

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCar
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA - DEQ

Anna Karolina Tasaka de Melo

Viabilidade econômica da produção de xilitol por *Saccharomyces cerevisiae* modificada *in silico*

Orientadora: Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima

SÃO CARLOS -SP
2025

Anna Karolina Tasaka de Melo

**Viabilidade econômica da produção de xilitol por *Saccharomyces cerevisiae*
modificada *in silico***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção
do título de bacharel em Engenharia
Química

Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima

São Carlos-SP
2025

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14/02 de 2025 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima

Convidado: Prof . Dr. Adilson José da Silva

Professor da Disciplina: Prof. Dr Ernesto Antonio Urquieta-Gonzalez

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, Karen e Wellington, por todo suporte e apoio durante os anos de graduação e aos meus familiares, pelo incentivo nos momentos dessa jornada.

À minha orientadora Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima pela dedicação, orientação e direcionamento que foram fundamentais para desenvolver o trabalho.

Aos meus melhores amigos Camila e João, que estiveram ao meu lado, oferecendo suporte, motivação e compreensão nos momentos mais desafiadores.

À instituição UFSCAR pela infraestrutura, por proporcionarem o ambiente necessário para a realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do curso de Engenharia Química, que contribuíram com suas ideias, debates e apoio ao longo da graduação.

Por fim, a todos que, de alguma forma fizeram parte dessa jornada, obrigada !

RESUMO

O xilitol é um adoçante natural com baixo índice glicêmico, por isso é uma boa alternativa ao açúcar. Além de ser uma alternativa mais saudável, sua produção sustentável pode utilizar resíduos lignocelulósicos, como o bagaço de cana, o que reduz os impactos ambientais. A crescente demanda por opções mais saudáveis, o xilitol vem se destacando no mercado como uma opção viável na indústria alimentícia e farmacêutica. Nesse contexto, este trabalho buscou estudar a viabilidade econômica do processo de produção de xilitol via fermentação de resíduos lignocelulósicos do bagaço de cana como substrato. A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, previamente modificada *in silico* em estudo de engenharia metabólica, é aplicada no processo fermentativo. A modelagem do processo de produção de xilitol foi realizada no software de simulação de processos SuperPro Designer. Estudos de sensibilidade paramétrica também serão empregados para verificar a viabilidade do processo frente às variações de conversão, escala de produção e preço do xilitol. A viabilidade econômica foi confirmada, mas a escolha da melhor combinação de parâmetros vai depender das prioridades escolhidas. A eficiência de 95% é a melhor para otimizar o rendimento sem trazer grandes impactos no OPEX. A combinação de maior escala, maior conversão e maior preço de venda, favorece o Payback. Para a TIR, o projeto mais viável está atrelado à maior escala e ao elevado preço do xilitol. A fermentação tem influência nos resultados, mas o estudo no intervalo de conversão teve menor impacto em comparação com os demais fatores. Para futuros estudos, recomenda-se ampliar a faixa de conversão e estabelecer métricas mais detalhadas para otimizar a análise econômica.

Palavras-chave: Xilitol; Fermentação; Viabilidade econômica; Resíduos lignocelulósicos.

ABSTRACT

Xylitol is a natural sweetener with a low glycemic index, making it a good alternative to sugar. In addition to being a healthier option, its sustainable production can utilize lignocellulosic residues, such as sugarcane bagasse, reducing environmental impacts. With the growing demand for healthier alternatives, xylitol has been gaining prominence in the market as a viable option for the food and pharmaceutical industries. In this context, this study aimed to evaluate the economic feasibility of xylitol production through the fermentation of lignocellulosic residues from sugarcane bagasse as a substrate. The yeast *Saccharomyces cerevisiae*, previously modified *in silico* in a metabolic engineering study, is applied in the fermentation process. The modeling of the xylitol production process was carried out using the SuperPro Designer process simulation software. Parametric sensitivity studies were also conducted to assess the feasibility of the process under variations in conversion, production scale, and xylitol price. The economic feasibility was confirmed, but the choice of the best combination of parameters depends on the selected priorities. An efficiency of 95% is the best way to optimize yield without significantly impacting OPEX. The combination of a larger scale, higher conversion, and higher selling price favors the Payback. For the IRR, the most viable project is linked to a larger scale and a higher xylitol price. Fermentation influences the results, but the studied conversion range had a smaller impact compared to other factors. For future studies, it is recommended to expand the conversion range and establish more detailed metrics to optimize economic analysis.

Keywords: Xylitol; Fermentation; Economic feasibility; Lignocellulosic residues.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	Fórmula molecular Xilitol	12
2.2	Apresentação de Processos químicos e microbianos.	15
2.3	Aproveitamento da cana de açúcar	18
2.4	Análise de Mercado de Xilitol	20
2.5	Consumo de Xilitol por País	20
3.1	Fluxograma do processo de produção xilitol	23
4.1	CAPEX do caso base	29
4.2	OPEX do caso base	30
4.3	Análise da variável resposta CAPEX	31
4.4	Análise da variável resposta OPEX	32
4.5 e 4.6	Análise da variável resposta IRR conversão 85% e 95%	34
4.7 e 4.8	Análise da variável resposta PayBack conversão 85% e 95%	35
4.9 e 4.10	Análise da variável resposta NPV $i=8\%$ conversão 95%	37
4.11 e 4.12	Análise da variável resposta NPV $i=12\%$ conversão 85% e 95%	38
4.13 e 4.14	Análise da variável resposta NPV $i=20\%$ conversão 85% e 95%	38
4.15	Análise da variável resposta de rendimento	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades físico - químicas do xilitol	13
Tabela 2.2	Componentes da Biomassa do Bagaço de Cana	19
Tabela 3.1	Fluxos de consumo e de produção da simulação.	22
Tabela 3.2	Pontos para Análise de Sensibilidade	28
Tabela 3.3	Análise de Sensibilidade Fatores	28
Tabela 4.1	Análise do Caso Base	29
Tabela 4.2	Resposta Variáveis	30

LISTA DE SIGLAS

CAPEX -(Capital Expenditure) Despesa de Capital
CAGR - (Compound Annual Growth Rate) Taxa de crescimento anual composta
TIR - (Taxa Interna de Retorno)
VPL - (Valor Presente Líquido)
OPEX - (Operational Expenditure) Despesas operacionais
TMA - Taxa Mínima de Atratividade

Sumário

1 - INTRODUÇÃO.....	11
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 - Xilitol.....	12
2.2 - Processo de produção de xilitol.....	14
2.2.1 Produção de xilitol por rota química.....	15
2.2.2 Produção de xilitol por rota Biotecnológica.....	16
2.2.2.1 Materiais Lignocelulósicos.....	17
2.3 - Mercado Xilitol.....	19
3 - METODOLOGIA.....	21
3.1 - Descrição do Software de Simulação.....	21
3.2 - Engenharia Metabólica.....	21
3.3 - Modelagem da Rota Metabólica.....	22
3.3.1 Pré Tratamento do Resíduo Lignocelulósico.....	23
3.3.2 Purificação do Substrato.....	24
3.3.3 Fermentação.....	25
3.3.4 Purificação do Produto.....	25
3.3.5 Cristalização-Secagem do Produto.....	26
3.3.6 Reciclagem de Água.....	27
3.4 - Análise de Sensibilidade.....	27
4- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 - CAPEX.....	31
4.2 - OPEX.....	32
4.3 - IRR (Internal Rate of Return).....	33
4.4 - PayBack Time.....	35
4.5 - NPV.....	36
4.6 - Rendimento.....	39
5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	41
6 -REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	43
APÊNDICE A.....	48
APÊNDICE B.....	51

1 - INTRODUÇÃO

O crescente aumento da ingestão de açúcares, em especial da sacarose, vem trazendo à ampliação dos riscos de problemas de saúde em escala mundial. Pesquisas têm sido realizadas para possibilitar a substituição desses açúcares, que contêm alto nível calórico, por edulcorantes, naturais ou artificiais, como o xilitol, que é um carboidrato obtido a partir da xilose, uma pentose presente em abundância na natureza, que sob hidrogenação química ou por processo biotecnológico pode ser convertida a xilitol (ALBUQUERQUE, 2014).

Atualmente a maior taxa de produção de xilitol é produzida por via química, porém ainda apresenta grandes desvantagens como, por exemplo, necessita de altas temperaturas e pressões, o que elevam o valor da comercialização do produto.(SARROUH, 2010)

O grande desafio para produzir xilitol por outras rotas é a capacidade de viabilizar a comercialização do produto, tanto viabilidade técnica quanto econômica . Os resíduos que são gerados pelo agronegócio e pelas indústrias alimentícias têm sido amplamente investigados para uso potencial como matéria-prima para a produção de xilitol(LADEIRA, 2014). Sabe-se que após com um pré-tratamento, podem liberar açúcares fermentáveis, como a xilose, que é a principal fonte atual para produção de xilitol.

Apesar da não existência de grandes estudos específicos sobre a viabilidade econômica do processo biotecnológico, acredita-se que a via fermentativa resultará em menores custos de produção (SARROUH, 2010). A rota biotecnológica de produção de xilitol, baseada na conversão microbiana da xilose proveniente da fração hemicelulósica de biomassas vegetais, apresenta-se como uma alternativa para substituir a atual obtenção comercial por via química, a qual tem desvantagens econômicas e ambientais(PÉREZ, 2019)

O Brasil é conhecido por seu grande potencial de produção de recursos renováveis tais como produtos agrícolas, florestais e resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar, a palha de arroz, a palha de trigo, a casca de aveia e as aparas de madeira. A produção de resíduos agroindustriais é de aproximadamente 250 milhões de toneladas/ano. A utilização adequada destes resíduos ajuda a minimizar problemas ambientais e energéticos, além disso, pode gerar produtos com relevantes aplicações na indústria farmacêutica e de alimentos.(PEDROSO, 2017)

Estes resíduos agrícolas, em geral, contêm cerca de 20 a 60% de celulose, 20 a 30% de hemicelulose e 15 a 30% de lignina. O bagaço de cana, farelo de trigo e de arroz, por exemplo, contêm cerca de 25 a 40% de celulose, 20 a 35% de hemicelulose e 15 a 35% de lignina. (TAMANINI; HAULY, 2024). Estes materiais podem ser utilizados como substratos para processos fermentativos pois mais de 70% da matéria seca é constituída de carboidratos.

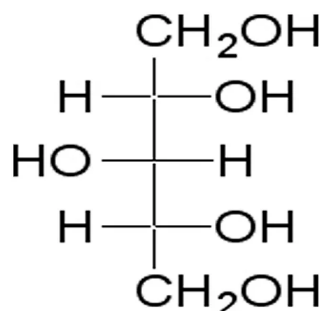
Por isso, este trabalho teve por objetivo, estudar sobre a viabilidade da produção de xilitol por rota biotecnológica, para isso foi realizada a simulação do processo de produção do xilitol no simulador Superpro a partir de resultados da engenharia metabólica (simulação com a levedura *Saccharomyces cerevisiae*) utilizando como resíduo o bagaço de cana.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Xilitol

O xilitol pode ser encontrado na natureza em diversas frutas e vegetais como o alface, couve flor, ameixas, framboesas, morangos, uvas, bananas, assim como em leveduras, líquens e cogumelos porém, em quantidades inferiores a 0,9 g/100g (TAMANINI; HAULY, 2024). Pode ser produzida por rotas químicas ou biotecnológicas. Atualmente, é produzida e utilizada por diferentes segmentos industriais, tais como a alimentícia, a farmacêutica e a odontológica (PARAJÓ et al.1998). Abaixo é apresentado a figura 2.1 com a fórmula molecular.

Figura 2.1 : Fórmula molecular Xilitol



Fonte: (Didática Labor, 2025)

O xilitol, é um poliálcool que tem como fórmula molecular o $C_5H_{12}O_5$ (1,2,3,4,5-pentahidroxi pentano), além de ser um adoçante que é capaz de substituir a sacarose, ele é tolerado por diabéticos e tem várias aplicações clínicas. Com uma estrutura aberta a molécula de xilitol possui cinco grupos hidroxila (OH), cada um deles ligado a um átomo de carbono, por conta disso o seu composto é conhecido como polihidroxi álcool acíclico ou pentitol(MUSSATO; ROBERTO, 2002). A tabela 2.1 apresenta as propriedades físico-químicas do xilitol.

Tabela 2.1 : Propriedades físico - químicas do xilitol

Funções e Propriedades	Características ou Valores
Massa Molar	152,15 g. mol ⁻¹
Aparência	Pó cristalino
Cor	Branca
Sabor	Doce
Odor	Nenhum
Ponto de Fusão	92-96°C
Ponto de Ebulição	216°C (1atm)
ph (solução aquosa a 10%)	5-7
Densidade (solução aquosa a 10%)	1,03 g.ml ⁻¹
Solubilidade em água a 20°C	63g/100g solução
Viscosidade (solução aquosa a 10%)	1,23 cP (a 20°C)
Calor de Solução (endotérmico)	34,8 cal.g ⁻¹
Valor calórico 2,4 kcal.g-1	2,4 kcal. g ⁻¹
Índice de Refração (a 25°C)	1,3471 (solução aquosa a 10%)

Fonte: (PEDROSO, 2017)

Uma das características marcantes do xilitol é seu alto poder refrescante na boca,

que é bastante explorada em produtos alimentícios. Essa característica peculiar se deve ao seu elevado calor de dissolução (34,8 cal.g⁻¹), que o torna, dentre os polióis, o que proporciona maior sensação de refrescância bucal. (JUNIOR, 2019)

Pode ser empregado isoladamente ou em associação com outros adoçantes em produtos de panificação, geléias, marmeladas, gelatinas, sobremesas, gomas de mascar, refrigerantes e sorvetes. Também pode ser utilizado em produtos farmacêuticos e de higiene oral. (JUNIOR, 2019)

O xilitol não é fermentado pela maioria dos microrganismos da cavidade bucal humana e, por isso, é capaz de inibir a desmineralização dos dentes e de exercer efeito não-cariogênico (PEDROSO, 2017).

O xilitol tem um importante emprego na indústria alimentícia, devido às suas características de interesse, como alto poder adoçante (comparado ao da sacarose), Além disso, o xilitol não participa das reações de Maillard (a qual ocasiona a formação de substâncias escuras nos alimentos) e, dessa forma, não reduz o valor nutricional das proteínas presentes (ALBUQUERQUE, 2014).

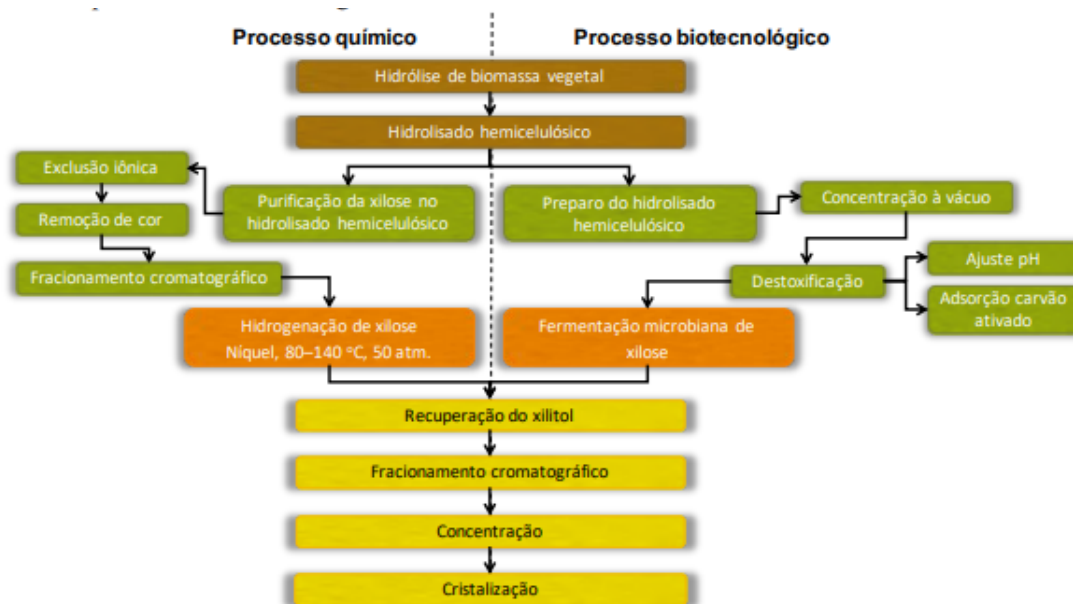
2.2 - Processo de produção de xilitol

Na atualidade, a maior parte da produção de xilitol se dá por via química, por meio de reações de hidrogenação da xilose, ou por via microbiológica, na qual micro-organismos específicos convertem xilose em xilitol. A produção de xilitol ocorre por meio da conversão química da xilose. As altas temperaturas e altas pressões utilizadas, sem contar as várias etapas de purificação requeridas, tornam o processo de obtenção de xilitol muito caro e por esse motivo buscam-se novas maneiras de produção que possam ser tão eficientes quanto os modos tradicionais (ALBUQUERQUE, 2014).

Já a produção de xilitol a partir da xilose por via microbiológica é considerado um processo que apresenta uma possibilidade bastante propícia, visto que a mesma é capaz de atuar em condições amenas de temperatura e pH, conseguindo assim uma diminuição nos custos energéticos e uma grande eficiência ao utilizar os microrganismos no processo que converterá o açúcar no álcool. Além disso, a produção microbiológica do xilitol gera menos interferentes, ou seja, menos subprodutos durante o processo (SARROUH, 2010).

Ambos os processos, químicos e microbianos, necessitam de soluções ricas em xilose, provenientes da hidrólise de materiais lignocelulósicos ricos em xilana, para a produção do xilitol (JUNIOR,2019). A figura 2.2 apresenta esquema referente aos processos químicos e biotecnológicos.

Figura 2.2 : Apresentação de Processos químicos e microbianos.



Fonte : (PÉREZ, 2019)

2.2.1 Produção de xilitol por rota química

A produção de xilitol em escala comercial é realizada por um processo Tamanini, químico patenteado em 1977 por Asko Melaja e Lauri Hamalainen (FRANÇOZO, 2015).

A produção de xilitol por via química utiliza condições de temperaturas na faixa de 80 °C a 140 °C e pressões que vão até 50 atmosferas na presença de um catalisador metálico de níquel. É feita a partir de hidrólise de materiais lignocelulósicos após a remoção da cor do hidrolisado, impurezas orgânicas e sais inorgânicos que não foram retirados no processo de exclusão iônica, procedimento de purificação realizado para se conseguir uma solução de xilose mais pura.(SARROUH, 2009)

Atualmente, a maior produtora de xilitol é a Danisco Company, uma empresa dinamarquesa que utiliza madeiras ou milho, fornecidos principalmente da China e por meio de hidrogenação xilitol é produzido (JUNIOR, 2019).

O processo de produção de xilose por rota química inclui quatro etapas básicas:

1. Obtenção da xilose por hidrólise ácida de material vegetal rico em xilana;
2. Purificação da xilose obtida;
3. Hidrogenação catalítica da xilose formando xilitol
4. Cristalização do composto.

Para se conseguir uma maior qualidade e um melhor rendimento, necessita-se de uma solução de xilose mais pura possível para não ocorrer problemas. Desta maneira, são realizadas etapas de purificação no meio contendo xilose para aumentar sua pureza, porém a adição desse processo além de aumentar o tempo acaba por aumentar também o valor do produto (PEDROSO, 2017)

Devido aos altos custos de produção de xilitol por via química, faz-se necessário um melhor estudo acerca de um outro método capaz de produzir xilitol de forma mais barata, e um dos métodos que vem apresentando resultados mais significantes é a produção de xilitol utilizando-se microrganismos capazes de converter a xilose em xilitol, ou seja, a produção biotecnológica.

2.2.2 Produção de xilitol por rota Biotecnológica

Entre pesquisas, vem se destacando a via biotecnológica, já que não há uma necessidade de grandes teores de pureza na xilose (JUNIOR, 2019)., portanto a xilose não precisa passar por uma purificação prévia para ser utilizada para produção de xilitol, como acontece na via química (SARROUH, 2009).

Além disso, o método biotecnológico apresenta outras vantagens como a capacidade de ser realizado com menores custos energéticos, pois o mesmo atua em condições de pressão e temperatura menores que no processo químico, também sua utilização é capaz de proporcionar uma diminuição na poluição ambiental em comparação com o processo químico bem como diminuição dos custos com o tratamento de resíduos tóxicos (SILVA, 2006)

Existe uma grande variedade de microrganismos (bactérias, fungos e leveduras) capazes de converter xilose em xilitol, etanol e outros compostos ((PARAJÓ et al.1998).

Dentre os microrganismos que podem ser usados no processo para produção de xilitol, tem-se um maior destaque para as leveduras, pois elas apresentam diversos benefícios em comparação com as bactérias como, apresentam melhor crescimento em pH ácido, são mais resistentes à contaminação e seu requerimento nutricional é menos rigoroso (JEFFRIES; JIN, 2004).

O uso de *Saccharomyces cerevisiae* na produção de xilitol é vantajoso devido à sua facilidade de modificação genética, resistência e se adaptar a condições industriais, Embora não metabolize xilose naturalmente, pode ser modificada para expressar enzimas específicas, permitindo a conversão eficiente desse açúcar em xilitol.

O processo de produção biotecnológico de xilitol apresenta algumas semelhanças com o de obtenção química nas etapas a serem seguidas.

1. Hidrólise da hemicelulose presente em biomassa lignocelulósica.
2. Fermentação Microbiana (Xilose convertida em xilitol).
3. Recuperação e Purificação do Xilitol.

Assim como no processo químico, a matéria-prima para a produção biotecnológica de xilitol é a xilose, que é obtida pela hidrólise da hemicelulose presente em biomassa lignocelulósica, como bagaço de cana, casca de arroz, palha de milho, entre outros. O substrato precisa ser purificado para remover inibidores que possam prejudicar o crescimento dos micro-organismos.

2.2.2.1 Materiais Lignocelulósicos

A utilização de resíduos provenientes da exploração da biomassa lignocelulósica para obtenção de bioprodutos é uma alternativa para a produção de energia e de alimentos pois a madeira e os resíduos da agroindústria constituem reservas naturais renováveis disponíveis em grandes quantidades (ALVES, 2001).

Devido às elevadas quantidades que são produzidas de resíduos sólidos oriundos da agroindústria a cada ano e que vem se acumulando cada vez mais gerando diversos inconvenientes como a poluição ambiental, ocasionando assim a perda de matérias-primas que podem gerar uma grande quantidade de produtos com alto valor agregado, tem se intensificado um maior estudo acerca dos materiais lignocelulósicos. (PAIVA, 2000)

Os materiais lignocelulósicos incluem vários resíduos agrícolas (palhas, cascas, cavacos), madeiras duras provenientes de árvores de folhas decíduas (dicotiledôneas), madeiras moles provenientes de coníferas e resíduos das indústrias de papel. A composição destes materiais é bastante variável. O maior componente é a celulose (35-50%) seguida pela hemicelulose (20-35%) e lignina (10- 25%) (TAMININI, HAULY, 2004)

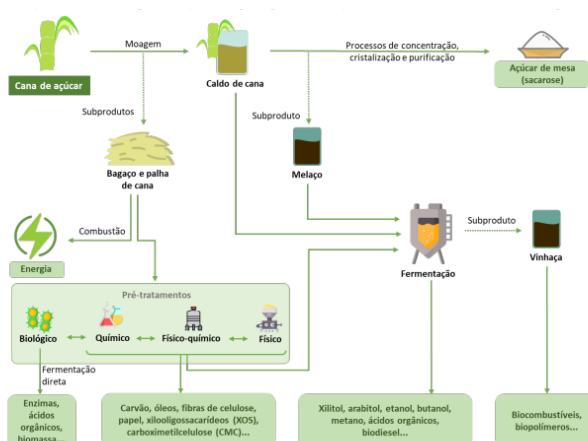
A biomassa lignocelulósica chama a atenção pela capacidade de fornecer biocombustíveis, além de bioprodutos derivados de açúcares constituintes como o xilitol (BOAES,2022)

Uma maior preocupação com o meio ambiente e também com o desenvolvimento sustentável faz com que cada vez mais os resíduos industriais sejam usados como substrato para a fabricação de novos produtos, pois esses resíduos que podem vir a ter seu uso ligado a diferentes produtos de interesse além de serem baratos encontram-se disponíveis em grandes quantidades.

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento , a produção de cana-de-açúcar no Brasil, em 2008, alcançou 552,8 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 74 toneladas por hectare ao ano (SANTOS; NASCIMENTO, 2017) , por conta disso o excedente de bagaço de cana é muito elevado.

A safra de 2019/2020 girou em torno de 620 milhões de toneladas de cana de açúcar(PÉREZ, 2019). A produção de cana-de-açúcar, na safra 2024/25, deverá ser de 689,8 milhões de toneladas (Global Market Insights, 2024) Na figura 2.3 é apresentado um esquema de aproveitamento da cana de açúcar.

Figura 2.3 - Aproveitamento da cana de açúcar



Fonte : (BEVILAQUE, 2023)

No Brasil, pesquisas vêm sendo realizadas para realizar a produção do xilitol usando principalmente o bagaço de cana como matéria prima. O país se encontra numa situação favorável a utilização desses diversos resíduos agroindustriais para produção de produtos com valor agregado, como no caso do xilitol (ALBUQUERQUE, 2014). A Tabela 2.2 apresenta uma média dos componentes do bagaço de cana.

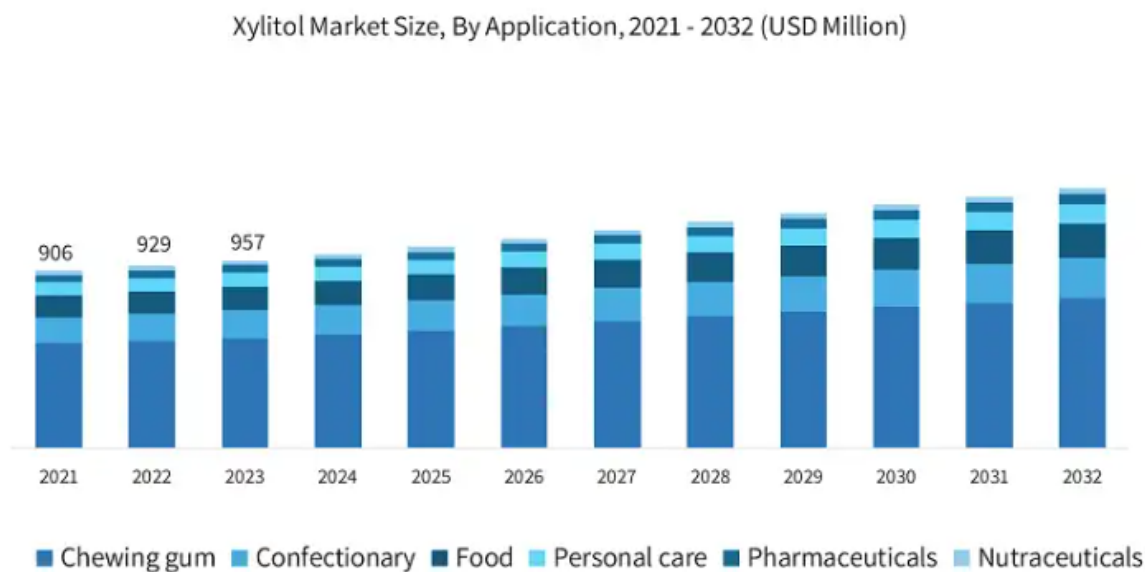
Tabela 2.2 : Componentes da Biomassa do Bagaço de Cana

Componentes da Biomassa	Bagaço de cana "in natura" (%)
Rendimento	-
Celulose	43,1 ± 0,5
Hemicelulose	28,6 ± 0,4
Lignina	20,8 ± 0,2
Cinzas	2,9 ± 0,1
Extrativos	4,6 ± 0,1
Total	100,0 ± 0,2

Fonte:(ARRUDA, 2011)

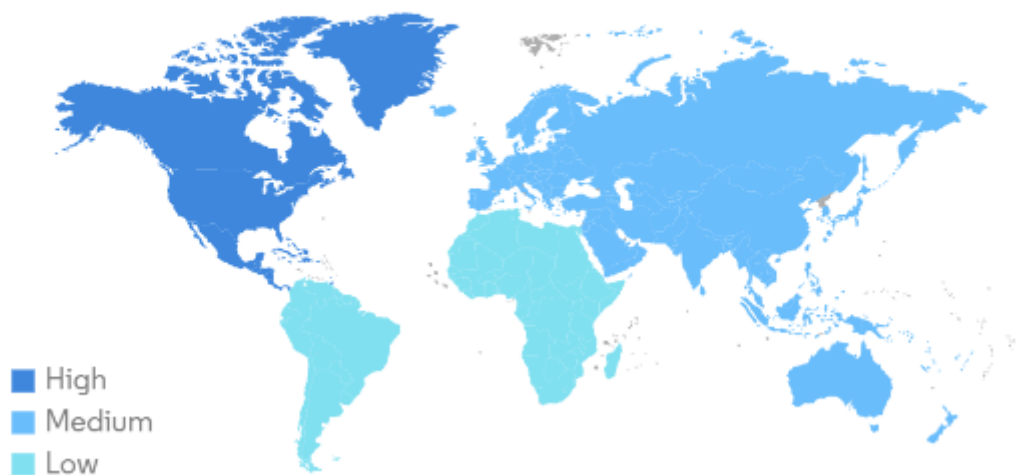
2.3 - Mercado Xilitol

O xilitol foi responsável pela circulação de 880 milhões de dólares em 2019, (BEVILAQUE, 2023). O tamanho do mercado de xilitol foi avaliado em US\$ 957 milhões em 2023 e deve registrar um CAGR de mais de 3,7% entre 2024 e 2032, impulsionado pela crescente demanda por adoçantes naturais e de baixa caloria, alimentada pela crescente conscientização sobre saúde entre os consumidores (Global Mark Insights, 2024) . Abaixo é apresentado a figura 2.4 sobre a tendência de análise de Mercado do Xilitol.

Figura 2.4 : Análise de Mercado de Xilitol

Fonte : (Global Market Insights,2024)

Estima-se que a Ásia-Pacífico cresça no maior CAGR durante o período de previsão (2024-2029).A figura 2.5 abaixo apresenta os países e seus consumos de xilitol (Mordor Intelligence, 2024)

Figura 2.5: Consumo de Xilitol por País

Fonte : (MordonIntelligence, 2024)

Atualmente , algumas empresas se destacam no Mercado Mundial de Xilitol , são elas Roquete ; Grupo Asiamerica, Inc.; Herboveda Índia; Xilitol Canadá; Aditivos alimentares A&Z; Cargill; CSPC Shengxue Glicose; Ingrediente.

Além disso, o crescente interesse comercial e científico no xilitol levou a uma forte demanda por esse produto no mercado global, de mais de 125.000 toneladas por ano, com um valor que é relativamente alto (5,0 \$/ kg para compra a granel por indústrias ou 10 \$/kg em supermercados) fazendo sua proposta atraente para a comercialização (Global Market Insights, 2024) .

3 - METODOLOGIA

3.1 - Descrição do Software de Simulação

O SuperPro Designer facilita a modelagem, avaliação e otimização de processos integrados em lote e contínuos em uma ampla gama de indústrias (biotecnologia, farmacêutica, química especializada, processamento de alimentos, bens de consumo, metalúrgica, materiais, purificação de água, tratamento de águas residuais, controle da poluição do ar, etc.). A combinação de modelos de operação de fabricação e ambientais na mesma ferramenta permite que os usuários projetem e otimizem simultaneamente os processos de fabricação e tratamento de fim de tubo e pratiquem a prevenção e o controle da poluição.

O SuperPro Designer gera doze relatórios abrangentes que fornecem informações sobre balanços de materiais e energia, dimensionamento de equipamentos, estimativa de custos de capital (CAPEX) e operação (OPEX) , análise de produtividade , avaliação de impacto ambiental , emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs), etc.(INTELLIGEN INC, 2023)

3.2 - Engenharia Metabólica

Para este presente trabalho, foi utilizado como levedura a *Saccharomyces cerevisiae* modificada in silico, que atualmente vem sendo muito estudada para a produção de xilitol. Como referência o texto de SILVA (2020) que utilizou o OptFlux, e

modificações genéticas que teriam como potencial aumentar a produção de xilitol a partir de material hemicelulósico no metabolismo da levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Nos experimentos foram utilizados como base Consumo de Xilose (20 mmol/gDW/h).

No processo o melhor resultado foi a produção de xilitol foi de 11,96 mmol/gDCW/h isso foi conquistado com apenas 5 modificações no modelo metabólico da levedura, que foram a deleção de quatro reações presentes na via da Glicólise (Álcool desidrogenase; Enolase; Hexoquinase; Piruvato descarboxilase) e a sub expressão de uma reação presente na via de interconversões da Pentose e Glucuronato (Xiluloquinase), a qual contém o metabólito alvo, o xilitol. Abaixo é apresentado na Tabela 3.1 apresenta os fluxos de consumo e de produção da simulação feita.

Tabela 3.1 : Fluxos de consumo e de produção da simulação.

Consumos		
Sigla do metabólito	Nome do metabólito	Valor
M_glc__D_e	D-Glicose	4,00
M_nh4_e	Amônia	6,48
M_o2_e	Oxigênio	20,00
M_pi_e	Fosfato	0,16
M_so4_e	Sulfato	2,13
M_xyl_D_e	D-Xilose	20,00
Produção		
Sigla do metabólito	Nome do metabólito	Valor
M_cys__L_e	L-Cisteína	2,07
M_h_e	H ⁺	1,91
M_h2o_e	Água	31,22
M_co2_e	Dióxido de carbono	29,65
M_xyl_e	Xilitol	11,96

Fonte : (SILVA, 2020)

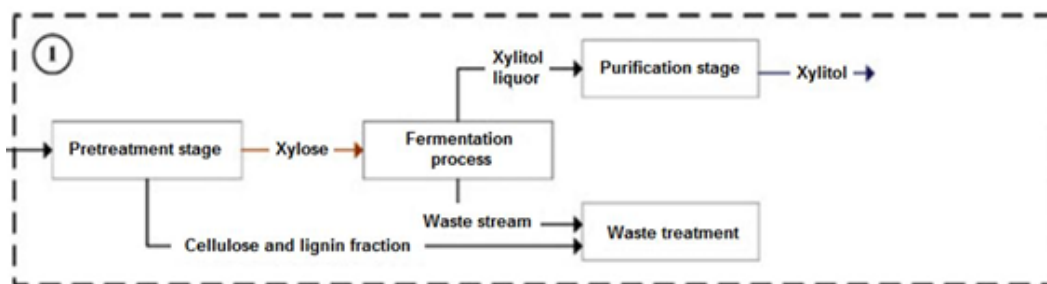
Portanto na produção de xilitol utiliza mais de 50% da xilose consumida, uma excelente performance para processos fermentativos industriais. Os dados obtidos no estudo apresentando foram utilizados na simulação deste trabalho.

3.3 - Modelagem da Rota Metabólica

Para realizar a modelagem do processo no software foi utilizado como base o estudo do SÁNCHEZ et al (2023) . O texto é um exemplo do SuperPro Designer que

analisa a produção de xilitol por meio de fermentação usando Brewer's Spent Grain (BSG) como matéria-prima. O processo começa com o pré -tratamento do BSG para liberação de xilose e arabinose. Abaixo é apresentado a figura 3.1 que apresenta como funciona o processo de produção de xilitol apresentado no trabalho.

Figura 3.1 : Fluxograma do processo de produção xilitol



Fonte: SÁNCHEZ et al (2023)

No estudo, a matéria-prima escolhida foi o desperdício de cerveja (BSG), que contém um significativo teor hemicelulósico fracionado. O trabalho foi adaptado de forma a contemplar as características e a disponibilidade da matéria-prima utilizada neste trabalho, o bagaço de cana de açúcar.

Além disso a etapa reacional foi modificada para representar o uso da levedura *Saccharomyces cerevisiae* modificada (in silico) para produção de xilitol conforme o texto de SILVA (2020)). No **APÊNDICE A** é possível ver o fluxograma adaptado para a produção do xilitol, com a matéria prima do bagaço de cana e levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

3.3.1 Pré Tratamento do Resíduo Lignocelulósico

O pré tratamento se inicia na unidade de mistura (P-1 / MX-101) onde a matéria prima será diluída e obter um fluxo com saída e composição 60% p/p em massa de água. Então , essa mistura será encaminhada para o tanque de armazenamento que permaneça com tempo de residência de 1h (P-2/ V-101), e é encaminhada para um trocador de calor (P-3/HX-101).

O fluxo que está pré-aquecido é misturado na misturadora (P-4 / MX-102).

A mistura é destinada ao reator (PFR) (P-5/R-101), que opera com tempo de residência médio de 15 min.

A mistura destinada ao PFR, é destinada a um tanque flash (P-6 / V-102) até obter uma temperatura de 100°C. No tanque flash, vamos ter duas saídas, os vapores do topo são enviados para um trocador de calor (P-3 / HX-101) para pré aquecer a mistura do bagaço, já o líquido é misturado com uma parte do fluxo de líquido proveniente da prensa de rosca (P-20 / SP-101) e passa para decanter centrífuga (P-9 / DC-101), nesse momento, o líquido é separado do sólido,

Já os sólidos são diluídos em água na unidade (P-10 / MX-104) e é prensado em prensa de rosca (P-20 / SP-101). A torta vai ser encaminhada para um secador rotativo para ser desidratada, produzindo um fluxo rico em celulose e lignina, denominada CelluLignin, que será encaminhado para venda.

O líquido da prensa de rosca é dividido em dois fluxos. Um é encaminhado para diluir a matéria-prima do Bagaço de Cana (em P-2/V-101). E o outro enviado para lavar a polpa do fundo do flash (P6/V-102),

O líquido na centrífuga decantadora (corrente S-11) é misturado com ácido sulfúrico (H₂SO₄) que possui concentração de 98% p/p que é encaminhado para (P-11 / MX-105), que tem uma saída concentração para H₂SO₄ de 0,50% m/m. A mistura entra em um reator de tanque agitado adiabático (CSTR) (P-14/R-102) com tempo de residência de 2,75 h.

3.3.2 Purificação do Substrato

A mistura de saída do CSTR, vai ser resfriada a 35 °C e encaminhada para um filtro rotativo a vácuo (P-18 / RVF-101) que contém uma solução p/p de hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂]. O tanque de neutralização opera continuamente com um tempo de residência de 30 minutos. O líquido que sai do tanque vai para um filtro rotativo a vácuo (P-18 / RVF-101) onde quase todas as cinzas, sulfato de cálcio (CaSO₄), celulose, lignina, gorduras e xilana são removidas.

O líquido que sai do filtro vai parar em um trocador de calor (P-19 / HX-103) que será aquecido, que então é armazenado no tanque agitado com tempo de residência de 1 h.

Este tanque vai atuar como um tanque tampão para o líquido passar por uma coluna de carvão ativado granular (GAC (P-27/GAC-101) que vai remover resíduos.

O proveniente da saída da coluna GAC é bombeada para um trocador de calor (P-29/HX-105), onde é pré-aquecido a 89 °C e depois alimentado em um evaporador. O líquido concentrado, que sai do evaporador, será direcionado para o trocador de calor (P-29/HX-105). O concentrado corrente que sai do trocador de calor será resfriado a 30 °C em outro calor trocador (P-30 / HX-106) e a partir daí será encaminhado para a etapa de fermentação.

3.3.3 Fermentação

Nessa etapa, uma das mais importantes, o líquido começa a ser resfriado e, é direcionado para um tanque agitado (P-32 / V-105), e é utilizado como tempo de residência de 8 horas, que funciona como tanque inicial e vai alimentar o processo de fermentação.

A etapa de fermentação (P-38/FR-101) é contínua e realizada por cinco fermentadores de $348,88m^3$ operando em paralelo. O processo da fermentação é aeróbio.

O ar fornecido é filtrado, comprimido e resfriado, A taxa de aeração e a temperatura de fermentação foram fixadas em 0,250 VVM e 30 °C, respectivamente, no procedimento (P-38 / FR-101) enquanto o tempo de cultivo (igual ao tempo de residência) é de 60 horas.

Na etapa de fermentação, vão ocorrer diversas reações sendo a principal produto xilitol. No processo será utilizado a levedura *Saccharomyces cerevisiae* modificada in silico que será apresentada posteriormente para fermentar continuamente a matéria-prima lignocelulósica.

3.3.4 Purificação do Produto

O caldo da pós fermentação apresenta grandes quantidades de resíduos, que vai incluir massa celular suspensa (biomassa), meios não fermentados e nutrientes. A purificação começa com o caldo de fermentação com o fluxo líquido da segunda centrífuga de pilha de discos (P-43 / DS-102).

A mistura vai ser encaminhada para a primeira centrífuga, onde grande parte da massa celular será retirada. O fluxo sólido obtido da primeira centrífuga de pilha de discos é separado, onde $\frac{1}{4}$ do fluxo de entrada para este divisor é reciclado de volta para os fermentadores iniciais, e os $\frac{3}{4}$ restantes são enviados para a segunda centrífuga de pilha de discos (P-43 / DS-102), para retirar o residual de biomassa.

A corrente líquida obtida da segunda centrífuga de pilha de discos é misturada com o caldo de fermentação proveniente dos fermentadores de produção. A solução resultante é encaminhada para um trocador de calor (P-54 / HX-112) e vai ser enviada para duas colunas de troca iônica em série.

Na primeira coluna tem-se a retirada de ácido acético, cinza, CaSO_4 e componentes proteicos solúveis são parcialmente removidos, enquanto na segunda coluna as quantidades restantes desses componentes são eliminadas.

A corrente do segundo íon da coluna de troca é aquecida em um trocador de calor (P-58 / HX-113) até a temperatura de $70\text{ }^\circ\text{C}$ e depois é alimentada para outro evaporador onde aproximadamente 82% da água é evaporada. A corrente concentrada obtida neste evaporador, vai para uma corrente de reciclagem líquida (licor) contendo algum xilitol da cesta centrífuga (P-77/BC BD-101).

O resto da mistura é alimentada em uma coluna de cromatografia onde o xilitol é purificado com um rendimento de recuperação de 94%

3.3.5 Cristalização-Secagem do Produto

A corrente do xilitol da saída da coluna de cromatografia, é aquecida e encaminhada para um evaporador, onde aproximadamente 94% da água é retirada. O fluxo quente e concentrado obtido já possui a concentração de xilitol em torno de 72% p/p, e vai ser resfriado (P-74 / HX-117) até $50\text{ }^\circ\text{C}$ e vai para a etapa de cristalização (P-75 / R-103), operando em um tempo de residência de 5 horas.

. A pasta que sai do primeiro cristizador é encaminhada para o segundo cristizador onde parte do xilitol dissolvido é cristalizado para atingir uma concentração alvo de xilitol dissolvido de 300 g/L

A lama resultante do segundo cristizador, que tem uma concentração de cristal de xilitol de cerca de 56% p/p, é então centrifugado em uma centrífuga de cesto

(P-77/BCFBD-101) para separar os cristais de xilitol do licor-mãe. As centrífugas de cesto operam em modo lote.

Existem duas centrífugas de cesto operando em modo escalonado. Os cristais úmidos de xilitol vão para um secador rotativo (P-88 / RDR-101) onde a água é removida até um teor de umidade final de 5%.

A corrente de produto de cristais de xilitol tem uma vazão uma pureza que gira em torno de 100%.

3.3.6 Reciclagem de Água

A planta analisada consome grandes quantidades de água. Por exemplo nas seguintes etapas.

- Diluição da matéria-prima BSG (P-1)
 - Diluição dos sólidos obtidos na centrífuga decantadora (P-10).
 - A Coluna de Carvão Ativado (P-27), que purifica o fluxo líquido proveniente do Filtros de Vácuo Rotativos (P-18).
 - A Coluna de Cromatografia SMB (P-68), que purifica o fluxo concentrado proveniente do evaporador de quatro efeitos (P-59).

Diversas estratégias foram implementadas para recuperar e reciclar a água consumida durante o processo, a fim de diminuir custos e viabilizar a produção.

3.4 - Análise de Sensibilidade

Para realizar a simulação no software de simulação SuperPro Designer foi realizado uma análise de sensibilidade com 3 variáveis: Bagaço de cana (ton/h) , Conversão da fermentação (%) e Preço do xilitol (US\$/kg).

Para esse estudo serão analisadas as variáveis respostas: CAPEX, OPEX, IRR, Payback, NPV a 8%, 12% e 20%. A Tabela 3.2 apresenta os pontos para Análise de Sensibilidade

Tabela 3.2 : Pontos para Análise de Sensibilidade

		-1	0	1	d
1	Escala (ton/h)	5	12,5	20	7,5
2	Conversão da fermentação (%)	85,0	90,0	95,0	5,0
3	Preço do xilitol (US\$/kg)	5,0	7,5	10,0	2,5

Fonte : Próprio Autor

As variáveis do ponto central foram escolhidos baseados em referências bibliográficas, valor da entrada de bagaço de cana de 12,5 ton/h corresponde ao excedente de bagaço de uma planta de etanol de porte médio, de moagem 500 t/h, a conversão da fermentação que na indústria gira em torno de 90% , e o Preço do xilitol a 7,5 (US\$/kg) como já apresentado anteriormente. A Tabela 3.3 abaixo apresenta as combinações dos parâmetros para a análise.

Tabela 3.3: Análise de Sensibilidade Fatores

Runs	Parâmetros		
	Escala (ton/h)	Conversão da fermentação (%)	Preço do xilitol (US\$/kg)
1	5	85,0	5,0
2	20	85,0	5,0
3	5	95,0	5,0
4	20	95,0	5,0
5	5	85,0	10,0
6	20	85,0	10,0
7	5	95,0	10,0
8	20	95,0	10,0
9	12,5	90,0	7,5

Fonte : Próprio Autor

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme já mencionado anteriormente, é esperado receber as seguintes variáveis respostas para ser analisada: CAPEX, OPEX, IRR, Payback, NPV a 8%, 12% e 20%. As suas definições serão exemplificadas posteriormente.

A Tabela 4.1 abaixo, apresenta o resultado do Caso Base para inicialmente ser apresentado os resultados esperados:

Tabela 4.1 : Análise do Caso Base

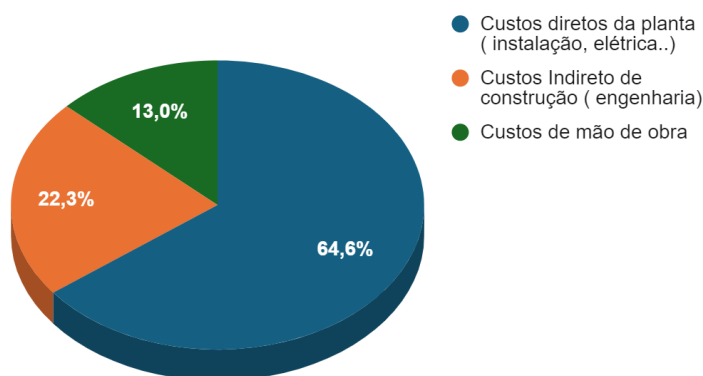
				Respostas			
CAPEX(despesas aquisição)	OPEX(despesas dia a dia)	IRR	Payback (ano)	NPV i = 8% a.a.	NPV i = 12 % a.a.	NPV i = 20 %a.a.	Rendimento kg Xilitol/kg bagaço(hor a)
254.710.000	92.990.000	16,1%	4,81	173.638.000	62.296.000	-53.449.000	0,16

Fonte : Próprio Autor

Todos os dados são entregues pelo simulador em forma de relatório, pode-se conferir o relatório de despesas no **APÊNDICE B**.

No caso base pode - se iniciar com algumas vistas, como a apresentação da variável CAPEX que posteriormente será melhor definido, mas que apresenta os custos de despesas de aquisição da indústria conforme a figura 4.1.

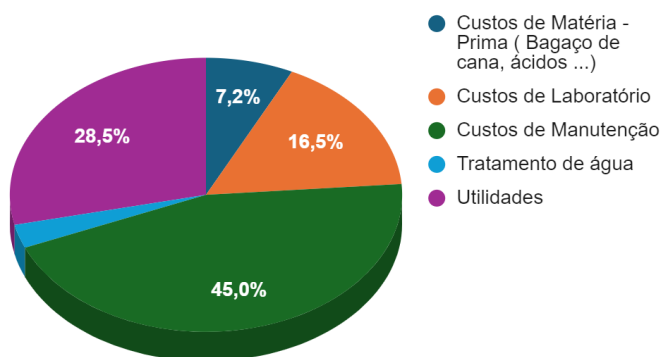
Figura 4.1 : CAPEX do caso base



Fonte : Próprio Autor

O OPEX que posteriormente será melhor definido apresenta os custos de despesas do dia a dia operacional conforme a figura 4.2

Figura 4.2 : OPEX do caso base



Fonte : Próprio Autor

Na Tabela 4.2 , pode-se observar as respostas obtidas de todos os testes fazendo a análise de sensibilidade dos Parâmetros.

Tabela 4.2 : Resposta Variáveis

Runs	CAPEX(despesas aquisição)	OPEX(despesas dia a dia)	IRR	Payback (ano)	Respostas			Rendimento kg Xilitol/kg bagaço(hor a)
					NPV i = 8% a.a.	NPV i = 12 % a.a.	NPV i = 20 %a.a.	
1	126.909.000	51.629.000			-160.067.000	-150.360.000	-135.607.000	0,15
2	378.848.000	132.117.000	7,5%	8,70	-31.621.000	-117.125.000	-201.380.000	0,15
3	127.808.000	53.506.000			-159.547.000	-150.252.000	-135.911.000	0,17
4	381.986.000	135.541.000	8,2%	7,76	7.769.000	-90.148.000	-187.694.000	0,17
5	126.909.000	50.826.000	12,9%	5,64	49.059.000	2.650.000	-44.781.000	0,15
6	378.848.000	134.519.000	27,0%	2,89	740.510.000	423.473.000	117.902.000	0,15
7	127.808.000	53.500.000	14,7%	5,06	77.127.000	18.886.000	-35.518.000	0,17
8	381.960.000	135.534.000	29,2%	2,57	858.930.000	531.732.000	181.013.000	0,17
9	254.710.000	92.990.000	16,1%	4,81	173.638.000	62.296.000	-53.449.000	0,16

Fonte : Próprio Autor

No **APÊNDICE B** é possível ver como são obtidos os resultados dos parâmetros citados acima.

Para realizar alguns testes com os resultados obtidos, foi utilizado o programa Design-Expert, o programa oferece matrizes de teste para triagem de até 50 fatores. O

programa utiliza a ANOVA que é a análise de variância para fornecer e estabelecer a significância estatística. A partir disso e com base em alguns modelos preditivos, é possível analisar a importância de cada fator para os resultados esperados.

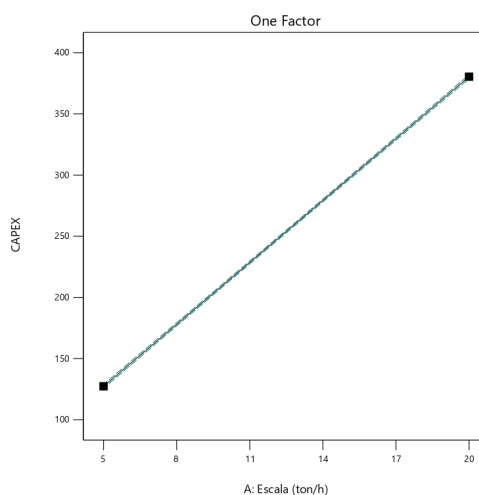
Para a análise esperada só foram considerados parâmetros significativos de acordo com o melhor ajuste. Ou seja, o fator precisa ter significância estatística para ser considerado na análise da resposta. Para se chegar a uma conclusão de qual simulação apresentou melhores resultados será analisada todas as respostas. Além disso, o projeto apresenta um tempo de vida de 20 anos, e precisará de 30 meses para ser construído e 4 meses para início do seu funcionamento.

4.1 - CAPEX

Capex é uma sigla da expressão Capital Expenditure CAPEX, a sigla pode ser definida como despesas de capital, este custo existe para expandir o escopo das operações de uma empresa. Por exemplo, pode ser considerado CAPEX os gastos de uma construção de fábrica, ou aquisições materiais (INTELLIGEN, INC 2023).

Para o CAPEX o melhor modelo de ajuste apresentado foi o linear com parâmetros significativos de apenas uma variável. Conforme a Figura 4.3 é possível ver quais são os fatores que interferem na Resposta CAPEX.

Figura 4.3 : Análise da variável resposta CAPEX



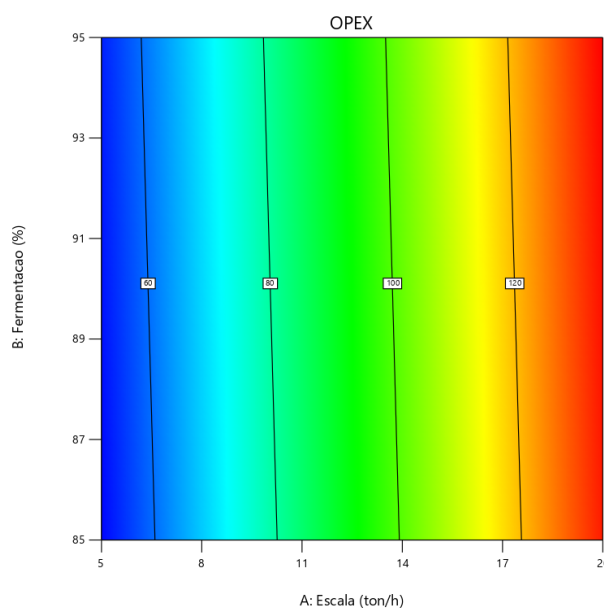
Fonte : Próprio Autor

Para a análise inicial é possível perceber que quanto maior a entrada de bagaço de cana, maior será o custo de CAPEX , já que o CAPEX abrange os custos de instrumentação, elétrica, engenharia, construção, equipamentos entre outros, portanto quanto maior a entrada de bagaço maior terá que ser a capacidade da planta , elevando o custo inicial de investimento do projeto.

4.2 - OPEX

OPEX é a sigla do termos Operational Expenditure, os gastos do OPEX estão relacionados a despesas operacionais, e a manutenção de equipamentos presentes na empresa. Por exemplo, custo de materiais, contas, funcionários entre outros (INTELLIGEN, INC 2023)Para o OPEX o melhor ajuste considerado foi o linear, tendo como parâmetros significativos duas variáveis. Conforme a Figura 4.4 é possível ver quais são os fatores que interferem na Resposta CAPEX.

Figura 4.4 : Análise da variável resposta OPEX



Fonte : Próprio Autor

Analisando o gráfico pode se ver os custos de OPEX pelas regiões coloridas.

- Azul : Menores custos de operação
- Verde : Custos intermediários

- Amarelo a vermelho : Valores elevados de OPEX

Realizando algumas análises iniciais, é possível observar que os menores custos de operação estão associados a menores escalas, além disso mesmos a variável da fermentação tendo pouca influências ela apresenta uma pequena significância no gráfico, e mostra que em processos com altas eficiências pode-se ter uma redução de custos operacionais.

Os custos operacionais mais elevados, apresentam as escalas mais elevadas e conversão mais baixa. Mostrando que com maiores entradas e menores conversões teremos um aumento dos custos.

4.3 - IRR (Internal Rate of Return)

IRR, mais conhecida como taxa interna de retorno, é uma taxa de desconto hipotética, que vai ser calculada baseada a partir da projeção de um fluxo de caixa. Na prática a taxa iguala o valor do investimento com o valor do retorno, além disso é uma boa métrica para entender se o investimento vale a pena ou não (INTELLIGEN, INC 2023).

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{FC_n}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (1)$$

Sendo:

VPL = Valor Presente Líquido

n = número de períodos

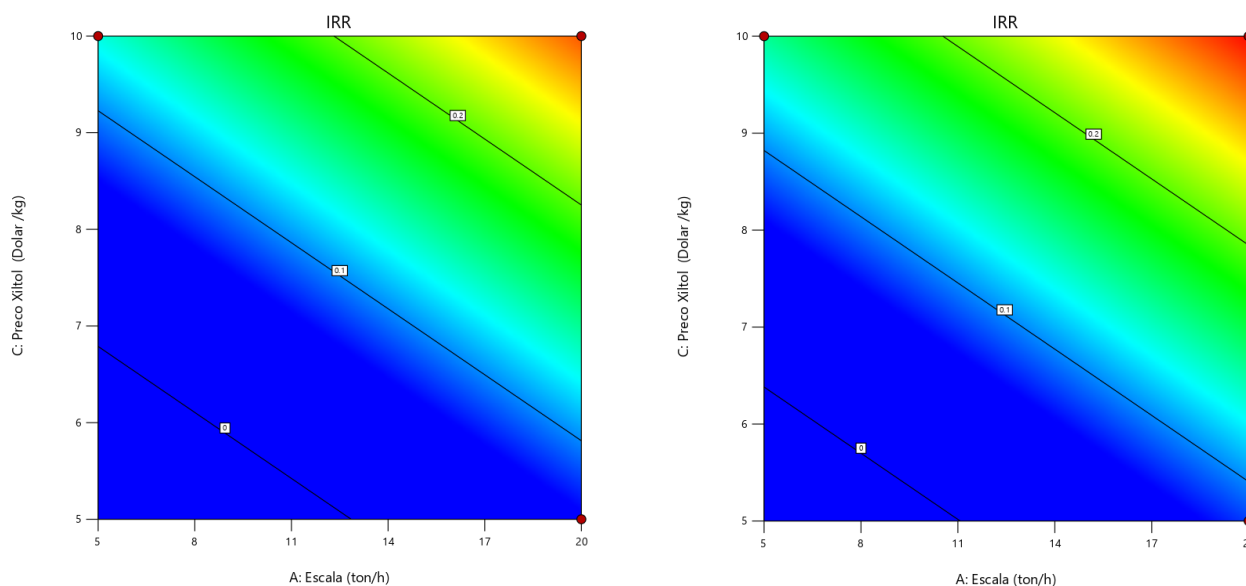
FC = Fluxo de Caixa

IRR= Taxa Interna de Retorno

A IRR vai indicar o retorno percentual esperado do investimento no processo de produção de xilitol a partir do bagaço de cana-de-açúcar. No geral, uma IRR maior significa que o projeto ou investimento oferece um retorno maior em relação ao capital investido, o que é positivo e o esperado para obter uma retorno na produção.

Para a variável IRR o ajuste utilizado foi o modelo linear ,apresentando como parâmetros significantes as 3 variáveis do processo, sendo a conversão a que apresenta menor influência conforme apresentado nas figuras 4.5 e 4.6.

Figura 4.5 e 4.6 : Análise da variável resposta IRR conversão 85% e 95%



Fonte : Próprio Autor

As cores indicam os valores da TIR, com a seguinte interpretação:

- Azul: TIR negativa, indicando que o projeto não é economicamente viável.
- Azul Claro - Verde: TIR igual a zero, ponto de equilíbrio econômico.
- Verde - Amarelo : TIR positiva, indicando viabilidade econômica crescente à medida que o projeto entrega maior retorno.

Na região verde - amarela , temos o projeto com uma TIR Positiva, isso indica que a combinação de maior escala e aumento do preço de venda do xilitol apresentam um retorno superior ao custo de investimento inicial. Já a região Azul do projeto trás uma TIR que seria inviável economicamente, pode - se analisar que em escalas muito pequenas (valores à esquerda no gráfico), mesmo preços elevados de xilitol podem não ser suficientes para tornar o projeto viável, devido a custos fixos elevados diluídos em menor produção. Além disso, mesmo a fermentação sendo a variável com menor influência , é possível ver que quanto maior a fermentação , combinados com a maior escala e o maior preço , retorna um maior valor de TIR.

4.4 - PayBack Time

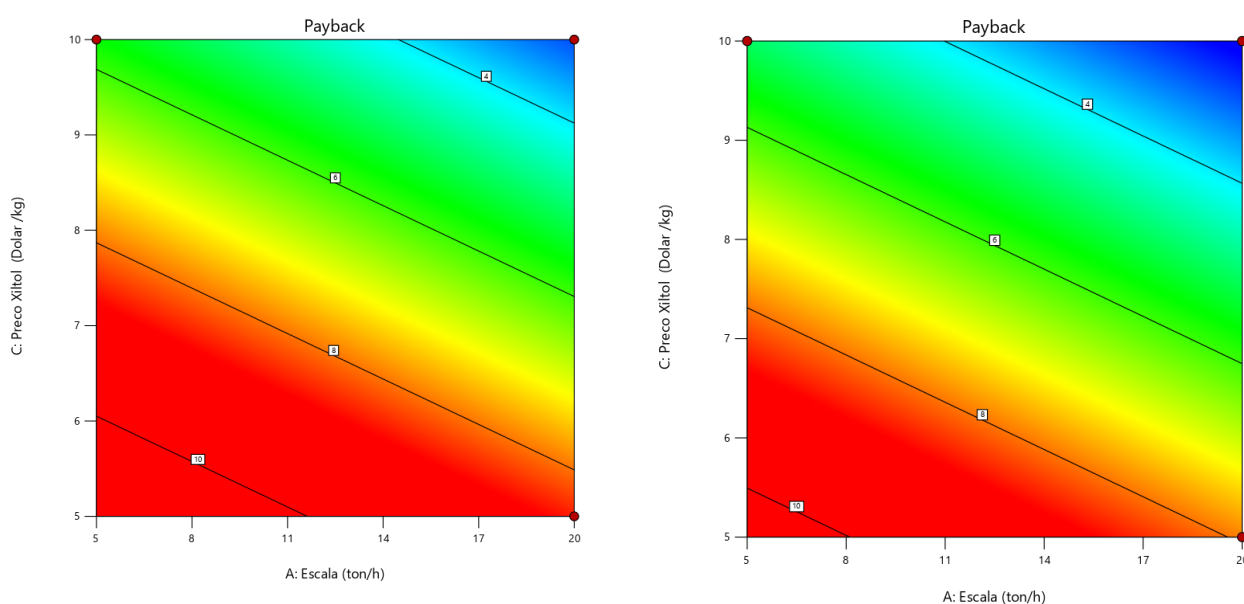
O payback time é um indicador financeiro utilizado para avaliar o período de tempo necessário para que o valor investido retorne para o investidor através dos lucros gerados pelo projeto(INTELLIGEN, INC 2023).

O cálculo do payback é relativamente simples sendo:

$$\text{Investimento Inicial} / \text{Receita Anual} = \text{Payback Time} \quad (2)$$

Para o PayBack time o melhor ajuste considerado foi o linear, tendo como parâmetros significativos as três variáveis. Conforme a Figura 4.7 e 4.8 é possível ver como os fatores interferem na Resposta Payback.

Figura 4.7 e 4.8 : Análise da variável resposta PayBack conversão 85% e 95%



Fonte : Próprio Autor

As cores do gráfico indicam o tempo de retorno (Payback) em anos:

- Azul (4 anos): Menor tempo de retorno, indicando alta variabilidade.
- Verde a Amarelo (6 a 8 anos): Retorno em tempo intermediário.
- Laranja a Vermelho (10 anos): Maior tempo de retorno, o que apresenta menor atratividade econômica.

As linhas no gráfico indicam os valores constantes do Payback (4, 6, 8, 10 anos), conectando as combinações de escala de produção e preço do xilitol que resultam no mesmo tempo de retorno.

Observando o Payback na faixa azul na parte superior direita do gráfico (alta escala de produção e preço elevado do xilitol), tem-se a combinação que maximiza as receitas e diminui os custos fixos, ou seja uma maior escala com um preço elevado. Possível entender também que quanto maior a conversão, menos tempo de retorno, fazendo a combinação de maior escala, maior conversão e maior preço a certa para se ter um Payback menor. Já considerando a região de parte amarela e vermelha, localizada na parte inferior esquerda do gráfico (baixa escala e preço reduzido), as receitas seriam insuficientes para compensar os custos iniciais rapidamente, prolongando o retorno do investimento.

4.5 - NPV

O Valor Presente Líquido de um fluxo de caixa é o valor monetário de todo o fluxo no tempo atual ou ao iniciar um investimento. Para ter este valor, é necessário somar as receitas líquidas futuras descontadas ao valor presente com uma taxa de desconto (ou taxa mínima de atratividade) (INTELLIGEN, INC 2023).

$$VPL = \sum_{n=1}^N \frac{FC_n}{(1+TMA)^n} \quad (3)$$

Se um investimento não tiver um VPL positivo, ou se houver outras oportunidades com um VPL maior, então o investimento não deve ser realizado.

n = número de períodos

FC = Fluxo de Caixa

Para analisar o VPL tem-se:

VPL Negativo = despesas maiores que as receitas, ou seja, o projeto é inviável;

VPL Positivo = receitas maiores que as despesas, ou seja, o projeto é viável;

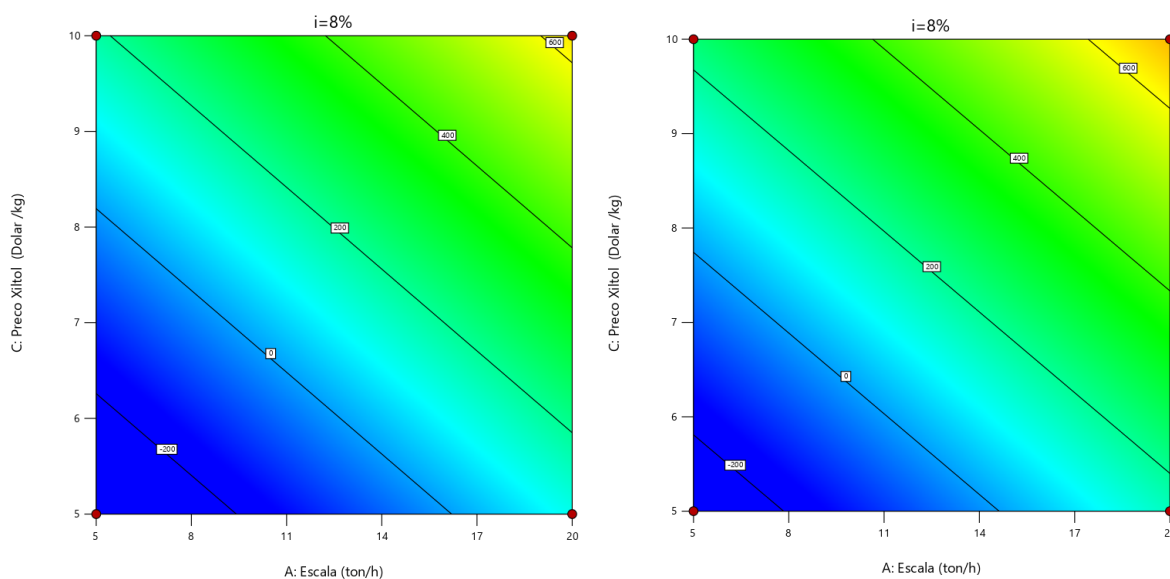
VPL Zero = receitas e despesas são iguais, ou seja, a decisão de investir no projeto é neutra.

É importante analisar que a Taxa Mínima de Atratividade é definida como o retorno mínimo esperado para o projeto ser considerado viável. Ela reflete o custo de oportunidade do capital, considerando o retorno que poderia ser obtido em investimentos alternativos com risco semelhante. A TMA é usada como a taxa de desconto nos cálculos do VPL e serve como referência para avaliar a atratividade econômica de um projeto.(INTELLIGEN, INC 2023).

Para calcular a VPL, deve-se testar valores de TMA, neste trabalho será testado TMA de $i=8\%$; $i=12\%$; $i=20\%$. Se a TIR do projeto for maior que a TMA, o projeto é economicamente viável. Caso contrário, não atenderá ao retorno mínimo esperado e poderá ser descartado.

Para a variável NPV o ajuste utilizado foi o modelo linear , apresentando como parâmetros significantes 2 variáveis do processo e escala e o preço do xilitol ,a conversão não apresenta parâmetros tão significantes no processo mas será apresentada para fins de análise.Primeiro foram apresentados o NPV com a TMA a $I=8\%$ conforme as figuras 4.9 e 4.10.

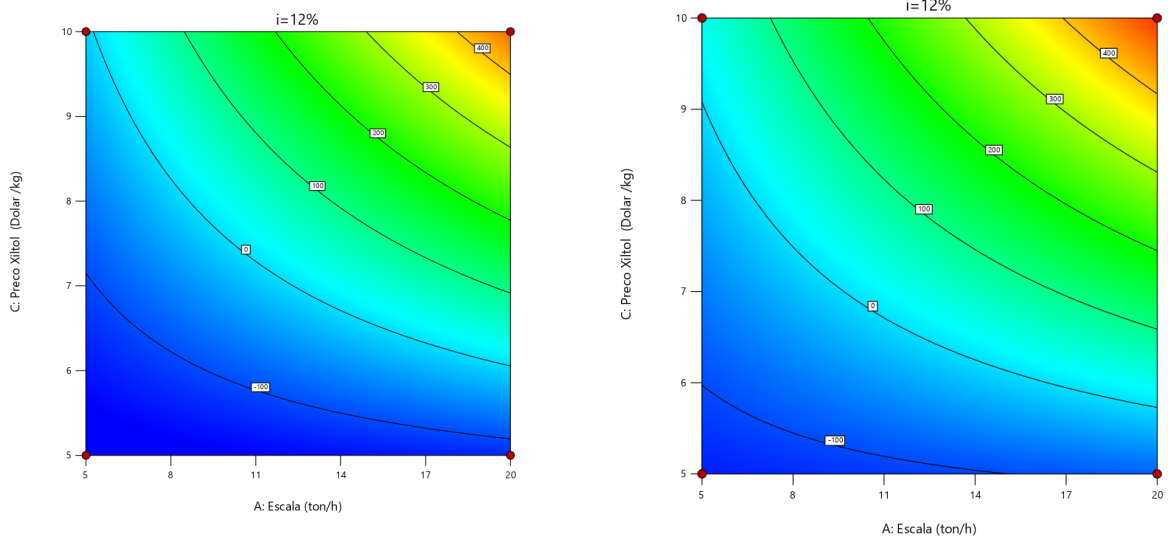
Figura 4.9 e 4.10 : Análise da variável resposta NPV $i=8\%$ conversão 85% e 95%



Fonte : Próprio Autor

Agora , pode - se ver os gráficos do NPV com a TMA a $I=12\%$ conforme as figuras 4.11 e 4.12

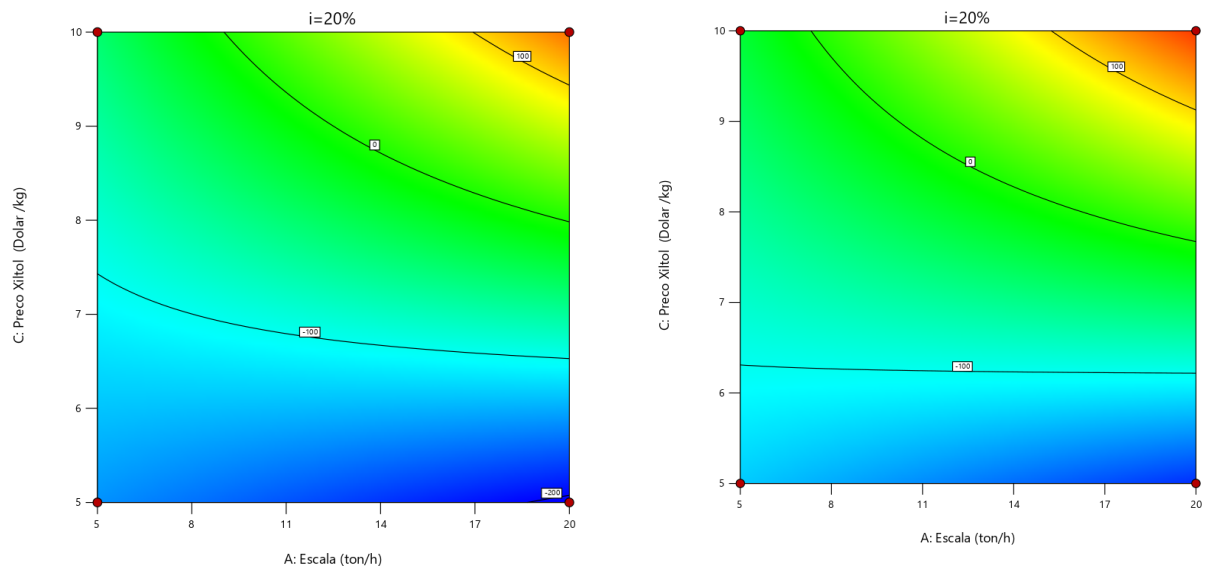
Figura 4.11 e 4.12 : Análise da variável resposta NPV $i=12\%$ conversão 85% e 95%



Fonte : Próprio Autor

E por último são apresentados os gráficos com com a TMA a $I=20\%$ conforme as figuras 4.13 e 4.14

Figura 4.13 e 4.14 : Análise da variável resposta NPV $i=20\%$ conversão 85% e 95%



Fonte : Próprio Autor

Na região de VPL negativo, que são observadas no canto inferior esquerdo (preço e escala reduzidos) , as receitas não serão suficientes para cobrir os custos, o que vai tornar o projeto inviável.

Na região em que o VPL é igual a zero, temos a linha onde o projeto não gera lucro nem prejuízo, ou seja, ainda não é o mais ideal para uma produção , mas não se tem prejuízo.

No espaço onde o VPL é positivo parte superior direita do gráfico (alta escala com elevados preços), o projeto se torna economicamente atrativo, ou seja gera valor significativo, que é o esperado para o funcionamento do projeto.

Pensando na fermentação pode -se observar que quanto maior a fermentação , maior o VPL , considerando as comparações por exemplo do gráfico das figuras 12 e 13

Comparando os gráficos 10 , 12 e 14 , variam o TMA , é possível observar que quanto maior o TMA , menor será o meu VPL , isso mantendo os fatores de escala, fermentação e preço.

4.6 - Rendimento

O rendimento é uma métrica que divide a saída pela entrada ou seja:

$$\text{entrada de bagaço/saída de xilitol} = \text{rendimento} \quad (4)$$

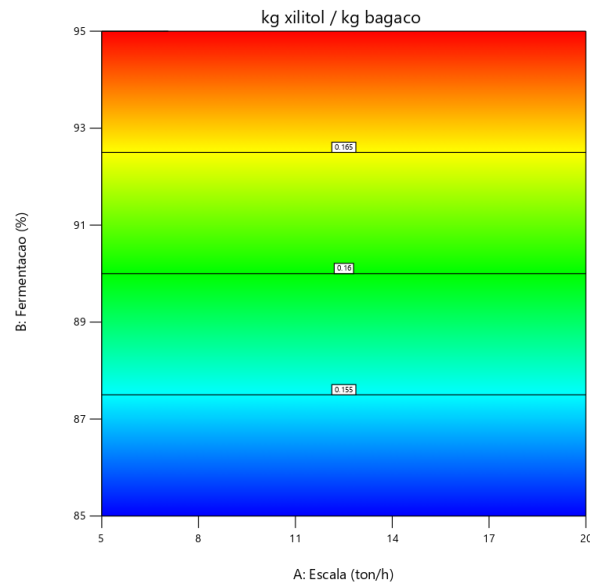
As cores indicam os valores resposta de rendimento, com a seguinte interpretação:

- Azul: Menor rendimento
- Azul Claro - Verde: Rendimento mediano
- Amarelo– Vermelho : TIR positiva, indicando viabilidade econômica crescente à medida que o projeto entrega maior retorno.

Para a variável rendimento o ajuste utilizado foi o modelo linear , apresentando como parâmetros significantes 1 variáveis do processo que é fermentação, a escala não apresenta parâmetros tão significantes no processo mas será apresentada para fins de análise.

O parâmetro mais influente no rendimento de xilitol é o percentual de fermentação (eixo Y), já que ele define a mudança no rendimento com maior clareza. A escala de operação (eixo X) parece ter um efeito mínimo no rendimento, dado que os valores permanecem constantes ao longo do eixo X.

Figura 4.15 : Análise da variável resposta de rendimento



Fonte : Próprio Autor

Para o rendimento , é possível ver que a fermentação gera a maior influência, bem mais do que a variável da escala , então quanto maior for a fermentação , será possível ter maiores transformações de bagaço de cana em xilitol;

5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O trabalho teve por objetivo estudar sobre a viabilidade da produção de xilitol por rota biotecnológica, A viabilidade econômica foi confirmada, mas a escolha da melhor combinação de parâmetros vai depender das prioridades escolhidas.

Para a variável CAPEX, a análise relativamente simples, quanto maior a escala maior será o custo de instalações iniciais, então deve-se analisar as outras variáveis respostas para analisar a melhor opção.

Apesar de não causar grandes variações no OPEX, operar em eficiências próximas de 95% seria desejável, pois contribui para maior rendimento e aproveitamento do substrato (resíduo lignocelulósico de bagaço de cana) sem penalizar significativamente o custo. O ideal seria considerar escalas talvez intermediárias para oferecer um pouco de equilíbrio nos custos operacionais.

Observando o Payback a combinação de maior escala, maior conversão e maior preço é certa para se ter um Payback menor já que diminui o tempo de retorno nos investimentos iniciais.

Para a variável resposta IRR os gráficos 7 e 8 mostram que a viabilidade do projeto depende significativamente tanto da escala de produção quanto do preço de mercado do xilitol e da fermentação. Então deve-se priorizar o aumento de todos os fatores para retornar um maior valor de IRR

O ideal conforme dito na seção anterior é que a TIR calculada seja sempre maior que a TMA, comparando os resultados da Tabela 6 : Resposta Variáveis é possível tirar algumas conclusões, as linhas 6 e 8 de testes são as únicas que apresentaram um TIR maior do que todos os TMA apresentados, isso não significa que os outros testes não são viáveis pois não foi estabelecida uma única TMA significa apenas que os testes apresentados nas linhas 6 e 8 são mais propícios a melhores resultados.

Isso pode ser confirmado com os resultados obtidos nos gráficos de VPL, se uma TMA de menor valor fosse estabelecida, várias opções de testes que teriam viabilidade econômica do processo, mas os que apresentam melhores VPLs são os testes 6 e 8 onde

apresentam os maiores valores e não apresentam nenhuma VPL negativa com a variação do TMA.

Para o rendimento , é possível ver que a fermentação gera a maior influência , então quanto mais conseguir converter a matéria prima em produto, melhores serão os resultados.

Portanto pode-se concluir que, sim , há viabilidade econômica na produção de xilitol por rota biotecnológica por *Saccharomyces cerevisiae* modificada in silico, mas a diversos parâmetros que podem ser avaliados para se decidir quais os melhores fatores, vai depender da prioridade estabelecida pelo investidor, se a prioridade é investir o menor valor inicial possível, um tempo de Payback máximo, mínimo de rendimento, TMA esperado.

Apesar de tudo neste trabalho com os fatores estabelecidos pode se apresentar como melhores resultados os testes 6 e 8 , que apresentam maiores valores de escala e Preço de venda do xilitol, apesar da fermentação apresentar durante os testes grande importância nos resultados o seu intervalo de conversão não apresentou grandes diferenças comparados aos outros dois fatores, mas o teste 8 apresenta um retorno um pouco maior por conta da fermentação.

Como sugestão em futuros estudos , pode se ampliar o intervalo de conversão do xilitol para realizar novos testes com conversões mais baixas, além da possibilidade de estabelecer algumas métricas de atingimento de resultados, como Payback mínimo esperado , rendimento, TMA, investimento inicial, outra sugestão seria realizar comparações de custo com a rota química, no momento não foram encontradas biografias com informações similares para realizar essas comparações. Tudo isso pode se tornar fatores importantes na análise de resultados e mudar bastante a determinação dos melhores fatores.

6 -REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, T. L. Produção biotecnológica de xilitol a partir de hidrolisado de bagaço de caju. 2014. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ALVES, L. A. Efeito do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar submetido a diferentes tratamentos sobre a atividade da xilose redutase de *Candida guilliermondii*. 2001. 193f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2001.

ARRUDA, P. V. Ampliação de escala da produção biotecnológica de xilitol a partir do bagaço de cana-de-açúcar. 2011. 165f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BEVILAQUE, G. C. Um estudo da produção biológica simultânea de xilitol e arabitol a partir de resíduos agroindustriais. 2023. 118f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, São Paulo, 2023.

BOAES, T. S. Aprimoramento da obtenção do hidrolisado hemicelulósico a partir da mistura do bagaço e palha de cana-de-açúcar visando a produção de xilitol. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de Lorena, 2022. <https://doi.org/10.11606/D.97.2022.tde-27092022-084342>.

DASGUPTA, D.; BANDHU, S.; ADHIKARI, D. K.; GHOSH, D. Challenges and prospects of xylitol production with whole cell bio-catalysis: A review. *Microbiological Research*, v. 197, p. 9-21, abr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.12.012>.

DIDÁTICA LABOR. Xilitol 25g CAS 87-99-0. Disponível em: <https://www.didaticalabor.com.br/xilitol-25g-cas-87-99-0>. Acesso em: 26 fev. 2025.

FRANÇOSO, L. O. Xilitol: um edulcorante diversificado e benéfico para a saúde humana – Uma revisão bibliográfica. Bauru, SP: Faculdade de Ciências – UNESP, 2015. 54 f.

GOMES, J. V. O. Modelagem e simulação de um biorreator para a produção de xilitol a partir de hidrolisados hemicelulósicos. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2023.

GLOBAL MARKET INSIGHTS. Xylitol Market Size - By Application (Chewing Gum, Confectionary, Food, Personal Care, Pharmaceuticals, Nutraceuticals), By Source (Corncob, Hardwood, Corn Husk, Sugarcane Bagasse), By Downstream Application Potential & Forecast, 2024 – 2032. Disponível em: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/xylitol-market>. Acesso em: 10 ago. 2024.

HALLBORN, J.; WALFRIDSSON, M.; AIRAKSINEN, U.; OJAMO, H.; HAHN-HÄGERDAL, B.; PENTTILÄ, M.; KERÄNEN, S. Xylitol Production by Recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. *Bio/Technology*, v. 9, n. 11, p. 1090–1095, 1991. doi:10.1038/nbt1191-1090.

H.M. Raoul Özüdoğru, M. Nieder-Heitmann, K.F. Haigh, J.F. Görgens. Techno-economic analysis of product biorefineries utilizing sugarcane lignocelluloses: Xylitol, citric acid and glutamic acid scenarios annexed to sugar mills with electricity co-production. *Industrial Crops and Products* Volume 133, July 2019, Pages 259-268 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.015>

F

INTELLIGEN INC. SuperPro Designer Overview, 2024. Disponível em: <https://www.intelligen.com/products/superpro-overview/>. Acesso em: 09 set. 2024.

INTELLIGEN, INC. SuperPro Manual. A Comprehensive Simulation Tool for the Design, Retrofit & Evaluation of Specialty Chemical, Biochemical, Pharmaceutical,

Consumer Product, Food, Agricultural, Mineral Processing, Packaging and Water Purification, Wastewater Treatment and Air Pollution Control Processes, 2023.

JEFFRIES, T. W.; JIN, Y. S. Metabolic engineering for improved fermentation of pentoses by yeast. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 63, p. 495-509, 2004.

JUNIOR, J. E. M. Desenvolvimento do processo de recuperação e purificação do xilitol produzido por rota biotecnológica utilizando o hidrolisado hemicelulósico do bagaço de caju como matéria-prima. 2019. 93f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LADEIRA, S. A. Aproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de celulases e xilanases por espécies de *Bacillus* sp. Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, mai. 2014.

MELO, D. W. D. Predição das velocidades específicas da produção de xilitol a partir do bagaço de caju por *Kluyveromyces marxianus* CCA 510, utilizando redes neurais artificiais. 2023. 58 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho do mercado de xilitol e análise de ações – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029). Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/xylitol-market>. Acesso em: 09 jan. 2025.

MUSSATO, S. I.; ROBERTO, I. C. Xilitol: Edulcorante com efeitos benéficos para a saúde humana. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas*, v. 38, n. 4, out./dez., 2002.

PAIVA, J. D. Produção de xilitol a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade de Campinas, São Paulo, 2000.

PARAJO, J. C.; DOMINGUEZ, H.; DOMINGUEZ, J. M. Biotechnological production of xylitol. Part 2: Operation in culture media made with commercial sugars. *Bioresource Technology*, v. 65, p. 203-212, fev. 1998.

PEDROSO, F. P.; Utilização de suprodutos da cana de açúcar para produção de xilitol *Revista Engenho*, vol.13 – Jun, 2017.

PÉREZ, A. F. H. Produção biotecnológica de xilitol a partir da mistura de bagaço e palha de cana-de-açúcar com aproveitamento do melaço: Otimização das condições de cultivo e engenharia da via metabólica. 2019. 192 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, São Paulo, 2019.

RAVELLA, S. R. et al. Overview on Commercial Production of Xylitol, Economic Analysis and Market Trends. In: *d-Xylitol*. [S.l.]: Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 291–306.

RAFIQUI, I. S. M.; SAKINAH, A. M. M. Processes for the Production of Xylitol—A Review. *Food Reviews International*, v. 29, n. 2, p. 127-156, 2013. DOI: 10.1080/87559129.2012.714434.

SÁNCHEZ, A. P.; MISAILIDIS, N.; FERREIRA, R. F.; PETRIDES, D. Xylitol Production via Fermentation from Lignocellulosic Feedstocks – Process Modeling and Techno-Economic Assessment (TEA) using SuperPro Designer. dez. 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.34516.58248.

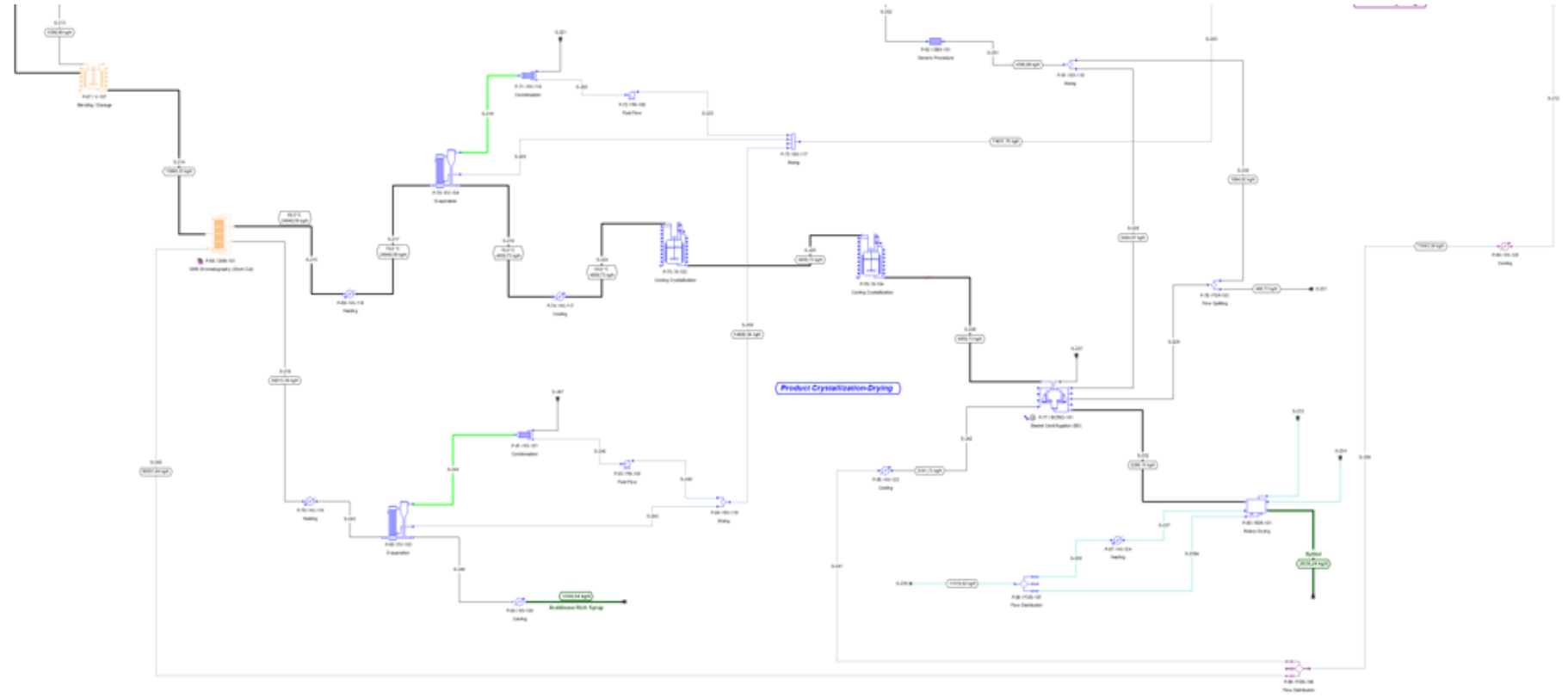
SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. *Revista UNINGÁ Review*, v. 29, n. 2, p. 06-13, jan./mar. 2017.

SARROUH. B. F., Estudo da Produção Biotecnológica de xilitol em reator de leito fluidizado Utilizando Bagaço de Cana de Açúcar e Células Mobilizadas:Avaliação de

Parâmetros Operacionais e Viabilidade Econômica. Tese (Doutorado em Biotecnologia)-
Escola de Engenharia de Lorena - USP, Lorena, 2009.

SILVA, A. S. D. OTIMIZAÇÃO IN SILICO DA PRODUÇÃO DE XILITOL POR
SACCHAROMYCES CEREVISIAE A PARTIR DE MATERIAL HEMICELULÓSICO
2020.45f. Trabalho de Conclusão de Curso(Bacharelado em Engenharia Química) -
Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

TAMANINI, C., & HAULY, M. C. de O. (2004). Resíduos agroindustriais para
produção biotecnológica de xilitol. Semina: Ciências Agrárias, 25(4), 315.
doi:10.5433/1679-0359.2004v25n4p315



APÊNDICE B

Economic Evaluation Report for Xylitol_original Run 3

dezembro 15, 2024

1. EXECUTIVE SUMMARY (2024 prices)

Total Capital Investment	136.866.000 \$
Capital Investment Charged to This Project	136.866.000 \$
Operating Cost	53.506.000 \$/yr
Main Revenue	35.416.000 \$/yr
Other Revenues	7.912.949 \$/yr
Total Revenues	43.329.000 \$/yr
Cost Basis Annual Rate	7.083 MT MP/yr
Unit Production Cost	7.553,79 \$/MT MP
Unit Production Revenue	6.117,14 \$/MT MP
Gross Margin	- 23,49 %
Return On Investment	- 1,52 %
Payback Time	N/A
IRR (After Taxes)	N/A
NPV (at 8,0% Interest)	- 159.547.000 \$

MP = Total Flow of Stream 'Xylitol'

2. EQUIPMENT SPECIFICATION AND FOB COST (2024 prices)

Main Equipment

Quantity/ Standby/ Staggered	Name	Description	Unit Cost (\$)	Cost (\$)
1 / 0 / 0	EV-101	Multi-Effect Evaporator Mean Heat Transfer Area = 252,16 m2	4.131.000	4.131.000
1 / 0 / 0	EV-103	Multi-Effect Evaporator Mean Heat Transfer Area = 164,55 m2	2.895.000	2.895.000
1 / 0 / 0	EV-102	Multi-Effect Evaporator Mean Heat Transfer Area = 66,40 m2	1.509.000	1.509.000
1 / 0 / 0	EV-104	Multi-Effect Evaporator Mean Heat Transfer Area = 59,32 m2	1.409.000	1.409.000
3 / 0 / 0	FR-101	Fermentor Vessel Volume = 348,88 m3	1.101.000	3.303.000
1 / 0 / 0	SMB-101	SMB Volume = 1905,51 L	1.053.000	1.053.000
1 / 0 / 0	DS-101	Disk-Stack Centrifuge Throughput = 13287,00 L/h	985.000	985.000
1 / 0 / 0	SP-101	Screw Press Throughput = 27999,00 kg/h	849.000	849.000
1 / 0 / 0	DC-101	Decanter Centrifuge Throughput = 34127,69 L/h	817.000	817.000
1 / 0 / 0	G-101	Centrifugal Compressor Compressor Power = 428,32 kW	746.000	746.000
1 / 0 / 0	R-102	Stirred Reactor Vessel Volume = 84489,25 L	621.000	621.000
1 / 0 / 0	SDR-101	Rotary Dryer Drying Area = 71,85 m2	617.000	617.000
1 / 0 / 0	V-105	Blending Tank Vessel Volume = 115597,36 L	569.000	569.000
1 / 0 / 0	R-101	Plug Flow Reactor Vessel Volume = 7169,18 L	460.000	460.000

1 / 0 / 1	BCFBD-101	Basket Centrifuge (Bottom Discharge) Filter Area = 2,96 m ²	303.000	606.000
1 / 0 / 0	HX-104	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 257,71 m ²	302.000	302.000
1 / 0 / 0	V-104	Blending Tank Vessel Volume = 30362,05 L	300.000	300.000
1 / 0 / 0	V-101	Blending Tank Vessel Volume = 23604,51 L	267.000	267.000
1 / 0 / 0	R-103	Stirred Reactor Vessel Volume = 11536,96 L	258.000	258.000
1 / 0 / 0	R-104	Stirred Reactor Vessel Volume = 11387,53 L	256.000	256.000
1 / 0 / 0	HX-102	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 173,56 m ²	238.000	238.000
1 / 0 / 0	V-106	Blending Tank Vessel Volume = 14574,41 L	217.000	217.000
1 / 0 / 1	GAC-101	GAC Adsorber (for Liquid Streams) Column Volume = 3256,59 L	198.000	396.000
1 / 0 / 1	INX-101	Ion Exchanger Column Volume = 3069,12 L	192.000	384.000
1 / 0 / 1	INX-102	Ion Exchanger Column Volume = 3069,12 L	192.000	384.000
1 / 0 / 0	HX-101	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 119,80 m ²	191.000	191.000
2 / 0 / 0	RVF-101	Rotary Vacuum Filter Filter Area = 27,06 m ²	185.000	370.000
1 / 0 / 0	RDR-101	Rotary Dryer Drying Area = 19,08 m ²	183.000	183.000
1 / 0 / 0	DS-102	Disk-Stack Centrifuge Throughput = 477,65 L/h	163.000	163.000
1 / 0 / 0	V-107	Blending Tank Vessel Volume = 6351,70 L	155.000	155.000
1 / 0 / 0	HX-105	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 81,76 m ²	152.000	152.000
1 / 0 / 0	HX-125	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 77,24 m ²	146.000	146.000
1 / 0 / 0	V-103	Neutralizer Vessel Volume = 16680,33 L	145.000	145.000
1 / 0 / 0	HX-108	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 72,42 m ²	141.000	141.000
1 / 0 / 0	HX-109	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 43,79 m ²	104.000	104.000
1 / 0 / 0	HX-106	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 33,57 m ²	89.000	89.000
1 / 0 / 0	HX-110	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 19,49 m ²	64.000	64.000
1 / 0 / 0	HX-121	Condenser Condensation Area = 123,62 m ²	61.000	61.000
1 / 0 / 0	HX-103	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 17,85 m ²	61.000	61.000
1 / 0 / 0	HX-107	Condenser Condensation Area = 49,20 m ²	48.000	48.000
1 / 0 / 0	HX-118	Condenser Condensation Area = 40,08 m ²	48.000	48.000
1 / 0 / 0	HX-115	Condenser Condensation Area = 62,15 m ²	48.000	48.000

1 / 0 / 0	HX-124	Heat Exchanger	44.000	44.000
1 / 0 / 1	GAC-102	Heat Exchange Area = 10,60 m2 GAC Adsorber (for Liquid Streams) Column Volume = 2,67 L	42.000	84.000
1 / 0 / 0	PM-101	Centrifugal Pump Pump Power = 2,99 kW	42.000	42.000
1 / 0 / 0	HX-112	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 9,27 m2	41.000	41.000
1 / 0 / 0	HX-111	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 9,01 m2	40.000	40.000
1 / 0 / 0	HX-119	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 7,67 m2	37.000	37.000
1 / 0 / 0	PM-102	Centrifugal Pump Pump Power = 2,16 kW	36.000	36.000
1 / 0 / 0	HX-123	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 6,78 m2	34.000	34.000
1 / 0 / 0	HX-113	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 6,53 m2	33.000	33.000
1 / 0 / 0	AF-101	Air Filter Rated Throughput = 5299418,87 L/h	32.000	32.000
1 / 0 / 0	HX-116	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 2,93 m2	21.000	21.000
1 / 0 / 0	HX-114	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 1,78 m2	15.000	15.000
1 / 0 / 0	HX-122	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 1,75 m2	15.000	15.000
1 / 0 / 0	V-102	Flash Drum Vessel Volume = 612,10 L	14.000	14.000
1 / 0 / 0	PM-103	Centrifugal Pump Pump Power = 0,15 kW	13.000	13.000
1 / 0 / 0	PM-105	Centrifugal Pump Pump Power = 0,17 kW	13.000	13.000
1 / 0 / 0	PM-104	Centrifugal Pump Pump Power = 0,07 kW	13.000	13.000
1 / 0 / 0	PM-106	Centrifugal Pump Pump Power = 0,06 kW	13.000	13.000
1 / 0 / 0	HX-117	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 1,26 m2	12.000	12.000
1 / 0 / 0	HX-120	Heat Exchanger Heat Exchange Area = 0,47 m2	11.000	11.000
		Unlisted Equipment		6.576.000
			TOTAL	32.880.000

3. FIXED CAPITAL ESTIMATE SUMMARY (2024 prices in \$)

3A. Total Plant Direct Cost (TPDC) (physical cost)	
1. Equipment Purchase Cost	32.880.000
2. Installation	14.231.000
3. Process Piping	6.576.000
4. Instrumentation	6.576.000
5. Insulation	986.000
6. Electrical	3.288.000
7. Buildings	6.576.000
8. Yard Improvement	4.919.000
9. Auxiliary Facilities	6.576.000
TPDC	82.608.000
3B. Total Plant Indirect Cost (TPIC)	
10. Engineering	12.008.000
11. Construction	16.522.000
TPIC	28.529.000
3C. Total Plant Cost (TPC = TPDC+TPIC)	
TPC	111.137.000
3D. Contractor's Fee & Contingency (CFC)	
12. Contractor's Fee	5.557.000
13. Contingency	11.114.000
CFC = 12+13	16.671.000
3E. Direct Fixed Capital Cost (DFC = TPC+CFC)	
DFC	127.808.000

4. FACILITY-DEPENDENT COST - PROCESS SUMMARY

Cost Item	Annual Cost (\$)	%
Depreciation	8.094.000	38,58
Maintenance	2.662.000	12,69
Insurance	1.278.000	6,09
Local Taxes	2.556.000	12,18
Factory Expense	6.390.000	30,46
TOTAL	20.981.000	100,00

5. MATERIALS COST - PROCESS SUMMARY

Bulk Material	Unit Cost (\$)	Annual Amount		Annual Cost (\$)	%
Air	0,00	893.121.629	kg	0	0,00
Bagaço de Cana	25,00	45.371	ton	1.134.278	42,26
Ca(OH) ₂	0,00	771.051	kg	0	0,00
H ₂ SO ₄	0,07	1.020.572	kg	71.440	2,66
HCl (37% w/w)	0,00	1.089.064	kg	0	0,00
MP Steam	36,00	41.071	MT	1.478.562	55,08
NaOH 50%w/w	0,00	1.913.670	kg	0	0,00
Water	0,00	246.685.296	kg	0	0,00
TOTAL				2.684.280	100,00

6. UTILITIES COST (2024 prices) - PROCESS SUMMARY

Utility	Unit Cost (\$)	Annual Amount	Ref. Units	Annual Cost (\$)	%
Std Power	0,10	19.350.571	kW-h	1.935.057	14,56
Steam	32,00	203.814	MT	6.522.051	49,09
Cooling Water	0,10	20.110.551	MT	2.011.055	15,14
Chilled Water	0,50	780.959	MT	390.479	2,94
Glycol	0,80	25.307	MT	20.246	0,15
TOTAL				13.286.103	100,00

Note: The utilities cost is reduced by 614831 \$/yr due to heat recovered in the process.

7. LABOR COST - PROCESS SUMMARY

Labor Type	Unit Cost (\$/h)	Annual Amount (h)	Annual Cost (\$)	%
Operator	69,00	193.612	13.359.231	100,00
TOTAL		193.612	13.359.231	100,00

8. VARIOUS CONSUMABLES COST (2024 prices) - PROCESS SUMMARY

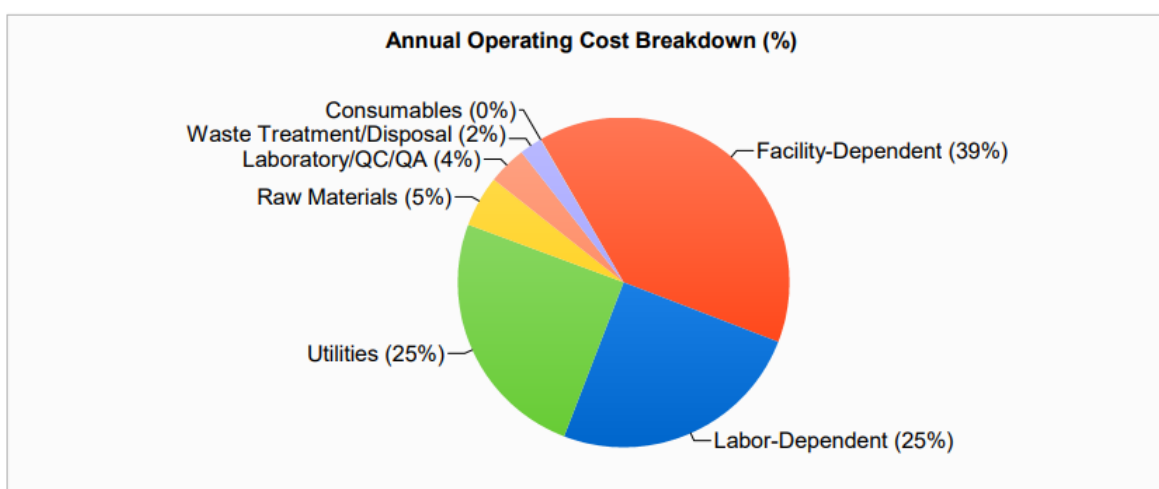
Consumable	Units Cost (\$)	Annual Amount	Annual Cost (\$)	%
Dft INX Resin for Water Trmt	2,00	2.258 L	4.516	35,17
Dft SMB Resin for Small Mol.	25,00	272 L	6.805	53,00
Dft GAC Packing (L)	4,00	380 kg	1.520	11,84
TOTAL			12.842	100,00

9. WASTE TREATMENT/DISPOSAL COST (2024 prices) - PROCESS SUMMARY

Waste Category	Unit Cost (\$)	Annual Amount	Annual Cost (\$)	%
Solid Waste			0	0,00
Aqueous Liquid			1.177.961	100,00
Salts	5,00	10.421 MT	52.106	4,42
S-126	5,00	4.273 MT	21.367	1,81
S-142	5,00	40.999 MT	204.994	17,40
S-170	5,00	1.921 MT	9.604	0,82
S-179	5,00	49 MT	247	0,02
S-191	5,00	10.820 MT	54.099	4,59
S-231	5,00	1.728 MT	8.638	0,73
S-106	5,00	24.839 MT	124.195	10,54
S-157	5,00	140.542 MT	702.711	59,65
Organic Liquid			0	0,00
Emissions			0	0,00
TOTAL			1.177.961	100,00

10. ANNUAL OPERATING COST (2024 prices) - PROCESS SUMMARY

Cost Item	\$	%
Raw Materials	2.684.000	5,02
Labor-Dependent	13.359.000	24,97
Facility-Dependent	20.981.000	39,21
Laboratory/QC/QA	2.004.000	3,75
Consumables	13.000	0,02
Waste Treatment/Disposal	1.178.000	2,20
Utilities	13.286.000	24,83
Transportation	0	0,00
Miscellaneous	0	0,00
Advertising/Selling	0	0,00
Running Royalties	0	0,00
Failed Product Disposal	0	0,00
TOTAL	53.506.000	100,00



11. PROFITABILITY ANALYSIS (2024 prices)

A.	Direct Fixed Capital	127.808.000 \$
B.	Working Capital	2.668.000 \$
C.	Startup Cost	6.390.000 \$
D.	Up-Front R&D	0 \$
E.	Up-Front Royalties	0 \$
F.	Total Investment (A+B+C+D+E)	136.866.000 \$
G.	Investment Charged to This Project	136.866.000 \$

H. Revenue Rates

Arabinose Rich Syrup (Revenue)	10.279 MT/yr
CelluLignin (Revenue)	29.090 MT/yr
Xylitol (Main Revenue)	7.083 MT/yr

I. Revenue Price

Arabinose Rich Syrup (Revenue)	600,00 \$/MT
CelluLignin (Revenue)	60,00 \$/MT
Xylitol (Main Revenue)	5,00 \$/kg

J. Revenues

Arabinose Rich Syrup (Revenue)	6.167.574 \$/yr
CelluLignin (Revenue)	1.745.375 \$/yr
Xylitol (Main Revenue)	35.416.402 \$/yr
Total Revenues	43.329.443 \$/yr

K.	Annual Operating Cost (AOC)	
	AOC	53.506.000 \$/yr
L.	Unit Production Cost /Revenue	
	Unit Production Cost	7.553,79 \$/MT MP
	Unit Production Revenue	6.117,14 \$/MT MP
M.	Gross Profit (J-K)	- 10.177.000 \$/yr
N.	Taxes (25%)	0 \$/yr
O.	Net Profit (M-N + Depreciation)	- 2.082.000 \$/yr
	Gross Margin	- 23,49 %
	Return On Investment	- 1,52 %
	Payback Time	N/A

MP = Total Flow of Stream 'Xylitol'

IRR/NPV SUMMARY					
IRR Before Taxes	-100,00 %	Interest %	8,00	12,00	20,00
IRR After Taxes	-100,00 %	NPV	- 159.547,00	- 150.252,00	- 135.911,00