

ESTUDO DA ANÁLISE PINCH APLICADA À INDÚSTRIA DE ÁLCOOL

Agilson dos Santos¹

Aline Moraes¹

Mario Eusebio Torres Alvarez²

Universidade São Francisco

agilson.santos@ppg.com

likamoraes06@hotmail.com

¹Alunos do Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Swift

²Professor Orientador, Curso de Engenharia Química, Universidade São Francisco; Campus Swift.

Resumo. A integração energética, a partir da metodologia Pinch desenvolvida por Linnhoff, é uma ferramenta aplicada em diversos ramos industriais, baseada na primeira e segunda lei da termodinâmica. Neste trabalho propõe-se a síntese de uma rede de trocadores de calor, com máximo aproveitamento energético entre as correntes de um processo, visando minimizar o consumo de utilidades externas quentes e frias a partir de metas base e o ponto Pinch, determinados através de ferramentas gráficas (curvas compostas) e analíticas (cascata térmica), que indicam a direção a ser seguida, em busca de um ótimo global. Assim, foi desenvolvido a integração energética através do método Pinch para o processo de produção convencional de álcool a partir da cana, sendo possível recuperar 65,5 MW de energia entre as correntes do processo, através da síntese de uma rede com 15 trocadores de calor, gerando uma economia em utilidades quente e fria de 80,8% e 82,9% respectivamente, quando comparado ao processo sem nenhuma integração energética. Foi possível constatar a eficácia do método em questão e os diversos benefícios tanto econômicos como ambientais advindos de sua aplicação.

Palavras-chave: tecnologia Pinch, integração energética, etanol, trocadores de calor.

Introdução

A energia elétrica é um dos bens mais valiosos e está diretamente ligada ao desenvolvimento econômico de uma nação (FAPESP, 2010). Quando se trata de indústrias químicas, petroquímicas, a questão energética tem se tornado vital, sendo muitas vezes o insumo principal da produção.

A demanda por energia se intensificou após as revoluções industriais e o crescente desenvolvimento econômico, trazendo a preocupação em relação ao uso sustentável e eficiente da energia. Desde então, surgiram ações voltadas à conservação, maior eficiência no uso e diversificação da matriz energética (BRASIL, 2011). A partir desse cenário, o campo de estudo e desenvolvimento de integração energética se intensificou e ganhou mais importância nos projetos industriais.

A recuperação de calor, deu origem ao campo de integração de processo aplicado às indústrias, desenvolvido na década de 1980 por B. Linnhoff, surgindo o chamado ponto Pinch.

Metodologia Pinch

É um método de análise térmica que se baseia na primeira e segunda lei da termodinâmica, partindo do princípio de que a energia deve ser conservada, e o calor flui em apenas uma direção. O método utiliza ferramentas gráficas e analíticas, para definir metas base e o ponto Pinch, que auxiliam na síntese de uma rede de trocadores de calor, com máxima troca térmica, além de vantagens econômicas e ambientais (SOUZA NETO, 2005).

O ponto Pinch é o ponto crítico, no qual qualquer troca térmica entre as correntes passando por ele, acarreta em consumo adicional de utilidades quente e fria, violando o consumo mínimo de utilidades pretendido. Assim, o ponto Pinch divide a análise em duas partes termicamente independentes, pois não há fluxo de calor através dele, formando uma região acima do Pinch (troca calor com utilidades quentes) e abaixo do Pinch (troca calor com utilidades frias).

A partir disso, são definidos princípios básicos de aplicação do método para garantir o consumo mínimo de utilidades: não inserir utilidades frias na região acima do Pinch; não inserir utilidades quentes na região abaixo do Pinch; não transferir calor através do ponto Pinch (KEMP, 2007).

Em processos químicos é comum ter correntes que precisam ser aquecidas e resfriadas. As correntes que precisam ser aquecidas são denominadas frias e as correntes que precisam ser resfriadas são denominadas quentes, independentemente de suas temperaturas de origem. A metodologia em questão, analisa a forma mais eficiente de troca térmica entre as correntes, iniciando a análise a partir do ponto Pinch, segundo regras elaboradas por Linnhoff e Hindmarsh (1983), uma síntese de rede de trocadores de calor é proposta, visando alcançar metas estabelecidas previamente. Somente quando as trocas térmicas entre as correntes não são possíveis ou desejáveis, utilidades externas quentes e frias (usualmente vapor e água) são adicionadas para suprir a demanda energética restante.

A obtenção das metas referenciais para análise Pinch, se dá através do método analítico (cascata térmica), e do método gráfico (curvas compostas) referente a um $\Delta T_{\min}$, pré-determinado entre as correntes envolvidas (GUNDERSEN, 2002).

É fundamental em qualquer projeto de rede de trocadores de calor, o estabelecimento de uma diferença mínima de temperatura entre as correntes ($\Delta T_{\min}$), que deve ser ajustada de forma a estabelecer um equilíbrio econômico entre recuperação de calor e consumo de utilidades. É comum adotar $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$ (LINNHOFF; AHMAD, 1989, 1990).

Método analítico -Cascata Térmica

A determinação do consumo mínimo de utilidades e o ponto Pinch, pode ser feita a partir da construção do método analítico apresentado por Linnhoff e Flower (1978), a partir do qual se define a denominada cascata térmica. São definidos os intervalos de temperaturas nos quais as correntes quentes e frias do processo podem trocar calor entre si, para manter a diferença mínima de temperatura ($\Delta t_{\min}$) pré-estabelecido, as temperaturas de cada intervalo s ajustadas, somando-se um valor de $\Delta t_{\min}/2$ para as temperaturas das correntes frias, e subtraindo-se $\Delta t_{\min}/2$ para as temperaturas das correntes quentes (SMITH, 2005).

A capacidade térmica e carga térmica de cada intervalo de temperatura (i) são calculadas, assim como também o fluxo de calor que vai de um nível superior para o nível inferior da cascata térmica. Com a hipótese inicial de que não há nenhuma fonte de energia externa proveniente de utilidade quente, é possível obter a cascata térmica inviável apresentando fluxos de calor negativos, o que implica na violação da segunda lei da termodinâmica, que determina que o calor flui de um corpo quente para um corpo frio e não ao contrário (ÇENGEL, 2009).

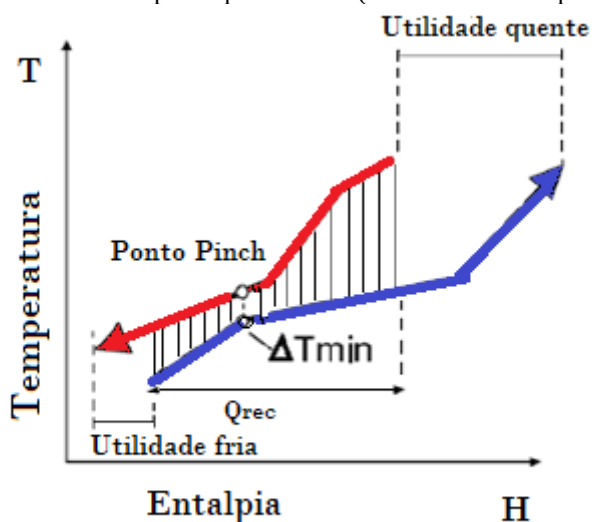
TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Uma nova cascata térmica viável pode ser obtida, identificando o maior valor negativo referente ao fluxo de energia (cascata inviável), que deve ser atribuído ao consumo mínimo de utilidade quente para o cálculo de uma nova cascata térmica viável. A posição do ponto Pinch é identificada pela temperatura na qual o fluxo de calor é igual a zero, e o consumo mínimo de utilidades frias é indicado a partir do fluxo de calor que deixa o último intervalo de temperatura (SMITH, 2005).

Método gráfico -Curvas Compostas

O método gráfico também possibilita a determinação das metas para a análise Pinch. Introduzido por Umeda T.et al (1978), as curvas compostas são a combinação de todas as correntes quentes do processo em uma curva, e de todas as correntes frias em outra. São obtidas pela soma de todas as capacidades térmicas disponíveis em cada intervalo de temperatura comum. A região vertical compreendida entre as curvas (região onde as curvas estão sobrepostas), na Figura 2, representa a possibilidade de recuperação de energia (Q_{rec}) entre elas, onde o calor pode ser transferido entre as próprias correntes quentes e frias, sem demandar utilidades. A região onde a curva composta quente não está sobreposta pela curva composta fria indica necessidade de utilidades frias. Analogamente para a curva composta fria, há a indicação da necessidade de utilidades quentes. O ponto onde as curvas apresentam a menor distância é identificado como ponto Pinch (KWONG,2013).

Figura 2- Curva composta quente e fria (Fonte: Elaborado pelo autor)



Número mínimo de unidades de troca térmica

Outra meta a ser definida é o número mínimo de unidades de troca térmica. Segundo Kemp (2007), o número de unidades de troca térmica (U) afeta diretamente o custo de capital de uma rede de trocadores de calor. É calculado segundo teorema de Euler para redes, e aplicado acima e abaixo do ponto Pinch.

Síntese da Rede de Trocadores de Calor

Para a elaboração de uma rede de trocadores de calor, é utilizado o diagrama de grade, introduzido por Linnhoff e Flower (1978). Nessa representação, as correntes quentes são agrupadas no topo, simbolizadas por setas no sentido esquerda-direita a partir de suas

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

temperaturas de entrada e chegando nas temperaturas alvo. As correntes frias logo abaixo do grupo de correntes quentes, têm as setas no sentido oposto, a transferência de calor entre duas correntes, caracterizada pela existência de um trocador de calor, demonstrada por dois círculos brancos ligados por uma linha vertical; e um círculo branco com a letra h, de quente (*hot*), ou c, de fria (*cold*), indicando o uso de utilidade quente ou fria, respectivamente

Regras para a síntese da rede de trocadores de calor (RTC)

O projeto da rede de trocadores de calor deve ser iniciado próximo ao ponto Pinch, onde se encontra como limitante mais crítico da troca de calor entre as correntes do processo. Linnhoff e Hindmarsh (1983) propuseram regras que foram seguidas no projeto da rede de trocadores de calor para região próxima ao Pinch:

- **Divisão acima e abaixo de Pinch:** O problema deve ser dividido em duas regiões, acima e abaixo do Pinch. Essas regiões devem ser tratadas isoladamente, garantindo a não transferência de calor através do Pinch;

- **Número de correntes quentes e frias:** O número de correntes quentes (N_q) na região acima do Pinch deve ser menor ou igual ao número de correntes frias (N_f) na região acima do Pinch. Analogamente para a região abaixo do Pinch, o número de correntes quentes (N_q) deve ser maior ou igual ao número de correntes frias (N_f). Caso contrário, deve-se dividir correntes até que a igualdade ocorra. Resumindo, tem-se:

$$N_q \leq N_f \text{ (acima do ponto Pinch)}$$

$$N_q \geq N_f \text{ (abaixo do ponto Pinch)}$$

- **Inequações de CP (capacidade térmica):** Acima do Pinch, deve-se combinar uma corrente quente com CP menor ou igual ao da corrente fria. Caso contrário, deve-se dividir correntes quentes ou frias até que a regra possa ser seguida. Analogamente, na região imediatamente abaixo do ponto Pinch, deve-se combinar uma corrente quente com CP maior ou igual ao da corrente fria. Resumindo, tem-se:

$$CP_q \leq CP_f \text{ (acima do Pinch)}$$

$$CP_q \geq CP_f \text{ (abaixo do Pinch)}$$

Segundo Linnhoff, a integração energética entre geradores, dissipadores e trocadores de calor, é o procedimento mais eficaz para se alcançar a economia de energia, podendo chegar a 60% dos gastos originais, em casos onde não foi empregada nenhuma técnica de integração de processos (CANMET, 2003). A metodologia é reconhecida e utilizada por diversos setores como: químico, petroquímico, celulose e papel, alimentos e bebidas, aço e metalurgia, entre outros. Apresenta diversas aplicações, tanto em projeto de novas instalações como em projetos de readequação (KEMP, 2007).

Análise do caso base – Produção de álcool convencional

A indústria sucroalcooleira brasileira tem se tornado uma das atividades mais importantes da economia nacional, produzindo açúcar, etanol e energia elétrica para os mercados internos e externos (ENSINAS et al., 2010). Além disso, apresenta grande participação na produção de energia renovável no Brasil, o uso do etanol e bagaço da cana de açúcar, totaliza 41,1% das fontes renováveis brasileiras (IEA 2015).

A integração energética da indústria sucroalcooleira certamente tem um papel fundamental. A partir de uma rede de trocadores de calor, há aproveitamento de energia térmica entre as correntes do processo, o que provoca uma diminuição no consumo de energia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

e na demanda de utilidades externas, proporcionando ganhos econômicos, e ganhos ambientais, devido a redução do uso de água no processo, e redução da eliminação de gases poluentes, provenientes da queima do bagaço usado para geração de energia (DIAS, MODESTO, et al., 2011).

A produção de álcool convencional a partir da cana de açúcar inicia com a limpeza da cana e extração do caldo através de moendas, há o tratamento físico e químico do caldo para eliminação de impurezas, correção do pH e recuperação da sacarose. O caldo é concentrado através de um sistema de evaporador de múltiplos efeitos, e sofre um processo de esterilização, que agora denomina-se mosto. Em seguida ocorre a fermentação alcoólica, etapa que consiste no processo de transformação anaeróbia dos açúcares em etanol (álcool etílico) e gás com auxílio de leveduras. O mosto fermentado é denominado vinho, que passa por uma centrifuga para separação do vinho e da levedura para ser reutilizada; o vinho delevedurado vai para o processo de destilação. A destilação é processo final que visa separar o álcool dos subprodutos, através dos diferentes pontos de ebulição dos componentes presentes. O processo é realizado geralmente em 5 colunas de destilação obtendo-se a vinhaça, o óleo fúsel, álcool de segunda geração, álcool hidratado e álcool anidro.

Segundo Higa (1999) e Salla (2008), as operações de tratamento, hidrólise, evaporação do caldo totalizam 56,1 % do gasto energético total do processo de produção de álcool; seguido de 41,2% referente à operação de destilação, e 1,95% referente à desintegração e moagem da cana. Portanto, as correntes participantes destes processos são muito significativas na integração energética da indústria em questão.

No presente trabalho, foi realizado o estudo da integração energética da indústria sucroalcooleira (especificamente da produção de álcool), que devido a expressiva participação na matriz energética brasileira, e significativa importância da integração energética de seus processos, foi definida como caso base, para a aplicação da metodologia Pinch.

A integração proposta foi realizada a partir de informações, segundo Dias (2008), que apresenta dados de correntes com possibilidade de integração energética, de uma destilaria com capacidade de produção de 33 t/h de álcool, processamento de cana 493 t/h e bagaço gerado 118 t/h. O software HINT 2.2 foi utilizado como ferramenta de auxílio na construção das curvas compostas e do diagrama de grade desenvolvido ao longo da aplicação do método (MARTÍN, et al., 2011).

Além da aplicação da metodologia Pinch no processo de produção do álcool, objetivamos a elaboração de uma rede de trocadores de calor ótima e análise dos ganhos obtidos com a integração proposta.

Metodologia

O presente trabalho foi realizado baseado na metodologia Pinch. As 3 etapas principais da metodologia seguidas neste trabalho são:

1) *Coleta de dados referentes às demandas energéticas do processo de produção do álcool (caso base)*

A coleta de dados para a análise deve conter as seguintes informações a respeito das correntes do processo: vazão mássica ($\dot{m}$), calor específico à pressão constante (c_p), temperatura inicial (T_i), temperatura final (T_f);

Considerando o calor específico da corrente constante, é possível determinar a sua capacidade térmica (CP), conforme Eq.1.

$$CP = c_p \times \dot{m} \quad (1)$$

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

A partir do CP, pode-se calcular a carga térmica (ΔH) da corrente, ou variação de entalpia, de acordo com a Eq.2.

$$\Delta H = CP \times (T_f - T_i) \quad (2)$$

A integração energética proposta neste trabalho, foi realizada segundo trabalho de Dias (2008), que apresenta dados de uma destilaria convencional, que produz álcool a partir da cana de açúcar, com capacidade de produção de 33 t/h de álcool. Cabe ressaltar que as correntes que não apresentam variação significativa de temperatura foram desconsideradas para a análise realizada. Os dados das correntes utilizadas, que apresentam possibilidade de integração, estão presentes na Tabela 1. Foi considerado um $\Delta T_{\min} = 10^\circ\text{C}$ para realização deste trabalho.

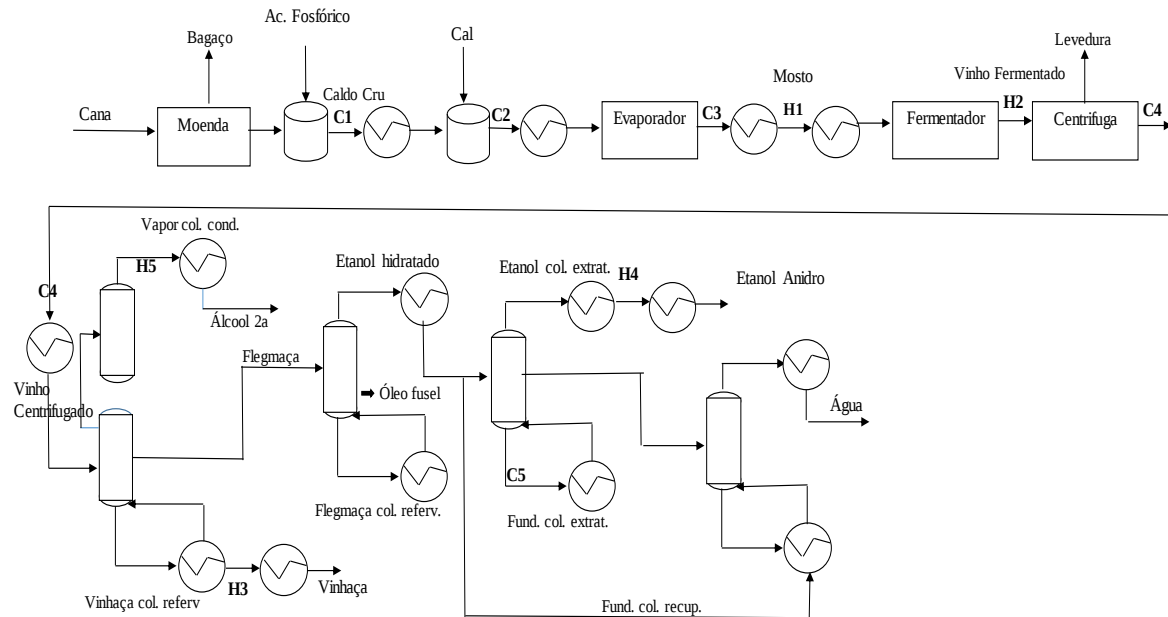
Tabela 1- Dados das correntes do processo: temperaturas iniciais e finais, capacidade térmica, carga térmica da produção convencional de álcool.

Corrente	Tipo	Descrição	Ti (°C)	Tf (°C)	CP (MW/°C)	ΔH (MW)
H1	Quente	Caldo Esterelizado	130	28	0,27	27,54
H2	Quente	Vinho Fermentado	28	24	1,36	5,44
H3	Quente	Vinhaça	112	35	0,35	26,95
H4	Quente	Etanol Anidro (Condensador)	78	35	0,21	9,03
H5	Quente	Vapores Col(condensador)	107	50	0,18	10,26
C1	Fria	Caldo Cru	30	70	0,52	20,80
C2	Fria	Caldo Causticizado	76	105	0,70	20,30
C3	Fria	Caldo para esterilização	96	130	0,27	9,18
C4	Fria	Vinho Centrifugado	28	82	0,42	22,68
C5	Fria	Fundo Col. Extrativa	111	137	0,32	8,32

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Dias (2008)

O fluxograma simplificado do processo convencional de produção de álcool, é apresentado na Figura 1, contendo somente as correntes pertinentes à integração energética realizada.

Figura 1-Fluxograma simplificado do processo convencional de produção de álcool (Fonte: Adaptado de Dias 2008)



2) Determinação de metas de referência para Análise Pinch

Foi obtido as metas referencias para a análise Pinch através dos métodos analítico (cascata térmica), e do método gráfico (curvas compostas) referente a um $\Delta T_{\min} = 10^{\circ}\text{C}$

Método analítico -Cascata Térmica

Foram calculadas a capacidade térmica de cada intervalo de temperatura (i) somando-se as capacidades térmicas das correntes frias (CP_f) e subtraindo-se as capacidades térmicas das correntes quentes (CP_q), de acordo com a Eq. 3.

$$CP_i = \sum CP_f - \sum CP_q \quad (3)$$

A carga térmica (ΔH_i) foi obtida multiplicando-se a capacidade térmica (CP_i) pela diferença de temperatura superior e inferior do intervalo em questão (ΔT_i), conforme mostra a Eq. 4. Foi considerado ΔH_i positivo indicando déficit de energia e ΔH_i negativo indicando excesso de energia (SMITH, 2005).

$$\Delta H_i = (\sum CP_f - \sum CP_q) \times \Delta T_i \quad (4)$$

Com a hipótese inicial de que não há nenhuma fonte de energia externa, proveniente de utilidade quente, foi construído uma cascata de calor (inviável) na qual o calor disponível em cada intervalo de temperatura foi transferido ao intervalo imediatamente inferior. O fluxo de calor (resíduo) foi calculado a partir da Eq 5.

$$Q_{icasc} = Q_{casc\ i-1} - \Delta H \quad (5)$$

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Foi identificado o maior valor negativo referente ao fluxo de energia, que foi atribuído ao consumo mínimo de utilidade quente para o cálculo de uma nova cascata térmica viável, os fluxos de calor foram recalculados.

Método gráfico -Curvas Compostas

As curvas compostas foram obtidas pela soma de todas as capacidades térmicas disponíveis em cada intervalo de temperatura comum, e foram feitas com o auxílio do software HINT 2.2 disponível gratuitamente

Software HINT 2.2

O software HINT 2.2, foi utilizado para auxiliar no desenvolvimento gráfico da integração energética proposta neste trabalho. É uma ferramenta desenvolvida por Ángel Martín na Universidade de Valladolid, que através dos conceitos da análise Pinch, permite a construção das curvas compostas, cascata térmica, e auxilia de forma gráfica no projeto da rede de trocadores de calor, entre outras ferramentas de análise (MARTÍN, et al., 2008). O software está disponível para utilização gratuita. (MARTÍN, et al.,2011)

Número mínimo de unidades de troca térmica

Foi calculado segundo teorema de Euler para redes, através da Eq. 6, onde N é o número de correntes no processo incluindo utilidades. (LINNHOFF, MASON e WARDLE, 1979).

$$U = N - 1 \quad (6)$$

Devido a divisão de uma rede pelo ponto *Pinch*, foi aplicado a Eq. 6 para região acima e abaixo do *Pinch*, como indicado pela Eq. 7 (GUNDERSEN, 2002).

$$U = (N_{\text{acima}} - 1) + (N_{\text{abaixo}} - 1) \quad (7)$$

3) Síntese da Rede de Trocadores de Calor

Para a elaboração de uma rede de trocadores de calor, foi utilizado o diagrama de grade, introduzido por Linnhoff e Flower (1978), cabe ressaltar ainda, que foi realizada com o auxílio gráfico do software HINT 2.2

Resultados e Discussão

A integração energética proposta, foi realizada baseada em dados segundo DIAS (2008), de uma destilaria convencional para produção de álcool.

Método analítico – Cascata térmica.

De acordo com as etapas do método, foi realizado o ajuste das temperaturas das correntes, que foram calculados e estão apresentadas Tabela 2.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

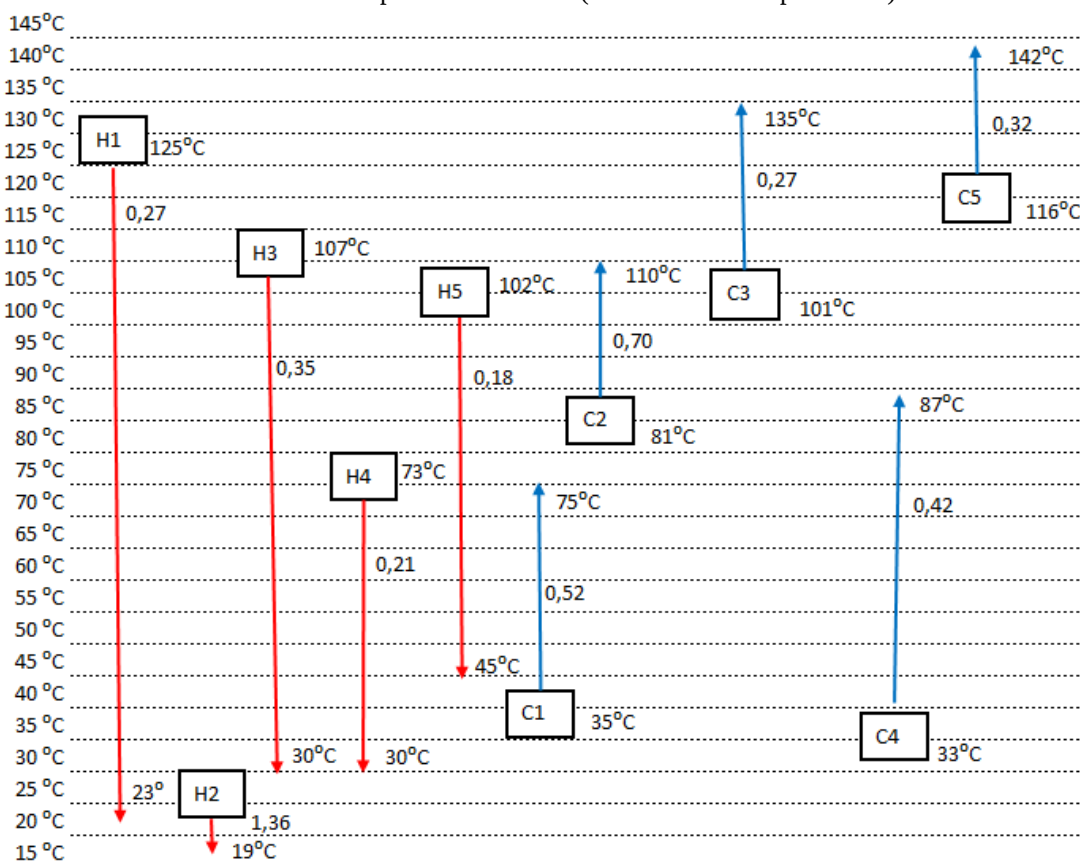
Tabela 2- Dados das correntes do processo: temperaturas iniciais e finais ajustadas, capacidade térmica, carga térmica referentes à produção convencional de álcool.

Corrente	Tipo	Descrição	Ti* (°C)	Tf* (°C)	CP (MW/°C)	ΔH (MW)
H1	Quente	Caldo Esterelizado	125	23	0,27	27,54
H2	Quente	Vinho Fermentado	23	19	1,36	5,44
H3	Quente	Vinhaça	107	30	0,35	26,95
H4	Quente	Etanol Anidro (Condensador)	73	30	0,21	9,03
H5	Quente	Vapores Col(condensador)	102	45	0,18	10,26
C1	Fria	Caldo Cru	35	75	0,52	20,80
C2	Fria	Caldo Causticizado	81	110	0,70	20,30
C3	Fria	Caldo para esterlização	101	135	0,27	9,18
C4	Fria	Vinho Centrifugado	33	87	0,42	22,68
C5	Fria	Fundo Col. Extrativa	116	142	0,32	8,32

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Dias (2008)

Foi estabelecido uma série de intervalos de temperatura dispostos em ordem decrescente, de acordo com a Figura 3, para auxiliar na elaboração da cascata térmica

Figura 3- Correntes e intervalos de temperatura definidos (Fonte: Elaborado pelo autor)



A capacidade térmica de cada intervalo de temperatura (i) foi calculada somando-se as capacidades térmicas das correntes frias (CP_f) e subtraindo-se as capacidades térmicas das correntes quentes (CP_q), de acordo com a Eq. 3; a carga térmica de cada intervalo foi obtida conforme Eq. 4. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Cargas térmicas e capacidades térmicas por intervalo de temperatura

Intervalo	Intervalo de Temperatura(°C)	$\Delta T(^{\circ}C)$	$\sum CP_f - \sum CP_q$ (MW/°C)	ΔH (MW)
1	142 - 135	7	0,32	2,24
2	135 - 125	10	0,59	5,90
3	125 - 116	9	0,32	2,88
4	116- 110	6	0	0
5	110 - 107	3	0,7	2,10
6	107 - 102	5	0,35	1,75
7	102 -101	1	0,17	0,17
8	101 - 87	14	-0,1	-1,40
9	87-81	6	0,32	1,92
10	81-75	6	-0,38	-2,28
11	75-73	2	0,14	0,28
12	73 -45	28	-0,07	-1,96
13	45-35	10	0,11	1,10
14	35-33	2	-0,41	-0,82
15	33-30	3	-0,83	-2,49
16	30-23	7	-0,27	-1,89
17	23-19	4	-1,36	-5,44

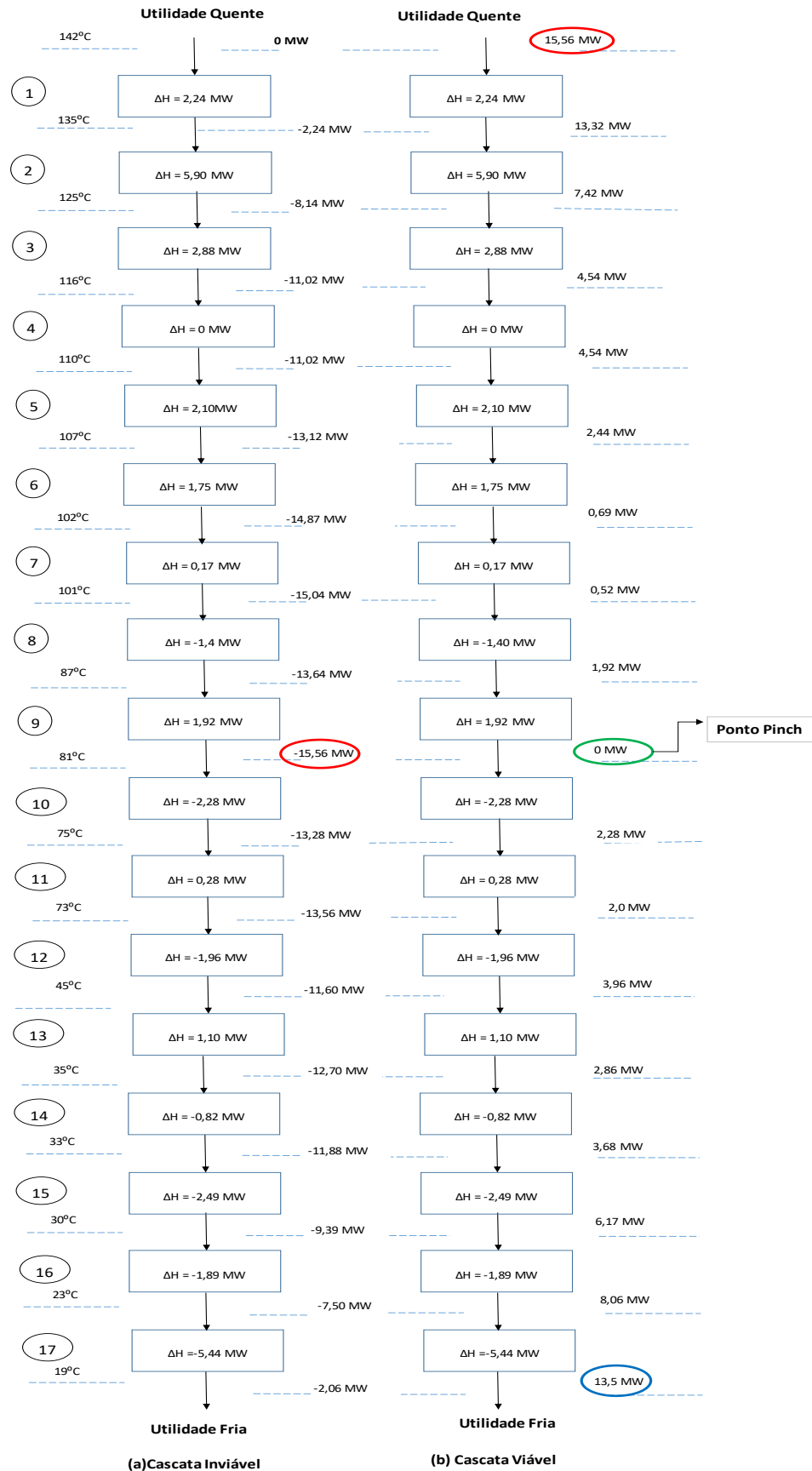
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da hipótese inicial de que não há fonte de energia externa proveniente de utilidade quente, foi realizado o cálculo da cascata térmica inicial (inviável) apresentada na Figura 4 (a). Nela, foi determinado o fluxo de calor entre os intervalos de temperatura, a partir da Eq. 5. O maior valor negativo referente ao fluxo de energia obtido na cascata inviável, foi de 15,56 MW, este valor é referente ao consumo mínimo de utilidade quente para a construção de uma nova cascata viável, apresentada na Figura 4 (b); que foi calculada inserindo este valor no primeiro intervalo de temperatura, a fim de evitar fluxos de calor negativos, que não obedecem a segunda lei da termodinâmica, segundo Çengel (2009).

Os fluxos de calor referentes a cascata térmica viável foram calculados a partir da Eq. 5. Foi verificado o consumo mínimo de utilidade fria de 13,5 MW. A posição do ponto *Pinch* foi identificada a partir da temperatura na qual o fluxo de calor foi igual a zero, em $T=81^{\circ}C$. Por se tratar de uma temperatura deslocada, as temperaturas *Pinch* reais das correntes quentes e frias são, respectivamente, $86^{\circ}C$ e $76^{\circ}C$.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

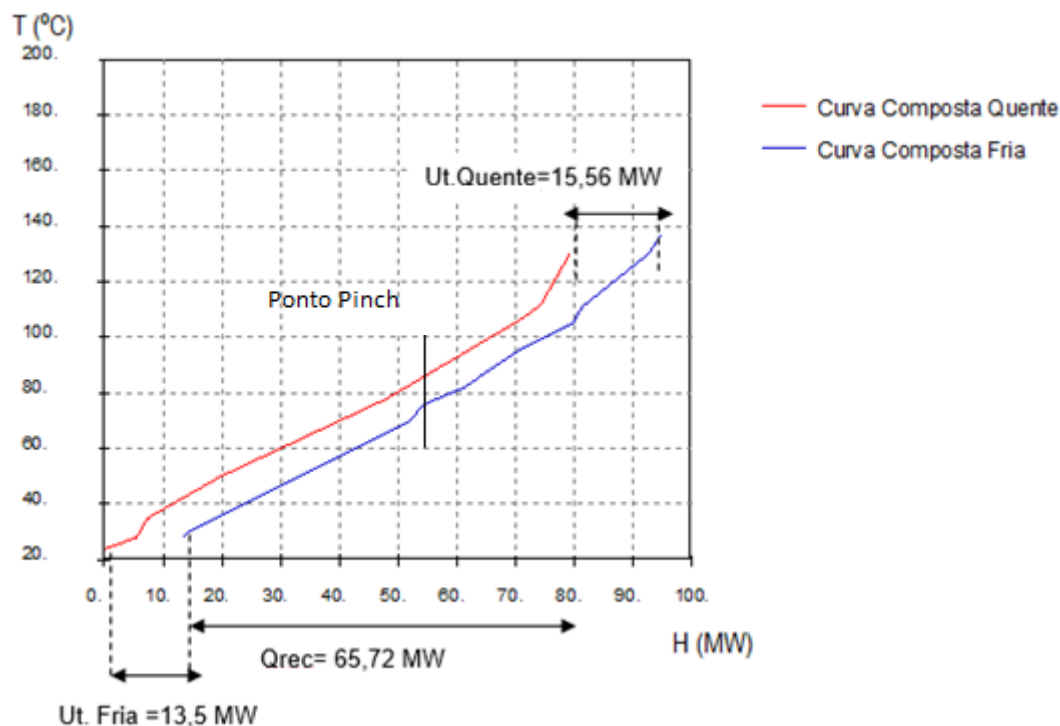
Figura 4-(a) Cascata térmica inviável para recuperação de calor; **(b)** Cascata térmica viável (Fonte: Elaborado pelo autor)



Método gráfico (Curvas Compostas)

A demanda mínima energética e o ponto Pinch também podem ser determinados pelo método gráfico. Os dados das correntes foram inseridos no software HINT 2.2, obtendo-se as curvas compostas presentes na Figura 5.

Figura 5- Curvas compostas referente ao caso base (Fonte: Elaborado pelo autor)



Analisando as curvas compostas obtidas, verifica-se que a máxima recuperação de calor entre as correntes (Q_{rec}) corresponde a $65,72 \text{ MW}$ (região onde as curvas quente e fria estão sobrepostas). É necessário inserir $13,5 \text{ MW}$ de utilidade fria, e $15,56 \text{ MW}$ de utilidade quente, para suprir a demanda energética restante no caso base estudado. O ponto Pinch para correntes quentes é de 86°C e para as correntes frias 76°C , essas duas temperaturas de Pinch tanto para correntes frias como para correntes quentes, são o ponto de partida para a síntese da rede de trocadores de calor.

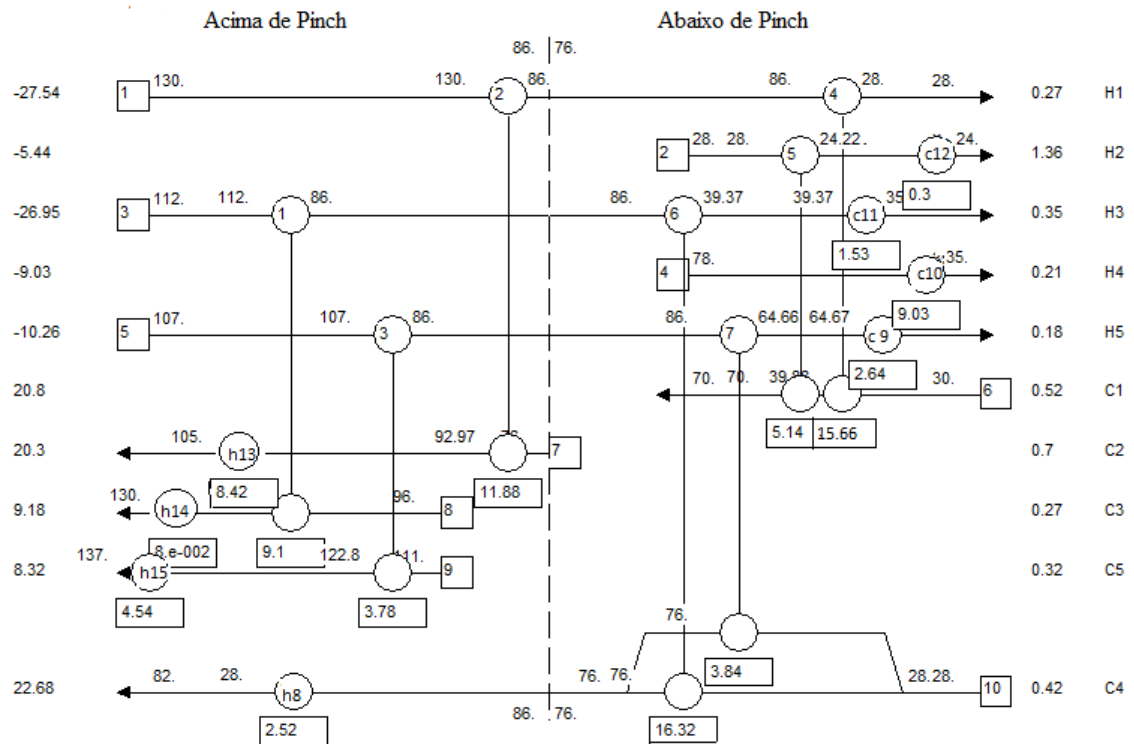
Os resultados obtidos a partir da construção das curvas compostas confirmam aqueles obtidos com o método analítico realizado anteriormente.

Síntese da Rede de trocadores de Calor (RTC)

A análise foi realizada partindo-se do ponto Pinch, e seguindo regras propostas por Linnhof e Hindmarsh, foi possível obter a rede de trocadores de calor, apresentada no diagrama de grade, da Figura 6, feita com o auxílio do software HINT 2.2.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Figura 6- Rede de trocadores de calor obtida para a produção de álcool convencional (Fonte: Elaborado pelo autor)



A Figura 6, apresenta a rede de trocadores de calor obtida para o caso base analisado, indicando as temperaturas de entrada e saída das correntes em cada um dos trocadores de calor, e a energia térmica trocada entre elas. Para promover o aquecimento de cinco correntes frias e o resfriamento de cinco correntes quentes, foi necessário a inserção de 15 trocadores de calor no total, consumo de 15,56 MW e 13,5 MW de utilidades quentes e frias respectivamente

Iniciando a análise da região acima do ponto Pinch, o critério do número de correntes foi obedecido, segundo Linnhoff e Hindmarsh, é possível observar 4 correntes quentes e 3 correntes frias, portanto, não é necessário realizar a divisão de correntes.

Como na região acima do ponto Pinch só devem ser inseridas utilidades quentes, a meta principal é realizar as trocas térmicas de forma que as correntes quentes (H1, H3, H5) sejam resfriadas completamente sem a necessidade de utilidades frias externas.

A partir da Eq 2, foi possível realizar o cálculo da capacidade térmica das correntes quentes, onde:

$$\Delta H(H1) = 0,27 \times (130 - 86) = 11,88 \text{ MW}$$

$$\Delta H(H3) = 0,35 \times (112 - 86) = 9,1 \text{ MW}$$

$$\Delta H(H5) = 0,18 \times (107 - 86) = 3,78 \text{ MW}$$

Assim, foram realizadas as trocas térmicas, de maneira a resfriar as correntes quentes, seguindo as regras do método Pinch, os trocadores de calor envolvidos são 1, 2, 3 apresentados na Figura 6.

A energia recuperada entre as correntes na região acima do ponto Pinch totaliza 24,76 MW. Para atender a demanda energética requerida, foi necessário inserir utilidades quentes (totalizando 15,56 MW) nas correntes frias (C2, C3, C4, C5) representadas pelos trocadores: h13, h14, h15, h8 respectivamente, como pode ser observado na Figura 6.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Analizando a região abaixo do ponto Pinch temos 5 correntes quentes e 3 correntes frias, portanto, o critério do número de correntes foi atendido.

O principal objetivo na região abaixo de Pinch é realizar a trocas térmicas entre as correntes de modo a aquecer as correntes frias (C1, C4), sem a necessidade de adição de utilidades quentes externas, visto que, não é permitido de acordo com a regra do método Pinch.

A partir da Eq 2 é possível determinar a capacidade térmica das correntes frias em questão:

$$\Delta H(C1) = 0,52 \times (70 - 30) = 20,80 \text{ MW}$$

$$\Delta H(C4) = 0,42 \times (76 - 28) = 20,16 \text{ MW}$$

Cabe ressaltar que a corrente C1 não passa pelo ponto Pinch, isso explica o motivo de não ser usado a temperatura fria de Pinch (76 °C) no cálculo da capacidade térmica da corrente.

A corrente C4 fria foi dividida para atender o critério ($CP_q \geq CP_f$). Tornando possível a troca térmica com as correntes H5 e H3.

As trocas térmicas envolvidas no aquecimento da corrente C1 são representadas pelos trocadores de calor 5 e 4, e aquelas envolvidas no aquecimento da corrente C4 são representadas pelos trocadores: 6 e 7.

A energia recuperada na região abaixo do ponto Pinch totaliza 40,96 MW. Foram inseridas utilidades frias (totalizando 13,5 MW) nas correntes quentes (H2, H3, H4, H5) representadas pelos trocadores: c12, c11, c10, c9, respectivamente, na Figura 6.

Foi utilizada a Eq 7, para o cálculo do número mínimo de trocadores de calor. Acima do Pinch existem 7 correntes e a utilidade quente, e abaixo de Pinch existem 8 correntes e a utilidade fria, tem-se:

$$U = (8 - 1) + (9 - 1) = 15 \text{ unidades de troca térmica.}$$

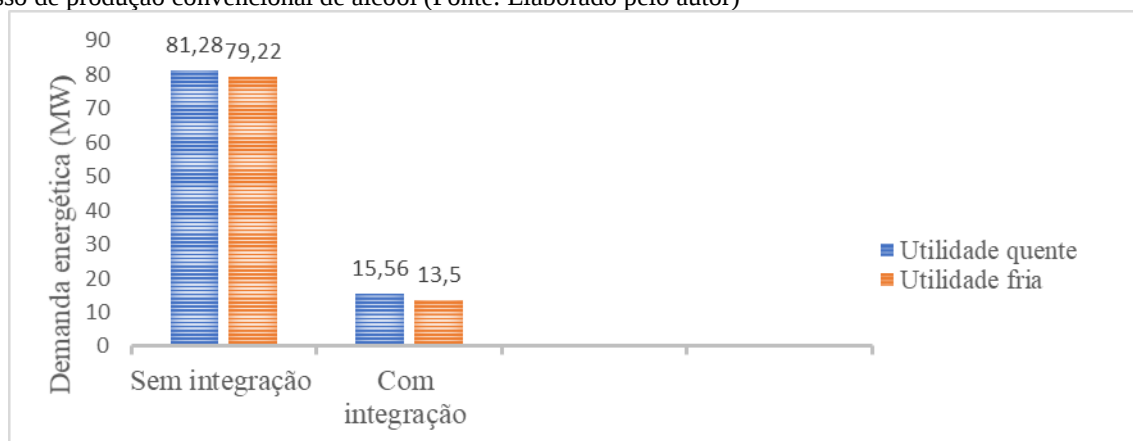
Como pode ser observado, o número mínimo de unidades de troca térmica obtido a partir da Eq.7 é o mesmo que o apresentado na rede de trocadores de calor proposta para o caso base.

Análise da economia energética obtida aplicando o método Pinch

Analizando o caso base estudado, e considerando que não há nenhuma integração energética entre as correntes, ou seja, todo o aquecimento e resfriamento das correntes vêm de utilidades externas, a demanda energética de utilidade quente é 81,28 MW e de utilidade fria é 79,22 MW. Após a integração energética realizada no presente trabalho, temos um aproveitamento energético de 65,72 MW entre as correntes e o requerimento de utilidade quente e fria de 15,56 MW e 13,5 MW respectivamente. O Figura 7 apresenta o gráfico comparativo da demanda energética do processo com integração e sem integração energética

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Figura 7- Gráfico comparativo da demanda energética com integração e sem integração energética para o processo de produção convencional de álcool (Fonte: Elaborado pelo autor)



Com base nos resultados obtidos, foi possível calcular a porcentagem de economia obtida em utilidades quentes e frias referente ao processo estudado. Foi obtida 80,86% de economia em utilidade quente, e 82,96% de economia em utilidades frias, quando se comparado ao processo sem nenhuma integração energética.

Conclusões

Através da aplicação do método Pinch no processo convencional de produção de álcool, foi possível estudar oportunidades de trocas térmicas entre as correntes, aplicação de diversos conceitos termodinâmicos, entender o mecanismo de integração energética e a aplicação das diversas ferramentas que compõe o método.

Com a realização do presente trabalho, foi possível obter uma recuperação energética significativa de 65,5 MW entre as correntes envolvidas no processo, através da elaboração de uma rede de trocadores de calor ótima, gerando uma economia de 80,8% e 82,9 % em utilidades quentes e frias respectivamente, quando se comparado ao processo sem nenhuma integração energética.

Todos os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, e através da aplicação do método Pinch, foi possível constatar a eficácia do método, já consagrado e utilizado como base de projetos em diversos ramos industriais. Proporcionando ganhos significativos de economia energética, vantagens econômicas e ambientais.

Analisando os ganhos trazidos pela aplicação do método de Pinch ao caso base estudado, verifica-se que, além dos ganhos econômicos provenientes do menor requerimento de utilidades externas, a menor demanda energética acarreta também, na redução da eliminação de gases poluentes provenientes da queima do bagaço, usado geralmente, para produzir energia na indústria de álcool convencional. Além disso, com a maior disponibilidade do bagaço da cana, este poderá ser utilizado pela própria indústria na produção de álcool de segunda geração, resultando em mais benefícios e lucratividade para a indústria.

Cabe ainda acrescentar, que a redução do uso de utilidades quentes e frias (água e vapor) acarreta também na redução do uso da água e efluentes aquosos no processo, somando mais um benefício proporcionado pela integração energética.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

Como sugestão para uma possível continuidade deste trabalho, é fundamental realizar a análise da viabilidade econômica da integração energética proposta, realizando um estudo analítico do investimento em equipamentos de troca térmica requeridos no estudo realizado.

Referências Bibliográficas

BRASIL. **Resolução ANP n.7, de 9.2.2011.** [S.l.], 2011. Publicada no diário oficial da nação em 10.2.2011.

CANMET. **Pinch Analysis:** for the Efficient Use of Energy, Water and Hydrogen. Varennes: Energy Technology Centre in Varennes, Natural Resources Canada, 2003. 64 p.

ÇENGEL, Y. A. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. 3^a. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2009. 902

DIAS, M. O. S. et al. **Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems.** Energy, v. 36, 2011. 36913703 determinísticas. 2009. 122p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Janeiro. 2009

DIAS, M. O. S. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000448321>>. Acesso em: 10/08/2017

DIAS, M. O. S.; MODESTO, M.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C. E. V. **Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems.** Energy, v. 36, p.3691-3703, 2011b.

Energy Information Administration: Brazil Overview. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br/out/instituto/rel-anual15.pdf>> Acessado em: 18/04/2017;

ENSINAS, A. V. **Integração térmica e otimização termoeconômica aplicadas ao processo industrial de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar.** 2008. 228f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UNICAMP, Campinas. 2008

ENSINAS, A.V.; SOSA-ARNAO, J.H.; NEBRA, S.A. **Aumento da eficiência energética em plantas produtoras de açúcar, etanol e energia elétrica.** In: CORTEZ, L.A.B. (Coord.). Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010. Parte 4, Cap. 6, p. 583-600

FLOWER, J. R.; LINNHOFF, B. **Thermodynamic analysis in the design of process networks.** Computers and Chemical Engineering, v.3, p.283-291, 1979

GUNDERSEN, T. **A Process Integration Primer.** Second. ed. Trondheim, NO: SINTEF Energy Research, 2002.

TRABALHO DE GRADUAÇÃO - ENGENHARIAS

HIGA, M. **Otimização do consumo de energia em usinas de açúcar e álcool através dos métodos do "Pinch-Point" e Programação Linear. Dissertação (Mestrado)** - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP. 1999.

InterAcademy Council **Academia Brasileira de Ciências 2010** São Paulo.FAPESP. Disponível em:< <http://www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf> > Acessado em 10/04/2017;

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

KWONG, W.H. **Integração Energética: rede de trocadores de calor.** São Carlos: EdUFSCAR, 2013. 152p

LINNHOFF, B., et al. **A user guide on process integration for the efficient use of energy.** Rugby (UK): The Institution of Chemical Engineers, 1982. 247

LINNHOFF, B.; AHMAD, S. **Cost optimum heat exchanger networks – 1.** Minimum energy and capital using simple models for capital cost. Computer Chemical Engineering, v.14, n.7, p.729-750, 1990

LINNHOFF, B.; FLOWER, J. R. **Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks.** AIChE Journal, v. 24, n. 4, p. 633-642, 1978a.

LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. **The Pinch design method for networks.** Chemical Engineering Science, v.38, n.5, p.745-763, 1983

LINNHOFF, B.; MASON, D. R.; WARDLE, I. **Understanding heat exchanger networks.** Computer Chemical Engineering, v.3, p.295-302, 1979

MARTÍN, Á. (2011). HINT, 2.2. Disponível em <<http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4215/innhold/software.htm>> Acesso em: 12/07/17;

MARTÍN, Á. e Mato, F. A. (2008). **Hint: An educational software for heat exchanger network.** Education for Chemical Engineers, v. 3, p. e6-e14, 2008.

SALLA, D.A. **Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho.** 2008. 168f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciência Agronômicas, Universidade Estadual Paulista de Botucatu, Botucatu, SP. Disponível em: <http://www.fca.unesp.br/pos_graduacao/teses/PDFs/Arq0279.pdf>. Acesso em: 23/07/17; .

SMITH, R. **Chemical Process Design and Integration.** 2 ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005. 687 p.

SOUZA NETO, J. N. **Metodologia para aplicação de integração energética numa planta industrial.** 2005. 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2005.

UMEDA, T.; ITOH, J.; SHIROKO, K. **Heat exchange system synthesis**. Chem. Engng. Progr., v. 74, 1978. 70-76.