

**AVALIAÇÃO DA INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DE UMA BIORREFINARIA  
UTILIZANDO ANÁLISE *PINCH***

**EVALUATION OF THE ENERGY INTEGRATION OF A BIOREFINERY USING *PINCH*  
ANALYSIS**

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DE UNA BIORREFINERÍA  
MEDIANTE ANÁLISIS *PINCH***



10.56238/revgeov16n5-116

**Boutros Sarrouh**

Doutorado em Biotecnologia Industrial  
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei  
E-mail: bsarrouh@ufsj.edu.br  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7204534064025448>

**Fernanda Carlos Monteiro**

Mestre em Engenharia Química  
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei  
E-mail: fernandacarlosmonteiro23@gmail.com  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5649191640351213>

**Daniel de Freitas Rodrigues**

Mestre em Engenharia Química  
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei  
E-mail: daninhofr@gmail.com  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3029179678516031>

**Renata Carolina Zanetti Lofrano**

Doutorado em Ciências  
Instituição: Universidade Federal de São João del-Rei - Campus Alto Paraopeba  
E-mail: renataczlofrano@gmail.com  
Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5561482457720983>

---

**RESUMO**

O presente trabalho propõe a implementação de uma planta piloto para a produção de xilitol a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Para o cálculo da capacidade de produção da planta proposta, considerou-se uma capacidade de processamento de 5 toneladas de bagaço de cana por dia, resultando na produção de 280 kg/dia de xilitol. Dessa forma, foram utilizados balanços de massa e de energia com o objetivo quantificar todas as correntes de entrada e saída deste processo produtivo. Pelo conceito de biorrefinaria, a planta piloto foi integrada a uma usina de açúcar e em seguida aplicou-se a análise Pinch, visando otimizar o consumo de energia do processo e ao mesmo tempo maximizar sua recuperação. Utilizando as correntes quentes e frias da usina e da planta de xilitol, foi elaborada uma rede de troca de calor para integrar ambos os processos de produção. Conforme os resultados da



avaliação energética, observou-se uma temperatura Pinch de 50°C, um consumo mínimo de 95921 kJ de utilidade quente e 491802 kJ de utilidade fria e uma recuperação de calor de 630330 kJ, ocasionando uma redução 53% no consumo de água na operação de troca de calor.

**Palavras-chave:** Produção de Xilitol. Integração Energética. Análise Pinch. Bagaço de Cana-de-Açúcar.

### ABSTRACT

This work proposes the implementation of a pilot plant for the production of xylitol from sugarcane bagasse. To calculate the production capacity of the proposed plant, a processing capacity of 5 tons of sugarcane bagasse per day was considered, resulting in the production of 280 kg/day of xylitol. Mass and energy balances were used to quantify all input and output streams of this production process. Following the biorefinery concept, the pilot plant was integrated into a sugar mill, and then Pinch analysis was applied to optimize the energy consumption of the process while maximizing its recovery. Using the hot and cold streams from the sugar mill and the xylitol plant, a heat exchange network was developed to integrate both production processes. According to the results of the energy evaluation, a Pinch temperature of 50°C was observed, a minimum consumption of 95921 kJ of hot utility and 491802 kJ of cold utility, and a heat recovery of 630330 kJ, resulting in a 53% reduction in water consumption in the heat exchange operation.

**Keywords:** Xylitol Production. Energy Integration. Pinch Analysis. Sugarcane Bagasse.

### RESUMEN

Este trabajo propone la implementación de una planta piloto para la producción de xilitol a partir de bagazo de caña de azúcar. Para calcular la capacidad de producción de la planta propuesta, se consideró una capacidad de procesamiento de 5 toneladas de bagazo de caña de azúcar por día, lo que resulta en una producción de 280 kg/día de xilitol. Por lo tanto, se utilizaron balances de masa y energía para cuantificar todos los flujos de entrada y salida de este proceso de producción. Siguiendo el concepto de biorrefinería, la planta piloto se integró a un ingenio azucarero, y posteriormente se aplicó el análisis Pinch para optimizar el consumo de energía del proceso y maximizar su recuperación. Utilizando los flujos calientes y fríos del ingenio azucarero y de la planta de xilitol, se desarrolló una red de intercambio de calor para integrar ambos procesos de producción. Según los resultados de la evaluación energética, se observó una temperatura de pinch de 50 °C, con un consumo mínimo de 95 921 kJ de energía caliente y 491 802 kJ de energía fría, y una recuperación de calor de 630 330 kJ, lo que representa una reducción del 53 % en el consumo de agua durante la operación de intercambio de calor.

**Palabras clave:** Producción de Xilitol. Integración Energética. Análisis de Pinch. Bagaço de Cana de Açúcar.



## 1 INTRODUÇÃO

O conceito de biorrefinaria é frequentemente expresso como uma estrutura industrial análoga a uma refinaria, porém tendo como matéria-prima processada a biomassa e não o petróleo e o gás (JONG; JUNGMEIER, 2015). A biomassa como matéria-prima renovável poderá ser empregada na produção de produtos biotecnológicos, tais como biossurfactantes, biocombustíveis, insumos químicos e biológicos. Um dos objetivos de uma biorrefinaria é reduzir a dependência da matéria prima fóssil e minimizar os impactos ambientais causados pelo uso deste insumo.

A busca por um ambiente mais sustentável, vem fazendo com que as empresas pesquisem novas alternativas para a redução dos impactos ambientais gerados em vários setores industriais. O bagaço de cana, maior resíduo gerado pela indústria sucroalcooleira, é proveniente da extração do caldo da cana-de-açúcar (BAN *et al.*, 2021), a utilização desse resíduo possui grandes vantagens como, disponibilização de forma abundante, alto rendimento, fácil coleta e propriedades bem definidas (BAI ET AL., 2021). Para cada hectare de cana-de-açúcar plantada, é possível obter cerca de 270-280 kg de bagaço (PRABHU *et al.*, 2021). A maior utilização do bagaço da cana no Brasil, tem sido para a produção de energia nas caldeiras de usinas, por meio da queima direta (PALMA *et al.*, 2021), a quantidade de bagaço utilizado na queima, é de quase 75%, restando ainda 25% de resíduo que deve ser descartado ou utilizado para outros fins, porém a queima, além de agregar um valor relativamente baixo para esse subproduto (BAI *et al.*, 2021), produz poluições ao ambiente como CO<sub>2</sub> e cinzas. As cinzas são resíduos difíceis de serem descartadas, pois há um número limitado de locais de despejo, outro problema é que quando descartado em locais inapropriados, pode liberar poluentes atmosféricos, como material particulado ou antropogênicos, poluentes que geram riscos à saúde humana, como problemas cardiovasculares e doenças respiratórias (KHAWAJA *et al.*, 2021). Além da queima, é possível produzir etanol de segunda geração (E2G) e o xilitol com o bagaço de cana.

O xilitol (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>O<sub>5</sub>) é uma alternativa à utilização de sacarose (VRIES *et al.*, 2022), pois seu poder adoçante é semelhante, com cerca de 40% menos de calorias (JIANG *et al.*, 2020). O xilitol está entre os 12 compostos obtidos por meio de biomassa com maior valor agregado (KHAWAJA *et al.*, 2021), pois possui benefícios à saúde humana devido ao seu baixo teor de energia, suas propriedades anticancerígenas e sua função anticariogênica (NARISSETTY *et al.*, 2021). Sua utilização tem sido ampla para a produção de cremes dentais e gomas de mascar para a prevenção de cáries, na indústria farmacêutica para tratamentos de doenças como otite média, osteoporose e infecções respiratórias (VRIES *et al.*, 2022) e na indústria alimentícia, para produção de alimentos para pessoas com diabetes, pois ao contrário dos outros açúcares, para ser metabolizado pelo organismo o xilitol não necessita de insulina, sendo melhor tolerado para portadores de Diabetes mellitus do Tipo I e Tipo II (MUSSATTO; ROBERTO, 2002).

Em uma biorrefinaria, o consumo de energia nas diferentes etapas de processo produtivo é



considerado um dos fatores mais importantes para a viabilidade técnica e econômica deste processo. Dessa forma, quanto maior o nível de integração entre as diferentes etapas dos processos, a biorrefinaria torna-se mais sustentável. Sendo assim, maior é a possibilidade da biorrefinaria ter uma produção eficiente energeticamente pela transferência de calor de um processo para outro, provocando uma redução no custo de produção de cada produto gerado (FATIH DEMIRBAS, 2009; OLIVEIRA, 2016).

A transferência de calor entre as diferentes correntes dos processos ocorre por meio de trocadores de calor. Para reduzir então o consumo de utilidades quentes e frias, e por consequência o custo de produção do produto, faz-se então o uso da integração energética. A implementação da integração energética, pode ser realizada por equipamentos já existentes na planta industrial de interesse, resultando em uma economia de custos, redução do consumo de utilidades e redução de emissão de resíduos, que em grandes quantidades geram impactos negativos ao meio ambiente. A integração energética no presente trabalho foi realizada por meio da análise *Pinch*, uma metodologia líder quando se trata de integração de processos (ALHAJRI *et al.*, 2021). A análise *Pinch* é uma integração energética que tem como objetivo atingir as quantidades ótimas de entrada e saída do sistema, pode ser representada de forma gráfica por meio de gráficos da curva composta (CC) ou da grande curva composta (GCC) e de forma algébrica (SU *et al.*, 2020). Essa ferramenta realiza a otimização de recursos, visa o desenvolvimento sustentável, devido ao fato de que na sua implementação o consumo de recursos como água e energia são minimizados (JAIN and BANDYOPADHYAY, 2019).

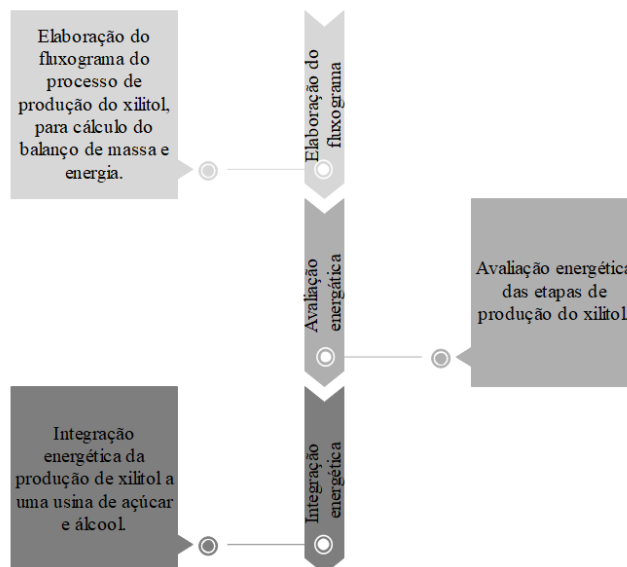
Sendo assim, o objeto desse artigo é estudar a viabilidade da integração energética de uma planta de produção de xilitol a partir do bagaço da cana-de-açúcar integrada a uma usina de açúcar e álcool utilizando a metodologia de análise *Pinch*.

## 2 METODOLOGIA

O estudo de uma planta de produção de xilitol integrada a uma usina de açúcar e álcool foi dividido em três partes: elaboração do fluxograma, avaliação energética e a integração energética, conforme mostra o diagrama da Figura 1.



Figura 1. Diagrama referente as etapas realizadas neste estudo



Fonte: Próprio Autor

## 2.1 ELABORAÇÃO DO FLUXOGRAMA DE PRODUÇÃO DO XILITOL

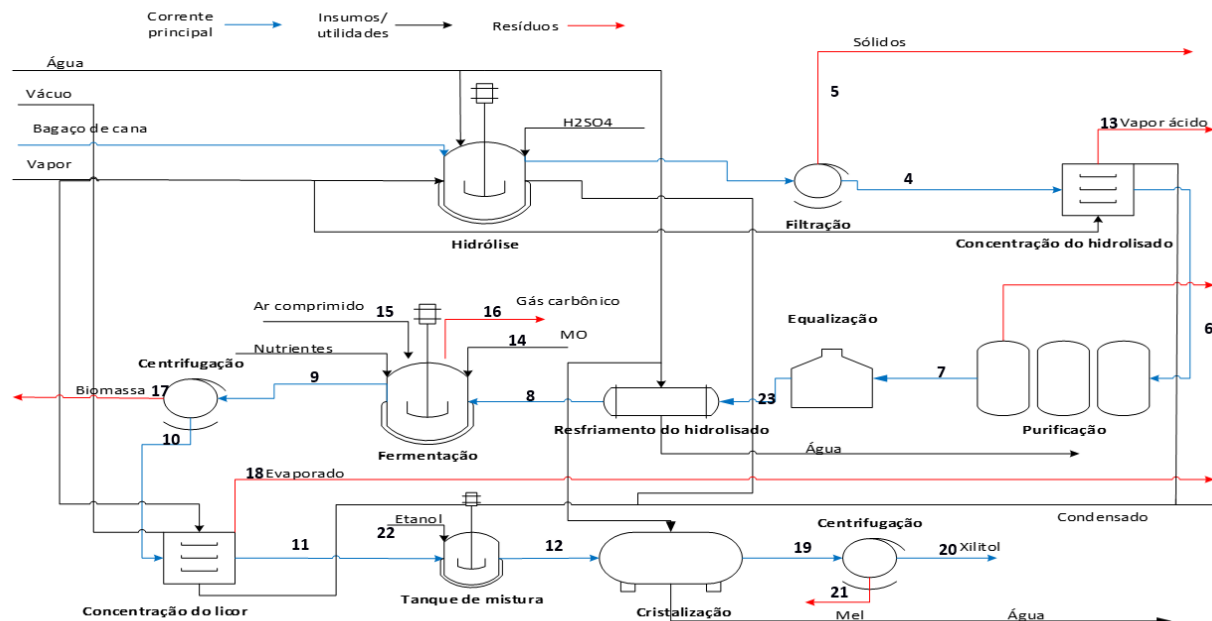
O primeiro passo para a elaboração de todo o processo, é a criação do fluxograma de uma planta produtora de xilitol. O fluxograma, Figura 2, foi elaborado baseado em dados experimentais e teóricos coletados da literatura especializada.

No início do processo de produção do xilitol o bagaço de cana-de-açúcar é encaminhado para a biorrefinaria. A primeira etapa é a hidrólise ácida. Nessa etapa utiliza-se um reator batelada encamisado, operando em regime descontínuo a uma temperatura de 120°C, por um tempo de reação de 10 minutos, e a proporção entre a massa seca de bagaço e o volume de solução ácida de 1:10, com uma conversão de 80% de xilana em xilose, esses dados foram obtidos por meio do trabalho de pesquisa realizado por Sarrouh (2009).

A corrente de saída do reator passa pelo processo de filtração, onde o hidrolisado é separado da torta. O filtro utilizado para a separação é um filtro prensa Tecitec com pressão de 8 bar e eficiência de 85%. Após a separação a torta será encaminhada para o processo de etanol de segunda geração (2G), parte sólida contendo celulose e lignina. E o hidrolisado, parte líquida contendo a xilose segue para a etapa de concentração. A corrente que sai do filtro prensa entra no evaporador de simples efeito, com fator de concentração de 8X (SARROUH, 2009). Nesta etapa ocorre a concentração de xilose no hidrolisado.



Figura 2. Processo industrial da produção de xilitol



Fonte: Próprio Autor

Para a realização da purificação do hidrolisado, utiliza-se colunas de troca iônica para a remoção de 100% do ácido sulfúrico, ácido acético, sulfúrico, furfural e 5-hidroximetilfurfural, 86,44% dos compostos fenólicos e 97,48% da cor do hidrolisado. Esses componentes removidos são tóxicos e podem prejudicar a etapa de fermentação e reduzir o rendimento. A corrente de hidrolisado será enviada para um tanque de equalização, para obtenção de uma maior vazão na fermentação. Antes da etapa de fermentação, é necessário diminuir a temperatura do hidrolisado por um trocador de calor utilizando água (fluido frio) a uma temperatura ambiente para resfriar a solução.

Na fermentação, utiliza-se um fermentador em temperatura ambiente (25-30 °C). É nessa etapa do processo que ocorre a conversão de xilose em xilitol, para isso utiliza-se cepa de levedura *Candida guilliermondii*. Em seguida, na etapa de filtração, ocorre a separação do licor e da torta, a torta é retirada e pode ser utilizada como matéria prima em outros processos, o licor é a parte líquida contendo água e xilitol, a separação apresenta uma eficiente de 80%.

Antes da etapa final de cristalização, é necessário realizar um aumento na concentração de xilitol, por um cozedor. Nessa etapa a água é evaporada a uma pressão de 0,3bar e uma temperatura de 60°C, sua concentração aumenta 5 vezes. Na corrente de saída, adiciona-se etanol na proporção de 50%-50% em massa da água contida no licor. O licor contendo o xilitol líquido agora passa para a etapa de cristalização, na qual ocorre a saturação, dando origem a uma mistura contendo cristais e mel. Logo em seguida, essa mistura passa por uma centrífuga para separar os cristais prontos para o envase e distribuição e o mel que será retornado ao processo para recuperação do xilitol ainda presente nele.

## 2.2 AVALIAÇÃO ENERGETIC

Após a elaboração do fluxograma, foram realizados os cálculos de balanço de massa em todas as etapas do processo. São esses cálculos que possibilitam obter a quantidade de matérias primas necessárias para a produção de xilitol, o dimensionamento dos equipamentos utilizados e a quantidade de outros materiais envolvidos em cada etapa do processo. Os cálculos foram realizados para uma planta piloto com capacidade de 1200 toneladas/ano, equivalente a 5 toneladas/dia de bagaço de cana. A produção ocorre em 240 dias no ano, o restante dos dias é considerado como o período de entressafra, na qual ocorre todas as manutenções planejadas, devido ao uso de ácido sulfúrico danificar tubulações e reatores. Já o balanço de energia foi realizado apenas nas etapas que necessitam de utilidades para aquecer ou resfriar os componentes das correntes ou dos equipamentos. Com esses cálculos, foi estimar a quantidade de utilidades necessárias no processo.

## 2.3 INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

A etapa de integração energética é a última do processo, tem como objetivo de integrar o processo de xilitol a uma usina de açúcar e álcool para maximizar a redução de energia e como consequência reduzir o consumo de utilidades. Essa integração foi realizada com base na análise *Pinch*.

O primeiro passo, foi a seleção das correntes que poderiam participar na integração energética, considerando qualquer restrição do processo. Os dados das correntes selecionados como temperatura inicial e final, a vazão mássica, o calor específico e a definição do das características das correntes, fria ou quente, líquida ou gasosa.

A diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ) estipulada foi de 20°C, pois esse valor adotado apresentou uma redução significativa no consumo de utilidades. E por fim, foram realizados os cálculos de análise *Pinch*. Para a geração dos gráficos, utilizou-se um software gratuito o “*Online Analysis Pinch Tool*”. Nessa etapa, foram obtidas a curva composta (CC), a temperatura *Pinch*, a grande curva composta (CGC) e o consumo máximo e mínimo de utilidades. Com base nos resultados obtidos, redes de trocadores de calor foram propostas para que a demanda energética mínima necessária no processo de produção do xilitol fosse atendida.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 BALANÇO DE MASSA DO PROCESSO DA PRDUÇÃO DE XILITOL

A Tabela 1 mostra os valores obtidos pelo balanço de massa das correntes que passam pelo reator, filtro prensa, evaporador de simples efeito, colunas de troca iônica, tanque de equalização e trocador de calor.

O reator de hidrólise é alimentado com o bagaço de cana e a solução ácida ( $H_2SO_4$  - 0,5% P/V), uma corrente de entrada com vazão de 208,33 kg/h de bagaço. E uma corrente também de entrada





contendo solução ácida com a mesma proporção utilizada por Sarrouh (2009), 1864,6 L de água e 10,4 L de  $H_2SO_4$  para a vazão de entrada de bagaço. Devido a reação do ácido sulfúrico ao ser adicionado em água houve um aumento na temperatura dessa solução passando de 25°C para 27,13°C. A composição do bagaço na corrente de entrada segundo Sarrouh (2009) é composto por 25,8% de hemicelulose, 42,8% de celulose, 22,1% de lignina e 9,3% de outros. Passado o tempo reacional de 10 min, a uma temperatura de 120°C, a conversão da hemicelulose em xilose foi favorecida e a formação de produtos secundários foram minimizadas. A conversão de hemicelulose em xilose foi obtida em 80%. Na etapa de filtração a corrente de saída 4 contém hidrolisado e a corrente de saída 5 a torta (Figura 2), sendo que no hidrolisado está presente o produto de interesse, a separação ocorreu com uma eficiência de 85%. A corrente de interesse segue para o concentrador, na qual a corrente 6 sai com um fator de concentração de 8X, a solução ácida passa pela estação de tratamento devido à presença de ácido sulfúrico. Já a corrente obtendo o concentrado, segue para a próxima etapa de purificação. Como a xilose não evapora, sua vazão continua sendo 36,55 kg/h, porém sua concentração difere, pelo fato de seu volume ter diminuído. Após a purificação a corrente 7 de saída purificada, segue para o tanque de equalização, a fim de aumentar sua vazão, a corrente 23 de saída do tanque então passa por um trocador de calor para reduzir sua temperatura antes da etapa de fermentação.

Tabela 1 – Balanço de massa para a produção de xilitol.

	<b>Centrada</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C13</b>	<b>C23</b>
<b>Hemicelulose kg/h</b>	53,75	10,75	-	10,75	-	-	-	-	-
<b>Celulose kg/h</b>	89,16	89,16	-	89,16	-	-	-	-	-
<b>Lignina kg/h</b>	46,04	46,04	-	46,04	-	-	-	-	-
<b>Outros kg/h</b>	19,38	19,38	-	19,38	-	-	-	-	-
<b>Solução ácida m³/h</b>	1,875	1,875	1,594	0,281	-	-	-	1,395	-
<b>Vazão xilose kg/h</b>	-	43	36,55	6,45	36,55	34,72	833,3	-	833,3
<b>Conc. xilose kg/m³</b>	-	-	22,94	-	183,2	183,7	183,6	-	183,6
<b>Hidrolisado m³/h</b>	-	-	-	-	0,199	0,189	4,54	-	4,54

Os números das correntes estão destacados na Figura 02.

Fonte: Autores.

A Tabela 2 apresenta a continuidade do balanço de massa com as correntes de entrada e saída do fermentador, centrífuga, cozedores, tanque de mistura e cristalizador.

Para a fermentação utilizou-se as suposições feitas por Canilha, *et. al* (2002): (1) estado estacionário, (2) não há vazamentos no processo e (3) após 54h de fermentação, ocorre uma conversão de 96% de xilose em xilitol. Nessa etapa ocorre a liberação de microrganismos (2027kg), oxigênio (8,53kg) e gás carbônico (117,33kg), é na fermentação que ocorre a formação do xilitol. Em seguida, a corrente 9 passa pela filtração, onde é separado a torta que contém a biomassa e tudo o que não foi reagido, a eficiência da centrífuga é de 80%.

Após a realização da filtração, a corrente 10 de saída (licor) que contém o xilitol, produto de interesse, segue para o cozimento, que é uma etapa de concentração, para aumentar a concentração de





xilitol presente antes da etapa de cristalização. Adiciona-se etanol na proporção de 50%-50% em massa da água contida no licor, ou seja, a vazão de etanol adicionada é a mesma da vazão de licor (0,73 m<sup>3</sup>/h), para auxiliar na solubilidade do xilitol. E por fim a etapa de cristalização, o rendimento da etapa de cristalização é 60%, o grau de pureza em seus cristais obtidos nela é de 89% e o tempo necessário para a cristalização está entre 2 e 3h, tempo menor que o usado para cristalizar a sacarose, que é em torno de 13 e 14h.

Tabela 2 – Continuação do balanço de massa para a produção de xilitol.

	C9	C10	C11	C12	C17	C18	C19	C20	C21	C22
<b>Hidrolisado m<sup>3</sup>/h</b>	4,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Xilose kg</b>	33,33	36,64	-	-	6,66	-	-	-	-	-
<b>Licor m<sup>3</sup></b>	-	3,63	0,73	0,73	-	2,9	0,73	-	0,73	-
<b>Xilitol kg</b>	729,6	583,7	583,7	583,7	145,9	-	233,4	-	13,59	-
<b>Conc. Xilitol kg/m<sup>3</sup></b>	160,7	160,8	799,6	-	-	-	-	-	-	-
<b>Vazão xilitol kg/h</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Etanol m<sup>3</sup>/h</b>	-	-	-	0,73	-	-	0,73	-	0,73	0,73
<b>Xilitol cristais Kg</b>	-	-	-	-	-	-	350,3	280,3	70	-

Os números das correntes estão destacados na Figura 02.

Fonte: Autores.

### 3.2 BALANÇO DE ENERGIA DO PROCESSO DA PRODUÇÃO DE XILITOL

O balanço de energia foi realizado apenas nos equipamentos que necessitam de utilidades. Utilizando os dados do balanço de massa do reator, é possível realizar os cálculos do balanço de energia. A Tabela 3, mostra os valores do balanço de energia e a quantidade necessária de vapor para aquecer as correntes, considerando uma temperatura inicial de 120°C (393K). Essa diferença de 0,02 kg/h de vapor, em um ano de operação, reduz o gasto em R\$4,37.

A Tabela 4 apresenta os valores utilizados para um trocador de calor contracorrente. A quantidade de água necessária para resfriar a corrente de hidrolisado é de 22,7 m<sup>3</sup>, tendo como tempo de resfriamento 30 min, levando em consideração a mínima geração de impacto possível no processo e a redução de custos.

A água utilizada nesse processo não necessita de tratamento. Para o balanço de energia no cristizador é necessário avaliar os três componentes presentes na corrente: água, xilitol e etanol. A quantidade necessária de água no resfriamento da cristalização é de 7,63 m<sup>3</sup>/dia, podendo ser reutilizada para o mesmo processo sem necessidade de tratamento.



Tabela 3 – Balanço de energia e quantidade de vapor necessária

Caso		Temperatura de entrada (°C)	Quantidade de Energia (kJ/h)	Vapor necessário (kg/h)
1	Bagaço	25	9104	-
	Solução ácida	25	744	-
	Vapor	120	9848	4,48
2	Bagaço	27,13	9104	-
	Solução ácida	27,13	727	-
	Vapor	120	9831	4,46

Fonte: Autores.

Tabela 4 – Dados do trocador de calor

Dados	
Fluido Quente	T <sub>inicial</sub> = 80°C
	T <sub>final</sub> = 80°C
Fluido Frio	T <sub>inicial</sub> = 25°C
	T <sub>final</sub> = 35°C
Calor trocado (Q)	962455 kJ
Coefficiente global de troca térmica (U)	550 W/m <sup>2</sup> .K
Área de troca térmica (A)	53,42 m <sup>2</sup>

Fonte: Autores.

Então para cada 5 toneladas de bagaço de cana por dia, obtém uma quantidade de 280,3 kg/dia de xilitol, ou seja, 56 kg de xilitol/tonelada de bagaço. Avaliando o mercado brasileiro, onde o produto ainda está em expansão, a quantidade gerada é um começo sem que haja um comprometimento do processo de cogeração que utiliza o bagaço como fonte de energia. A quantidade de água utilizada no processo é de 30,35 m<sup>3</sup>/dia, ou seja, 6m<sup>3</sup> de água por tonelada de bagaço.

### 3.3 INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA

Em uma indústria canavieira o consumo de água em seus processos de resfriamento é alto. Algumas correntes precisam ser aquecidas ou resfriadas e a energia utilizada não está sendo aproveitada. Com o intuito de maximizar o reaproveitamento, foi realizado uma modificação no processo. Todo o estudo feito até o momento foi considerando que o aquecimento e resfriamento das correntes no processo era utilizando apenas utilidades externas, o que quer dizer que não houve nenhum tipo de integração energética. Agora para alcançar o objetivo de interesse desse estudo, escolheu-se algumas correntes para realizar a integração energética. A Tabela 5 mostra as correntes escolhidas.

Tabela 5 – Dados das correntes de integração

Corrente	Tipo	Constituição	m.Cp(kJ/h.°C)	T <sub>inicial</sub> (°C)	T <sub>final</sub> (°C)	ΔQ(kJ/h)
23	Quente	Hidrolisado	19249	80	30	-962450
12	Quente	Licor	5343	60	30	-160290
A1	Fria	Caldo	48420	30	45	726307
2	Fria	Sol. Ácida	7,84	27	120	729

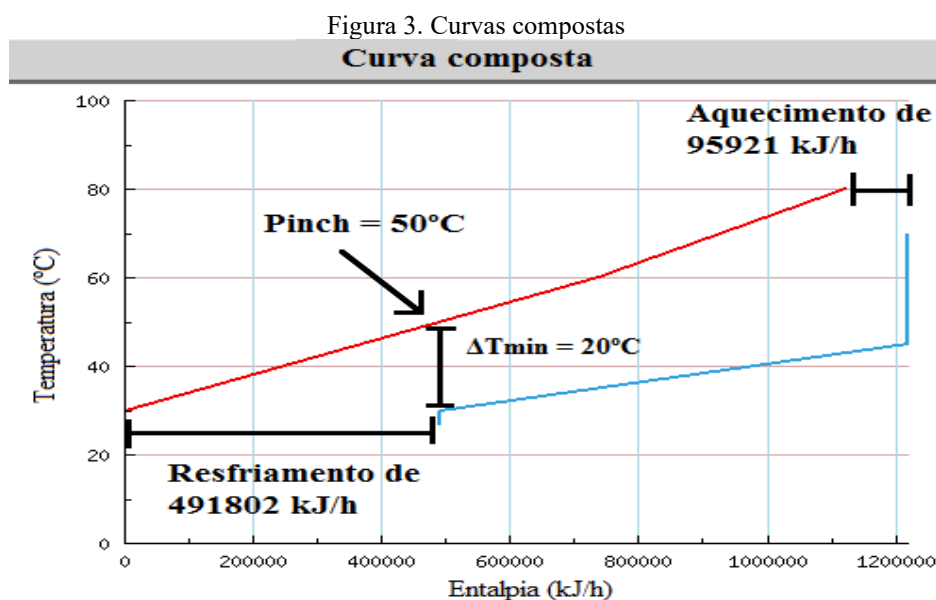
Fonte: Autores.



A corrente denominada como A1, se refere a corrente que sai do tanque de caldo peneirado e vai para o primeiro aquecedor da usina de açúcar, com uma vazão maior que a do processo de xilitol, portando dividiu-se em duas correntes uma com 185 m<sup>3</sup>/h e outra com 15 m<sup>3</sup>/h que será utilizada para a integração.

A temperatura de operação da hidrólise deve estar em 120°C, logo a corrente foi aquecida de 27°C até sua temperatura de operação. Porém, como a vazão é baixa, para não comprometer a definição do ponto *Pinch*, utilizou-se uma rede de trocadores de calor para aquecer a corrente até 70°C antes de entrar no reator.

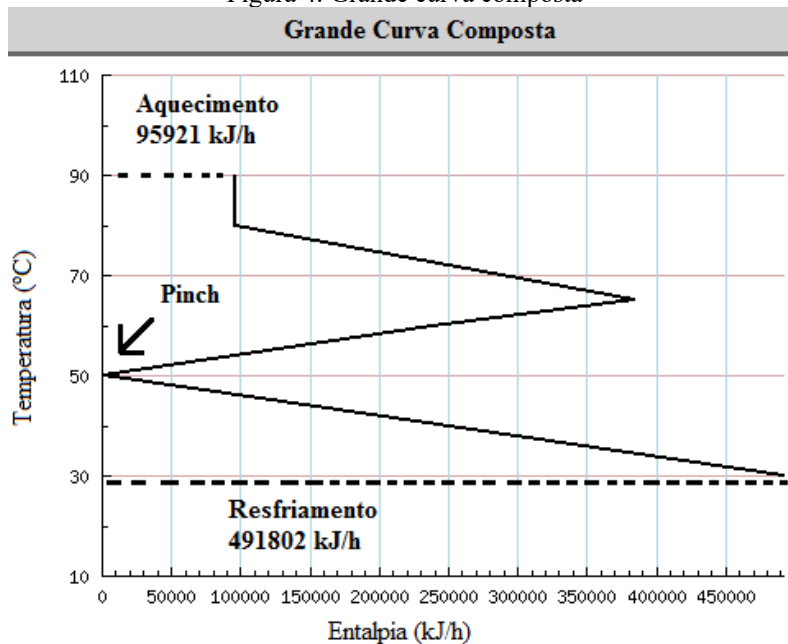
O software “*Online Pinch Analysis Toll*” foi utilizado para gerar os resultados, gráficos da curva composta (Figura 3), da grande curva composta (GCC) (Figura 4), do ponto *Pinch* (Figura 4) e o consumo e utilidades quentes (Figura 4). Para o início da análise um  $\Delta T_{min}$  de 20°C foi estipulado.



Fonte: Próprio Autor

Ao avaliar a Figura 3, diagrama das curvas compostas, verifica-se que a energia recuperada pela troca de calor entre as correntes é de 630330 kJ/h, com uma quantidade de utilidade quente necessária para o processo de 95921 kJ/h e fria de 491802 kJ/h. Com um  $\Delta T_{min}$  de 20°C a temperatura de *Pinch* de 50°C para as correntes quentes e 30°C para as correntes frias.

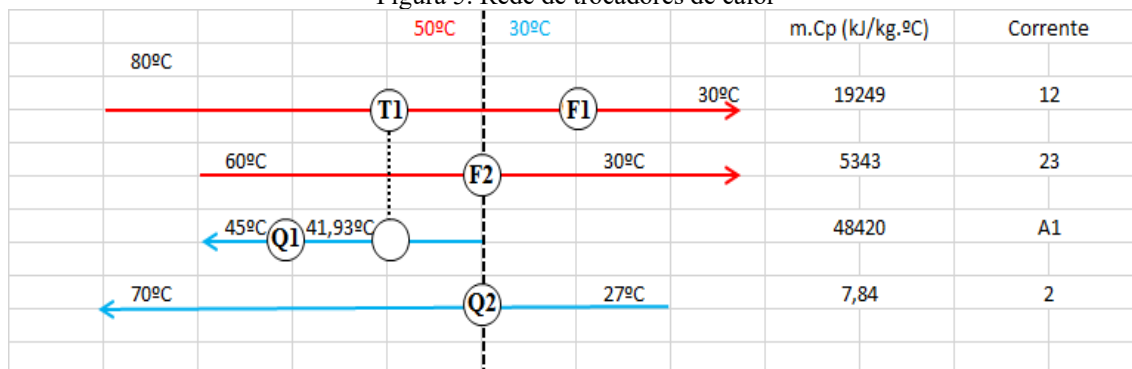
Figura 4. Grande curva composta



Fonte: Próprio Autor

A Figura 4, mostra o gráfico da grande curva composta. Também é possível obter o mesmo valor para o ponto *Pinch* e as utilidades requeridas. Com os resultados fornecidos pelo software, uma rede de trocadores de calor foi proposta como mostra a Figura 5.

Figura 5. Rede de trocadores de calor



Fonte: Próprio Autor

Sendo: (T1) trocador de calor, (Q1 e Q2) aquecedores e (F1 e F2) resfriadores. Pode-se observar que com a nova configuração proposta, a única corrente que teve troca de calor entre elas foi a corrente 12 e a A1, o restante das correntes ainda necessitam da mesma quantidade inicial de utilidades quentes ou fria.

Ao avaliar a demanda de uma biorrefinaria não integrada com uma com integração energética, obtemos uma economia de 86% em utilidade quente e 53,7% em utilidade fria. Para se obter um resultado real precisamos lembrar que a corrente A1 foi dividida. A energia total para aquecer os 200m<sup>3</sup> de caldo é 9,684 x 10<sup>6</sup> kJ e a economia foi de 630330 kJ, resultando em uma redução de 7% em utilidade quente.



Com essa economia de utilidade, a quantidade de água gasta passou de 12,2m<sup>3</sup>/dia para 10,5m<sup>3</sup>/dia na etapa de resfriamento. No processo, são utilizados ao todo 18,15 m<sup>3</sup> de água. Será necessário realizar uma modificação no fluxograma apresentado inicialmente (Figura 2), a adição de um trocador de calor em relação a configuração inicial. Assim, é necessário a adição de dois trocadores de calor com áreas de troca térmica de 20,8 e 21,4 m<sup>2</sup>. A Tabela 6, mostra as especificações dos trocadores de calor utilizados no processo.

Tabela 6. Especificações dos trocadores de calor

Trocador de calor	Corrente	Constituição	T <sub>inicial</sub> (°C)	T <sub>final</sub> (°C)	ΔQ (kJ/h)	U (J/s.m <sup>2</sup> .K)	Área (m <sup>2</sup> )
1	Quente	Hidrolisado	80	50	630330	300	20,8
	Frio	Caldo de cana	30	41,93			
2	Quente	Hidrolisado	50	30	384982	550	21,4
	Frio	Água	25	35			

Fonte: Autores.

O estudo do uso da análise *Pinch* é de grande importância, pois é a integração energética mais simples a ser usada, embora não se encontre muito na literatura a respeito da análise *Pinch* em processos de produção de xilitol, alguns trabalhos tiveram grandes resultados com o uso dessa análise, como Salina e seus colaboradores (2021), fez o uso da integração energética por meio da análise *Pinch* para integrar ao processo de produção de etanol, utilizou duas utilidades de aquecimento para que as necessidades de aquecimento no processo de fabricação do etanol fossem atendidas, vapor com alta temperatura e vapor de média temperatura. Foram comparados quatro casos com integração e quatro casos sem integração, na qual foi variado a porcentagem de palha recuperada, os casos que tiveram integração, apresentaram 36,8%, 43,0%, 49,1% e 56,0% de redução no consumo de energia elétrica. Li e colaboradores (2019), aplicou a análise *Pinch* para diminuir o consumo de utilidades de uma rede de trocadores de calor industrial, esse artigo pode ser aplicado em qualquer indústria que possui rede de trocadores de calor, a porcentagem de economia de energia que foi possível alcançar com a utilização do método de análise *Pinch*, foi de 45% para 75%. Já Mrayed e seu colaboradores (2021), fez o uso a análise *Pinch* para realizar o cálculo da integração energética para obter o resultado das metas de energia e da economia de serviços públicos no HEN, em uma unidade de destilação de petróleo bruto, o projeto realizado foi feito aproveitando a energia atual desperdiçada em um condensador da coluna atmosférica, observou-se que ao realizar a adição de um novo trocador no sistema, ocorreu uma economia de 9,3MW de utilidades no processo. Os autores também constataram em seu estudo, que após 3 anos haverá uma redução significativa de 1.079,6kg/h de CO<sub>2</sub> que seriam liberados na atmosfera.

Os trabalhos citados comprovam ainda mais a eficiência da análise *Pinch* para a redução dos custos, diminuição do consumo de utilidades e minimização dos impactos ambientais. Além disso, essa



metodologia pode ser utilizada em qualquer processo industrial que faz o uso de trocadores de calor com utilidades quentes e frias, sem que haja um custo alto adicional envolvido.

#### **4 CONCLUSÃO**

Com a aplicação da integração energética por meio da análise *Pinch*, foi possível reduzir em 7% o uso da utilidade quente (vapor) e em 53% no consumo da utilidade fria (água). Reduzindo dessa forma o impacto ambiental e os custos de produção, ajudando a melhorar a viabilidade técnica e econômica do processo de produção de xilitol, visto que seus benefícios podem trazer uma melhora na qualidade de vida.



## REFERÊNCIAS

- ALHAJRI, Ibrahim H. e colab. Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis - A case study of a crude oil refinery in Kuwait. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 26, n. April, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128723>>. Acesso em: 28 maio 2021.
- BAI, Liji; SU, Xiujuan; FENG, Jinpeng; MA, Shaojian. Preparation of sugarcane bagasse biochar/nano-iron oxide composite and mechanism of its Cr (VI) adsorption in water. *Journal Of Cleaner Production*, v. 320, p. 128723, out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128723>>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- BAN, Mei Teng; MAHADIN, Nurulain; KARIM, Khairil Juhanni Abd. Synthesis of hydrogel from sugarcane bagasse extracted cellulose for swelling properties study. *Materials Today: Proceedings*, v. 50, p. 2567-2575, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.342>>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- CANILHA, Larissa. Aproveitamento do hidrolisado de palha de trigo para a obtenção de xilitol por via microbiana. 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Faculdade de Engenharia Química de Lorena, Lorena, 2002. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/antigas/2002/BID02001.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2021.
- FATIH Demirbas, M. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy*, v. 86, p. S151–S161, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.043>>. Acesso em: 04 jun. 2021.
- JAIN, Sheetal; BANDYOPADHYAY, Santanu. Multi-objective optimisation for segregated targeting problems using Pinch Analysis. *Journal Of Cleaner Production*, v. 221, p. 339-352, jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.162>>. Acesso em: 15 jun. 2021,
- JIANG, Wenyan; XING, Yihao; ZHANG, Linye; GUO, Xiaoming; LU, Yiwen; YANG, Mei; WANG, Jing; WEI, Guangtao. Polyethylenimine-modified sugarcane bagasse cellulose as an effective adsorbent for removing Cu( II ) from aqueous solution. *Journal Of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 7, p. 49830, 27 ago. 2020. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/app.49830>>. Acesso em: 01 jun. 2021.
- JONG, Ed de; JUNGMEIER, Gerfried. Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries. *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*, p. 3-33, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-444-63453-5.00001-x>>. Acesso em: 03 jul. 2021.
- KHAWAJA, Saleh Ali; JAVED, Usman; ZAFAR, Tayyab; RIAZ, Mamoon; ZAFAR, Muhammad Saeed; KHAN, Muhammad Khizar. Eco-friendly incorporation of sugarcane bagasse ash as partial replacement of sand in foam concrete. *Cleaner Engineering And Technology*, v. 4, p. 100164, out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100164>>. Acesso em: 03 jul. 2021 .
- LI, Bao-Hong; CASTILLO, Yan Edy Chota; CHANG, Chuei-Tin. An improved design method for retrofitting industrial heat exchanger networks based on Pinch Analysis. *Chemical Engineering Research And Design*, v. 148, p. 260-270, ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.06.008>>. Acesso em: 21 ago. 2021
- MRAYED, Sabri; SHAMS, Mohamed Bin; AL-KHAYYAT, Mohammed; ALNOAIMI, Nasser. Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation unit. *Cleaner Engineering And Technology*, v. 4, p. 100168, out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100168>>. Acesso em: 04 jul. 2021





MUSSATTO, S.I. e ROBERTO, I.C. Produção biotecnológica de xilitol a partir da palha de arroz. *Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento*, v. 28, n. January 2002, p. 34–39, 2002.

NARISSETTY, Vivek; CASTRO, Eulogio; DURGAPAL, Sumit; COULON, Frederic; JACOB, Samuel; KUMAR, Dinesh; AWASTHI, Mukesh Kumar; PANT, Kamal Kishore; PARAMESWARAN, Binod; KUMAR, Vinod. High level xylitol production by *Pichia fermentans* using non-detoxified xylose-rich sugarcane bagasse and olive pits hydrolysates. *Bioresource Technology*, v. 342, p. 126005, dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126005>>. Acesso em: : 21 ago. 2021

OLIVEIRA, Bruna Cristina. Complexidade em Biorrefinarias. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<http://epqb.eq.ufrj.br/download/complexidade-em-biorrefinarias.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

PALMA, Kelly Roberta de; TOMAZ, Edson; SORIA-VERDUGO, Antonio; SILVA, Maria Aparecida. The influence of the elemental and structural chemical composition on the ash fusibility of sugarcane bagasse and sugarcane straw. *Fuel*, v. 304, p. 121404, nov. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121404>>. Acesso em: : 21 ago. 2021

PRABHU, N.; GAJENDRAN, T.; KARTHIKADEVI, S.; ARCHANA, A.; ARTHE, R.. Utilization of sugarcane bagasse for enhancement production of fibrinolytic enzyme using statistical approach. *Cleaner Engineering And Technology*, v. 5, p. 100269, dez. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119066>>. Acesso em: : 16 ago. 2021

SARROUH, Boutros Fouad. Estudo da Produção Biotecnológica de Xilitol em Reator de Leito Fluidizado Utilizando Bagaço de Cana-de-açúcar e Células Imobilizadas: avaliação de parâmetros operacionais e viabilidade econômica.. 2009. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia Industrial, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97131/tde-26092012-150444/publico/BIT09002.pdf>. Acesso em: 05 maio 2021.

SU, Weihua; YE, Yujing; ZHANG, Chonghui; BALEŽENTIS, Tomas; FTREIMIKIENÈ, Dalia. Sustainable energy development in the major power-generating countries of the European Union: the pinch analysis. *Journal Of Cleaner Production*, v. 256, p. 120696, maio 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120696>>. Acesso em: : 20 jun. 2021

Vries, R.P. De, Meng, J., Chroumpi, T., Miia, R.M. *Bioresource Technology* Xylitol production from plant biomass by *Aspergillus niger* through metabolic engineering. *Bioresource Technology*, v.344, p. 126199, jan. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126199>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

