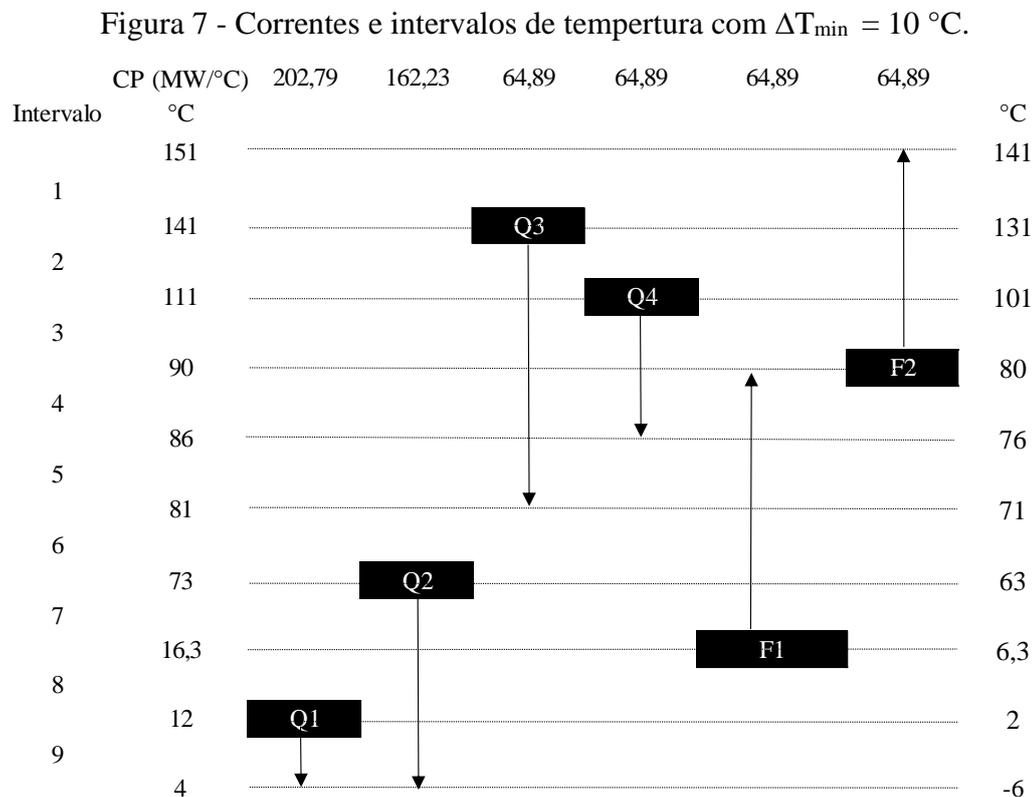
Para calcular a capacidade térmica (C_p) de cada corrente, o calor específico do leite à pressão constante foi considerado 3930 J/kg·K e sua densidade 1,032 kg/L. Embora a rigor o valor de densidade varie com o percentual de gordura presente no produto, optou-se por considerar o valor médio (SILVA, 1997).

A variação de entalpia (ΔH), para cada uma das correntes, foi calculada usando a Equação 1.

3.2 Determinação das metas de desempenho

Em seguida, procedeu-se a construção do diagrama de intervalos de temperatura. Neste trabalho investigou-se o efeito do valor de ΔT_{\min} sobre o custo total da rede obtida. Por isso, a metodologia foi aplicada com diferentes valores de ΔT_{\min} (1 °C, 5 °C e 10 °C). O procedimento utilizado ilustrado foi feito para $\Delta T_{\min} = 10$ °C. Para os demais valores, a metodologia foi aplicada da mesma maneira.

O diagrama de intervalos de temperatura foi construído subtraindo-se o valor de ΔT_{\min} de T_i e T_f das correntes quentes e então construindo-se um diagrama em que a escala das correntes frias (à direita) e a escala das correntes quentes (à esquerda) são deslocadas pelo valor de ΔT_{\min} . Para $\Delta T_{\min} = 10$ °C, o diagrama obtido é apresentado na Figura 7.



Fonte: Da autora (2021).

Através do somatório das capacidades térmicas e a diferença de temperatura em cada intervalo calculou-se a variação de entalpia de cada um, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Cargas térmicas por intervalo.

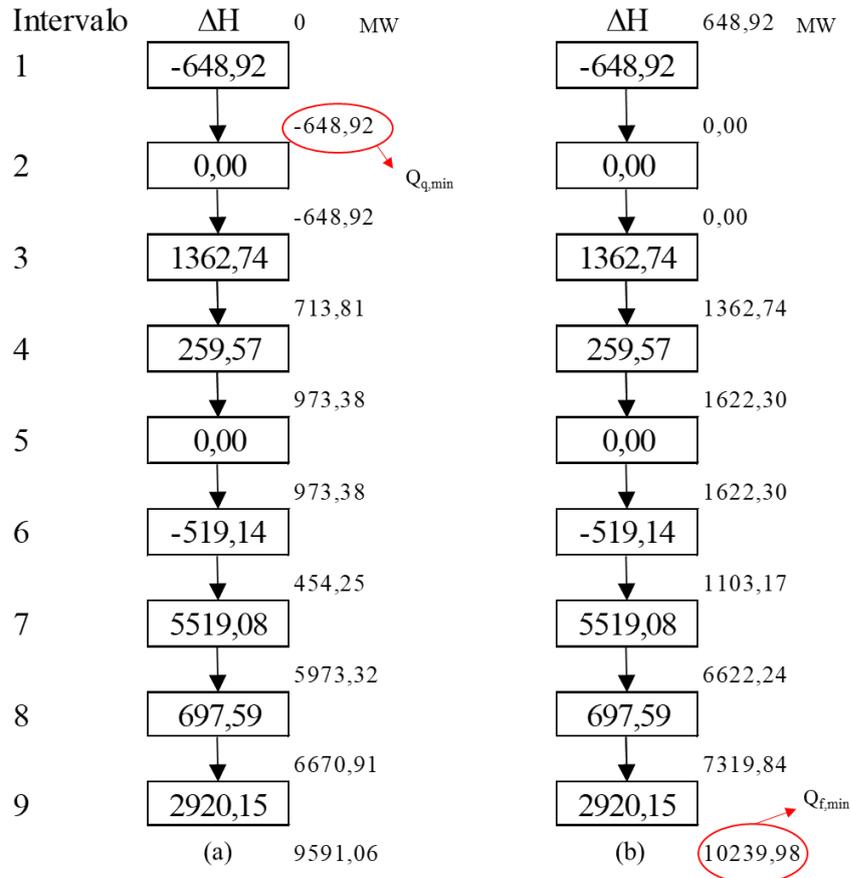
Intervalo	ΔT (°C)	ΣC_P (MW/°C)	ΔH (MW)
1	10	-64,89	-648,92
2	30	0,00	0,00
3	21	64,89	1362,74
4	4	64,89	259,57
5	5	0,00	0,00
6	8	-64,89	-519,14
7	56,7	97,34	5519,08
8	4,3	162,23	697,59
9	8	365,02	2920,15

Fonte: Da autora (2021).

A partir da hipótese de que não há fonte de energia externa inicial e com base nos ΔH dos intervalos calculados elaboraram-se as cascatas térmicas para determinar as metas de desempenho. Na Cascata 1 (Figura 8 (a)), o maior valor dos déficits se trata do consumo mínimo de utilidade quente, um $Q_{q,min}$ igual a 648,92 MW. Adicionando o valor de $Q_{q,min}$ no primeiro intervalo de temperatura foi calculada a cascata viável, Cascata térmica 2 (Figura 8 (b)) de onde obteve-se um $Q_{f,min}$ de 10239,98 MW.

A posição do ponto *Pinch* corresponde ao intervalo no qual a variação de energia é nula. Neste caso, o déficit foi igual entre os intervalos 1 – 2 e 2 – 3, logo escolheu-se o primeiro intervalo, isto é, entre os intervalos 1 e 2, portanto, para $\Delta T_{min} = 10$ °C, tem-se a $T_{q,pinch} = 141$ °C e $T_{f,pinch} = 131$ °C (COKER, 2014).

Figura 8 - (a) Cascata térmica 1. (b) Cascata térmica 2.



Fonte: Da autora (2021).

Na Tabela 6 são apresentadas as metas de desempenho para cada um dos ΔT_{\min} avaliados no estudo do caso.

Tabela 6 - Metas de desempenho para os diferentes valores de ΔT_{\min} .

ΔT_{\min} (°C)	$T_{q,pinch}$ (°C)	$T_{f,pinch}$ (°C)	$Q_{q,min}$ (MW)	$Q_{f,min}$ (MW)
1	141	140	64,89	9.655,95
5	141	136	324,46	9.915,52
10	141	131	648,92	10.239,98

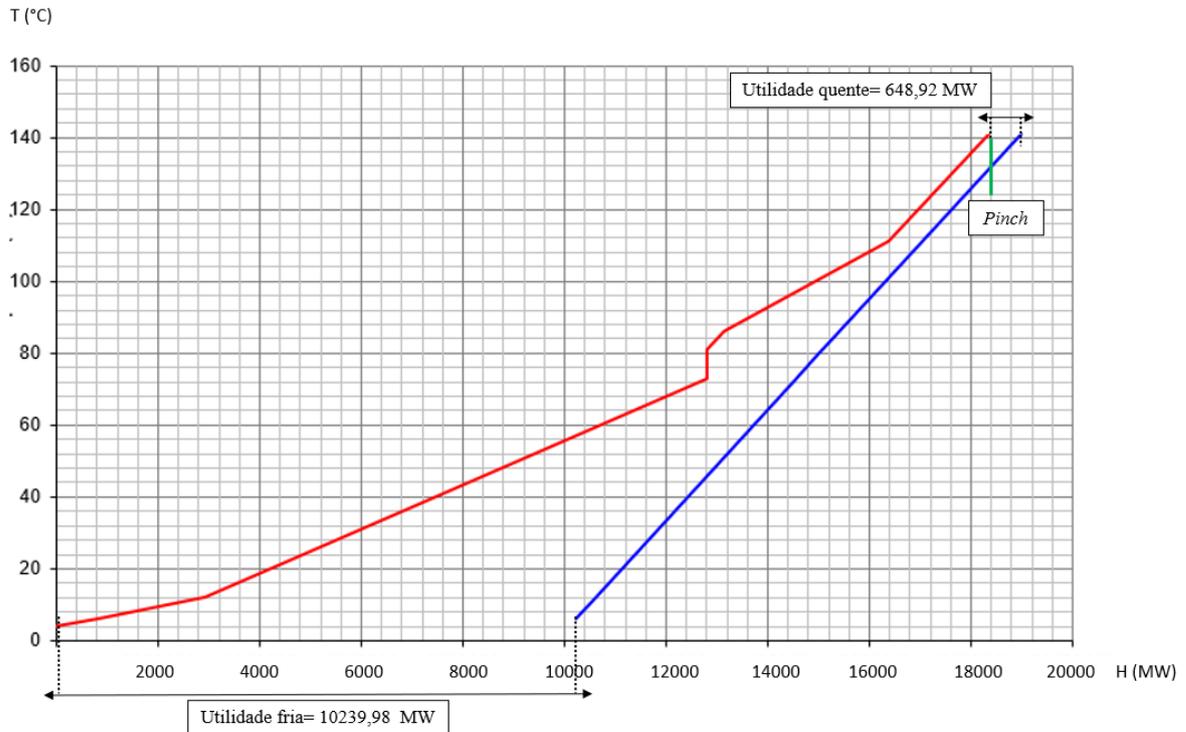
Fonte: Da autora (2021).

3.3 Seleção de Utilidades

O HINT é um *software* gratuito, desenvolvido na Universidade de Valladolid na Espanha, por Ángel Martín, que aborda os conceitos da análise *Pinch* (MARTÍN et al., 2008). Esta ferramenta foi utilizada para auxiliar no desenvolvimento gráfico necessário no decorrer deste trabalho.

Com o auxílio do software HINT 2.2, construíram-se as Curvas Compostas para o problema em questão, como apresentado na Figura 9.

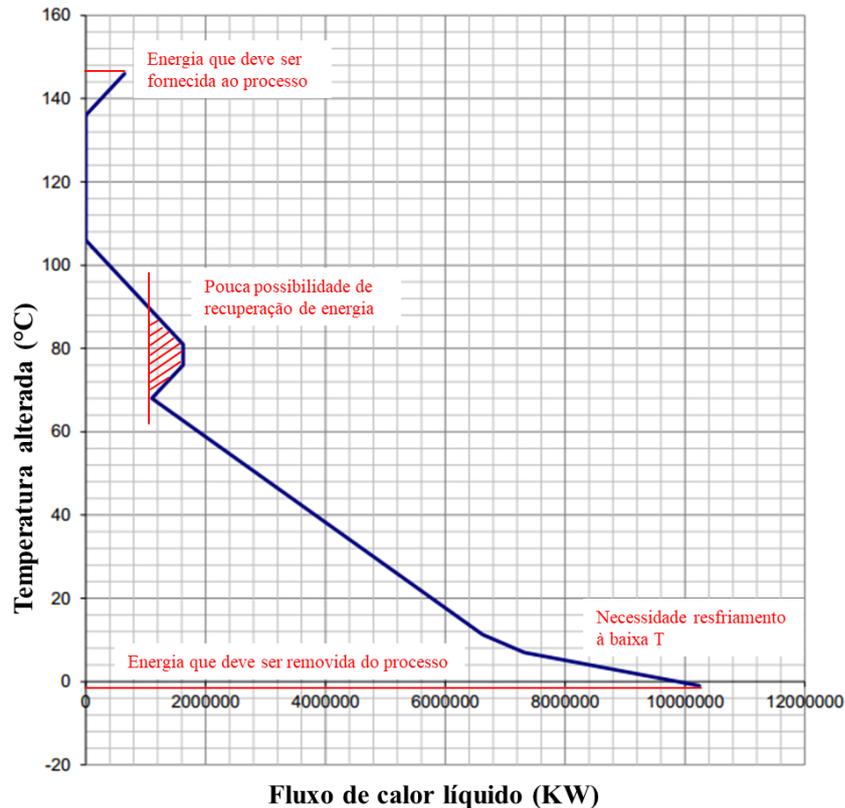
Figura 9 - Curvas Compostas ($\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$).



Fonte: Da autora (2021).

Como esperado, a disposição das curvas confirmou as metas de desempenho, bem como a posição do ponto *Pinch* determinadas pelo Método de Intervalo de Temperatura, aplicado anteriormente.

Embora as curvas compostas forneçam as metas de desempenho, elas não são apropriadas para efetuar a seleção adequada das utilidades. A Grande Curva Composta (GCC) é um gráfico de fluxo de calor líquido em relação à temperatura deslocada. A partir dela pode-se encontrar a quantidade mínima de aquecimento ou resfriamento que deve ser fornecido nos diferentes níveis de temperatura, logo trata-se de uma ferramenta apropriada para compreender a interface entre o processo e o sistema de utilidade (SMITH, 2005). Para o estudo em questão com $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, a GCC está apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Grande Curva Composta ($\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Fonte: Da autora (2021).

Na GCC, o ponto de fluxo de calor zero é o ponto *Pinch*. Acima e abaixo do *Pinch* há demandas que não podem ser supridas por correntes de processo e correspondem a $Q_{q,\min}$ e $Q_{f,\min}$ respectivamente. Na área hachurada entre 70 e 90 °C (aproximadamente) representa a parcela de energia passível de recuperação, pois tem-se curva quente disponível para suprir a demanda fria.

Observando a GCC obtida e as relações de utilidades e suas temperaturas descritas por Turton et al. (2018), selecionaram-se como utilidade quente o vapor a baixa pressão (5 barg), cuja temperatura de utilização é até 160 °C e como utilidade fria, a água refrigerada, cujas propriedades estão sumarizadas na Tabela 7, em que o custo é em dólar.

Tabela 7 - Propriedades das utilidades.

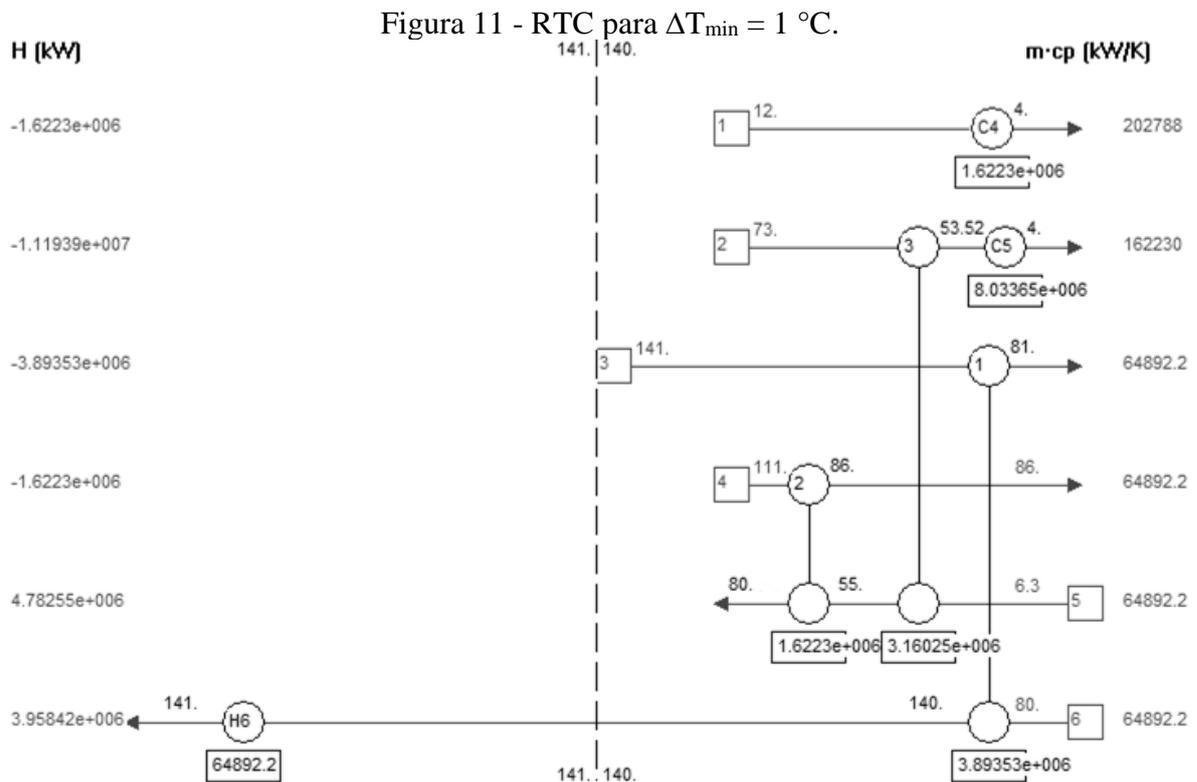
Utilidade	Temperatura	Propriedade	Custo (US\$)
Vapor de baixa pressão (saturado)	160°C	$\lambda = 2085,36\text{ kJ/kg}$	9,45/1000 kg
Água moderadamente refrigerada	Entrada: 3 °C Saída: 15 °C (máx)	$\rho_{\text{agua}} = 999,5\text{ kg/m}^3$ $c_p = 4,20\text{ kJ/kg.K}$	4,77/GJ

Fonte: adaptado de Turton et al. (2018).

3.4 Projeto da Rede de Trocadores

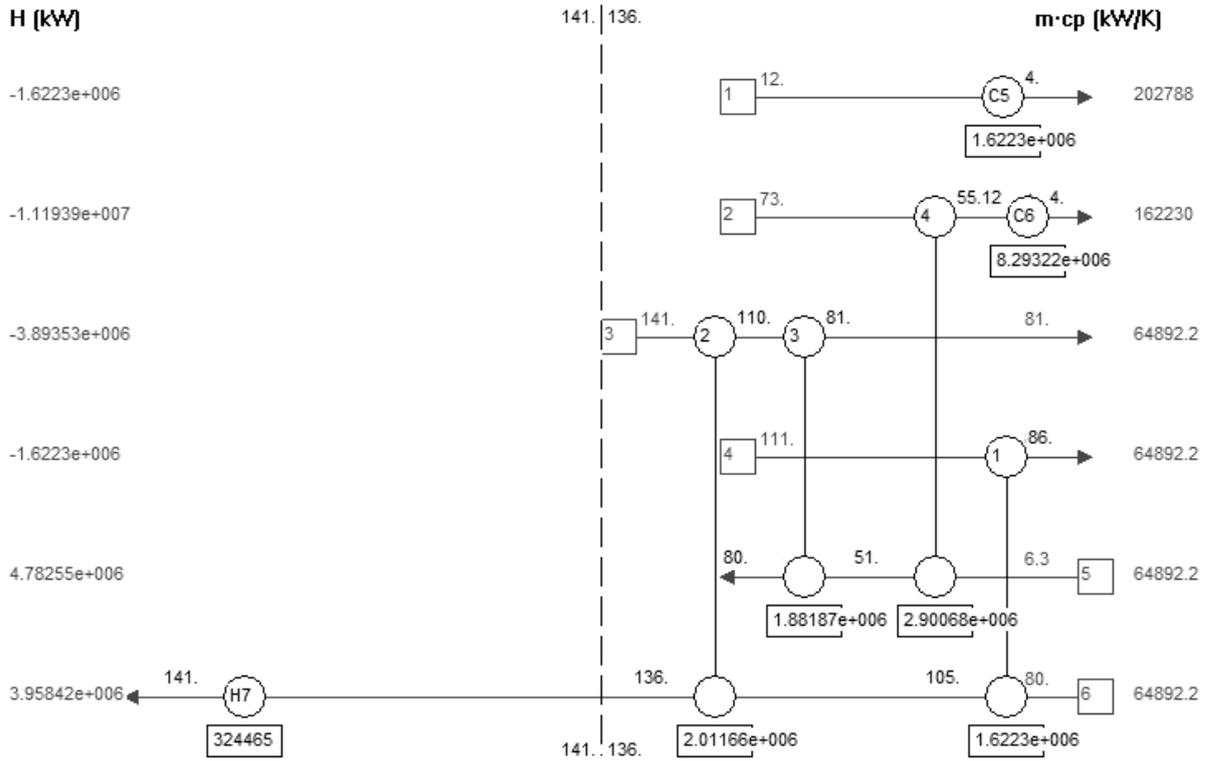
O projeto da rede de troca térmica usando as regras heurísticas iniciou-se pela construção de um Diagrama de Grade, agrupando-se as correntes quentes no topo, representadas por setas direcionadas para a esquerda e as correntes frias de maneira inversa.

Com a demarcação do ponto *Pinch*, e a divisão das regiões abaixo e acima, foi possível aplicar as premissas dos critérios de pareamentos contidos na Tabela 2, respeitando as “regras de ouro”. Através deste procedimento que está detalhadamente mostrado no Apêndice A foram geradas as redes para os ΔT_{\min} iguais a 1 °C, 5 °C e 10 °C conforme as Figuras 11, 12 e 13 respectivamente. São indicadas as temperaturas de entrada e saída das correntes em cada um dos trocadores de calor e a energia térmica trocada entre eles, sendo que os trocadores conectados à outra corrente são os de integração e os ciclos individuais os de utilidades.



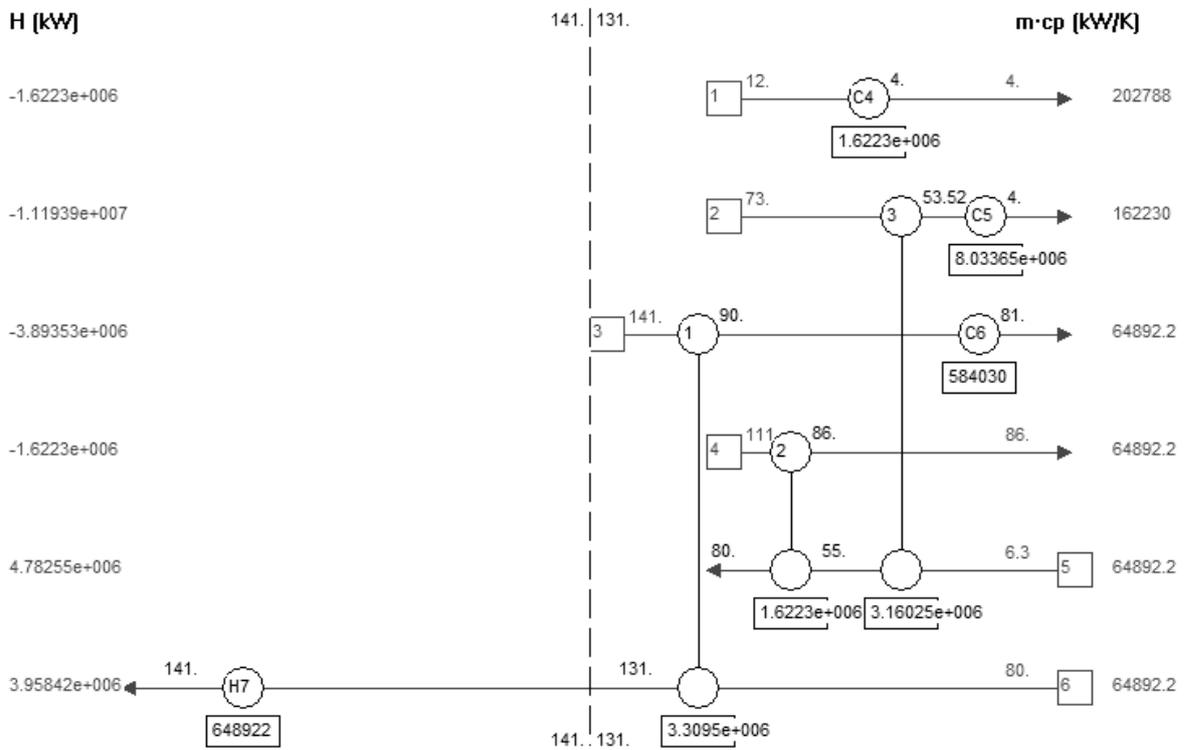
Fonte: Da autora (2021).

Figura 12 - RTC para $\Delta T_{\min} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fonte: Da autora (2021).

Figura 13 - RTC para $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fonte: Da autora (2021).

3.5 Estimativa dos custos de rede

A estimativa dos custos é proposta para que se possa revisar a rede construída e se necessário reduzir custos, por meio do cálculo do custo anual.

Através da soma dos custos de utilidade (C_{util}) e dos custos de capital corrigido pelo fator do material de construção (C_{BM}), foi possível estimar o custo total da rede (C_T), ilustrado na Equação 2 (PERLINGEIRO, 2018).

$$C_T = C_{util} + C_{BM} \quad (2)$$

O custo de utilidade envolve custo unitário do item i (p_i) conforme informado na Tabela 6, a taxa de consumo por hora (q_i), e o fator anual de operação da planta (f_0) (Equação 3).

$$C_{util} = (\sum p_i \cdot q_i) \cdot f_0 \quad (3)$$

Já o custo do capital está relacionado com a área (A) dos trocadores de calor, conforme Equação 4. Foi estimado usando a metodologia de Análise de Custo Modular considerando custo de aquisição de trocadores de calor por placas planas, em pressão ambiente de operação e usando aço inoxidável na construção (TURTON et al., 2018).

$$\log_{10}(C_{cap}) = 4,6656 + (-0,1557 \cdot \log_{10}(A)) + 0,1547 \cdot (\log_{10}(A))^2 \quad (4)$$

O aço inoxidável como material de construção dos trocadores foi escolhido dado que é conhecido por sua resistência à corrosão, altas temperaturas e incrustações, é amplamente disponível, fácil de limpar e mais barato quando comparado com outros materiais, além de não contaminar o produto, característica extremamente importante, visto que se trata de uma indústria alimentícia (HANOUN et al., 2017). Os trocadores em operação na planta atualmente são do mesmo material.

Tendo em vista o material escolhido para a fabricação dos trocadores o custo do módulo de cada trocador (C_{BM}) foi calculado usando as constantes do fator básico do módulo (B_1 e B_2) e empregando o fator de correção do material (F_M) propostos por Turton et al. (2018) conforme a Equação 5.

$$C_{BM} = C_{cap}(B_1 + B_2 F_M) = C_{cap}(0,96 + 1,21 \cdot 2,7) = 4,227 C_{cap} \quad (5)$$

O primeiro passo então, foi a determinação da temperatura média logarítmica (ΔT_{lm}), para o cálculo da área dos trocadores adicionados, através da utilização das Equações 6 e 7, sendo T_{qe} e T_{qs} as temperaturas de entrada e saída do fluido quente, respectivamente e T_{fe} e T_{fs} as do fluido frio.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{qe} - T_{fs}) - (T_{qs} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{qe} - T_{fs})}{(T_{qs} - T_{fe})} \right]} \quad (6)$$

$$A = \frac{Q}{UF\Delta T_{lm}} \quad (7)$$

em que Q é a taxa de transferência de calor do trocador, U o coeficiente global de troca térmica e F o fator de correção para escoamento contracorrente.

Para os coeficientes globais de troca térmica utilizou-se o valor de $913,3 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, para os trocadores de utilidades, levando em consideração o fator de incrustação do leite em maiores tempos de operação (GUTIERREZ, 2013; PRAKASH et al., 2009). Para os trocadores de integração, U igual a $880 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ (FELLOWS, 2000). Já para o valor de F, assumiu-se 0,85 referente ao trocador de calor por placas (TURTON et al., 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de aplicar a metodologia *Pinch* a fim de elaborar uma rede de troca térmica integrada para um processo de beneficiamento de leite. Como resultado da etapa de determinação das metas de desempenho, conforme a metodologia, foram identificadas as quantidades mínimas de utilidades necessárias ao funcionamento da rede para diferentes valores de ΔT_{\min} . Desta maneira, calculou-se os custos das utilidades necessárias para cada rede, com o fator anual de operação (f_0) de 5184 h/a, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Custos com utilidades por rede.

ΔT_{\min} (°C)	Despesa com vapor (US\$/ano)	Despesa com água refrigerada (US\$/ano)	Custo total de utilidades (US\$/ano)
Sem integração	739.227.456,51	1.631.911.320,63	2.371.138.777,14
1	5.487.954,39	859.569.573,66	865.057.528,06
5	27.439.771,96	882.676.282,63	910.116.054,59
10	54.879.543,93	911.559.668,83	966.439.212,76

Fonte: Da autora (2021).

A partir dos dados dispostos na Tabela 8, verifica-se que as despesas com água moderadamente refrigerada representam 68,82% do custo total das utilidades quando se analisa o processo sem o uso da integração energética, já para a rede construída através do método *Pinch* com $\Delta T_{\min} = 1$ °C, o valor representa 99,37% do total. Embora o custo unitário do vapor seja superior ao da água, como apresentado na Tabela 7, nesta rede devido elevada demanda por resfriamento em baixas temperaturas, o gasto com água constitui a maior fonte de custo. Como apresentado no tópico 2.3.2, em processos que demandam refrigeração, valores de ΔT_{\min} entre 3 °C e 5 °C são tipicamente utilizados para reduzir a demanda energética, por isso a faixa investigada de valores ΔT_{\min} esteve entre 1 °C e 10 °C.

Houve uma redução de 63,52% no custo total das utilidades da rede com $\Delta T_{\min} = 1$ °C, quando comparada com ao processo sem integração, e de 61,62 % e 59,24% para 5 °C e 10 °C respectivamente. Portanto, conforme esperado, houve aumento do consumo das utilidades com o aumento do ΔT_{\min} . O aumento de ΔT_{\min} de 1 °C para 10 °C implicou em uma alta de 11,72% do custo de utilidades.

Além do benefício econômico, essa redução tem grandes impactos ambientais, pois diminuir o consumo das utilidades implica que menos recursos naturais estão sendo utilizados

para geração de energia, portanto há uma menor demanda de recursos, além de amenizar as contribuições para o aquecimento global.

Como informado na Metodologia, o projeto da rede de troca térmica para cada valor de ΔT_{\min} foi feito usando as regras heurísticas. Na Tabela 9 são então apresentados os custos de capital total em cada rede em comparação com o custo de capital da rede sem integração, utilizando apenas trocadores de calor de utilidades.

Tabela 9 - Custo de capital das RTC's.

ΔT_{\min} (°C)	Número de trocadores de calor	Custo de capital (US\$)
Sem integração	6	169.376.884.288,63
1	6	877.030.839.611,56
5	7	187.590.881.756,50
10	7	177.710.353.850,91

Fonte: Da autora (2021).

O custo de capital está diretamente ligado à área dos trocadores de calor utilizados e, quanto menor o ΔT_{\min} , maior é a área necessária para a realização da troca térmica, tornando assim a rede mais cara. Quando se compara os ΔT_{\min} 's, o custo de capital da RTC para 1 °C é 393,52% e o de 5 °C 5,56% maior do que o de 10 °C.

Cabe ainda a se destacar o custo de capital da rede sem integração, em que se utiliza apenas trocadores de utilidades, ele é menor do que aqueles com integração, isso está relacionado também à área total dos trocadores, que é menor que nos outros casos. Já quando se observa os investimentos em um longo prazo de operação (Tabela 10), nota-se a vantagem econômica do emprego da integração energética da rede, com uma economia estimada de \$5,7 bilhões, com a utilização do $\Delta T_{\min} = 10$ °C, em 10 anos de operação.

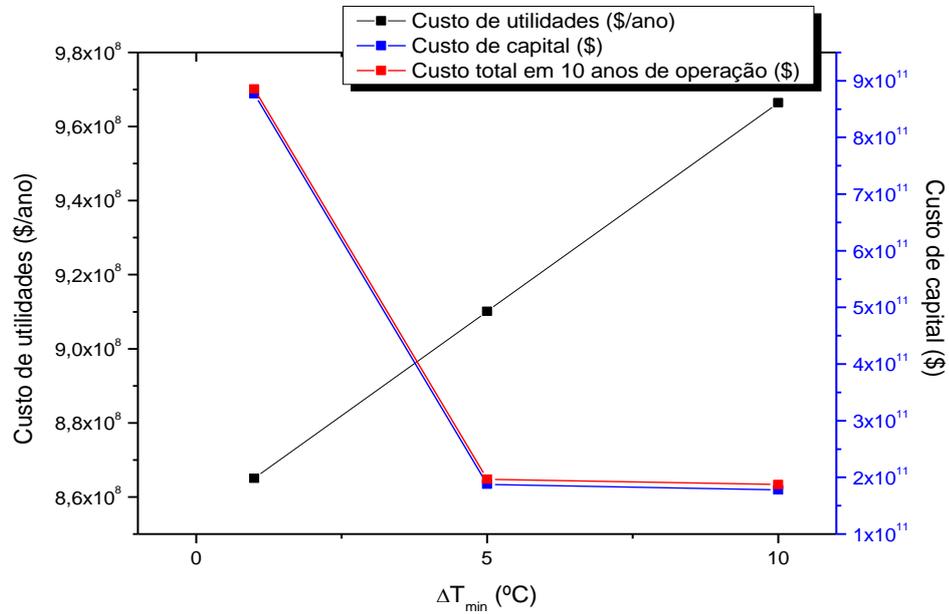
Tabela 10 - Custo das redes em 10 anos de operação.

ΔT_{\min} (°C)	Custo total em 10 anos de operação (US\$)
Sem integração	193.088.272.060,02
1	885.681.414.892,11
5	196.692.042.302,40
10	187.374.745.978,50

Fonte: Da autora (2021).

Os dados de custo operacional e de capital para os diferentes valores de ΔT_{\min} 's foram reunidos e são apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Relação entre os custos de utilidades, capital e total.



Fonte: Da autora (2021).

Diante da análise dos dados apresentados, é possível inferir que, dentro da faixa investigada, o projeto da rede integrada com $\Delta T_{\min} = 10$ °C seria a melhor opção para a integração de um processo, a que trará maiores benefícios econômicos e ambientais em um longo prazo. Sendo assim, é o fluxograma da rede integrada para o $\Delta T_{\min} = 10$ °C está representado na Figura 15.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho empregou-se a análise *Pinch* para avaliar a integração energética em uma planta industrial de beneficiamento de leite. Pode-se afirmar que a metodologia foi aplicada com sucesso. A partir do fluxograma de processo fornecido por uma usina situada no interior de São Paulo, determinaram-se as metas de desempenho energético e, por meio de regras heurísticas, realizou-se o projeto de três redes, com diferentes valores de ΔT_{\min} (1, 5 e 10 °C) para investigação dos custos envolvidos.

Apesar de a rede projetada com $\Delta T_{\min} = 1$ °C ter conduzido a uma rede com menor custo operacional, a rede projetada com $\Delta T_{\min} = 10$ °C levou a uma rede com custo de capital 393,52% inferior ao caso com $\Delta T_{\min} = 1$ °C. Portanto o projeto com $\Delta T_{\min} = 10$ °C foi recomendado a um custo total de US\$ 187.374.745.978,50 para 10 anos de operação, implicando em economia de US\$5,7 bilhões em relação à rede original nestes 10 anos.

Mesmo com a pouca possibilidade de recuperação energética do processo, foi possível desenvolver e aplicar a metodologia proposta, projetando as Redes de Trocadores de Calor (RTC), avaliando o impacto dos custos de utilidades, de capital e custo total, bem como o da área dos trocadores adicionados nas redes. A integração energética traz uma redução dos custos produtivos, já que projeta uma RTC que aproveita ao máximo a energia do processo e consequentemente reduz a necessidade de consumo de outras fontes energéticas, tornando a operação ecoeficiente.

Para trabalhos futuros, o estudo da viabilidade de aplicação da RTC montada na instalação existente, por meio da avaliação do *layout*, dos equipamentos já em atividade e sua possibilidade de adaptação, seria um ponto muito interessante para complementar este trabalho, bem como uma avaliação geral dos custos operacionais do funcionamento da planta em operação e após as possíveis modificações, a fim de decidir sobre as mudanças no processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIA. Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação. **Indústria da alimentação - principais indicadores econômicos.** Disponível em: <<http://www.abia.org.br/vst/faturamento.pdf>>. Acesso em: 02 de outubro 2020.
- ABIQ. Associação Brasileira das Indústrias de Queijo. 2007. <<http://www.abiq.com.br>>. Acesso em: 02 de outubro 2020.
- BRUNOZI JÚNIOR, A.C.; ABRANTES, L.A.; FERREIRA, M.A.M.; GOMES, A.P. Mercado e Tributação: Uma Abordagem Teórica sob a Perspectiva de Estruturas de Mercado na Cadeia Agroindustrial do Leite. *Revista Econômica do Nordeste*, v.43, n.1, p.93-108, 2012.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, X.; HUNTER, J. S., *Statistics for experiments*, J. Wiley & Sons, 1978.
- CANADA. *Pinch Analysis for the Efficient Use of Energy, Water and Hydrogen*. Canada: Natural Resource Canada, 2003. 64 p.
- CALEGARE, A. J. A. *Introdução ao delineamento de experimentos*. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 2009.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Guia Técnico Ambiental da Indústria de Produtos Lácteos – Série P+L*. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/documentos/laticinio.ppd>. Acesso em 30 de outubro de 2020.
- COKER, A. K. *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants 4ª Edição*. Elsevier Gulf Professional Publishing, 2014
- EL-HALWAGI, M. M. *Process integration*. San Diego: Elsevier, 2006.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2015*. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 296p.
- EPE- Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional*. Ministério de Minas e Energia-MME, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2021.
- FELLOWS, P. *FOOD PROCESSING TECHNOLOGY- Principles and Practice*. 2ª Edição. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2000.
- FIEMG (Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais)- *GUIA TÉCNICO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS*, 2015.
- FONSECA, J. C. J. *Análise de Ecoeficiência do Consumo de Água e Energia na Indústria de Laticínios no Licenciamento Ambiental no Estado da Bahia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2017.
- GUNDERSEN, T. *A Process Integration Primer*. Second. ed. Trondheim, NO: SINTEF Energy Research, 2002.
- GUTIERREZ, C. G. C. C. *Análise Dinâmica de um Processo Contínuo de Pasteurização em Trocadores de Calor a Placas*. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- HALLIDAY, D. 1916- *Fundamentos de Física*, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. Rio de Janeiro, LTC, 2009.
- HANOUN, A. ANTARI, L. BATTI, M. *Implementation of Pinch Technology in Local Industry as an Energy Management Tool*. An-Najah National University, Nablus, 2017.
- JÚNIOR, C. C. F. *Integração Energética da etapa de extração de óleo de soja utilizando análise pinch*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2009.

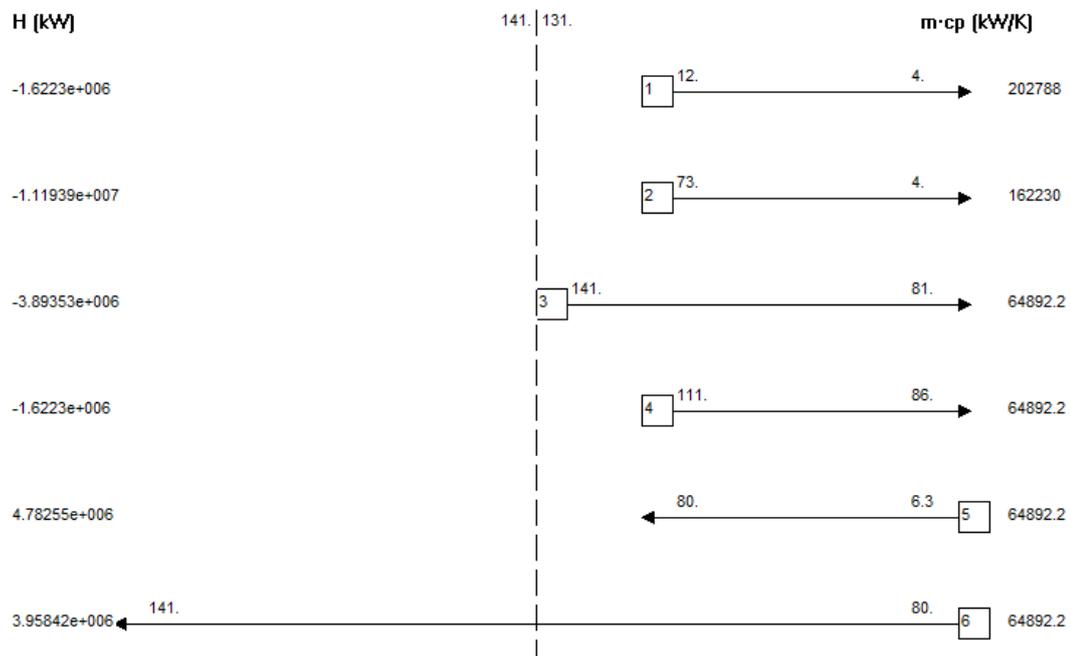
- KEMP, I. C. Pinch Analysis and Process Integration: a user guide on process integration for the efficient use of energy. 2 ed. Elsevier, 2007. 396 p
- LINNHOF, B., FLOWER, J. R. Synthesis of heat exchanger networks: 1. Systematic generation of energy optimal networks. *AIChE J*, v. 24, n. 4, p. 633-642, Jul. 1978.
- LINNHOF, B.; HINDMARSH, E. The Pinch design method for networks. *Chemical Engineering Science*, v.38, n.5, p.745-763, 1983.
- LINNHOF, B. User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, The Institution of Chemical Engineers, UK, 1994.
- MADUREIRA, C. D. Integração Energética aplicada a uma Planta de Fertilizantes visando a redução de consumo de utilidades quente e fria. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2018.
- MDIC- Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços - Cadeia Agroindustrial do Leite no Brasil Diagnóstico dos Fatores Limitantes à Competitividade. Brasília, 2018.
- MTE. Ministério do Trabalho e Emprego. Relação Anual de Informações Sociais – RAIS. Brasília: RAIS. Disponível em: <<http://bi.mte.gov.br/>>. Acesso em: 15 de outubro 2020.
- OLIVEIRA, A. B. Avaliação da Eficiência Energética em um Sítio Industrial utilizando Análise Pinch com Heurísticas e Técnicas de Projeto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- OLIVEIRA, C. M. Integração energética da biorrefinaria de cana-de-açúcar para produção de etanol de primeira e segunda geração e energia elétrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.
- PERLINGEIRO, C.A. G. Engenharia de processos : análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos. 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2018.
- PRAKASH, S. HUPPERTZ, T. KARVCHUK, O. DEETH, H. Ultra-high-temperature processing of chocolate flavoured milk. *Journal of Food Engineering*, Volume 96, Issue 2, 2010. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.008.
- PROCKNOR, Celso. Utilidades. *Revista Stab*, 2004. Disponível em: <<https://www.procknor.com.br/br/artigos/utilidades>>. Acesso em: 15 de janeiro 2021.
- SEIDER, W. D. SEADER, J. D. LEWIN, D. R. Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation. 3ª Edição. John Wiley & Sons, Hoboken, 2009.
- SILVA, M. L. Aplicação da análise "Pinch" na síntese de Redes de Trocadores de Calor Flexíveis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- SILVA, P. C. Gestão de Energia na Indústria de Laticínios. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2014.
- SILVA, P. H. F. Leite- Aspectos de Composição de Propriedades. *Revista Química Nova na Escola*. Novembro de 1997. Disponível em: <<http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc06/quimsoc.pdf>>. Acesso em: 01 de fevereiro 2021.
- SOUZA NETO, J. N. Metodologia para aplicação de integração energética numa planta industrial. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 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 (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2018.
- TURTON, R., BAILIE, R. C., WHITING, W. B., SHAEIWITZ, J. A. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Process. 4ª edição. Estados Unidos da America: Prentice Hall, 2018.
- Walmsley T.G., Walmsley M.R.W., Neale J.R., Atkins M.J., 2015, Pinch analysis of an industrial milk evaporator with vapour recompression technologies, *Chemical Engineering Transactions*, 45, 7-12. DOI:10.3303/CET1545002

APÊNDICE A

Procedimento de projeto da Rede de Trocadores de Calor para o $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1º passo- Construção do Diagrama de grade, apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de grade para $\Delta T_{\min} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Da autora (2021).

2º passo- Divisão das regiões do *Pinch*.

3º passo- Pareamento das correntes.

Acima do *Pinch*, obteve-se a configuração conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Corrente acima do *Pinch*.

Corrente	T (°C)	T <i>pinch</i> (°C)	CP (KW/K)	ΔH (KW)
6	141	131	64.892,16	648.921,60

Fonte: Da autora (2021).

Critérios de pareamento $\left\{ \begin{array}{l} N_Q \leq N_F \\ \dot{m}c_{p,q} \leq \dot{m}c_{p,f} \end{array} \right.$

Não há nenhuma possibilidade de pareamento, pois existe apenas uma corrente. Assim inseriu-se o trocador H7 (Figura 2) como trocador de calor de utilidade quente para suprir a demanda de 648.921,60 KW da corrente 6 (fria).

Abaixo do *Pinch*, obteve-se a configuração conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Correntes abaixo do *Pinch*.

Corrente	T^{pinch} (°C)	T (°C)	CP (KW/K)	ΔH (KW)
1	12*	4	202.788,00	1.622.304,00
2	73*	4	162.230,40	11.193.897,60
3	141	81	64.892,16	3.893.529,60
4	111*	86	64.892,16	1.622.304,00
5	80*	6,3	64.892,16	4.782.552,19
6	131	80	64.892,16	3.309.500,16

*Temperaturas fora do *Pinch*.

Fonte: Da autora (2021).

$$\text{Critérios de pareamento} \left\{ \begin{array}{l} N_Q \geq N_F \\ \dot{m}c_{p,q} \geq \dot{m}c_{p,f} \end{array} \right.$$

Observando os critérios de pareamento, temperaturas das correntes e ΔH 's o pareamento de maior aproveitamento energético será entre as correntes 3 e 6 (Tabela 3). Assim inseriu-se o trocador 1 (Figura 2).

Tabela 3 - Primeiro pareamento.

Pareamento	ΔH_q (KW)	ΔH_f (KW)	$\Delta H_q - \Delta H_f$ (KW)
3x6	3.893.529,6	3.309.500,16	584.029,44

Fonte: Da autora (2021).

A corrente 6 foi esgotada, o que leva à nova configuração do sistema, detalhada na Tabela 4.

Tabela 4 - Nova configuração das correntes (1).

Corrente	T <i>pinch</i> (°C)	T (°C)	CP (KW/K)	ΔH (KW)
1	12*	4	202.788,00	1.622.304,00
2	73*	4	162.230,40	11.193.897,60
3	90*	81	64.892,16	584.029,44
4	111*	86	64.892,16	1.622.304,00
5	80*	6,3	64.892,16	4.782.552,19

Fonte: Da autora (2021).

A temperatura atualizada da corrente 3 foi calculada utilizando a Equação 1, de variação de entalpia. A mesma equação foi utilizada para todos os casos onde as correntes pareadas não foram energeticamente esgotadas.

Analogamente à análise anterior, pareia-se as correntes 4 e 5 (Tabela 5), com isso inseriu-se o trocador 2 (Figura 2).

Tabela 5 - Segundo pareamento.

Pareamento	ΔH _q (KW)	ΔH _f (KW)	ΔH _q -ΔH _f (KW)
4x5	1.622.304,00	4.782.552,19	-3.160.248,19

Fonte: Da autora (2021).

A corrente quente 4 foi esgotada, logo a corrente 5 deve ser pareada com outra corrente, para não infringir a regra que proíbe o uso de utilidades quentes abaixo do *Pinch*.

Tem-se então a configuração apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Nova configuração das correntes (2).

Corrente	T <i>pinch</i> (°C)	T (°C)	CP (KW/K)	ΔH (KW)
1	12*	4	202.788,00	1.622.304,00
2	73*	4	162.230,40	11.193.897,60
3	90*	81	64.892,16	584.029,44
5	55*	6,3	64.892,16	3.160.248,19

Fonte: Da autora (2021).

O pareamento viável é entre as correntes 2 e 5 (Tabela 7) e assim adiciona-se o trocador 3 (Figura 2).

Tabela 7 - Terceiro pareamento.

Pareamento	ΔH_q (KW)	ΔH_f (KW)	$\Delta H_q - \Delta H_f$ (KW)
2x5	11.193.897,60	3.160.248,19	8.033.649,41

Fonte: Da autora (2021).

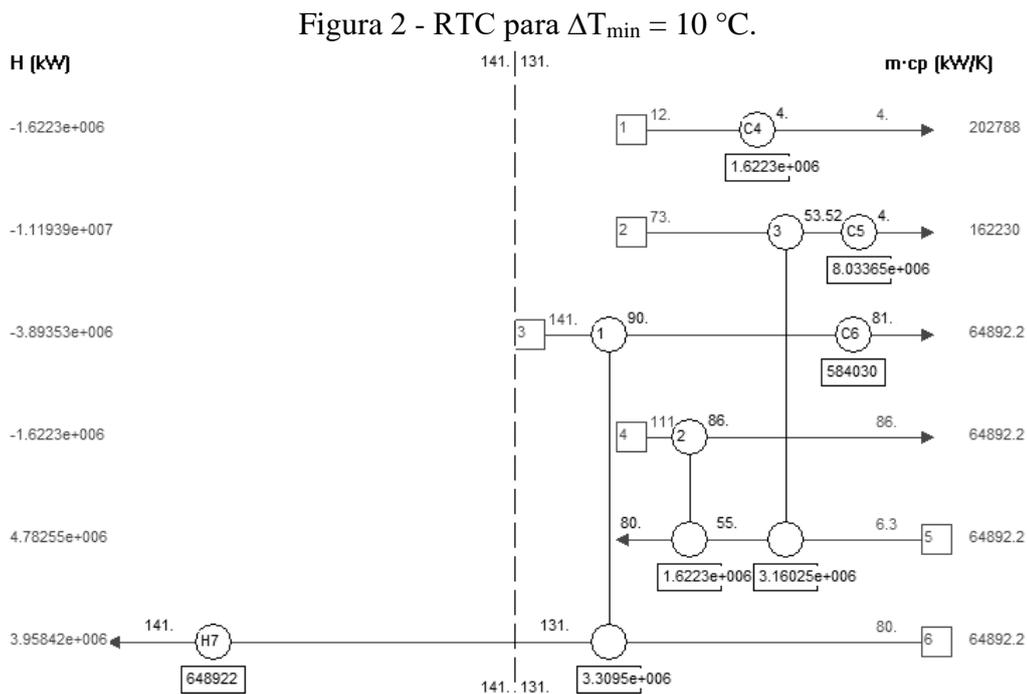
Com a corrente 5 esgotada, restam apenas as correntes quentes e suas respectivas cargas térmicas a serem supridas pelos trocadores de calor com utilidades frias C4, C5 e C6 respectivamente (Figura 2), conforme descrito a Tabela 8.

Tabela 8 – Cargas térmicas finais a serem supridas por utilidades frias.

Corrente	T^{pinch} (°C)	T (°C)	CP (KW/K)	ΔH (KW)
1	12*	4	202.788,00	1.622.304,00
2	53,52*	4	162.230,40	8.033.649,41
3	90*	81	64.892,16	584.029,44

Fonte: Da autora (2021).

A Figura 2 ilustra a Rede de Trocadores de calor final para o caso descrito.



Fonte: Da autora (2021).