

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Instituto de Química

Nathalia Oliveira da Silva

**Avaliação técnico-econômica de um processo em escala industrial para
produção de celulose microfibrilada**

Rio de Janeiro
2022

Nathalia Oliveira da Silva

**Avaliação técnico-econômica de um processo em escala industrial para produção de
celulose microfibrilada**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Área de concentração: Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente.

Orientadores: Prof. Dr. Márcio Luis Lyra Paredes
Prof. Dr. Pedro Henrique Rodrigues Alijó

Rio de Janeiro
2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/Q

S586 Silva, Nathalia Oliveira da

Avaliação técnico-econômica de um processo em escala industrial para produção de celulose microfibrilada. – 2022.
103 f.

Orientador(a): Márcio Luis Lyra Paredes
Pedro Henrique Rodrigues Alijó

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
Instituto de Química.

1. Celulose – Teses. 2. Processos industriais – Teses. I. Paredes, Márcio Luis Lyra. II. Alijó, Pedro Henrique Rodrigues. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Química. IV. Título.

CDU 547.458.81

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Nathalia Oliveira da Silva
Assinatura

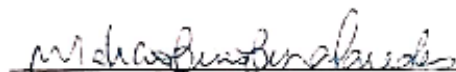
10/08/2022
Data

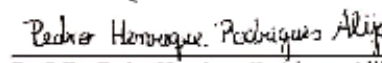
Nathalia Oliveira da Silva

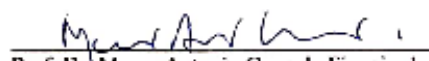
Avaliação técnico-econômica de um processo em escala industrial para produção de celulose microfibrilada

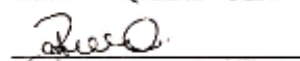
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Processos Químicos, Petróleo e Meio Ambiente.

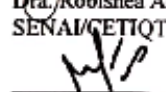
Aprovada em 23 de junho de 2022.
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Márcio Luis Lyra Paredes (Orientador)
Instituto de Química – UERJ


Prof. Dr. Pedro Henrique Rodrigues Alijó (Orientador)
Instituto de Química – UERJ


Prof. Dr. Marco Antonio Gaya de Figueiredo
Instituto de Química – UERJ


Dra. Robisnéa Adriana Ribeiro
SENAI/CETIQT


Dr. Washington Luiz Esteves Magalhães
Embrapa Florestas

Rio de Janeiro
2022

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, irmão e a todos os familiares, por todo apoio e ajuda que demonstraram ao longo de toda esta jornada.

Ao meu namorado, pelo incentivo nos momentos difíceis e por sempre acreditar em mim.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado e torceram pelo meu sucesso.

Aos orientadores Márcio Paredes e Pedro Alijó por toda orientação, compreensão e oportunidade de desenvolver este trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UERJ pela oportunidade de me desenvolver pessoalmente e profissionalmente.

À CAPES pelo apoio financeiro ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UERJ.

No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.

Albert Einstein

RESUMO

Silva, Nathalia Oliveira da, *Avaliação técnico-econômica de um processo em escala industrial para produção de celulose microfibrilada*. 2022. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A pandemia do COVID-19 gerou danos em diversos setores da economia, sendo o álcool em gel um dos produtos mais procurados. Seu desabastecimento foi gerado principalmente devido à falta do modificador de reologia importado, o carbomer 980, um polímero de origem fóssil. Atualmente, existe a necessidade de substituir os produtos derivados de petróleo por produtos de origem renováveis, diminuindo problemas como a poluição plástica e com as emissões de carbono. A celulose microfibrilada (MFC) é um produto de origem vegetal, que pode substituir o carbomer 980, com propriedades mecânicas, coloidais e de barreira significativos. Suas propriedades garantem diversas aplicações, desde modificadores de reologia até embalagens de alimentos e bebidas. Portanto, o interesse pela MFC nos últimos anos é evidente. Embora existam diferentes tecnologias para sua produção, sendo as principais a homogeneização, microfluidização e o *grinder*, existe uma lacuna entre a produção em escala laboratorial e industrial. Este trabalho tem como objetivo propor um processo em escala comercial para produção de MFC, visando preparar o país para um eventual enfrentamento de pandemia que demanda a produção de álcool em gel. A MFC será produzida a partir de celulose de polpa kraft branqueada, avaliando os impactos de um aumento de escala e sua viabilidade técnico-econômica, utilizando o método de moagem (*grinder*). Para a avaliação econômica, foram analisados seis cenários, com diferentes produtividades e tipos de instalação da planta (planta isolada ou co-localizada). Os custos de produção e os preços mínimos de venda do MFC (equivalente seco) variaram de USD 6,47/kg a USD 11,24/kg e USD 10,42/kg a USD 15,85/kg, respectivamente. O preço de mercado foi estimado em uma faixa de USD 10,52/kg a USD 15,95/kg, sendo utilizados os indicadores econômicos de valor presente líquido (VPL), índice de lucratividade (IL), taxa interna de retorno (TIR), payback simples (PBS) e descontado (PBD) para sua avaliação. Depreciação, mão de obra, manutenção e reparos, custos administrativos e outros fatores que compõem os custos fixos foram identificados como os principais responsáveis pelo aumento dos preços.

Palavras-chave: Celulose microfibrilada. Custo de produção. Avaliação técnico-econômica.

ABSTRACT

Silva, Nathalia Oliveira da, *Technical-economic assessment of an industrial scale process for the production of microfibrillated cellulose*. 2022. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

The COVID-19 pandemic has caused damage in several sectors of the economy, with gel alcohol being one of the most sought after products. Its shortage was generated mainly due to the lack of the rheology modifier usually imported, carbomer 980, a polymer of fossil origin. Currently, there is a need to replace petroleum products with products from renewable sources, reducing problems such as plastic pollution and carbon emissions. Microfibrillated cellulose (MFC) is a product of plant origin, which can replace carbomer 980, with significant mechanical, colloidal and barrier properties. Its properties guarantee several applications, from rheology modifiers to food and beverage packaging. Therefore, the interest in MFC in recent years is evident. Although there are different technologies for its production, the main ones being homogenization, microfluidization and the grinder, there is a gap between laboratory and industrial scale production. This work aims to propose a process on a commercial scale for the production of MFC, aiming to prepare the country for an eventual pandemic that demands the production of gel alcohol. The MFC will be produced from bleached kraft pulp, evaluating the impacts of an increase in scale and its technical-economic assessment, using the grinder method. For the economic evaluation, six scenarios were analyzed, with different yields and types of plant installation (isolated or co-located plant). Production costs and minimum selling prices for MFC (dry equivalent) ranged from USD 6.47/kg to USD 11.24/kg and USD 10.42/kg to USD 15.85/kg, respectively. The market price was estimated in a range of USD 10.52/kg to USD 15.95/kg, using the economic indicators of net present value (NPV), profitability index (IL), internal rate of return (TIR), simple payback (PBS) and discounted (PBD) for your evaluation. Depreciation, labor, maintenance and repairs, administrative expenses and other factors that make up fixed costs were identified as the main drivers of price increases.

Keywords: Microfibrillated cellulose. Manufacturing cost. Techno-economic assessment.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ABIHPEC	Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos
BC	Celulose bacteriana
BNC	Nanocelulose bacteriana
ACC	Contra-colisão aquosa
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CD	Custos diretos
CFI	Capital fixo de investimento
CFQ	Conselho Federal de Química
CI	Custos indiretos
CNC	Nanocristais de celulose
CNF	Nanofibrilas de celulose
EDA	Etilenodiamina
GL	Gay-Lussac
IL	Índice de lucratividade
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
MFC	Celulose Microfibrilada
NCC	Celulose nanocristalina
NFC	Celulose nanofibrilada
OMS	Organização Mundial da Saúde
PBS	Payback simples
PBD	Payback descontado
PIB	Produto Interno Bruto
PMV	Preço mínimo de venda
RMN	Ressonância Magnética Nuclear
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
TEMPO	2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil
TIR	Taxa interna de retorno
VPL	Valor presente líquido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura química básica da celulose	17
Figura 2 - Representação dos polimorfos da celulose	19
Figura 3 - Representação das principais etapas do processo de produção Kraft.....	22
Figura 4 - Mapa dos produtores de celulose e papel no ano de 2020.....	24
Figura 5 - Micrografias eletrônicas de transmissão e micrografia eletrônica de varredura dos diferentes tipos de nanocelulose	26
Figura 6 - Imagens de suspensões aquosas de MFC	28
Figura 7 - Evolução do número anual de patentes que mencionam MFC desde 2010.....	29
Figura 8 - Distribuição de pedidos de patentes referentes a MFC	30
Figura 9 - Representação esquemática do homogeneizador.....	33
Figura 10 - Representação esquemática do microfluidizador, com câmara em formato de Z. ..	33
Figura 11 - Representação esquemática do grinder.....	35
Figura 12 - Esquema do método para produzir gel de MFC por tratamento enzimático e microfluidização	39
Figura 13 - Representação do processo de carboximetilação da celulose	40
Figura 14 - Esquema do método para produzir gel de MFC por carboximetilação e microfluidização	40
Figura 15 - Fluxograma do método para produzir gel de MFC por refino combinado, carboximetilação e microfluidização	41
Figura 16 - Processo de produção de MFC com os principais tipos de tratamento	46
Figura 17 - Proposta de fluxograma de processo da MFC em larga escala para cenários de nova planta	56
Figura 18 - Comparação entre os capitais fixos de investimento (CFI) de uma planta semelhante	68
Figura 19- Evolução dos preços de polpa de celulose de fibra curta entre os anos de 2011 e 2021 no estado de São Paulo	69
Figura 20 - Estimativa do custo de produção para todos os cenários.....	79
Figura 21 - Estimativas do custo de produção e do preço mínimo de venda para todos os cenários.....	79
Figura 22 - Análise de sensibilidade sobre o preço mínimo de venda para todos os cenários...	88
Figura 23 - Análise de sensibilidade e gráfico de tornado dos cenários A, B e C sobre o VPL	89
Figura 24 - Análise de sensibilidade e gráfico de tornado dos cenários D, E e F sobre o VPL .	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de várias fibras naturais (% em massa)	18
Tabela 2 - Família de nanoceluloses com suas respectivas fontes, métodos de obtenção e tamanho característico.....	25
Tabela 3 - Principais produtores de celulose microfibrilada no mundo	43
Tabela 4 - Pré-tratamentos, pressões de operação, número de passagens e energia requerida para o homogeneizador, microfluidizador e <i>grinder</i>	46
Tabela 5 - Comparação entre os indicadores econômicos.....	54
Tabela 6 - Cenários analisados para a produção de MFC (base seca).....	57
Tabela 7 - Valores de referência para os custos de água e energia da planta.....	59
Tabela 8 - Estimativa do custo dos principais equipamentos do cenário A (construção de uma planta isolada).	60
Tabela 9 - Balanço de massa para o cenário A.....	62
Tabela 10 - Balanço de massa para o cenário B	62
Tabela 11 - Balanço de massa para o cenário D.....	63
Tabela 12 - Balanço de massa para o cenário C	63
Tabela 13 - Balanço de massa para o cenário E	64
Tabela 14 - Balanço de massa para o cenário F	64
Tabela 15 - Estimativa do capital fixo de investimento, capital de giro e depreciação dos cenários A, B e C, que representam a construção de uma nova planta	65
Tabela 16 - Estimativa do capital fixo de investimento, capital de giro e depreciação dos cenários D, E e F, que representam a co-localização	66
Tabela 17 - Custo da polpa de celulose com co-localização	69
Tabela 18 - Detalhamento do custo com celulose, água e energia elétrica do cenário A.....	70
Tabela 19 - Detalhamento do custo com celulose, água e energia elétrica do cenário B.....	70
Tabela 20 - Detalhamento do custo com celulose, água e energia elétrica do cenário C.....	71
Tabela 21 - Detalhamento do custo com celulose e energia elétrica do cenário D	71
Tabela 22 - Detalhamento do custo com celulose e energia elétrica do cenário E.....	72
Tabela 23 - Detalhamento do custo com celulose e energia elétrica do cenário F.....	72
Tabela 24 - Estimativa para o número de operadores dos cenários A, B e C, referentes à construção de uma nova planta.....	74

Tabela 25 - Estimativa para o número de operados dos cenários D, E e F, referentes à construção de uma planta co-localizada	75
Tabela 26 - Estimativa do custo fixo para os cenários A, B e C para a construção de uma nova planta.....	76
Tabela 27 - Estimativa do custo fixo para os cenários D, E e F para a construção de uma planta co-localizada	77
Tabela 28 - Comparação dos cenários analisados	81
Tabela 29 - Fluxo de caixa para o cenário A (valores em K USD).....	82
Tabela 30 - Fluxo de caixa para o cenário B (valores em K USD)	83
Tabela 31 - Fluxo de caixa para o cenário C (valores em K USD)	84
Tabela 32 - Fluxo de caixa para o cenário D (valores em K USD).....	85
Tabela 33 - Fluxo de caixa para o cenário E (valores em K USD)	86
Tabela 34 - Fluxo de caixa para o cenário F (valores em K USD).....	87
Tabela 35 - Estimativa do custo dos principais equipamentos dos cenários A, B e C.....	102
Tabela 36 - Estimativa do custo dos principais equipamentos dos cenários D, E e F.....	103

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
OBJETIVO GERAL	16
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1. REVISÃO DA LITERATURA	17
1.1. Celulose	17
1.1.1. <u>Estrutura</u>	17
1.1.2. <u>Polimorfismo</u>	18
1.1.3. <u>Processos de obtenção de celulose</u>	20
1.1.3.2. Processo kraft	21
1.1.4. <u>Mercado de celulose no Brasil</u>	23
1.2. Nanocelulose	25
1.2.1. <u>Celulose Microfibrilada</u>	27
1.2.2. <u>Celulose Nanocristalina</u>	30
1.2.3. <u>Celulose Bacteriana</u>	31
1.3. Produção de celulose microfibrilada	32
1.3.1. <u>Principais métodos de obtenção</u>	32
1.3.1.1. Homogeneização a alta pressão	32
1.3.1.2. Grinding	34
1.3.1.3. Outros métodos de obtenção	36
1.3.2. <u>Principais pré-tratamentos para obtenção de MFC</u>	38
1.3.2.1. Enzimático	38
1.3.2.2. Carboximetilação	39
1.3.2.3. Carboxilação via oxidação mediada por TEMPO	41
1.3.2.4. Outros pré-tratamentos	42
1.4. Mercado de celulose microfibrilada	42
1.5. Formulação do gel alcóolico de MFC e de carbomer 980	44
1.6. Considerações finais	45
2. METODOLOGIA	48
2.1. Capital de investimento total (CIT)	48
2.2. Custo variável	49

2.3.	Custo fixo.....	49
2.4.	Métodos para verificação da viabilidade técnico-econômica do projeto.....	50
2.4.1.	<u>Método Payback Simples – PBS</u>	50
2.4.2.	<u>Método Payback Descontado – PBD</u>	51
2.4.3.	<u>Valor Presente Líquido – VPL</u>	52
2.4.4.	<u>Taxa Interna de Retorno – TIR</u>	52
2.4.5.	<u>Índice de lucratividade - IL</u>	53
2.4.6.	<u>Comparações entre os indicadores econômicos</u>	54
2.5.	Análise de sensibilidade	55
2.6.	Proposta de escalonamento do processo.....	55
2.7.	Cenários analisados	57
2.8.	Estudo de localização da planta	58
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
3.1.	Capital de investimento total (CIT).....	60
3.2.	Custo variável	68
3.3.	Custo fixo.....	72
3.4.	Estimativa do custo de produção e preço mínimo de venda.....	78
3.5.	Indicadores econômicos e preço de mercado	80
3.6.	Análise de sensibilidade	88
3.7.	Considerações finais	92
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE – Estimativa do custo dos equipamentos.....	102

INTRODUÇÃO

Em março de 2020, a Organização Mundial da Saúde (OMS) declarou pandemia do novo coronavírus, Sars-Cov-2, causador da doença COVID-19. A rápida disseminação da doença gerou uma alta demanda por produtos de higiene pessoal no mundo inteiro, como álcool em gel, sabonetes, lenços de papel e papel higiênico (NIELSEN, 2020). No Brasil, o aumento do consumo de álcool em gel foi destaque, com uma alta de 808%, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC), gerando o seu desabastecimento no mercado nacional.

De acordo com o Conselho Federal de Química (CFQ), o álcool em gel, em concentração 70% (°INPM ou °GL), é um eficiente desinfetante de superfícies e antisséptico para as mãos, agindo rapidamente sobre bactérias vegetativas, vírus e fungos. Seu uso é recomendado pela OMS, por ser uma medida eficaz e preventiva ao COVID-19, principalmente quando não há a possibilidade de lavar as mãos com água e sabão. Logo, a ausência do álcool em gel nas prateleiras dos estabelecimentos comerciais é explicada, uma vez que, a população, na tentativa de se prevenir da doença, passou a usar o produto com muita frequência.

O Formulário Nacional da Farmacopeia Brasileira (2012) descreve como principais ingredientes para formulação do álcool em gel, o álcool etílico e o carbômer 980, um polímero de ácido poliacrílico, também conhecido como Carbopol. O carbômer 980 é um modificador de reologia normalmente importado, que enfrentou escassez em esfera global devido à pandemia (MAGALHÃES; DEGENHARDT, 2020). Em relação ao etanol, o Brasil possui uma indústria bem desenvolvida, sendo o segundo maior produtor global, atrás apenas dos Estados Unidos. A produção de etanol ocorre em todas as regiões do país, porém maior parte da produção é concentrada no Sudeste e Centro-Oeste, que juntos corresponderam a 90% da produção dos anos de 2019 ($\cong$ 35,6 bilhões de toneladas) e 2020 ($\cong$ 31,9 bilhões de toneladas) (VIDAL, 2020).

Na tentativa de solucionar o problema de desabastecimento, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), por meio da RDC n.º 350, de 19 de março de 2020, autorizou em caráter excepcional e temporário, que empresas fabricantes de medicamentos, saneantes e cosméticos regularizadas possam fabricar e comercializar preparações antissépticas sem sua autorização prévia. Entretanto, esta medida não conseguiu resolver a questão, visto que, devido à alta demanda, a oferta de carbômeros era insuficiente.

Tendo em vista este cenário pandêmico, evidencia-se a necessidade de produtos alternativos ao carbomer 980 que consigam suprir a demanda do mercado. Os possíveis agentes gelificantes, por grupo de classificação, que se apresentam como alternativas viáveis para tal substituição são: acrilatos, álcoois graxos, argilas, celulósicos, estearatos, gomas, polímeros sintéticos, polissacarídeos, sais e sílica (MONTEIRO, 2020).

Atualmente, existe a necessidade de substituição de produtos de origem fóssil por produtos derivados de fontes renováveis, que podem resolver problemas socioambientais, reduzindo as emissões de carbono. A celulose é uma fonte versátil para diversos produtos, além de ser o polímero natural mais abundante do planeta, com produção por fotossíntese estimada em 10^{11} - 10^{12} toneladas por ano, tendo como principais fontes a madeira e algodão (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). Um produto originário da celulose, que pode ser uma alternativa vantajosa ao carbômer 980, é a celulose microfibrilada (MFC) (MAGALHÃES; DEGENHARDT, 2020), também conhecida como nanofibrilas de celulose (CNF) e celulose nanofibrilada (NFC), que apresenta propriedades mecânicas, coloidais e de barreira significativas, além de caráter renovável e biodegradável. Devido a suas propriedades, a MFC se torna promissora para aplicações em diversas áreas como fabricação de papel, compósitos, embalagens e produtos farmacêuticos (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). O principal mercado da MFC hoje é a indústria de papel e celulose, em que as fábricas produzem e usam a MFC em seus próprios produtos. (TAPPI, 2018).

O Brasil é referência mundial no setor de árvores cultivadas, que inclui fabricação de produtos de madeira e celulose, papel, painéis de madeira, pisos laminados e carvão vegetal. Em 2019, o país registrou uma receita bruta de R\$97,4 bilhões no setor florestal, contribuindo com 6% na formação do Produto Interno Bruto (PIB) nacional. O Brasil é o maior exportador e o segundo maior produtor de celulose do mundo, atingindo a marca de 19,7 milhões de toneladas fabricadas em 2019 e 21 milhões em 2020 (IBÁ, 2021).

Apesar de todas as vantagens da oferta de celulose disponível, a produção de MFC ainda não está tão consolidada no mercado, devido ao alto consumo energético requerido no processo. Estimativas apontam que os processos consomem em média 30 kWh/kg (NAKAGAITO; YANO, 2004) e na tentativa de diminuir esse custo, foram desenvolvidos pré-tratamentos químicos, enzimáticos e mecânicos para melhorar os processos de fibrilação, diminuindo assim o consumo energético (DUFRESNE, 2017). Existem vários métodos de fibrilação mecânica que podem ser usados para preparar MFC, porém os principais métodos utilizados são: homogeneização, microfluidização e *grinding*. A *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* (TAPPI), em relatório de 2018, apresenta os principais produtores de

MFC com escala comercial/pré-comercial mundiais, com destaque para a FiberLean Technologies (Reino Unido), Borregaard, (Noruega), Nippon Paper (Japão) e University of Maine (Estados Unidos). Na lista também aparecem a brasileira Suzano e outras empresas com capacidade em escala piloto.

Magalhães e Degenhardt (2020) propõem o uso de MFC para a formulação do álcool em gel, com avaliação do seu efeito sobre a bactéria *Escherichia coli*, observando-se uma drástica redução no número de unidades formadoras de colônias, comprovando a eficiência do álcool a base de nanocelulose. O estudo também relata que o MFC é atóxico e não causou efeitos inflamatórios quando testado em células macrófagas humanas.

Nesta dissertação é realizada uma avaliação técnico-econômica de um processo em escala industrial para produção de celulose microfibrilada. Foram considerados 6 cenários. 3 para construção de uma nova planta e 3 para co-localização, além de considerar um aumento de escala entre os cenários. As avaliações econômicas de cada caso incluem o levantamento dos custos de capital e custos de produção, permitindo assim uma comparação detalhada do panorama analisado. Espera-se que este trabalho estimule a produção nacional de MFC, o que será estratégico para o país no enfrentamento de uma eventual nova pandemia, permitindo o imediato direcionamento de MFC nacional para a produção de álcool em gel.

O texto está organizado em 3 capítulos. No capítulo 1, apresenta-se uma revisão da literatura, discorrendo sobre a celulose, nanoceluloses e sobre os principais métodos de obtenção da celulose microfibrilada. O capítulo 2 é voltado para a explicação da metodologia empregada para a avaliação econômica do processo. Já o capítulo 3 envolve a aplicação da metodologia, uso dos indicadores econômicos e discussões dos resultados obtidos.

Finalizando a dissertação, há a presença das conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

OBJETIVO GERAL

Propor uma avaliação técnico-econômica da produção da celulose microfibrilada (MFC) em escala comercial, visando preparar o país para um eventual novo enfrentamento de pandemia que demanda a produção de álcool em gel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

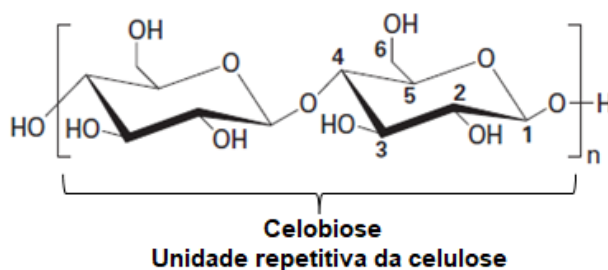
- Propor um escalonamento da produção de MFC;
- Identificar os principais custos associados à produção de MFC;
- Estimar o custo de produção da MFC;
- Estimar o preço mínimo de venda e o preço de mercado da MFC.

1. REVISÃO DA LITERATURA

1.1. Celulose

A celulose é uma macromolécula de cadeia linear, composta por anéis de D-glicopirranose (glicose) unidas por ligações do tipo β -(1,4), formando a celobiose, conforme apresentado na Figura 1. Ela é considerada um dos elementos estruturais mais importantes em plantas e outras espécies vivas (DUFRESNE, 2017, 2019). Devido ao seu arranjo molecular, a celulose apresenta propriedades como degradabilidade, quiralidade, hidrofílicidade e é insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos. A celulose pode ser obtida de diversas fontes, como madeira, algodão, coco, linho, cânhamo, juta, bagaço, bambu, animais marinhos, algas, fungos, invertebrados e bactérias. (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). Seu grau de polimerização (DP) depende de sua origem e método de isolamento/purificação, sendo geralmente expresso em unidades de glicopirranose, com aproximadamente 10.000 unidades para madeira nativa, 20.000 para o algodão e 1.000 para polpas kraft branqueadas (FENGEL; WEGENER, 1983; WERTZ *et al.*, 2010).

Figura 1 - Estrutura química básica da celulose



Fonte: Adaptado de DUFRESNE, 2017.

1.1.1. Estrutura

A celulose é um polímero estrutural semicristalino. Apresenta regiões amorfas (desordenadas) e cristalinas (ordenadas) dentro da microfibrila, com cristalinidade tipicamente na faixa de 40 a 70%, dependendo do método de isolamento e da fonte da celulose. As fibras

lignocelulósicas consistem em um aglomerado de microfibrilas, como resultado, a estrutura das plantas abrangem muitas escalas de comprimento, assim como muitos tecidos biológicos (DUFRESNE, 2017; SHMULSKY; JONES, 2011). Como exemplo, as fibras de polpa de madeira apresentam comprimentos que variam de 1 a 3 mm, larguras no intervalo de 10 a 50 μm e espessura de parede com aproximadamente de 1 a 5 μm (CHINGA-CARRASCO, 2011). Com exceção de algumas fibras como algodão, urtiga e outros, as células vegetais são compostas basicamente de celulose, hemicelulose e lignina (DUFRESNE, 2017), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química de várias fibras naturais (% em massa)

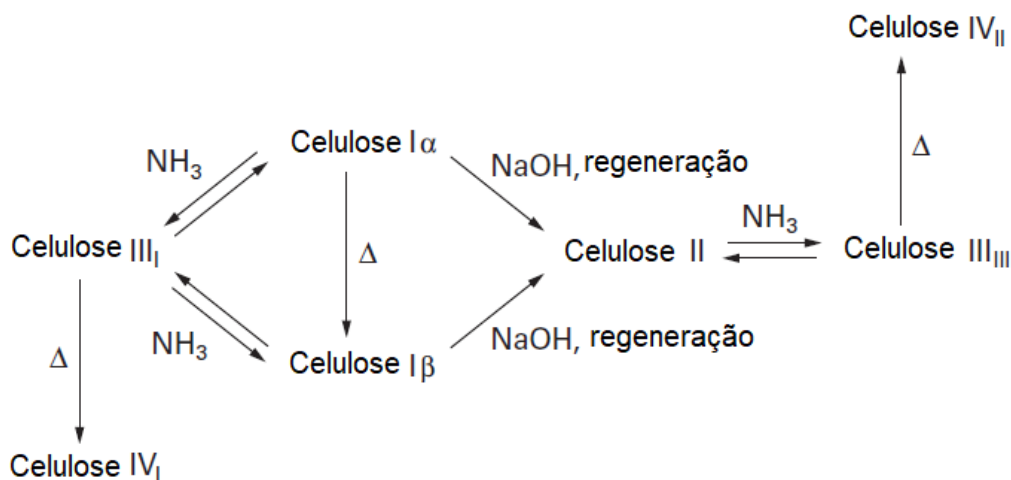
Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Algodão	85 - 90	5,7	-
Bambu	26 - 43	30	21 - 31
Cânhamo	68	15	10
Juta	61 - 71	14 - 20	12 - 13
Linho	71	18,6 - 20,6	2,2
<i>Hard wood</i>	45 - 55	24 - 40	18 - 25
<i>Soft wood</i>	45 - 50	25 - 35	25 - 35
Óleo de palma	65	-	29
Palha de trigo	38 - 45	15 - 31	12 - 20
Urtiga	86	10	-

Fonte: Adaptado de (DUFRESNE, 2017; MALHERBE ; CLOETE, 2002)

1.1.2. Polimorfismo

O polimorfismo é a capacidade de uma substância existir no estado sólido com duas ou mais estruturas cristalinas diferentes (TEODORO; CUSTODIO; NAPOLITANO, 2018). Devido aos diferentes arranjos dos anéis de glicopirranose e mudanças conformacionais nos grupos de hidroximetil, a celulose pode apresentar diferentes tipos de empacotamento, diferindo apenas no tamanho da célula unitária e possivelmente na polaridade da cadeia (DUFRESNE, 2017; KOVALENKO, 2010). Sendo assim, a celulose possui vários polimorfos, conforme é apresentado esquematicamente na Figura 2.

Figura 2 - Representação dos polimorfos da celulose



Fonte: Adaptado de DUFRESNE, 2017.

Na natureza, a celulose é encontrada na forma cristalina de celulose I, também conhecida como celulose nativa (DUFRESNE, 2017). Estudos espectroscópicos de ressonância magnética nuclear (RMN) mostraram que a celulose I é composta por mais de uma forma cristalina e é uma mistura que consiste em dois polimorfos, identificados por celulose I α e I β , onde se diferenciam em seus padrões de ligação de hidrogênio. A forma I α representa uma fase triclinica com uma cadeia por unidade de célula e é encontrada principalmente em celulosas produzidas por organismos primitivos, como algas ou bactérias. Como exemplo, a celulose bacteriana possui um teor de 70% de polimorfo I α . A forma I β representa uma fase monoclinica com duas cadeias por unidade de célula e encontra-se principalmente na celulose produzida por plantas, como algodão e madeira e também em animais marinhos. Na polpa de madeira, por exemplo, a fase I β apresenta a proporção de aproximadamente 64% (ATALLA; VANDERHART, 1984; DUFRESNE, 2017).

O polimorfo I α pode ser convertido, não completamente, na fase mais estável I β por tratamento térmico (260°C a 280°C), em meios como, solventes orgânicos, hélio (DEBZI et al., 1991), hidrólise (ATALLA et al., 1985) ou passando pela celulose III. A celulose nativa, que é metaestável, pode ser convertida de modo irreversível na forma termodinamicamente mais estável, a celulose II. A conversão pode ocorrer por intumescimento da celulose I com soluções aquosas concentradas de hidróxido de sódio (17 a 20% m/v) e posterior inserção de espécies químicas. Outra forma de preparação é a regeneração, onde ocorre a solubilização de celulose I num solvente, seguido de precipitação por diluição em meio aquoso (DUFRESNE, 2017; WELLARD, 1954). A celulose III pode ser obtida por tratamento com amônia líquida ou com certas aminas orgânicas, como a etilenodiamina (EDA), e em seguida é realizada uma etapa de

lavagem utilizando álcool. A preparação pode ser feita a partir da celulose I (gerando a celulose III_I) ou da celulose II (formando a celulose III_{III}). As dimensões da rede da celulose III_I e da celulose III_{III} são similares, apresentando célula unitária hexagonal, e com polaridade das cadeias semelhantes à do material de partida. A celulose III tratada em alta temperatura, utilizando glicerol, é convertida em celulose IV. Mais uma vez existem dois tipos, as celulosas IV_I e IV_{II} obtidas das celulosas III_I e III_{III}, respectivamente (DUFRESNE, 2017).

Como mencionado anteriormente, a celulose pode ser obtida de diversas fontes, porém, a produção em escala comercial concentra-se em fontes como madeira, plantas anuais (como o algodão) e resíduos agrícolas (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). No Brasil, 98% da celulose produzida é proveniente das florestas de pinus e eucalipto, o restante vem de um mercado bastante reduzido de fontes alternativas, como, bambu, babaçu e bagaço de cana-de-açúcar (SOUZA; ONOYAMA; SANTOS, 2015). As indústrias de papel e papelão são as maiores consumidoras de celulose. Apenas 2% da celulose utilizada (3,2 milhões de toneladas em 2003) é destinada à produção de fibras, filmes de celulose regenerada e sínteses de ésteres ou éteres de celulose (DUFRESNE, 2017).

1.1.3. Processos de obtenção de celulose

O processo de obtenção de celulose evoluiu ao longo dos anos. Os trabalhos realizados por Koops, no início do século XIX, sobre deslignificação da madeira utilizando produtos químicos revolucionaram a obtenção das fibras. A fabricação em larga escala de celulose para produção de papel foi estimulada pela revolução industrial e pelo progresso vivido na época. A partir de então, surgem novos processos de obtenção de celulose, dando início à era moderna da fabricação de polpa química (CAMPOS; FOELKEL, 2017).

Em 1851, os ingleses Burgess e Watt obtiveram uma polpa com boas características, através da fervura a alta temperatura da madeira em álcali, dando início ao processo conhecido como soda, sendo patentado em julho de 1854. Porém, o processo não foi bem recebido pelos ingleses, devido à ausência de recuperação do licor preto residual e a menor alvura das polpas obtidas. Comparado com outros processos mais antigos de polpação, o processo soda não fez grandes progressos na quantidade de produtos produzidos. O processo passou por avanços tecnológicos, utilizando a antraquinona, que facilita a polpação; entretanto, acabou perdendo

espaço para o processo mais difundido pelo setor atualmente: o processo sulfato ou kraft (CAMPOS; FOELKEL, 2017).

O norte-americano Benjamin Tilghman, em 1866, desenvolveu o processo Sulfito, com experimentação conduzida nas fábricas de W.W. Harding & Sons, em Manayunk, próximo a Filadélfia, nos Estados Unidos (EUA). Porém, o método original passou por várias transformações para se adequar a operação prática e as normas ambientais. O processo sulfito baseia-se no emprego de soluções ácidas de íons sulfito (SO_3^{2-}) ou bissulfito (HSO_3^-) para tratar a madeira. Inicialmente, também era utilizada no processo uma solução alcalina a base de carbonato de cálcio (CaCO_3). Entretanto, as fábricas mais recentes substituíram o carbonato de cálcio por óxido de magnésio, facilitando o sistema de recuperação tanto para os reagentes químicos quanto para a recuperação energética. O método apresenta várias desvantagens, entre elas maiores períodos de tempo de cozimento e má qualidade dos papéis fabricados, devido a uma maior degradação da celulose e hemicelulose em meio ácido. O processo foi o método dominante de produção de polpa química até o início da década de 1960 (CAMPOS; FOELKEL, 2017; SEBEN; PAULA; VIANA, 2012).

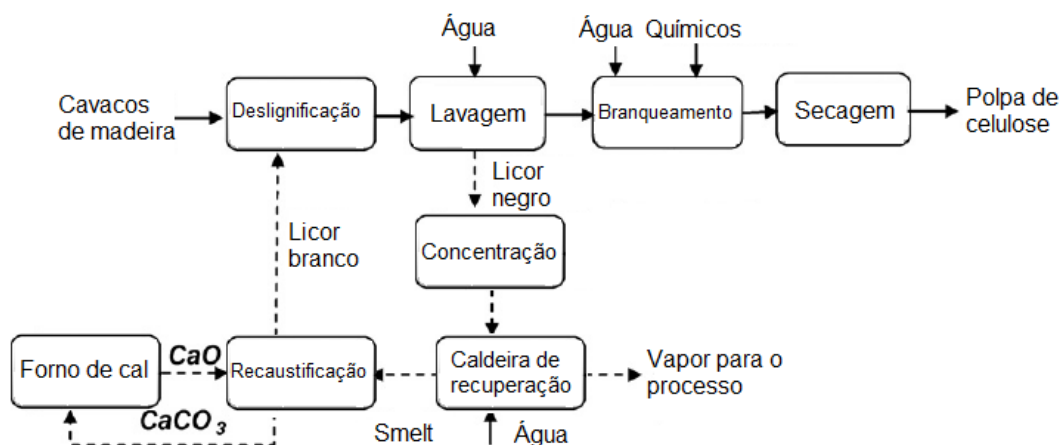
1.1.3.2. Processo kraft

O processo kraft (ou sulfato) foi desenvolvido em 1879 e patenteado em 1884 pelo químico alemão Dahl, tornando-se o principal processo de polpação de celulose no mundo. Dahl experimentou adicionar sulfato de sódio (Na_2SO_4) ao processo soda como uma alternativa as perdas químicas existentes durante a polpação. Verificou-se, que o sulfato era reduzido a sulfeto, resultando na aceleração da deslignificação, produzindo uma polpa mais resistente e com maior rendimento de operação. O processo apresenta vantagens, como poder ser usado para qualquer espécie de madeira, facilidade na recuperação dos químicos utilizados (cerca de 96 a 97%) e geração de energia para deslignificação da madeira (CAMPOS; FOELKEL, 2017).

No processo, os cavacos de madeira descascados e picados são alimentados no digestor para o processo de cozimento, ocorrendo à deslignificação química, que consiste em separar a lignina das fibras para formar a polpa. Para deslignificação, é utilizado uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S), chamado de licor branco. Após a etapa de deslignificação, as fibras são lavadas e branqueadas quimicamente. Para finalização da

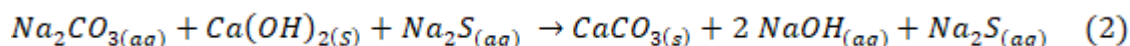
operação, a polpa é escorrida, prensada e enviada para um processo de secagem (MATEOS-ESPEJEL; SAVULESCU; PARIS, 2011), conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Representação das principais etapas do processo de produção Kraft



Fonte: Adaptado de MATEOS-ESPEJEL; SAVULESCU; PARIS, 2011.

O processo se torna extremamente vantajoso economicamente e ambientalmente, devido à possibilidade de recuperação do licor branco. Concluída a etapa de deslignificação, os resíduos químicos e substâncias dissolvidas formam uma solução aquosa que é chamada de licor negro, rico em lignina e reagentes químicos. Este licor negro é enviado para um sistema de evaporadores de múltiplo efeito, a fim de promover sua concentração. O licor negro concentrado é então queimado nas caldeiras de recuperação, ocorrendo nesse processo a redução de sulfato de sódio (Na_2SO_4) em sulfeto de sódio (Na_2S), recuperando assim um dos reagentes utilizados na polpação. A parte inferior da caldeira é deficiente em oxigênio para que a redução ocorra, sendo o carbono o agente redutor, proveniente da pirólise dos compostos orgânicos. O *smelt* é resultado dos sais fundidos do processo de queima, e é constituído de sulfeto de sódio (Na_2S) e carbonato de sódio (Na_2CO_3). O *smelt* dissolvido é denominado licor verde e através da adição de cal viva (CaO) a esse licor, ocorre a reação de caustificação, onde o carbonato de sódio (Na_2CO_3) é convertido em hidróxido de sódio (NaOH), conforme reações descritas pelas equações (1) e (2). As reações ocorrem de forma simultânea, produzindo o licor branco e carbonato de cálcio como subproduto, chamado de lama de cal. O licor branco é separado da lama de cal para ser enviado ao digestor, a lama de cal é então calcinada no forno para produzir a cal, fechando o ciclo de recuperação dos produtos químicos (ALVES *et al.*, 2015).



O processo apresenta mais uma vantagem, que é a possibilidade de geração de vapor através da queima do licor negro, tornando-se o principal meio de geração de energia para a fábrica. Como desvantagens do processo, podemos citar as emissões de odores no ambiente, baixo rendimento (entre 40 e 50%), baixa alvura das polpas após o cozimento e, consequentemente, maior custo com processos de branqueamento (ALVES *et al.*, 2015).

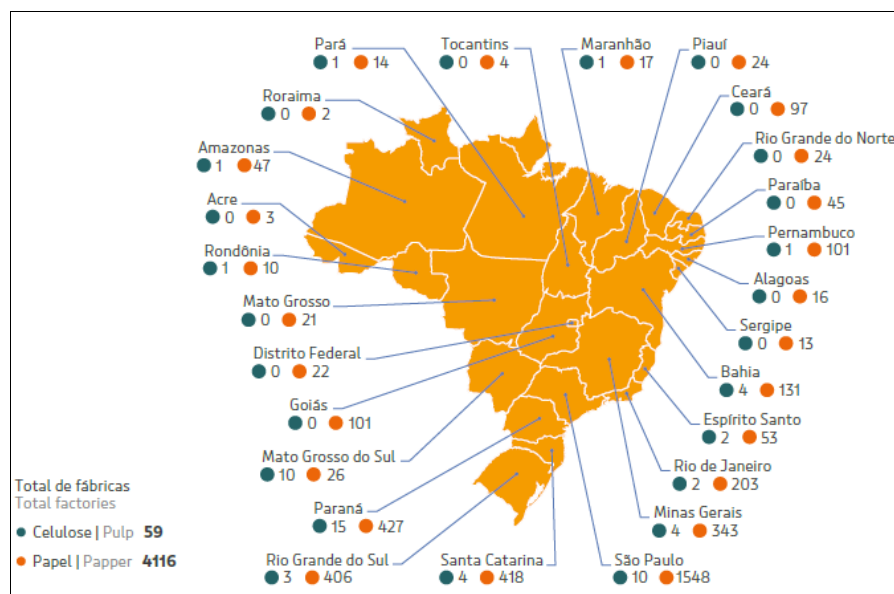
1.1.4. Mercado de celulose no Brasil

O Brasil é referência mundial na produção de celulose, sendo o segundo maior produtor global, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Em 2020, sua produção chegou a marca de 21 milhões de toneladas fabricadas, sendo 75% da produção (15,6 milhões) destinada para a exportação e o restante para atender ao mercado interno (5,3 milhões de toneladas). A maior parte da produção brasileira de celulose se concentra na obtenção de fibras curtas (eucalipto), que possui maior capacidade absorvente, adaptação às diversas regiões ecológicas e rápido crescimento, com ciclos de corte de aproximadamente 7 anos. As fibras longas (pinus) são mais resistentes, porém são produzidas em menor escala. O primeiro e o segundo desbastes ocorrem predominantemente, nas idades de 8 e 12 anos, respectivamente, e o corte final é efetuado aproximadamente aos 21 anos de idade (IBÁ, 2021; EMBRAPA FLORESTAS, 2019; 2020).

Apesar da pandemia da COVID-19, a produção de celulose no Brasil cresceu em 2020. O setor rapidamente se organizou para atender ao aumento de demanda por itens essenciais como lenços, papel higiênico, embalagens de papel, máscaras, aventais hospitalares e toucas. A qualidade e origem do produto, obtido de forma ecologicamente correta, mantiveram a celulose brasileira como um dos mais desejados do mundo (IBÁ, 2021).

A produção de celulose e papel ocorre em vários estados do país, com destaque para as regiões Sul e Sudeste, que concentram a maior quantidade de fábricas desse segmento, conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Mapa dos produtores de celulose e papel no ano de 2020



Fonte: IBÁ, 2021.

Há muitas empresas em destaque no Brasil no mercado de celulose, sendo referência mundial em relação à base florestal altamente produtiva. A Suzano S.A. é uma empresa brasileira e a maior companhia de celulose do mundo. Ela tem plantas de celulose em Aracruz (ES), Imperatriz (MA), Mucuri (BA), Três Lagoas (MS), Jacaré (SP), Limeira (SP) e Suzano (SP). Outra empresa, que é uma das líderes de produção de celulose solúvel e especial, é a Bracell, com fábricas nos estados da Bahia e São Paulo. Ela produz e comercializa celulose de fibra curta branqueada kraft, com capacidade de produção de 250 mil toneladas por ano. A Klabin S.A. é a única empresa a produzir e fornecer três tipos diferentes de celulose, a de fibra curta, fibra longa e fluff, todas produzidas em uma única unidade industrial, localizada em Ortigueira, no Paraná. A celulose fluff é feita a partir de fibras longas, pensado especialmente para a indústria de produtos absorventes higiênicos, como fraldas, lenços umedecidos e protetores diários. A Eldorado Brasil possui um moderno e inovador parque tecnológico e produz celulose de eucalipto branqueada, oriunda do cozimento kraft. Atualmente, produz mais de 1,7 milhões de toneladas de celulose por ano, em seu complexo industrial localizado no Mato Grosso do Sul. A Cenibra é uma das maiores produtoras mundiais de celulose branqueada kraft. Sua fábrica tem capacidade de produção de 1,2 milhões de toneladas de celulose de fibra curta por ano, e possui localização no município de Belo Oriente, Minas Gerais.

1.2. Nanocelulose

O termo nanocelulose geralmente se refere a materiais celulósicos tendo pelo menos uma dimensão na faixa manométrica (1-100nm) e pode ser obtida por diferentes métodos e fontes lignocelulósicas (ABDUL KHALIL et al., 2014). Os métodos para sua produção variam de rotas como: *top-down* que envolvem rotas enzimáticas/físicas/químicas a partir de madeira ou resíduos agrícolas/florestais, e *bottom-up*, que envolvem a produção de nanofibrilas de celulose por bactérias a partir de glicose (DUFRESNE, 2017). A nanocelulose apresenta as principais propriedades da celulose, como hidrofilicidade, alta especificidade, e extensa capacidade de modificação química, com propriedades inerentes a materiais em nanoescala (KARGARZADEH et al., 2018).

Segundo Klemm *et al.* (2011), as nanoceluloses podem ser classificadas em três subcategorias, dependendo das suas dimensões, métodos de preparação e fontes celulósicas, conforme apresentado na Tabela 2. As subcategorias de nanoceluloses são encontradas na literatura com diferentes terminologias, como:

- I. Celulose microfibrilada (MFC), microfibrilas de celulose, nanofibrilas de celulose (CNF), celulose nanofibrilada (NFC).
- II. Celulose nanocristalina (NCC), nanocristais de celulose (CNC), whiskers, cristalitos.
- III. Celulose bacteriana (BC), nanocelulose bacteriana (BNC), celulose microbiana, biocelulose.

Tabela 2 - Família de nanoceluloses com suas respectivas fontes, métodos de obtenção e tamanho característico

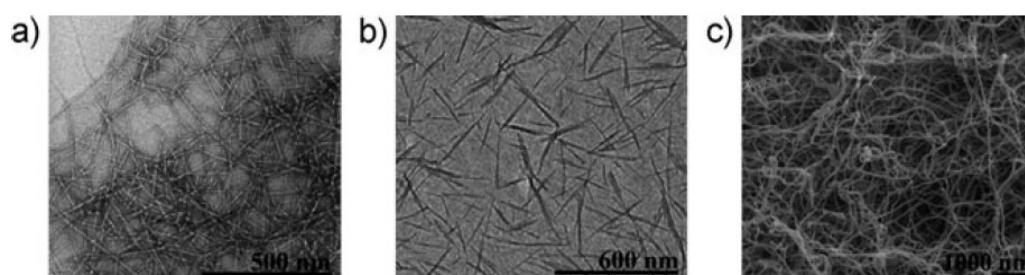
Nanoceluloses	Fontes típicas	Obtenção e tamanho
Celulose microfibrilada (MFC)	Madeira, beterraba, tubérculo de batata, cânhamo, linho.	Delaminação mecânica da polpa de madeira por altas forças de cisalhamento. Diâmetro: 5-60 nm Comprimento: Vários micrômetros.
Celulose nanocristalina (NCC)	Madeira, algodão, cânhamo, linho, palha de trigo, casca de amora, rami, tunicina, celulose	Hidrólise ácida da celulose de várias origens. Celulose vegetal: Diâmetro: 5-70 nm e Comprimento: 100-250 nm

	de algas e bactérias.	Celuloses de tunicados, algas e bactérias. 100 nm a vários micrômetros.
Celulose bacteriana (BC)	Açúcares e álcoois de baixo peso molecular	Síntese bacteriana Diâmetro: 20-100 nm

Fonte: Adaptado de KLEMM et al., 2011.

As nanopartículas celulósicas possuem uma elevada área superficial específica e alta densidade referentes aos grupos hidroxila. Essas propriedades influenciam suas interações tanto no estado líquido (suspensões) como no estado sólido (filmes), gerando aplicações bastante interessantes. (DUFRESNE, 2017). Estruturas típicas dessas nanoceluloses podem ser vistas nas micrografias eletrônicas e de varredura, conforme Figura 5.

Figura 5 - Micrografias eletrônicas de transmissão e micrografia eletrônica de varredura dos diferentes tipos de nanocelulose



Legenda: a) MFC e b) NCC - imagens de micrografias eletrônicas de transmissão; c) micrografia eletrônica de varredura de BC.

Fonte: Adaptado de KLEMM et al., 2011.

As nanoceluloses apresentam uma variedade de aplicações, justificando seu estudo e investimento de novas tecnologias para o seu processo produtivo. As aplicações incluem materiais compósitos, indústria de papel e cartão, produtos adsorventes, alimentos e bebidas, tintas e revestimentos, adesivos, embalagens, óleo e gás, eletrônicos e produtos médicos, farmacêuticos e cosméticos (CHARREAU; CAVALLO; FORESTI, 2020). Como exemplo de aplicação prática, a propriedade de gelificação do MFC foi usada para desenvolver complexos de proteína de soja isolada, como substitutos de gordura (SUN *et al.*, 2015). Também foi relatada a eficiência dos nanocristais de celulose (NCC) e da celulose microfibrilada (MFC) no aprimoramento dos desempenhos reológicos e de filtração da bentonita, utilizada para fluidos de perfuração de poços (LI *et al.*, 2015).

Devido aos diferentes termos utilizados para descrever os nanomateriais de celulose, principalmente para a celulose microfibrilada e nanofibrilada, vários comitês e organizações técnicas, iniciaram uma padronização de diferentes tipos de nanocelulose, classificando-as pelo tamanho de suas fibrilas. Porém, o trabalho ainda não foi finalizado (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). Alguns produtores comerciais de MFC/NFC preferem chamar seu material de “celulose nanofibrilada (NFC)” porque soa mais avançado e evoluído, enquanto outros preferem chamá-lo de “celulose microfibrilada (MFC)” por causa de percepções sobre questões ambientais, de saúde e segurança (TAPPI, 2018). ASSIS *et al.* (2017b) descrevem ainda o termo como CMNF para a celulose microfibrilada, indicando que a nomenclatura ainda não foi padronizada. Neste trabalho, usaremos a terminologia de celulose microfibrilada, para descrever este tipo de material.

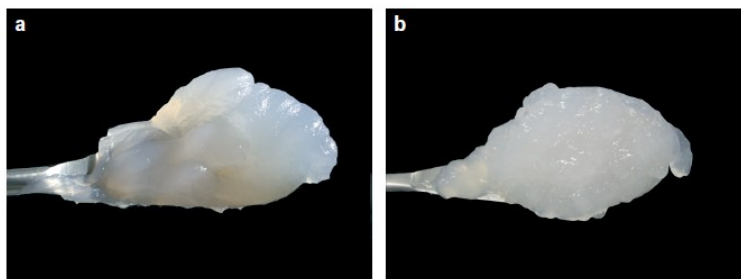
1.2.1. Celulose Microfibrilada

A celulose microfibrilada (MFC) consiste em um feixe de moléculas de cadeia de celulose esticada com longos, flexíveis e fortes emaranhados de nanofibras de celulose (CHAKRABORTY; SAIN; KORTSCHOT, 2006), apresentando domínios cristalinos e amorfos. Normalmente, as MFC têm um diâmetro de 5 a 50 nm e um comprimento de poucos micrômetros. Possuem a capacidade de formar géis em água, exibindo comportamento tixotrópico. (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). A MFC é geralmente produzida por delaminação mecânica da polpa de madeira, utilizando altas forças de cisalhamento antes e/ou após o tratamento químico ou enzimático (KLEMM *et al.*, 2011).

As técnicas mais utilizadas para a produção desse tipo de celulose são homogeneização, microfluidização e grinding (KLEMM *et al.*, 2011). Outros tratamentos não convencionais também são citados na literatura, como criogenia, ultra-som de alta intensidade, refinamento a disco, explosão a vapor e contra colisão aquosa. Vários tipos de pré-tratamentos foram propostas para reduzir o consumo de energia e modificar a superfície da nanocelulose. Como exemplo, podemos citar tratamentos enzimáticos, oxidação mediada por TEMPO (radical 1-oxil de 2,2,6,6-tetrametilpiperidina), carboximetilação (ASSIS *et al.*, 2017b), sulfonação, quaternização, dentre outros (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). Uma revisão sobre as principais técnicas de produção MFC é apresentada na Seção 1.3.

Após o processo de desfibrilação, o MFC está normalmente disponível na forma de suspensão, geralmente em água. Durante o processo de produção, a suspensão muda de baixa para alta viscosidade. Em partes, isso se deve ao aumento do coeficiente de Einstein, que aumenta com o aumento da razão comprimento/diâmetro das partículas suspensas e também com a superfície altamente reativa da celulose. (DUFRESNE, 2017). O comportamento de gel do MFC é mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Imagens de suspensões aquosas de MFC



Legenda: (a) suspensão a 2% em peso de eucalipto, pré-tratado enzimaticamente do Instituto Tecnológico FCBA;
(b) suspensão a 10% em peso da marca ARBOCEL NANO MF 40-10.

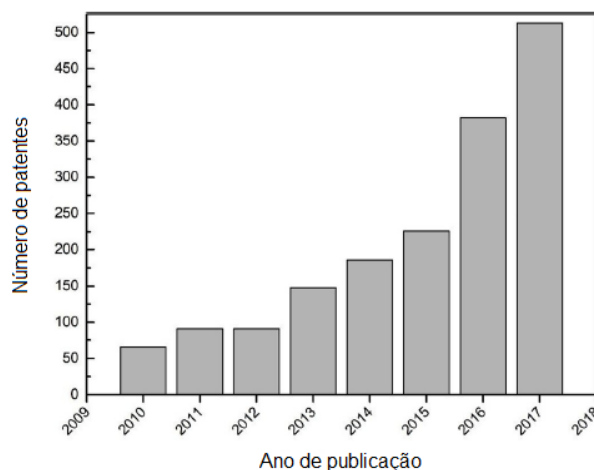
Fonte: DUFRESNE, 2017.

O comportamento reológico de suspensões de MFC foi investigado nos primeiros trabalhos de homogeneização a alta pressão relatados na década de 1980, por Herrick *et al.* (1983) e Turbak, Snyder e Sandberg (1983). Os autores observaram um comportamento pseudoplástico, quando o gel a 2% em peso tornou-se muito fluido quando agitado em alta taxa de cisalhamento. Também foram observadas propriedades de viscosidade tixotrópica e estabilidade do gel no armazenamento, ou quando congelado e descongelado. Pääkkö *et al.* (2007) estudaram o comportamento reológico do MFC pré-tratado enzimaticamente. Testes em polpas branqueadas sulfito mostraram que as suspensões aquosas se comportaram como géis em toda a faixa de concentração investigada, entre 0,125% a 5,9% em peso.

Devido à variedade de aplicações das nanoceluloses e suas propriedades, muitas pesquisas e inovações sobre o tema ganharam destaque nas últimas duas décadas, evidenciando o potencial das microfibrilas de celulose. O número de patentes publicadas sobre MFC é de aproximadamente 1.700 documentos, entre os anos de 2010 e 2017, quase que o dobro do valor encontrado para CNC, de aproximadamente 950 documentos. (CHARREAU; CAVALLO; FORESTI, 2020). Na Figura 7, é possível observar a evolução do número de patentes publicadas a cada ano, utilizando as seguintes palavras-chave: celulose microfibrilada, celulose microfibrilar, celulose microfibrilalizada, celulose micro-fibrilada, micro: celulose fibrilada,

celulose nanofibrilada, celulose nanofibrilar, nanofibrila/s de celulose, microfibrila/s de celulose, nanofibra/s de celulose, nanofibra/s de celulose.

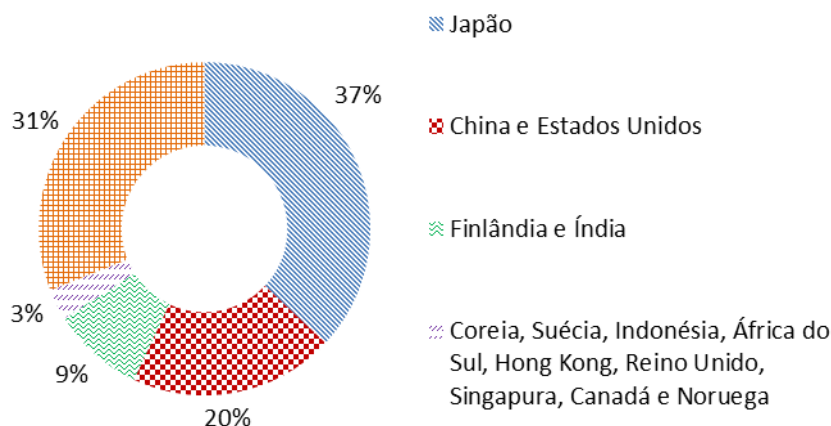
Figura 7 - Evolução do número anual de patentes que mencionam MFC desde 2010



Fonte: CHARREAU; CAVALLO; FORESTI, 2020.

O número de patentes publicadas tem a tendência de crescer a cada ano, reforçando o interesse crescente pelo nanomaterial. Aproximadamente 71% dos documentos de MFC são de propriedade de empresas e aproximadamente 19% pertencem a instituições acadêmicas. Do restante das publicações, aproximadamente 8%, são de propriedade de instituições acadêmicas em conjunto com empresas, e aproximadamente 2% é referente a pessoas físicas. A Figura 8 ilustra os países com maiores números de pedidos de patentes envolvendo MFC nos últimos anos. Os países com um maior número de publicações de patentes são, em ordem decrescente, Japão, China e Estados Unidos, seguidos da Finlândia, Índia, Coreia, Suécia, Indonésia, África do Sul, Hong Kong, Reino Unido, Singapura, Canadá e Noruega (CHARREAU; CAVALLO; FORESTI, 2020).

Figura 8 - Distribuição de pedidos de patentes referentes a MFC



Fonte: Adaptação CHARREAU; CAVALLO; FORESTI, 2020.

1.2.2. Celulose Nanocristalina

A celulose nanocristalina (CNC) é produzida pelo tratamento químico da polpa de celulose. Foi obtida pela primeira vez por Rånby (1949), utilizando hidrólise ácida de fibras de celulose dispersas em água. Neste método, o ácido sulfúrico é um dos ácidos mais comumente usados, devido a seu baixo custo e melhor estabilização das suspensões de CNC, hidrolisando preferencialmente as regiões amorfas da celulose. Por meio desse tratamento, são produzidas CNC's rígidas em forma de haste com grupos sulfato em sua superfície. Sua morfologia geralmente depende da fonte de celulose. Usualmente, são produzidas CNC's com diâmetro de 3 a 35 nm e comprimento de 200 a 500 nm. Os rendimentos relatados para produção de CNC a partir desta técnica são geralmente baixos, entre 30% e 50% (ASSIS *et al.*, 2017a; NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016).

A CNC exibe formas alongadas e cristalinas semelhantes a hastes, e tem flexibilidade muito limitada em comparação com a MFC, por não conter regiões amorfas (BRINCHI *et al.*, 2013). As partículas são compostas totalmente de celulose e possuem zonas cristalinas com teores entre 54 e 88% (MOON *et al.*, 2011). O grau de cristalinidade, diversidade dimensional e morfologia variam de acordo com a fonte de material celulósico e condições de preparo (ABDUL KHALIL *et al.*, 2014). Quando suspensos em água, os nanocristais formam suspensões coloidais e sua estabilidade depende do tamanho das partículas dispersas, polidispersidade e da carga superficial (DUFRESNE, 2017).

A comercialização de nanocristais de celulose ainda está em estágio inicial. A empresa canadense CelluForce apresenta a maior capacidade de produção relatada (260 t/ano, base seca), seguida da americana American Process (130 t/ano, base seca) e da sueca Melodea (35 t/ano, base seca) (TAPPI, 2018)

1.2.3. Celulose Bacteriana

Celulose bacteriana (BC) é uma nanocelulose de alta pureza gerada por bactérias aeróbias, do gênero *gluconacetobacter*, em meios de cultura aquosos contendo uma fonte de açúcar. Estas bactérias estão amplamente difundidas na natureza, onde a fermentação de açúcares e carboidratos vegetais ocorre. O tempo de tal processo varia de alguns dias a duas semanas (GATENHOLM; KLEMM, 2010). A BC tem a mesma composição química que a celulose vegetal. No entanto, é livre de outros grupos funcionais, como carboxil ou carbonil, que geralmente são oriundos do processo de purificação da madeira ou de outras plantas, e também é livre de outros polímeros, como lignina, hemiceluloses ou pectina, o que facilita seu uso em aplicações biomédicas, estimulando assim a biofabricação. A BC apresenta um DP de 3.000 a 9.000 e uma alta cristalinidade, em torno de 80 a 90%. (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016; KLEMM *et al.*, 2011).

Por não ser o tipo mais comum de nanocelulose, Dufresne (2017) acredita que até a escala comercial, custos de produção e o desenvolvimento da fermentação se tornem maduros, não é possível responder se a BC consiga competir com as fontes tradicionais de celulose.

1.3. Produção de celulose microfibrilada

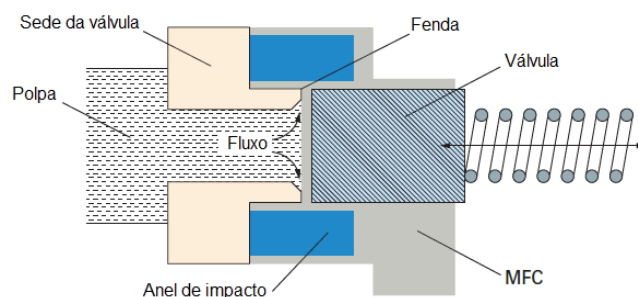
1.3.1. Principais métodos de obtenção

1.3.1.1. Homogeneização a alta pressão

A homogeneização a alta pressão é uma técnica utilizada para produzir a MFC, desintegrando mecanicamente as fibras de celulose. Os homogeneizadores e microfluidizadores são equipamentos utilizados para tal processo e já são comumente utilizados nas indústrias alimentícia, cosmética, farmacêutica e biotecnológica. (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016).

Nos trabalhos pioneiros de Herrick *et al.* (1983) e Turbak, Snyder e Sandberg (1983, 1984), foi descrito o processo de produção de MFC a partir de polpa comercial de *soft wood*, utilizando um homogeneizador Manton-Gaulin. O processo consiste em passar repetidas vezes (de 8 a 10 vezes) uma pasta diluída de fibras de celulose (1 a 2% em massa) pelo homogeneizador, utilizando uma pressão de 55 MPa e temperatura controlada na faixa de 70 a 90°C. O equipamento apresenta um conjunto de válvula com mola e, à medida que esta válvula abre e fecha rapidamente, as fibras são submetidas a uma grande queda de pressão com forças de impacto e cisalhamento, promovendo um alto grau de fibrilação, resultando na produção de MFC. A diluição das fibras é geralmente feito em água, que é o meio líquido mais conveniente e barato. Porém, qualquer fluido polar pode ser utilizado e o grau de fibrilação alcançado vai depender da polaridade e propriedades do fluido escolhido. Exemplos de fluidos que apresentaram dispersões satisfatórias de MFC são: glicerina, propilenoglicol, dimetilsulfóxido, dimetilformamida, e misturas destes com água (DUFRESNE, 2017; TURBAK; SNYDER; SANDBERG, 1984). A Figura 9 ilustra um desenho esquemático do homogeneizador. Por muitos anos, a principal desvantagem para o sucesso comercial do processo de homogeneização foi o alto consumo de energia, que poderia chegar até mesmo a 70 MWh por tonelada (ERIKSEN *et al.*, 2008). Porém, com o desenvolvimento de métodos de pré-tratamento, este valor diminuiu drasticamente (KLEMM *et al.*, 2011).

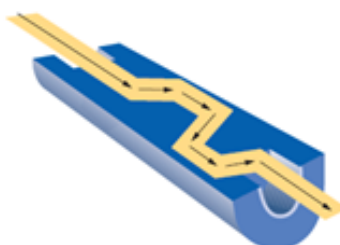
Figura 9 - Representação esquemática do homogeneizador



Fonte: Adaptação DUFRESNE, 2017.

Uma alternativa ao uso do homogeneizador é o microfluidizador, um equipamento que também opera a elevadas pressões. Zimmermann *et al.* (2004), relataram o uso do microfluidizador (M-100 Y, Microfluidics Inc., USA) para produzir MFC. O processo consiste em bombear a suspensão de celulose através das câmaras do equipamento, que possuem uma geometria específica, em forma de Z ou Y, e largura de orifício na faixa de 100 a 400 μm . A técnica utiliza pressões altíssimas, na faixa de 105 a 170 MPa, gerando um fluxo com altas forças de cisalhamento. À medida que a suspensão de celulose acelera a altas velocidades, ela colide na parede do canal e em si mesma, produzindo a fibrilação da celulose. Ao sair da câmara, o produto pode ser direcionado a um trocador de calor e recirculado novamente para o processo. É recomendado repetir o processo várias vezes, para melhorar o grau de fibrilação (DUFRESNE, 2017; NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). Segundo MICROFLUIDICS (2021), a série M700 apresenta equipamentos com maior escala de produção, com taxas de fluxo de 300 a 900 kg/h. A Figura 10 mostra detalhes da câmara em formato de Z do microfluidizador.

Figura 10 - Representação esquemática do microfluidizador, com câmara em formato de Z.



Fonte: DUFRESNE, 2017.

Uma desvantagem, principalmente para os microfluidizadores, é o entupimento dos canais da câmara, quando se utiliza fibras longas de celulose (Spence *et al.*, 2011). Esta questão

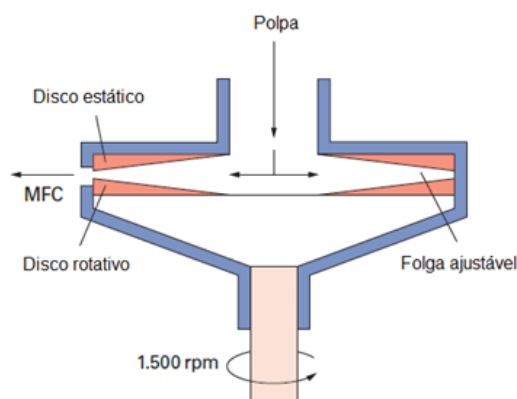
continua a ser o principal desafio para o aumento de escala de tal processo (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016).

1.3.1.2. Grinding

A MFC também pode ser obtida por um processo mais simples, por meio de moagem, utilizando um moedor (ou *grinder*). O *grinder* é composto por dois discos em cerâmica de alumina, sendo um rotativo e um estático com folga ajustável entre os discos, conforme apresentado na Figura 11. Os discos em alumina não são porosos, apresentando uma ação antibacteriana no processo. Enquanto o disco de moagem superior é fixo, o inferior é girado em alta velocidade (1.500 rpm), submetendo as fibras a tensões cíclicas repetidas. A suspensão de celulose (cerca de 2% em massa) é alimentada em uma tremonha e dispersa por força centrífuga na folga entre as pedras de moagem, onde é submetida a compressão maciça, cisalhamento e forças de atrito, sendo moída em partículas ultrafinas (DUFRESNE, 2017).

Taniguchi e Okamura (1998) relataram a obtenção do MFC com diâmetros na faixa de 20 a 90 nm, utilizando um pequeno *grinder* comercial, fabricado pela Masuko Sangyo Co. Ltd., Japão. Foi utilizada uma variedade de fibras naturais, como fibras de polpa de madeira, fibras de algodão, tunicina, quitosana, fibras de seda e colágeno contendo de 90 a 95% em massa de água. A polpa foi passada 10 vezes através do equipamento até obter um resultado satisfatório. Já Jordão, Claro e Magalhães (2017), realizam a preparação de MFC com 25 passagens pelo grinder, do marca Masuko Sangyo Co., com polpas branqueadas de eucalipto e pinus, na consistência de 3% em massa de celulose. Segundo a MASUKO SANGYO (2021), o modelo MKZB20-100J é considerado um dos maiores *grinders* do mundo, com capacidade de processamento de até 6.000 kg/h, sendo ideal para processar materiais fibrosos como grãos, gengibre, mostarda, amêndoas, carbono, talco, sílica, celulose, para emulsificar graxas, cosméticos, dentre outras aplicações.

Figura 11 - Representação esquemática do grinder.



Fonte: Adaptação DUFRESNE, 2017.

Damásio *et al.* (2021) avaliaram o efeito da desfibrilação, utilizando o *grinder* da marca Masuko Sangyo Co., modelo MKCA6-2, nos principais parâmetros que influenciam o processo produtivo da MFC, como velocidade de rotação, número de passagens pelo equipamento, consistência da polpa e o espaçamento entre as pedras do moinho. Para o estudo, foi avaliada polpa de fibra longa não branqueada. Notou-se que as velocidades de 1.500 e 2.200 rpm foram mais eficientes no processo de desfibrilação, em comparação com a velocidade de 2.900 rpm. 1.500 rpm é considerada a velocidade ótima, pois velocidades muito altas não permitem um cisalhamento suficiente para desfibrilação da polpa. A viscosidade está diretamente relacionada com o número de passagens pelo *grinder*. Inicialmente, a viscosidade da polpa é inferior a 500 mPa.s. Após as cinco primeiras passagens, esse valor é maior que 2.000 mPa.s, indicando um aumento expressivo da viscosidade conforme se aumenta o número de passagens pelo *grinder*, porém esse aumento ocorre até um determinado valor, não avaliado pelos autores. Os autores não reportaram diferenças nos resultados do processo produtivo para consistência da polpa entre 2 a 4% em massa de celulose. A folga entre os discos do moedor é outro parâmetro que tem efeito direto na viscosidade e na eficiência do processo de desfibrilação. O ideal é manter uma distância de trabalho entre os discos no ponto zero microns ou muito próximo de zero microns. Wang *et al.* (2012) relataram o uso da redução do espaço entre as pedras de moagem para -100 μm a partir da posição zero de movimento.

Outra solução para facilitar a fibrilação é realizar a operação de moagem na presença de uma carga corrosiva, como o carbonato de cálcio. O mineral desempenha um papel essencial na transferência de energia mecânica e o material resultante é um compósito MFC-mineral, designado para uso na indústria papelreira (BARDET *et al.*, 2013). Esse método de produção é

utilizado com sucesso pela empresa FiberLean® Technologies, que é a principal produtora global de MFC. O produto está presente no mercado sob o nome FiberLean MFC.

1.3.1.3. Outros métodos de obtenção

Existem outros processos mecânicos que podem ser usados para produzir MFC, embora não amplamente utilizados, como crioemagamento, ultrasonicação de alta intensidade, eletrofiação, extrusão, misturador de alta velocidade, refino a disco, explosão a vapor, moinho de bolas e contra-colisão aquosa (ACC).

O crioemagamento é uma técnica geralmente utilizada em laboratório e consiste em congelar as fibras de celulose usando nitrogênio líquido para posterior etapa de refino de alto cisalhamento. Durante o refino, os cristais de gelo exercem pressão sobre as paredes celulares, provocando a liberação das nanofibrilas (CHAKRABORTY; SAIN; KORTSCHOT, 2005). Dufresne *et al.* (1997), citam o uso do crioemagamento mais como uma forma de pré-tratamento, já que o material é posteriormente submetido a um processo de desfibrilação a alta pressão.

A ultrasonicação de alta intensidade é outro método utilizado em escala laboratorial para produzir MFC. Para ruptura celular utiliza-se o ultrassom com frequência tipicamente entre 20 a 50 kHz. A amostra sofre uma oscilação de alta frequência, proporcionando a fibrilação da celulose, devido à cavitação e impactação como resultado das altas pressões. A técnica apresenta algumas desvantagens, como geração de calor, altos níveis de ruído, variação de rendimento e geração de radicais livres (DUFRESNE, 2017). Cheng, Wang e Rials (2009) relatam o uso da técnica de ultrasonicação para gerar MFC a partir de diversas fontes de celulose, a fim de utilizá-las como reforço de polímeros biodegradáveis.

A eletrofiação é um método para preparar fibras através da ação de forças eletrostáticas. Existem basicamente três componentes no processo, um fornecedor de alta tensão, um tubo capilar com uma pipeta ou agulha de pequeno diâmetro, e uma tela coletora de metal. No processo, uma solução de polímero é eletricamente carregada em alta voltagem para produzir as fibras de celulose em escala submicrométrica (HUANG *et al.*, 2003).

O processo de extrusão com parafuso duplo também pode ser usado para produção de MFC. Durante o processo, a polpa de celulose é fibrilada por dois parafusos co-rotativos em um tambor fechado. O maior desafio da técnica é a otimização do perfil do parafuso e das

condições de processamento para proporcionar forças de cisalhamento necessárias para delaminar a polpa de celulose sem degradar as fibras (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016).

Uetani e Yano (2011) apresentaram o uso bem sucedido de um misturador de alta velocidade na fibrilação de polpa de celulose de fibra longa branqueada (não seca), obtendo MFC com diâmetro uniforme de 15 a 20 nm. A técnica de refino também é citada na literatura por Karande *et al.* (2011) como processo único para produzir MFC a partir de fibras de algodão, através de um refinador a disco laboratorial. Seu funcionamento é parecido com o *grinder*. Porém, no grinder é possível ajustar o espaçamento entre os discos, influenciando na qualidade da MFC gerada. Apesar da tentativa de processo único, essa técnica resulta em um material celulósico altamente heterogêneo, assim o refino é aplicado mais como um pré-tratamento mecânico para a produção de MFC.

A explosão a vapor é um método utilizado para separar o material lignocelulósico em seus principais componentes: celulose, lignina e hemiceluloses. No entanto, também foi proposto para a produção de MFC a partir de fontes alternativas, como folhas de abacaxi (CHERIAN *et al.*, 2010) e fibras de bananeira (DEEPA *et al.*, 2011). Durante a explosão a vapor, a celulose é exposta ao vapor pressurizado, seguido por uma rápida liberação de pressão através de uma válvula, causando a ruptura da parede celular da fibra (SUN *et al.*, 2005).

Zhang, Tsuzuki e Wang (2015) descrevem a preparação de MFC a partir da polpa kraft de madeira macia, utilizando um moinho de bolas. Nesta técnica, a polpa de celulose é misturada com água e colocada em um recipiente cilíndrico, parcialmente preenchido com bolas de Zircônia (diâmetro inferior a 1 mm). Enquanto o moinho gira, a celulose é desintegrada pela alta energia de colisão entre as esferas (NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016).

A contra-colisão aquosa (ACC) é mais uma técnica de obtenção de MFC e consiste em colidir dois jatos de suspensões aquosas de celulose um contra o outro, através de bocais. A colisão entre esses dois jatos produz a MFC. Uma das deficiências deste método é o tamanho do material celulósico processado, que deve ser inferior ao diâmetro do bocal, cerca de 150 μm , para evitar entupimento (ASSIS *et al.*, 2017b; NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016). Kose *et al.*, (2011) relatam a produção de MFC individual usando ACC, a partir de uma suspensão aquosa de celulose bacteriana.

1.3.2. Principais pré-tratamentos para obtenção de MFC

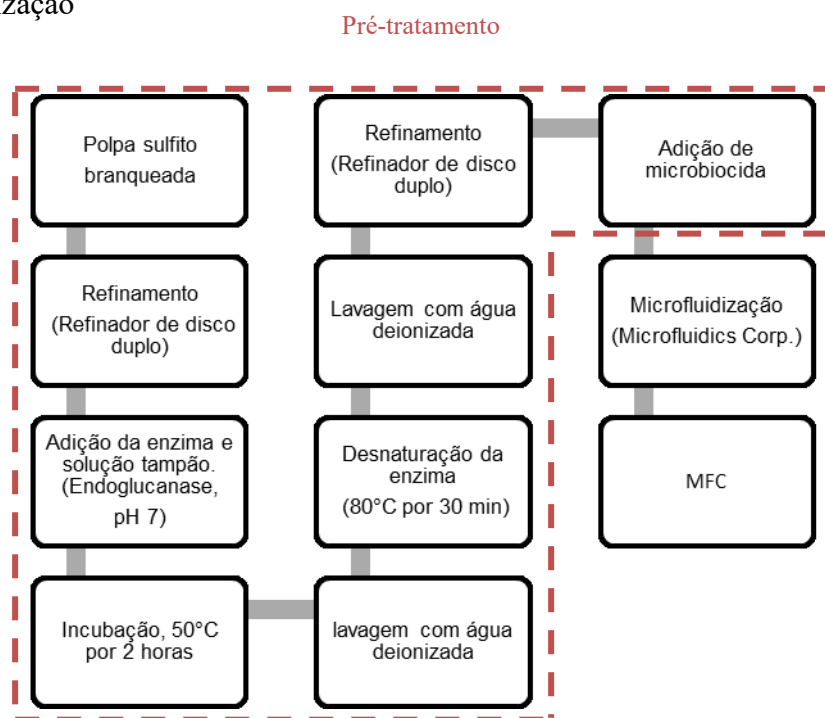
Diferentes tipos de pré-tratamentos foram desenvolvidos a fim de reduzir o consumo energético empregado no método de homogeneização à alta pressão. Devido à natureza floculante das fibras, podem ocorrer problemas durante a passagem da pasta de celulose pela fenda estreita do homogeneizador (HERRICK *et al.*, 1983). Como o processo exige que a pasta de celulose passe repetidas vezes no equipamento, para aumentar sua fibrilação, a demanda energética pode ser alta, como já mencionado anteriormente. Os principais pré-tratamentos apresentados na literatura são o tratamento enzimático (HENRIKSSON *et al.*, 2007, PÄÄKKÖ *et al.*, 2007), e introdução de grupos carregados através da carboximetilação (WÄGBERG *et al.*, 2008) e oxidação mediada por 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil (TEMPO). Com o uso dos pré-tratamentos, evidenciou-se que houve uma redução no consumo de energia, para valores em torno de 1.000 kWh/ton (SIRÓ; PLACKETT, 2010).

1.3.2.1. Enzimático

Os pré-tratamentos enzimáticos permitem a produção de nanocelulose com consumo de energia substancialmente reduzido, na ordem de 5.400 kWh/ton (BAJPAI, 2016). As enzimas podem quebrar as ligações glicosídicas da celulose, aumentando a acessibilidade das fibras e facilitando o processo de homogeneização/microfluidização (ARVIDSSON; NGUYEN; SVANSTRÖM, 2015). As fibras de celulose não são degradadas naturalmente por uma única enzima, geralmente fungos aeróbicos como *Trichoderma*, *Phanerochaete* e *Aspergillus*, degradam a celulose excretando uma mistura de enzimas hidrolíticas, que atuam de formas independentes. Estas celulasas podem ser sete ou mais enzimas diferentes, pertencentes a diferentes famílias de proteínas. As principais enzimas reconhecidas são as do tipo A e B, denominadas de celobiohidrolases, capazes de atacar a celulose cristalina e as do tipo C e D, chamadas de endoglucanases, que geralmente requerem alguma desordem na estrutura para realizar a degradação da celulose (HENRIKSSON *et al.*, 2007).

O trabalho de Pääkkö *et al.* (2007) descreve o processo de produção de MFC utilizando polpa sulfito branqueada com pré-tratamento enzimático em conjunto com o microfluidizador, conforme o esquema representado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema do método para produzir gel de MFC por tratamento enzimático e microfluidização



Fonte: O autor, 2022.

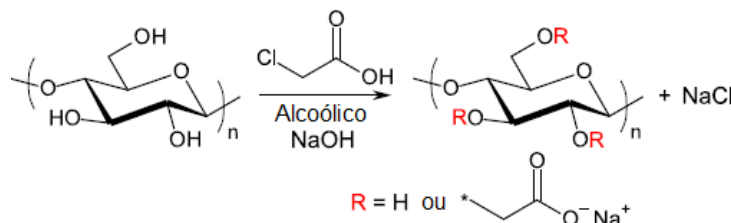
Para que as enzimas funcionem de forma eficaz, uma solução tampão de fosfato é aplicada, formada por uma combinação de fosfato monopotássico (KH_2PO_4) e fosfato dissódico (Na_2HPO_4). No processo ocorrem duas alterações de temperatura, primeiro durante o tempo de incubação, quando as enzimas estão ativas, com aumento de 21 °C para 50 °C, e mais tarde no processo de desnaturação das enzimas, aumentando a temperatura desde a temperatura ambiente até 80 °C. A água deionizada é usada nas etapas de lavagem do processo e um microbiciocida (5-cloro-2-etil-4-isotiazolin-3-ona) é adicionado para evitar crescimento bacteriano (ARVIDSSON; NGUYEN; SVANSTRÖM, 2015).

1.3.2.2. Carboximetilação

A carboximetilação consiste na substituição de grupos hidroxila, que compõem a estrutura química da celulose, por grupos carboximetil (CH_2COOH), de carga negativa, conforme apresentado na Figura 13. A introdução de grupos carregados negativamente em fibras celulósicas melhora a estratificação das nanofibrilas, devido à repulsão eletrostática entre

as cargas. O procedimento é realizado através de uma reação química entre celulose e o ácido monocloroacético em presença de hidróxido de sódio (WALECKA, 1956; BÄCKSTRÖM *et al.*, 2012). No processo, o isopropanol é geralmente usado como solvente (DUFRESNE, 2017).

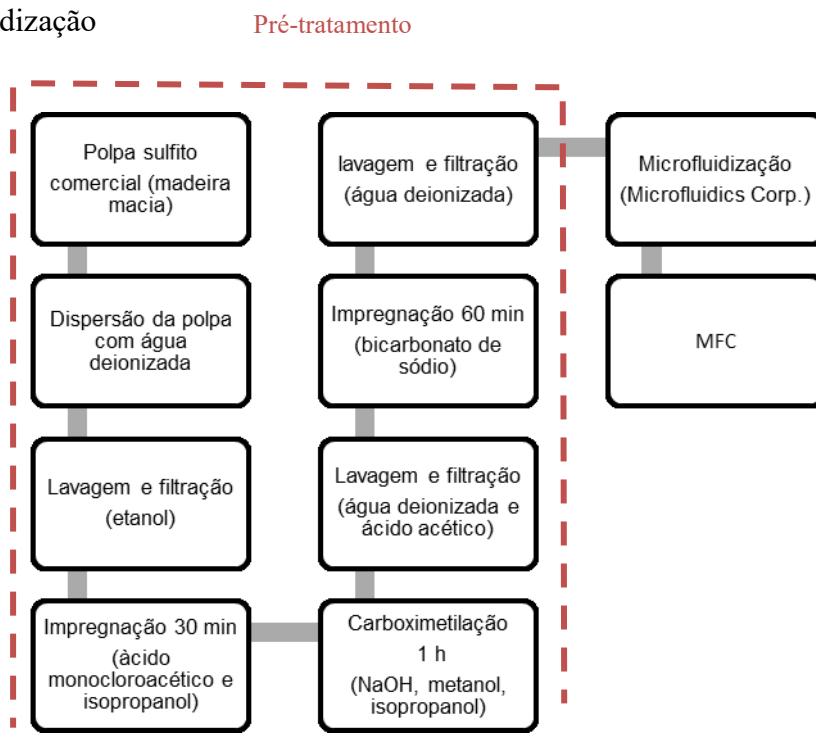
Figura 13 - Representação do processo de carboximetilação da celulose



Fonte: Adaptado de NECHYPORCHUK; BELGACEM; BRAS, 2016.

A produção de MFC a partir de celulose carboximetilada foi relatada por Wågberg *et al.* (2008). Abaixo, podemos observar no esquema as etapas de produção de forma resumida.

Figura 14 - Esquema do método para produzir gel de MFC por carboximetilação e microfluidização



Fonte: O autor, 2022.

No processo, o etanol, isopropanol e metanol são usados como solventes. O hidróxido de sódio tem a função de neutralizar o ácido clorídrico formado na reação de carboximetilação, e o bicarbonato de sódio adiciona sódio em vez de íons de hidrogênio para o MFC

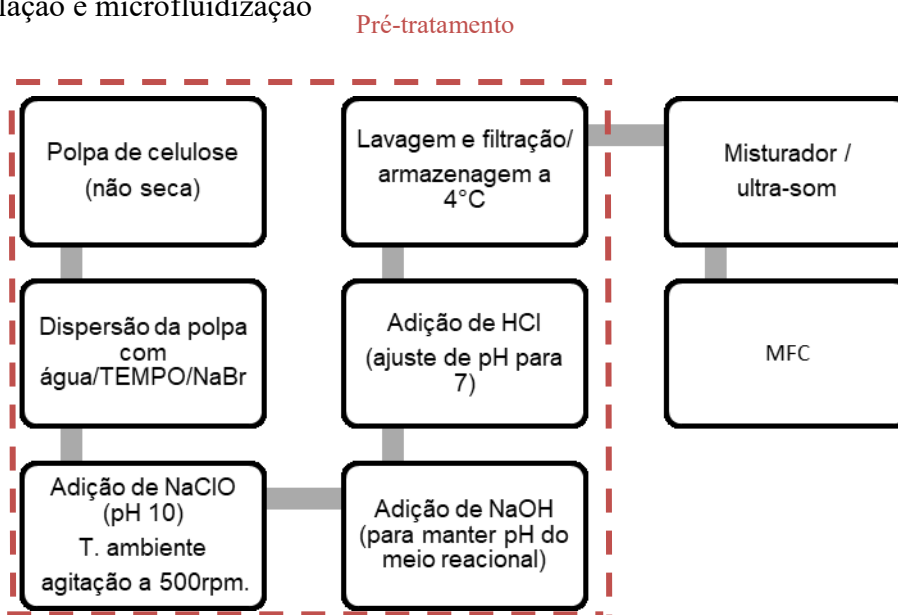
carboximetilada. A água deionizada e o ácido acético são usados na etapa de lavagem (ARVIDSSON; NGUYEN; SVANSTRÖM, 2015).

1.3.2.3. Carboxilação via oxidação mediada por TEMPO

A carboxilação via oxidação mediada por 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil (TEMPO) é o método de pré-tratamento mais comumente utilizado para preparar MFC (DUFRESNE, 2017). Assim como na carboximetilação, o método visa introduzir cargas negativas (COOH) a estrutura química da celulose, melhorando a estratificação das fibras.

Saito *et al.* (2006) utilizaram celuloses nativas (não secas) de polpa de madeira sulfite branqueada, algodão, tunicina e celulose bacteriana, para produzir MFC, utilizando a oxidação mediada pelo radical 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil (TEMPO) como pré-tratamento. Na Figura 15, é possível observar de forma resumida as etapas do processo.

Figura 15 - Fluxograma do método para produzir gel de MFC por refino combinado, carboximetilação e microfluidização



Fonte: O autor, 2022.

1.3.2.4. Outros pré-tratamentos

Liimatainen *et al.* (2013) utilizaram a técnica de sulfonação, como pré-tratamento para produzir MFC. Trata-se de mais uma forma de introduzir grupos carregados negativamente à estrutura da celulose, utilizando periodato e bissulfito de sódio, facilitando assim o processo de fibrilação. Tejado *et al.* (2012) utilizaram a Carboxilação via oxidação de periodato-clorito como outra forma de introduzir cargas negativas. Durante a reação, os álcoois secundários da celulose são primeiramente oxidados em grupos aldeído, utilizando periodato de sódio, e depois são convertidos em grupos carboxil usando clorito de sódio. A quartenização é mais uma forma de introduzir cargas a estrutura da celulose, porém nesta técnica, ocorre a introdução de cargas positivas. Aulin *et al.* (2010) realizaram a quaternização de uma dispersão de polpa de celulose usando cloreto de (2-3-epoxipropil) trimetilamônio na presença de água, isopropanol e hidróxido de sódio.

O uso de pré-tratamentos assistidos por solventes também é relatado na literatura. Carrillo, Laine e Rojas (2014) propuseram um método baseado no uso de microemulsões compostas por soluções aquosas de ureia ou etilenodiamina como pré-tratamento da polpa antes da desintegração mecânica. A ureia e a etilenodiamina são utilizadas devido à sua capacidade de romper a ligação de hidrogênio interfibrilar. Li *et al.* (2012) produziram nanocelulose do bagaço de cana-de-açúcar por homogeneização a alta pressão utilizando o líquido iônico (cloreto de 1-butil-3-metilimidazólio ([Bmim]Cl) como forma de pré-tratamento. Sirviö, Visanko e Liimatainen (2015) utilizaram um solvente eutético profundo de cloreto de colina-ureia (razão molar de 1:2) como um meio de pré-tratamento para promover a nanofibrilação de polpa de celulose de bétula, usando um microfluidizador como método de desintegração mecânica.

1.4. Mercado de celulose microfibrilada

Nos últimos vinte anos os nanomateriais celulósicos têm sido objeto de muito interesse em todo o mundo. Várias invenções envolvendo nano-objetos de celulose são reivindicadas anualmente, permitindo a instalação das primeiras fábricas de produção comercial de nanocelulose (CHARREAU; CAVALLO; FORESTI, 2020), Além disso, a necessidade de

substituição de materiais de origem fóssil por materiais renováveis abre oportunidades para a produção e comercialização de nanoceluloses. Em termos de capacidade de produção, o mercado de nanocelulose produziu 13.870 toneladas (equivalente seco) em 2015, com principais aplicações em compósitos e segmentos de processamento de papel (ASSIS *et al.*, 2017a).

O mercado de MFC é maior que das outras nanoceluloses e pode encontrar diversas aplicações, tais como: produtos absorventes, compósitos, agentes modificadores de reologia, reforço na fabricação de papel e papelão, fabricação de lenços de papel, cosméticos (MILLER, 2017), eletrônica e engenharia de tecidos (HAMAD, MIAO E BECK, 2019).

Em relatório técnico, TAPPI (2018), listou-se os principais produtores de celulose microfibrilada do mundo, agrupando-os de acordo como chamam seus produtos (MFC ou CNF), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais produtores de celulose microfibrilada no mundo

MFC			
Produtor	País	Processo	ton/ano
FiberLean Technologies	Reino Unido	Mecânico/mineral	8.800
Borregaard	Noruega	Próprio/não informado	1.100
Norske Skog	Noruega	Pré-tratamento mecânico	260
Rise	Suécia	Pré-tratamento enzimático	200
Daicel	Japão	Homogeneizador de alta pressão	200
CTP/FCBA	França	Pré-tratamento enzimático	25
Suzano	Brasil	Mecânico	25
CNF			
Nippon Paper	Japão	Pré- tratamento químico	560
University of Maine	EUA	Mecânico	260
American Process	EUA	Fracionamento SO ₂	130
CelluComp	Reino Unido	Pré- tratamento químico	100
Chuetsu Pulp and Paper	Japão	Contra colisão aquosa	100
Oji Paper	Japão	Esterificação de fosfato	40
Sugino Machine	Japão	Colisão oblíqua	26
Seiko PMC	Japão	Modificação hidrofóbica	24

FONTE: Adaptado de TAPPI, 2018.

O relatório também apresenta empresas com escala de produção piloto, como Stora Enso (Finlândia), UPM (Finlândia), Empa (Suíça), InoFib (França), Tianjin Haojia Cellulose (China), Weidmann Fiber Technology (Suíça), entre outras.

Apesar de o Japão apresentar maior porcentagem de patentes publicadas, como destacado na Figura 9, as duas maiores produtoras globais de MFC são a FiberLean Technologies e a Borregaard, ambas europeias. A FiberLean Technologies apresenta um processo robusto, sem pré-tratamento e com a participação de um mineral para facilitar a fibrilação da celulose e o produto final é um composto MFC-mineral. Vários minerais diferentes, como carbonato de cálcio, caulim, grafite, talco e muitos outros podem ser usados. Já a Borregaard apresenta um processo de produção próprio e exclusivo, não informado nos canais de comunicação da empresa. A fábrica foi inaugurada em 2016 em Sarpsborg, Noruega, e usa o abeto norueguês como matéria-prima. As suspensões de MFC são comercializadas com concentrações de 2% e 10%, com o nome comercial de Exilva.

A empresa finlandesa Stora Enso utiliza atualmente o MFC para fabricar embalagens de leite para a indústria de laticínios. O MFC traz vantagens como aumento de resistência e leveza nas embalagens. O MFC também é usado industrialmente no Japão como agente espessante para tinta de caneta e para produzir absorventes de incontinência urinária (ASSISet *al.*, 2017a). Portanto, a MFC se apresenta como um material renovável e promissor, com aplicações comerciais e muitas outras com potencial aplicação industrial.

O preço de mercado da MFC varia de USD 9/kg a USD 221/kg, em base seca, dependendo do tipo de processo mecânico, pré-tratamento e escala empregados (ASSISet *al.*, 2017b). A universidade do Maine reportou o valor de USD 33/kg para o custo de produção da MFC produzida em sua unidade, em escala piloto (CHAUVE; BRAS, 2014).

1.5. Formulação do gel alcóolico de MFC e de carbomer 980

O comunicado técnico da Embrapa (MAGALHÃES; DEGENHARDT, 2020) apresenta a formulação de álcool em gel à base de etanol 92,8 °INPM e da MFC. Para uma formulação de aproximadamente 1,3L (1.040,60 g) de álcool em gel, são necessários 154g de gel de MFC a 3,99% m/v. Sua fórmula conta ainda com um emoliente, para não ressecar a pele. Também é possível adaptar a formulação para outras consistências de gel de celulose, bastando apenas manter a mesma proporção de massa de celulose. Além disso, o estudo avalia o efeito deste

álcool em gel sobre a bactéria *Escherichia Coli*, observando-se uma redução extrema no número de unidades formadoras de colônias, validando a eficiência do método. Em relação a sua textura, é relatado que o novo álcool em gel apresenta consistência similar àquele do álcool em gel comercial, sendo observada uma leve formação de grumos (efeito *rolling out*) ao se friccionar as mãos.

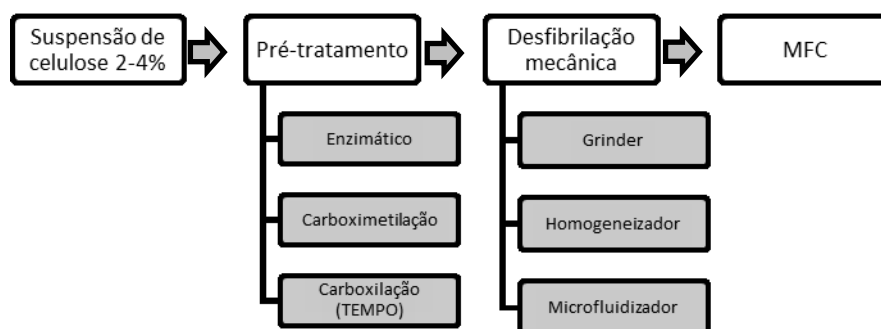
Para o álcool em gel tradicional comercial, o Formulário Nacional da Farmacopeia Brasileira (2002), descreve que para a produção de 100g de gel alcóolico são necessários 75,73 g de álcool etílico (96 °GL) e 0,5 g de carbômer 980, sendo o restante dos componentes água purificada e uma solução de trietanolamina (emoliente). Logo, para 100g de gel alcóolico de MFC, serão necessários 0,613 g de MFC (base seca), uma quantidade um pouco superior que a de carbômer 980.

Os carbômeros são polímeros de ácido acrílico reticulado de alta massa molar, e são utilizados principalmente na indústria cosmética. Como solventes de polimerização, são utilizados: acetato de etila, benzeno ou um cosolvente (mistura de ciclohexano e acetato de etila). Como agentes de reticulação, são utilizados, alil sacarose ou alil pentaeritritol. Os produtos da família dos carbômeros são quimicamente semelhantes, se diferem por seu tipo de reticulação química e podem ser: homopolímeros (carbomer 980), copolímeros (carbomer 1342) ou interpolímeros (carbomer Ultrez 10). O carbômero 980 apresenta viscosidade na faixa de 40.000 a 60.000 mPa.s, para uma concentração de 0,5% em peso (LUBRIZOL, 2022). Em 2020, o tamanho do mercado global de dos carbômeros foi de 660,2 milhões de dólares, e sofreu grande impacto devido ao COVID-19, obtendo um declínio de -2,1%, comparado com o crescimento médio dos anos de 2017 a 2019. O mercado de carbômeros também sofreu devido a regulamentações governamentais impostas, exigindo a redução do uso de produtos polimerizados com benzeno. Os principais produtores de carbômeros são: Lubrizol (EUA), Tinci Materials (China), Evonik Industries (Alemanha) e DX Chemicals (China) (MARKET RESEARCH REPORT, 2022). O preço do Carbomer 980 no mercado varia de USD 8,00/kg a USD 20,00/kg (ALIBABA, 2022).

1.6. Considerações finais

Como visto anteriormente, o processo de produção de MFC é relativamente simples, como esquematizado no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 - Processo de produção de MFC com os principais tipos de tratamento



Fonte: O autor, 2022.

Os processos se diferenciam nos tipos de pré-tratamento e desfibrilação mecânica. O método de *grinding* apresenta vantagem por não precisar de um pré-tratamento, porém necessita de um grande número de passagens no equipamento. Para o método de homogeneização a solução de celulose necessita de 8 a 10 passagens. Já para o método de microfluidização, dependendo do tipo pré-tratamento, a solução de celulose terá de passar uma ou mais vezes pelo microfluidizador. Na Tabela 4, apresenta-se um esquema comparativo com informações operacionais de custos energéticos associados aos três tipos de processamento, com suas respectivas referências.

Tabela 4 - Pré-tratamentos, pressões de operação, número de passagens e energia requerida para o homogeneizador, microfluidizador e grinder

Método	Homogeneizador	Microfluidizador		Grinder
Pré-tratamento	Nenhum (a)	Enzimático (e)	Carboximetilação (d)	Nenhum (a)
Pressão de operação	55 MPa (a)	105 - 170 MPa (e)	165 MPa (d)	Atmosférica (a); (f)
Nº passagens	8-10 (b)	8 (e)	1 (d)	10-25 (a); (f)
Custo energético	12,0 - 70,0	5,01 - 5,40	1,00 - 2,86	2,55 - 4,25

(kWh/kg)	(a); (c); (d)	(c); (d)	(c); (d)	(a); (f)
Capacidade	3.270	900		6.000
máxima	(g)	(h)		(i)
(kg/h)				

Legenda: (a) SPENCE *et al.*, 2011; (b) TURBAK, *et al.*, 1984; (c) ARVIDSSON; NGUYEN; SVANSTRÖM, 2015; (d) BAJPAI, 2016; (e) PÄÄKKÖ *et al.*, 2007; (f) JORDÃO; CLARO; MAGALHÃES, 2017; (g) DAIRY ENGINEERING, 2021 ; (h) MICROFLUIDICS, 2021 e (i) MASUKO SANGYO, 2021.

Fonte: O autor, 2022.

O método de microfluidização com carboximetilação tem menor custo energético, porém as várias etapas de pré-tratamento podem encarecer o processo, uma vez que, utiliza-se outros reagentes (isopropanol, metanol, ácido monocloroacético, dentre outros), além de água e polpa de celulose para a produção.

Embora existam muitos documentos referentes à MFC, a maioria trata-se de modificações na estrutura das fibras e novas tecnologias, existindo um gargalo entre a escala de produção de laboratório e um processo industrial. Até o momento foram encontrados três documentos referentes à viabilidade técnico-econômica da produção de MFC. De Assis, *et al.* (2017b) detalham os principais custos envolvidos na produção de MFC, utilizando a técnica de refinamento a disco. Bondancia *et al.* (2020), também realizam um estudo de viabilidade técnico-econômica da MFC, entretanto é utilizado ácido cítrico para hidrólise e a técnica de ultrassom para desfibrilação. Jordão, Claro e Magalhães (2017) são os únicos, a propor a viabilidade econômica da produção de MFC pelo método de *grinding*, mas seu estudo não contempla uma análise tão detalhada e nem quais são os impactos no preço de venda, com o aumento da escala de produção. Diante disso, o presente estudo visa preencher essa lacuna, estudando os efeitos de um aumento de escala e levantando os principais pontos que influenciam o custo de produção, preço mínimo de venda e preço de mercado do processo, utilizando a técnica de *grinding*. Este método de produção se mostrou eficaz, além de não necessitar de um pré-tratamento, deixando o processo mais simples e apresentando um menor custo energético. O método também apresenta vantagens em relação aos outros devido ao menor custo de investimento e maior capacidade de produção.

2. METODOLOGIA

2.1. Capital de investimento total (CIT)

Um projeto de planta aceitável deve apresentar um produto que será vendido com lucro. Primeiramente, deve-se investir capital suficiente para construir todos os aspectos necessários para a instalação da planta, além de possuir fundos disponíveis para matérias-primas, mão de obra, utilidades, salários administrativos e outros. O capital fixo de investimento (CFI) é o capital necessário para a construção de uma nova planta ou modificações em uma já existente. Já o capital necessário para o funcionamento da planta é chamado de capital de giro (CG). A soma do capital fixo de investimento com o capital de giro é conhecido como capital de investimento total (CIT) (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2002).

O capital fixo de investimento é composto por custos diretos e indiretos. Sendo eles:

Custos diretos:

- **Aquisição de equipamentos** (Cotação dos equipamentos).
- **Instalação de equipamentos** (Mão de obra, fundações, suportes e plataformas).
- **Instrumentação e controle** (Instrumentos, mão-de-obra de instalação e equipamentos auxiliares).
- **Tubulações** (Mão de obra, válvulas, conexões, tubos, suportes e outros itens).
- **Sistema elétrico** (Fiação de energia, iluminação, serviços, fiação de instrumentos e controle).
- **Edifícios, incluindo serviços** (Mão de obra, edifícios ligados à fábrica, encanamento, aquecimento, iluminação e ventilação).
- **Serviços e melhorias** (Custo de cercas, nivelamento, estradas, calçadas, desvios ferroviários, paisagismo, serviços de fornecimento de utilidade e proteção contra incêndios).
- **Terreno** (Custo do terreno, vistorias e taxas).

Custos indiretos:

- **Engenharia e supervisão** (Projeto de engenharia, incluindo software licenciado, desenhos, contabilidade, compras, despesas de viagem, comunicações e etc.).

- **Despesas legais** (Compra de terreno, compra de equipamentos, contratos, normas governamentais e ambientais).
- **Despesas de construção e taxas** (Construção e operação, ferramentas de construção, canteiro de obras, folha de pagamento da construção, seguros, taxa do contratante, etc.).
- **Contingência** (Tempestades, inundações, acidentes de transporte, greves, mudanças de preços, pequenas mudanças de projeto, erros de estimativa e outras despesas imprevistas).

2.2. Custo variável

Os custos variáveis de produção incluem despesas diretamente associadas à operação de fabricação. Ou seja, dependem da taxa de operação da planta (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2002). Este tipo de custo inclui:

- **Matérias-primas** (Materiais utilizados diretamente para fabricação dos produtos).
- **Utilidades** (Vapor, eletricidade, água de resfriamento entre outros).
- **Catalisadores e solventes.**

2.3. Custo fixo

Os custos fixos são despesas que praticamente independentes da taxa de produção da planta. Despesas como mão de obra, manutenção, taxas locais, seguros e aluguel são geralmente classificados como custos fixos. Os custos gerais da planta, que incluem uma variedade de serviços para a rotina da planta, também podem ser considerados como custos fixos, já que praticamente não se alteram com a taxa de produção (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2002). Este tipo de custo inclui:

- **Mão de obra operacional** (Salário de operadores).

- **Supervisão operacional e assistência administrativa** (Supervisão direta e assistência de escritório ligada à operação).
- **Manutenção e reparos** (Equipamentos e edifícios).
- **Suprimentos operacionais** (Lubrificantes, produtos de teste e outros).
- **Encargos de laboratório** (Controle de qualidade e análises laboratoriais).
- **Taxas locais**
- **Seguro**
- **Custos administrativos**
- **Custos gerais da planta**

2.4. Métodos para verificação da viabilidade técnico-econômica do projeto

Avaliações técnico-econômicas são essenciais para verificar a viabilidade de processos em escala industrial. Essa verificação é realizada através de dados disponíveis no projeto, como o fluxo de caixa projetado, que permitem uma tomada de decisão por critérios quantitativos. Há vários métodos baseados em engenharia econômica que permite essa verificação, como payback (simples e descontado), valor presente líquido, taxa interna de retorno índice de lucratividade. Cada método apresenta um tipo de avaliação em grandezas diferentes. O payback realiza uma análise baseada no tempo necessário para o retorno do projeto, com resultados em escala de tempo. O índice de lucratividade fornece uma avaliação através de um índice calculado sobre os fluxos de caixa. O valor presente líquido expressa seus resultados em termos monetários e a taxa interna de retorno realiza a avaliação através de taxas percentuais (CORREIA NETO, 2009). A seguir, apresenta-se uma breve descrição de cada um desses métodos.

2.4.1. Método Payback Simples – PBS

O método de payback simples (PBS) permite avaliar o tempo necessário para recuperar o investimento inicial realizado. Isso ocorre quando a soma acumulada das receitas do fluxo de

caixa for igual ao investimento realizado. Quanto menor o tempo de recuperação do investimento, melhor será o resultado, pois mais rápido o projeto se paga, gerando caixa líquido para investir em um novo projeto. Para utilizar o método, deve-se estipular um prazo máximo de retorno do investimento, e não se deve aceitar um projeto que tenha prazo de retorno superior ao prazo máximo estipulado. Entretanto, se o período de recuperação do investimento for inferior ao prazo máximo, o projeto deve ser aceito. O método de payback simples não considera o valor do dinheiro no tempo (CORREIA NETO, 2009). O cálculo do PBS pode ser feito da seguinte forma:

$$\sum_{t=0}^{PBS} FC_t = 0 \quad (3)$$

Em que FC_t é retorno após a aplicação de impostos e t é o tempo de vida do projeto.

- Se $PBS < t$, o projeto deve ser aceito. Mostra que o VPL será positivo e consequentemente criará valor para empresa.
- Se $PBS > t$, o projeto não deve ser aceito.

O valor de PBS igual ao prazo estipulado não foi incluído na condição de aceitação do projeto, pois esse resultado indica que o custo inicial deverá ser recuperado no tempo máximo de projeto e não criará nem destruirá valor da empresa (LAPPONI, 2007).

2.4.2. Método Payback Descontado – PBD

O payback descontado diferencia-se do simples por considerar o efeito do dinheiro no tempo. No período de payback descontado, não são usados os valores nominais dos fluxos, como no PBS, e sim os valores descontados no presente, utilizando uma taxa de juros, k , conhecida como taxa mínima de atratividade (TMA). A taxa mínima de atratividade, como o próprio nome sugere, é a taxa de remuneração mínima requerida pelos provedores de capital para aceitar um projeto. Também é conhecida como custo de capital, sendo uma taxa de desconto ajustada ao risco da operação e deve ser coerente com as fontes de capital do empreendimento (CORREIA NETO, 2009).

O critério decisório é o mesmo utilizado no payback simples, podendo ser calculado da seguinte forma:

$$\sum_{t=0}^{PBS} \frac{FC_t}{(1+k)^t} = 0 \quad (4)$$

Em que k é a taxa mínima de atratividade definida pelo investidor.

O PBD não é recomendado como único método de avaliação do projeto, e deve ser utilizado para avaliação de projetos simples (LAPPONI, 2007).

2.4.3. Valor Presente Líquido – VPL

O valor presente líquido (VPL) consiste em somar todos os fluxos financeiros do projeto no tempo atual (saídas e entradas) e subtrair o investimento feito no tempo zero.

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (5)$$

Em que I_0 é o investimento inicial e n é o horizonte temporal de análise do projeto.

O VPL será positivo se a soma dos fluxos de caixa no tempo for maior do que o custo inicial I_0 , caso contrário, o VPL será negativo (LAPPONI, 2007). Para a tomada de decisão, o VPL é comparado com o valor de referência zero de forma que:

- Se $VPL > 0$, o custo inicial será recuperado e remunerado com a taxa requerida k e o projeto criará valor para a empresa. Logo, o projeto deve ser aceito.
- Se $VPL < 0$, o custo inicial não será recuperado nem remunerado completamente com a taxa requerida k e o projeto destruirá valor da empresa. Logo, o projeto deve ser recusado.

2.4.4. Taxa Interna de Retorno – TIR

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de juros que anula o VPL do projeto. Ela detecta, mas não mede a criação de valor do projeto negativo (LAPPONI, 2007). O método Pode ser obtido através de:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} \quad (6)$$

O cálculo da TIR pode ser realizado por métodos iterativos como Newton-Raphson, calculadoras financeiras ou funções financeiras do Excel.

A decisão com o método da TIR somente deve ser feita em projetos simples, que garantem a existência de uma única TIR. Para decidir se a TIR do projeto deve ser aceita, ela deve ser comparada com a uma referência, a taxa requerida k , de modo que:

- Se $TIR > k$, O projeto criará valor e o custo inicial será recuperado e remunerado com a taxa requerida k . Logo, o projeto deve ser aceito.
- Se $TIR < k$, o projeto destruirá um valor não determinado da empresa e o custo não será recuperado nem remunerado de forma completa com a taxa requerida k . Logo, o projeto deve ser rejeitado.

2.4.5. Índice de lucratividade - IL

O índice de lucratividade (IL) é definido como a divisão da soma dos presentes retornos, mediante a uma taxa requerida pelo investimento inicial do projeto (LAPPONI, 2007). Pode ser obtido através de:

$$IL = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + k)^t}}{I_0} \quad (7)$$

Portanto, o IL mede o valor do projeto por unidade do custo inicial na data inicial do fluxo de caixa. Se o VPL do projeto é positivo, a soma dos presentes retornos será maior que o custo inicial e consequentemente o IL do projeto será maior que um ($IL > 1$). Por outro lado, se o VPL do projeto for negativo, a soma dos presentes retornos será menor que o custo inicial e por consequência o IL será menor que um ($IL < 1$) (LAPPONI, 2007).

A tomada de decisão como IL é realizada da seguinte forma:

- Se $IL > 1$, A soma dos presentes retornos será maior que o custo inicial. Logo, o projeto deve ser aceito.
- Se $IL < 1$, a soma dos presentes retornos será menor que o custo inicial. Logo, o projeto deve ser rejeitado.

2.4.6. Comparações entre os indicadores econômicos

Como dito anteriormente, Cada método apresenta um tipo de avaliação em grandezas diferentes. Na Tabela 5, é possível verificar as vantagens e desvantagens de cada método.

Tabela 5 - Comparação entre os indicadores econômicos

Método	Vantagens	Desvantagens
PBS	• Aplicação simples • Fornece uma estimativa do tempo de retorno do investimento	• Não considera o valor do dinheiro no tempo • Não considera todos os capitais do fluxo de caixa do projeto
PBD	• Considera o valor do dinheiro no tempo • Fornece uma estimativa melhorada sobre o tempo de retorno do investimento	• Não considera todos os capitais do fluxo de caixa do projeto • Só aplicado para projetos simples
VPL	• Considera todo fluxo de caixa do projeto • Considera o valor do dinheiro no tempo • Informa e mede o valor criado ou destruído pelo projeto • Seleciona o melhor projeto, o de maior VPL	• É necessário determinar a priori a taxa requerida do projeto.
TIR	• Considera o fluxo de caixa completo • Considera o valor do dinheiro no tempo • Informa se projeto cria ou destrói valor	• Aplicada apenas para projetos simples • É necessário determinar a priori a taxa requerida do projeto.

IL	• Considera o fluxo de caixa completo • Considera o valor do dinheiro no tempo • Informa se projeto cria ou destrói valor	• É necessário determinar a priori a taxa requerida do projeto.
-----------	---	---

Fonte: O autor, 2022.

2.5. Análise de sensibilidade

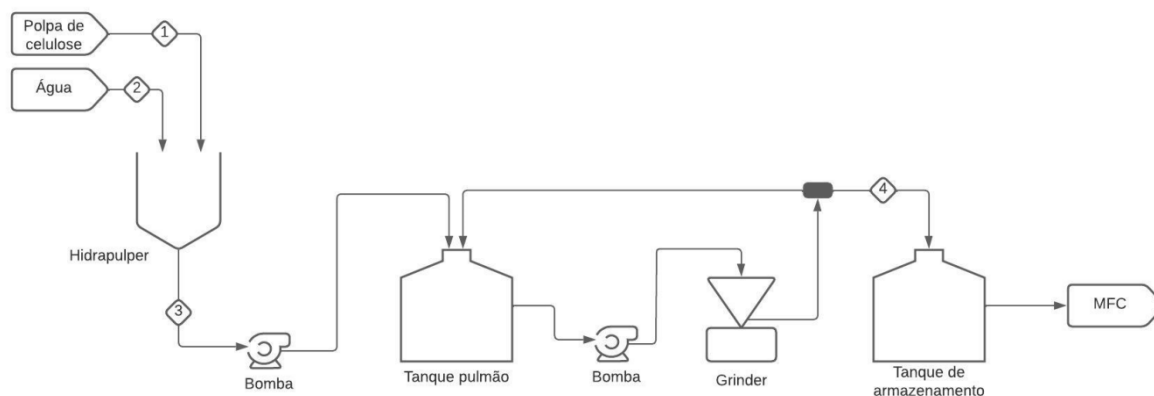
A análise de sensibilidade é um tipo de avaliação de risco do projeto e consiste em avaliar as alterações nos resultados calculados, após variação de uma estimativa por vez. Normalmente escolhe-se uma variável que possa ter um comportamento incerto e varia-se seu valor percentualmente para mais ou para menos, mantendo estáveis todas as outras variáveis do processo. Após essa variabilidade, um novo resultado é calculado, mostrando a sensibilidade dele frente a variável (CORREIA NETO, 2009).

As variáveis escolhidas para as alterações foram: custo variável, custo fixo, taxa mínima de atratividade e capital fixo de investimento (CFI). Optou-se por variar estas estimativas em $\pm 25\%$, assim como nos artigos de ASSIS *et al.* (2017b) e Bondancia *et al.* (2020).

2.6. Proposta de escalonamento do processo

O escalonamento de processos é utilizado quando se deseja aumentar a capacidade de produção, como da passagem da escala laboratorial para uma escala piloto ou comercial. O fluxograma de processos abaixo é uma proposta do aumento de escala da produção de MFC para a construção de uma nova planta, saindo de uma escala laboratorial para uma escala comercial.

Figura 17 - Proposta de fluxograma de processo da MFC em larga escala para cenários de nova planta



Fonte: O autor, 2022.

A polpa de celulose branqueada (1) e a água (2) são misturadas em um hidrapulper com concentração de 3% em celulose. A mistura de água e celulose (3) é bombeada para um tanque pulmão e em seguida recirculada através do *grinder* até atingir a consistência necessária (em torno de 25 passagens). O produto final (4) segue para um tanque de armazenamento, onde pode ser envasado e comercializado ou utilizado na própria planta (como agente de reforço para a produção de papel). A MFC apresenta um aspecto de gel, com 3% em concentração de sólidos. O processo apresenta como vantagem a ausência de geração de resíduos gasosos ou líquidos, tornando-o mais amigável ao meio ambiente. ASSISet *al.* (2017b), relatam que a vida útil do produto final é de cerca de um ano e não há necessidade de refrigerar ou adicionar biocidas para inibir o crescimento de microrganismos.

O hidrapulper é um equipamento já utilizado na indústria de papel e tem como função desagregar a celulose, apresenta rotores específicos para trabalhar em baixa ou alta consistência, podendo ser usado em regime contínuo ou batelada. O grinder da marca Masuko Sangyo Co. Ltd permite a produção de MFC em escala laboratorial, com aproximadamente 120 kg/h (MASUKO SANGYO, 2021). O equipamento proposto para o escalonamento do processo pertence ao mesmo fabricante, porém com uma maior capacidade de processamento, de aproximadamente 6.000 kg/h (MASUKO SANGYO, 2021). A Universidade do Maine utiliza um analisador Techpap Morfi, para medir a quantidade de finos na pasta de MFC, após passagens pelo refinador a disco. ASSISet *al.* (2017b), relataram que um valor em torno de 90% de finos é bastante satisfatório, pois a amostra apresenta dimensões em escala

manométrica (larguras entre 20 e 100 nm e comprimentos de vários micrômetros). Logo, um sistema similar pode ser considerado para a planta proposta neste trabalho.

2.7. Cenários analisados

São considerados seis cenários de produção: três para plantas construídas isoladamente e três para uma configuração de co-localização, em que, considera-se a produção de MFC dentro de uma fábrica que já produza polpa de celulose. Os cenários estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Cenários analisados para a produção de MFC (base seca)

Cenários	Número de grinders em paralelo	Capacidade de produção, base seca (t/ano)	Matéria-prima
Planta isolada			
A	1	57,02	Polpa de celulose
B	2	114,05	comercial
C	4	228,10	(90% em massa de sólidos)
Co-localização			
D	1	57,02	Celulose em
E	2	114,05	suspensão
F	4	228,10	(3% em massa de sólidos)

Fonte: O autor, 2022.

Para o cenário de co-localização, foram considerados as seguintes informações:

- A polpa de celulose é fornecida a 3% em massa de sólidos, já que é integrada a uma fábrica de celulose. Consequentemente, não há a necessidade do uso do hidrapulper, nem a utilização de água para diluição da matéria-prima.
- O preço da celulose a 3% é menor do que da polpa comercial, pois são descontados os valores da secagem e do frete (ASSIS *et al.*, 2017b).
- Foi considerado um menor valor para porcentagem da compra do terreno.

- Serão necessários menos funcionários, reduzindo o valor da mão de obra.

Para ambos os cenários foram consideradas as seguintes informações:

- A planta opera 330 dias por ano (8000 horas), em regime contínuo, 24h por dia.
- O *grinder* opera com 100% de sua capacidade e não há perdas na produção.
- Considera-se um consumo energético de 4.000 kWh/t de celulose (base seca) para o grinder, com 25 passagens (JORDÃO; CLARO; MAGALHÃES, 2017) e 333 kWh/t, base seca, para o hidrapulper (ASSIS *et al.*, 2017b).

2.8. Estudo de localização da planta

É muito importante definir onde o empreendimento estará localizado, pois tanto receitas como despesas dependerão diretamente da localização adotada. Assim, a determinação da localização ótima é de suma importância, pois traz o maior benefício ao empreendimento. Para determinar essa localização, é importante identificar variáveis que são afetadas pelos locais alternativos (CORREIA NETO, 2009). Neste estudo foram considerados como variáveis importantes para a tomada de decisão o fornecimento de matérias primas e custo com o processo produtivo.

É desejável estar próximo dos fornecedores de matéria primas, devido ao menor custo com transportes. Quanto mais distante estiver o local de processamento da fonte de matérias-primas e maior for o peso do material a ser transportado, maior será o custo com transportes. É necessário também que haja matéria-prima sempre disponível, para evitar paradas indesejadas na planta. Outro fator importante é o local de processamento, pois as despesas com energia elétrica, água, aluguéis e impostos variam para diferentes localidades, impactando nos custos do projeto.

Apesar do Brasil ser o segundo maior produtor de celulose do mundo, com fabricação em várias estados do país, sua produção se concentra majoritariamente nas regiões Sul e Sudeste, com destaque para os estados do Paraná, Mato Grosso do Sul e São Paulo (IBÀ, 2020)

Segundo a FIRJAN (2017), os gastos com energia elétrica para o setor industrial podem representar mais de 40% de seus custos de produção. As diferenças nas alíquotas de ICMS influenciam no custo da energia, havendo diferenças entre os estados. O Rio de Janeiro apresenta maior custo de energia elétrica industrial do país (0,626 R\$/kWh) e Roraima o menor

(0,310 R\$/kWh). Entre os estados com maior produção de celulose, o estado de São Paulo apresenta menor custo de energia, além de ser o estado com maior quantidade de fabricas de papel do Brasil, sendo um ótimo mercado consumidor para a MFC, especialmente para aplicação como espessante (substituto do Carbopol) na fabricação do álcool em gel. Sendo assim, o estado de São Paulo foi escolhido para a localização da planta.

O valor associado à energia elétrica foi baseado na estrutura tarifária para a categoria industrial, fornecidos pela Companhia Neoenergia Elektro (NEOENERGIA, 2022) e o custo com água foi baseado nas tarifas da Companhia BRK ambiental (BRK AMBIENTAL, 2022). A moeda utilizada neste estudo foi o dólar americano. Para a conversão, foi considerada a média do período de janeiro/2021 a fevereiro/2022, com um Real equivalente a USD 0,19 (R\$ 5,40/USD) (IPEA, 2022). Na Tabela 7 encontram-se os valores assumidos para os cálculos com os custos de água e energia da planta.

Tabela 7 - Valores de referência para os custos de água e energia da planta

Água (R\$/m³)	26,36	Água (USD/t)	5,02
Energia (R\$/kWh)*	0,417	Energia (USD/kWh)	0,079

*ICMS 18%, PIS 1,03% e COFINS 4,72%.

Fonte: O autor, 2022.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Capital de investimento total (CIT)

A primeira etapa do cálculo do CFI é a estimativa do custo dos equipamentos. Os preços unitários do hidrapulper e do *grinder* da marca Masuko Sangyo foram obtidos através de orçamentos solicitados aos fabricantes. Os preços dos tanques de armazenamentos e bombas foram estimados através da ferramenta Matches (MATCHES, 2014). Os custos dos principais equipamentos envolvidos no processo para o cenário A estão listados na Tabela 8. Os demais cenários estão listados nas Tabelas 35 e 36 do Apêndice.

Tabela 8 - Estimativa do custo dos principais equipamentos do cenário A (construção de uma planta isolada)

Planta isolada			
Equipamentos	Unidades	Preço unitário (USD)	Preço (USD)
Cenário A			
Grinder	1	560.410,13	560.410,13
Hidrapulper	1	13.300,00	13.300,00
Tanque	2	8.400,00	16.800,00
Bomba	2	2.000,00	4.000,00
		Frete (USD)	3.410,00
		Total (USD)	597.920,13

Fonte: O autor, 2022.

A diferença no custo total dos equipamentos entre o cenário A, de planta isolada, e D, de co-localização, é a ausência do hidrapulper.

O valor referente ao hidrapulper refere-se a uma capacidade de 4 a 14 t/dia. Para uma maior capacidade, estimou-se o valor referente a um aumento de escala, através da relação:

$$\text{Custo do equipamento } X = (\text{custo do equipamento } Y) \times \left(\frac{\text{capacidade do equipamento } X}{\text{capacidade do equipamento } Y} \right)^{0,6} \quad (8)$$

Essa relação é conhecida como regra do fator de seis décimos. Se conhecermos o custo e a capacidade de um equipamento Y , o custo de um equipamento similar X é obtido pelo preço do equipamento de referência vezes a razão entre suas capacidades elevadas a 0,6, que é o valor mais comumente usado para indústria química. Além disso, deve-se se certificar que os equipamentos são equivalentes, feitos do mesmo material e operam nas mesmas condições de trabalho. Esta regra também é amplamente utilizada para estimar o capital fixo de investimento de processos semelhantes (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2002).

O valor do grinder já inclui o custo de importação e frete para o Brasil, para os demais equipamentos, foi adicionado um valor de frete de 10% do custo dos equipamentos adquiridos, já que foram cotados com preço FOB (*free on board*). Certamente os custos de frete dependem de muitos fatores, como peso do equipamento, distância da entrega e o método de transporte, porém uma estimativa de 10% é recomendada para avaliações de pré-projeto.

Os balanços de massa foram calculados para cada cenário. Os resultados para todos os cenários estão especificados nas Tabelas 9 a 14. O processo é bem simples e há apenas polpa de celulose e água. A numeração das correntes de processo está detalhada na Figura 17. O hidrapulper, os tanques e as bombas foram cotados de acordo com os dados do balanço de massa.

Tabela 9 - Balanço de massa para o cenário A

	1		2		3		4	
	Polpa		Água		Polpa em suspensão		MFC	
Componentes	Vazão (t/dia)	Fração mássica	Vazão (t/dia)	Fração mássica	Vazão (t/dia)	Fração mássica	Vazão (t/dia)	Fração mássica
Polpa de celulose	0,1728	0,9	0	0	0,1728	0,03	0,1728	0,03
Água	0,02	0,1	5,57	1	5,59	0,97	5,59	0,97
Total	0,2	1	5,57	1	5,76	1	5,76	1

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 10 - Balanço de massa para o cenário B

	1		2		3		4	
	Polpa		Água		Polpa em suspensão		MFC	
Componentes	Vazão (t/dia)	Fração mássica	Vazão (t/dia)	Fração mássica	Vazão (t/dia)	Fração mássica	Vazão (t/dia)	Fração mássica
Polpa de celulose	0,3456	0,9	0	0	0,3456	0,03	0,3456	0,03
Água	0,04	0,1	11,14	1	11,17	0,97	11,17	0,97
total	0,4	1	11,14	1	11,52	1	11,52	1

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 11 - Balanço de massa para o cenário D

	1		2		3		4	
	Polpa		Água		Polpa em suspensão		MFC	
Componentes	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração
	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica
Polpa de celulose	0,1728	0,03	0	-	0,1728	0,03	0,1728	0,03
Água	5,59	0,97	0,00	-	5,59	0,97	5,59	0,97
Total	5,76	1	0,00	-	5,76	1	5,76	1

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 12 - Balanço de massa para o cenário C

	1		2		3		4	
	Polpa		Água		Polpa em suspensão		MFC	
Componentes	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração
	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica
Polpa de celulose	0,6912	0,9	0	0	0,6912	0,03	0,6912	0,03
Água	0,08	0,1	22,3	1	22,3	0,97	22,3	0,97
total	0,8	1	22,3	1	23,04	1	23,04	1

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 13 - Balanço de massa para o cenário E

	1		2		3		4	
	Polpa		Água		Polpa em suspensão		MFC	
Componentes	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração
	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica
Polpa de celulose	0,3456	0,03	0	0	0,3456	0,03	0,3456	0,03
Água	11,17	0,97	0,00	0	11,17	0,97	11,17	0,97
total	11,5	1	0,00	0	11,52	1	11,52	1

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 14 - Balanço de massa para o cenário F

	1		2		3		4	
	Polpa		Água		Polpa em suspensão		MFC	
Componentes	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração	Vazão	Fração
	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica	(t/dia)	mássica
Polpa de celulose	0,6912	0,03	0	0	0,6912	0,03	0,6912	0,03
Água	22,35	0,97	0,0	0	22,3	0,97	22,3	0,97
total	23,04	1	0,0	0	23,04	1	23,04	1

Fonte: O autor, 2022.

A partir do custo dos equipamentos, é possível estimar o capital fixo de investimento, e com ele estimar os demais valores do projeto, como capital de giro, depreciação e o capital de investimento total. Os percentuais dos custos envolvidos foram escolhidos dentro de uma faixa de valores sugeridos por Peters, Timmerhaus e West (2002). Os resultados para todos os cenários podem ser observados nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Estimativa do capital fixo de investimento, capital de giro e depreciação dos cenários A, B e C, que representam a construção de uma nova planta

			Valor para cada cenário (USD)		
Descrição	Percentual	Referência	A	B	C
Custos Diretos (de 65%-85% do capital fixo de investimento)					
Equipamentos			597.920,13	1.168.450,26	2.308.887,34
Instalação	25%	C _{equipamentos}	149.480,03	292.112,57	577.221,83
Instrumentação e controle	8%	C _{equipamentos}	47.833,61	93.476,02	184.710,99
Tubulação	10%	C _{equipamentos}	59.792,01	116.845,03	230.888,73
Instalação elétrica	10%	C _{equipamentos}	59.792,01	116.845,03	230.888,73
Edifícios e auxiliares	8%	C _{equipamentos}	47.833,61	93.476,02	184.710,99
Serviços e melhorias	15%	C _{equipamentos}	89.688,02	175.267,54	346.333,10
Terreno	4%	C _{equipamentos}	23.916,81	46.738,01	92.355,49
Custos diretos (CD)			1.076.256,23	2.103.210,47	4.155.997,20
Custos Indiretos (de 15-35% do capital fixo de investimento)					
Engenharia e supervisão	5%	CD	53.812,81	105.160,52	207.799,86
Despesas legais	1%	CFI	13.450,00	26.280,00	51.920,00
Despesas de construção e taxas	10%	CFI	134.500,00	262.800,00	519.200,00
Contingência	5%	CFI	67.250,00	131.400,00	259.600,00
Custos indiretos (CI)			269.012,81	525.640,52	1.038.519,86

Capital fixo de investimento (CFI)			CD + CI	1.345.269,05	2.628.850,99	5.194.517,06
Capital fixo de investimento total (CFIT)			CFI + CG	1.494.743,38	2.920.945,55	5.771.685,63
Capital de Giro (CG)	10%	CFIT		149.474,34	292.094,55	577.168,56
Depreciação			(CFI - terreno) / 10 anos	132.135,22	258.211,30	510.216,16

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 16 - Estimativa do capital fixo de investimento, capital de giro e depreciação dos cenários D, E e F, que representam a co-localização

			Valor para cada cenário (USD)		
Descrição	Percentual	Referência	D	E	F
Custos Diretos (De 65%-85% do capital fixo de investimento)					
Equipamentos			583.290,13	1.153.820,26	2.289.160,52
Instalação	25%	C _{equipamentos}	145.822,53	288.455,07	572.290,13
Instrumentação e controle	8%	C _{equipamentos}	46.663,21	92.305,62	183.132,84
Tubulação	10%	C _{equipamentos}	58.329,01	115.382,03	228.916,05
Instalação elétrica	10%	C _{equipamentos}	58.329,01	115.382,03	228.916,05
Edifícios e auxiliares	8%	C _{equipamentos}	46.663,21	92.305,62	183.132,84
Serviços e melhorias	15%	C _{equipamentos}	87.493,52	173.073,04	343.374,08
Terreno	2%	C _{equipamentos}	11.665,80	23.076,41	45.783,21
Custos diretos (CD)			1.038.256,43	2.053.800,06	4.074.705,73
Custos Indiretos (De 15-35% do capital fixo de investimento)					
Engenharia e supervisão	5%	CD	51.912,82	102.690,00	203.735,29
Despesas legais	1%	CFI	12.976,00	25.670,00	50.920,00

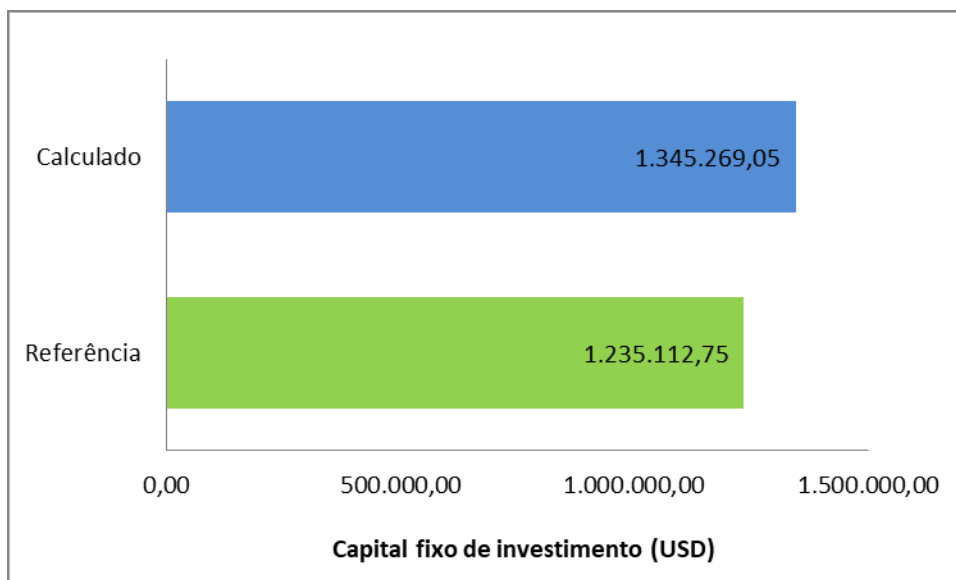
Despesas de construção e taxas	10%	CFI	129.760,00	256.700,00	509.200,00
Contingência	5%	CFI	64.880,00	128.350,00	254.600,00
Custos indiretos (CI)			259.528,82	513.410,00	1.018.455,29
Capital fixo de investimento (CFI)		CD + CI	1.297.785,25	2.567.210,07	5.093.161,01
Capital fixo de investimento total (CFIT)		CFI + CG	1.441.983,61	2.852.455,63	5.659.067,79
Capital de Giro (CG)	10%	CFIT	144.198,36	285.245,56	565.906,78
Depreciação		(CFI - terreno) / 10 anos	128.611,95	254.413,37	504.737,78

Fonte: O autor, 2022.

Para grandes indústrias, o custo dos equipamentos geralmente equivale de 15 a 40% do CFI (PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2002). Neste estudo, o custo dos equipamentos ($C_{\text{equipamentos}}$) foi estimado em aproximadamente 44% do CFI para todos os cenários, um pouco acima da faixa, mas se tratando de uma planta simples e de uma avaliação inicial, o valor pode ser considerado.

As estimativas para os custos diretos e indiretos foram de 80% e 20% do capital fixo de investimento, respectivamente. Peters, Timmerhaus e West (2002) estimam que os custos diretos situam-se entre 65% a 85% do capital fixo de investimento e os custos indiretos entre 15 a 35% do capital fixo de investimento. Assis *et al.* (2017b) estimaram os custos diretos representem 70% do CFI para uma planta semelhante. Logo, os percentuais considerados neste trabalho são consistentes com a literatura. Para o cenário A, foi realizada uma comparação com o capital fixo de investimento estimado por Assis *et al.* (2017b), através da equação (8). O resultado calculado no presente trabalho é bem próximo ao valor obtido pelos autores (valor de referência), conforme observado na Figura 18.

Figura 18 - Comparação entre os capitais fixos de investimento (CFI) de uma planta semelhante



Fonte: O autor, 2022.

O método de depreciação linear foi utilizado para os cálculos, visto que, para avaliações técnico-econômicas, uma taxa de depreciação anual constante é aceitável. Em geral todos os bens com vida útil limitada de mais de um ano são depreciables. Custos de projeto e engenharia, transporte, montagem em campo e melhorias no terreno também são depreciables. Contudo, o capital fixo de investimento (CFI), excluindo terrenos, é depreciable.

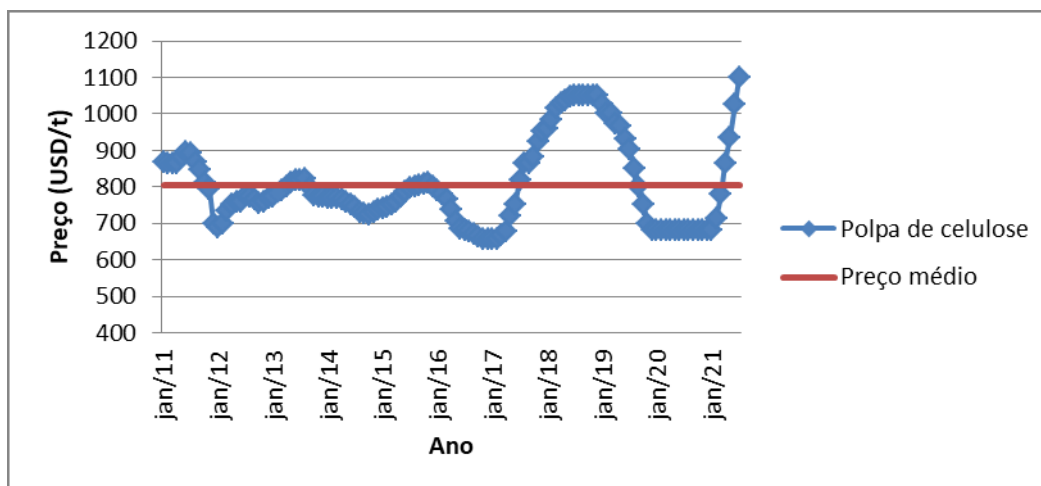
3.2. Custo variável

Como o processo utiliza apenas água e polpa de celulose, não há gastos com solventes ou catalisadores, e somente a energia consumida pelos equipamentos é considerada no cálculo das utilidades. Além dos gastos energéticos dos equipamentos principais também foi considerado um valor de 25% sobre a energia requerida pelo grinder e hidrapulper por ano, para as bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Segundo informativos do setor florestal do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), o custo da polpa de celulose variou bastante nos últimos dez anos, sendo utilizada a média desses valores para o cálculo do custo com a matéria-prima. A

Figura 19 demonstra a evolução dos preços da polpa de celulose de fibra curta no estado de São Paulo.

Figura 19- Evolução dos preços de polpa de celulose de fibra curta entre os anos de 2011 e 2021 no estado de São Paulo



Fonte: O autor, 2021.

O preço médio da celulose de fibra curta, no período de 2020 a 2021, no mercado interno de São Paulo foi estimado em USD 804,28 por tonelada, incluindo frete e impostos.

Para o cálculo do preço da polpa de celulose de co-localização, foram considerados os seguintes descontos (ASSIS *et al.*, 2017b):

Tabela 17 - Custo da polpa de celulose com co-localização

Custo celulose (US\$/ton)	Custo frete (US\$/ton)	Custo de secagem (US\$/ton)	Custo polpa co- localização (US\$/ton)
804,28	55,85	39,09	709,34

Fonte: O autor, 2022.

Nas Tabelas 18 a 23 estão organizados os resultados dos custos variáveis para todos os cenários.

Tabela 18 - Detalhamento do custo com celulose, água e energia elétrica do cenário A

Matéria-Prima	Preço (USD/t)	Produção (t/dia)	Produção (t/ano)	Valor (USD)
Celulose	804,28	0,17	57,02	45.863,25
Água	5,02	5,59	1.843,78	9.262,15
Utilidades (Energia)	Preço (kWh)	Energia (kWh/t)	Energia (kWh/ano)	Valor (USD)
Grinder	0,079	4000	228.096,00	18.059,40
Hidrapulper	0,079	333	18.988,99	1.503,45
Outros*	0,079	25%	61.771,25	4.890,71
Total (USD/ano)				79.578,96

* bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 19 - Detalhamento do custo com celulose, água e energia elétrica do cenário B.

Matéria-Prima	Preço (USD/t)	Produção (t/dia)	Produção (t/ano)	Valor (USD)
Celulose	804,28	0,35	114,05	91.726,50
Água	5,02	11,17	3.687,55	18.524,31
Utilidades (Energia)	Preço (kWh)	Energia (kWh/t)	Energia (kWh/ano)	Valor (USD)
Grinder	0,079	4000	456.192,00	36.118,80
Hidrapulper	0,079	333	37.977,98	3.006,89
Outros*	0,079	25%	123.542,50	9.781,42
Total (USD/ano)				159.157,92

* bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 20 - Detalhamento do custo com celulose, água e energia elétrica do cenário C.

Matéria-Prima	Preço (USD/t)	Produção (t/dia)	Produção (t/ano)	Valor (USD)
Celulose	804,28	0,69	228,10	183.453,00
Água	5,02	22,35	7.375,10	37.048,62
Utilidades (Energia)	Preço (kWh)	Energia (kWh/t)	Energia (kWh/ano)	Valor (USD)
Grinder	0,079	4000	912.384,00	72.237,60
Hidrapulper	0,079	333	75.955,97	6.013,78
Outros*	0,079	25%	247.084,99	19.562,84
Total (USD/ano)				318.315,84

* bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 21 - Detalhamento do custo com celulose e energia elétrica do cenário D

Matéria-Prima	Preço (USD/t)	Produção (t/dia)	Produção (t/ano)	Valor (USD)
Celulose	709,34	0,17	57,02	40.449,39
Utilidades (Energia)	Preço (kWh)	Energia (kWh/t)	Energia (kWh/ano)	Valor (USD)
Grinder	0,079	4000	228.096,00	18.059,40
Outros*	0,079	25%	57.024,00	4.514,85
Total (USD/ano)				63.023,64

* bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 22 - Detalhamento do custo com celulose e energia elétrica do cenário E.

Matéria-Prima	Preço (USD/t)	Produção (t/dia)	Produção (t/ano)	Valor (USD)
Celulose	709,34	0,35	114,05	80.898,78
Utilidades (Energia)	Preço (kWh)	Energia (kWh/t)	Energia (kWh/ano)	Valor (USD)
Grinder	0,079	4000	456.192,00	36.118,80
Outros*	0,079	25%	114.048,00	9.029,70
Total (USD/ano)				126.047,28

* bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 23 - Detalhamento do custo com celulose e energia elétrica do cenário F.

Matéria-Prima	Preço (USD/t)	Produção (t/dia)	Produção (t/ano)	Valor (USD)
Celulose	709,34	0,69	228,10	161.797,56
Utilidades (Energia)	Preço (kWh)	Energia (kWh/t)	Energia (kWh/ano)	Valor (USD)
Grinder	0,079	4000	912.384,00	72.237,60
Outros*	0,079	25%	228.096,00	18.059,40
Total (USD/ano)				252.094,56

* bombas, iluminação, ventilação e instrumentação.

Fonte: O autor, 2022.

3.3. Custo fixo

Para estimativa dos custos fixos, primeiramente é necessário estimar o número de operadores. Em análises preliminares de custos, a quantidade de mão de obra operacional pode ser obtida pela experiência da empresa com algum processo semelhante, ou por meio de informações já publicadas para determinados tipos de processos. A relação entre o número de operadores e a taxa de produção não é linear e uma forma de estima-la é através da relação entre operador/equipamento. Neste trabalho, o cálculo do número de operadores foi elaborada

a partir da mão de obra típica para cada equipamento, considerando a existência de 3 turnos de trabalho por dia. As Tabelas 24 e 25 listam a quantidade de operadores por unidade e turno. Os valores para tanques e bombas foram sugeridos por Peters, Timmerhaus e West (2002). Os valores para cada equipamento variam de 0,1 a 1, e como os equipamentos *grinder* e hidrapulper não estavam na listagem, foram assumidos os valores de 1 e 0,8 para cada um, respectivamente, pois são os equipamentos que mais demandariam atenção na produção. O número de operadores é obtido multiplicando-se o fator de cada equipamento pelo número de equipamentos e pela quantidade de turnos de trabalho. O valor do somatório é arredondado para o número inteiro superior mais próximo.

Tabela 24 - Estimativa para o número de operadores dos cenários A, B e C, referentes à construção de uma nova planta

Cenários		A		B		C	
Equipamentos	Operador /unidade/ turno	Unidades	Operadores	Unidades	Operadores	Unidades	Operadores
Grinder	1	1	3,00	2	6,0	4	12
Hidrapulper	0,8	1	2,4	1	2,4	1	2,4
Tanque	0,2	2	1,2	2	1,2	2	1,2
Bombas	0,1	2	0,6	2	0,6	2	0,6
Outros			1		1		1
		Total	8,2	Total	11,2	Total	17,2
Total		9		12		18	

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 25 - Estimativa para o número de operados dos cenários D, E e F, referentes à construção de uma planta co-localizada

Cenários		D		E		F	
Equipamentos	Operador /unidade/ turno	Unidades	Operadores	Unidades	Operadores	Unidades	Operadores
Grinder	1	1	3	2	6	4	12
Tanque	0,2	2	1,2	2	1,2	2	1,2
Bombas	0,1	2	0,6	2	0,6	2	0,6
			1		1		1
		Total	5,8	Total	8,8	Total	14,8
Total		6		9		15	

Fonte: O autor, 2022

Para o salário anual de cada operador, foi considerado um valor de 20.400,00 USD, incluindo hora-extras e impostos salariais, conforme sugerido por Bastos *et al.* (2022). Nas Tabelas 26 e 27 estão descritos os custos fixos para todos os cenários com seus respectivos valores.

Tabela 26 - Estimativa do custo fixo para os cenários A, B e C para a construção de uma nova planta

Descrição	Percentual	Referência	Valor para cada cenário (USD/ano)		
			A	B	C
Mão de obra	-	(Número de operadores) x (salário anual do operador)	183.600,00	244.800,00	367.200,00
Supervisão e assistência administrativa	10%	Mão de obra	18.360,00	24.480,00	36.720,00
Manutenção e reparos	2%	Capital fixo de investimento	26.905,38	52.577,02	103.890,34
Suprimentos Operacionais	10%	Manutenção e reparos	2.690,54	5.257,70	10.389,03
Encargos de laboratório	10%	Mão de obra	18.360,00	24.480,00	36.720,00
Taxas locais	1%	CFI	13.452,69	26.288,51	51.945,17
Seguro patrimonial	0,4%	CFI	5.381,08	10.515,40	20.778,07
Custos administrativos	20%	Mão de obra + supervisão + manutenção	45.773,08	64.371,40	101.562,07
Custos gerais da planta	50%	Mão de obra + supervisão + manutenção	114.432,69	160.928,51	253.905,17
Custo fixo total			428.955,45	613.698,55	983.109,85

Fonte: O autor, 2022.

As taxas locais representam impostos anuais sobre a propriedade. O seguro patrimonial depende do que está sendo produzido e do tamanho das instalações. Os custos administrativos também foram incluídos como custos fixos e representam os custos para salários de executivos, secretários e contadores, suporte de informática, honorários advocatícios, material de escritório e comunicações. Para os cenários de co-localização estes custos foram incluídos na avaliação com um valor percentual mais baixo, pois a construção da nova planta seria dentro da própria propriedade, já existindo esses serviços disponíveis.

Tabela 27 - Estimativa do custo fixo para os cenários D, E e F para a construção de uma planta co-localizada

Descrição	Percentual	Referência	Valor para cada cenário (USD/ano)		
			D	E	F
Mão de obra	-	(Número de operadores) x (salário anual do operador)	122.400,00	183.600,00	306.000,00
Supervisão e assistência administrativa	10%	Mão de obra	6.120,00	9.180,00	15.300,00
Manutenção e reparos	2%	Capital fixo de investimento	25.955,71	51.344,20	101.863,22
Suprimentos Operacionais	10%	Manutenção e reparos	2.595,57	5.134,42	10.186,32
Encargos de laboratório	10%	Mão de obra	12.240,00	18.360,00	30.600,00
Custos administrativos	10%	Mão de obra + supervisão + manutenção	15.447,57	24.412,42	42.316,32
Custos gerais da planta	50%	da mão de obra + supervisão + manutenção	77.237,85	122.062,10	211.581,61
Custo fixo total			261.996,70	414.093,14	717.847,47

Fonte: O autor, 2022.

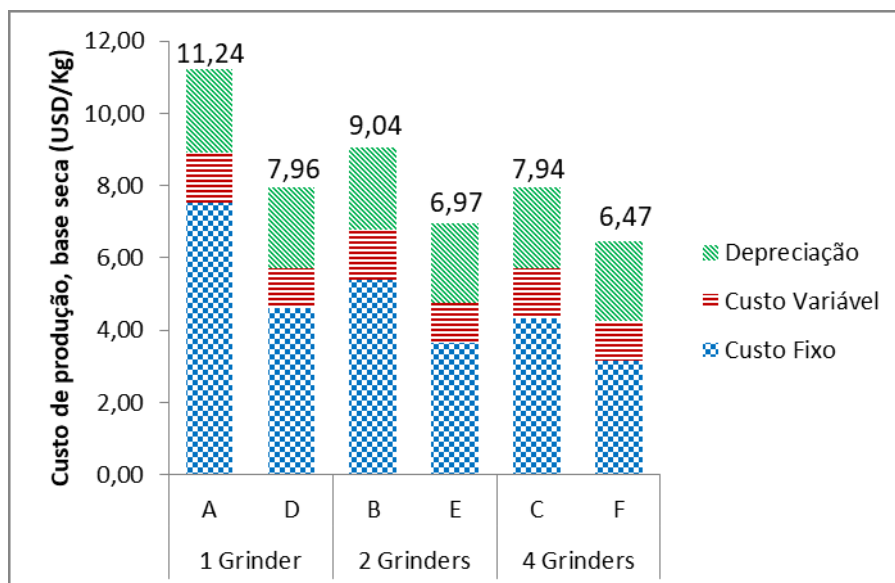
Os custos gerais da planta incluem uma variedade de serviços para a rotina da planta, como serviços hospitalares e médicos, manutenção geral da planta, despesas gerais, serviços de segurança, folha de pagamento, incluindo segurança social, planos de aposentadoria, seguro médico e de vida, embalagens, restaurantes e instalações recreativas, serviços de salvamento, laboratórios, proteção de propriedade, superintendência de fábrica, armazém e instalações de armazenamento, funcionários especiais e benefícios.

3.4. Estimativa do custo de produção e preço mínimo de venda

Todas as despesas diretamente relacionadas com a operação de fabricação são incluídas nos custos de produção. Essas despesas são os custos variáveis, custos fixos e a depreciação.

Os custos de produção variaram de USD 6,47/kg a USD 11,24/kg (equivalente seco), conforme demonstrado na Figura 20. Bras e Chauve (2014) relataram que é difícil dar uma estimativa clara sobre o preço do produto final, devido aos estudos serem confidenciais. Porém, conhecendo o custo da matéria-prima e de produção, estima-se um custo de produção de USD 7/kg a USD 12/kg, em base seca, um resultado bem próximo ao calculado neste trabalho. O custo fixo representa a maior parcela do custo de produção para todos os cenários, seguido da depreciação. Como esperado, o custo de produção para os cenários de localização (D, E e F) são menores, devido a menores custos com aquisição de equipamentos, mão de obra, polpa de celulose e energia.

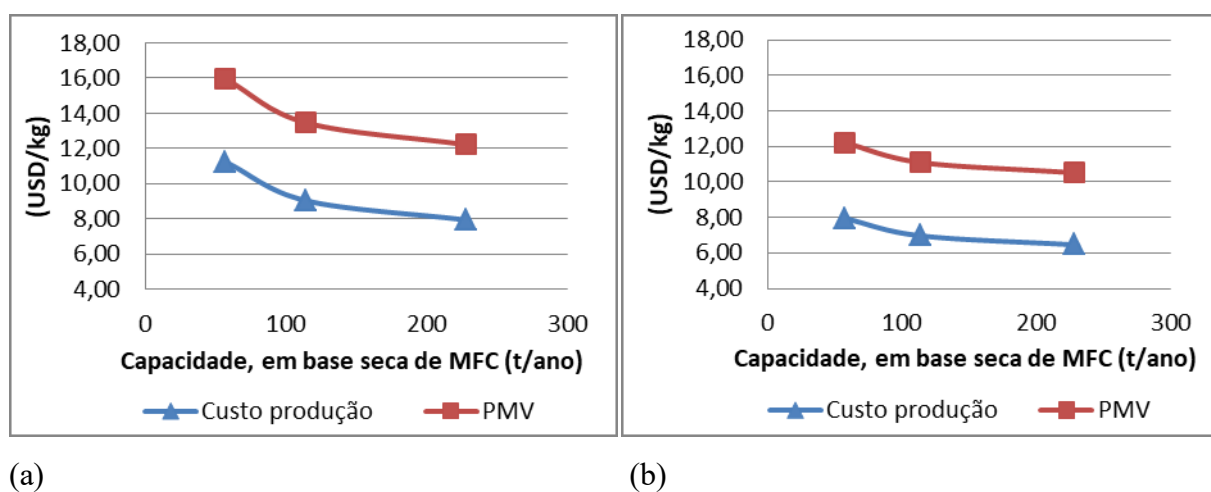
Figura 20 - Estimativa do custo de produção para todos os cenários



Fonte: O autor, 2022.

O preço mínimo de venda (PMV) é definido como o preço que anula o valor do VPL do investimento na taxa assumida e no tempo de vida do empreendimento. Para sua estimativa é necessário construir o fluxo de caixa do projeto. Na Figura 21, é possível comparar os preços mínimos de venda e os custos de produção associados para todos os cenários analisados.

Figura 21 - Estimativas do custo de produção e do preço mínimo de venda para todos os cenários



Legenda: (a) cenários de planta isolada; (b) cenários de co-localização.

Fonte: O autor, 2022.

O menor PMV, foi encontrado para o cenário F, de co-localização utilizando 4 *grinders* (228,10 t/ano, base seca), com o valor de USD 10,42/kg. Em contrapartida, o maior PMV foi obtido para o cenário A, de uma construção de uma nova planta utilizando 1 *grinder* (57,02 t/ano, base seca), com o valor de USD 15,85/kg. Bondancia *et al.*, (2020) estimaram o PMV da MFC de USD 11,52/kg a USD 11,85/kg, em base seca, com 200 kg/h de celulose kraft branqueada de eucalipto como matéria prima. Observando o gráfico, é possível perceber como o custo de produção e preço mínimo de venda diminuem com o aumento da escala de produção, evidenciando os efeitos de escala.

3.5. Indicadores econômicos e preço de mercado

No fluxo de caixa do projeto é possível acompanhar todas as movimentações de valores de forma detalhada, no período de tempo avaliado. Nos estudos de viabilidade é comum considerar-se menores fatores de operação nos primeiros anos de vida útil da planta, devido a uma série de ajustes e paradas imprevistas que fazem com que a produção inicialmente acabe sendo inferior à programada. No primeiro ano de operação, a planta trabalhará com 70% da sua capacidade produtiva, e a cada ano essa capacidade aumentará em 10%. Sendo assim, no quarto ano a capacidade produtiva alcançará os 100%, conforme sugerido por Haydary (2019). Para os impostos cobrados sobre o lucro tributável, foi assumido um valor de 25% para o imposto de renda e 10% para taxas estaduais (TOWLER e SINNOTT, 2013). Um preço de mercado foi sugerido para cada cenário, já que o PMV apresenta VPL nulo e não constrói e nem destrói o valor da empresa. Para analisar o preço de mercado sugerido, foram utilizados os indicadores econômicos de payback simples e descontado, VPL, TIR e IL.

O preço de mercado sugerido foi estimado acrescentando USD 0,10/kg ao PMV de cada cenário, obtendo valores de VPL positivos.

Para todos os cenários, o método de payback simples apresentou um tempo de retorno entre 5 e 6 anos. Já o método de payback descontado, que utiliza a taxa mínima de atratividade, apresentou retornos entre 9 e 10 anos de projeto. Portanto, os dois métodos recomendam a aceitação do empreendimento, pois os resultados são menores que o tempo de vida do projeto, de 10 anos. A TIR obteve um valor maior que a TMA (12%) para todos os cenários, também indicando que o projeto é viável. O IL obteve um resultado um pouco maior que 1 para todos os cenários, confirmando mais uma vez a aceitação do projeto. Os resultados

com maiores VPL foram para os cenários C e F, pois são beneficiados pela economia de escala, conforme podemos observar na Tabela 28.

Tabela 28 - Comparação dos cenários analisados

Cenários analisados						
	A	B	C	D	E	F
VPL (USD)	19.095,27	38.190,53	76.381,07	19.095,27	38.190,534	76.381,07
PBS (anos)	5,92	5,90	5,89	5,89	5,88	5,87
PBD (anos)	9,87	9,86	9,86	9,86	9,86	9,86
TIR	12,27%	12,28%	12,29%	12,29%	12,29%	12,29%
IL	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Preço de mercado (USD/kg)	15,95	13,46	12,21	12,22	11,10	10,52

Fonte: O autor, 2022.

O cenário F apresenta melhor resultado, devido ao maior VPL e menor preço de mercado estimado, em base seca de MFC. Nas Tabelas numeradas de 29 a 34 é possível analisar o fluxo de caixa para cada cenário, com valores em mil (K) USD.

Tabela 29 - Fluxo de caixa para o cenário A (valores em K USD)

Item	Construção				Operação						
Ano base	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa ocupacional	-	70%	80%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t)	0	39,92	45,62	51,32	57,02	57,02	57,02	57,02	57,02	57,02	57,02
Investimento inicial	(1345,27)										
Receita bruta		636,80	727,77	818,74	909,71	909,71	909,71	909,71	909,71	909,71	909,71
Custo fixo		(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)	(428,96)
Custo variável		(55,71)	(63,66)	(71,62)	(79,58)	(79,58)	(79,58)	(79,58)	(79,58)	(79,58)	(79,58)
Depreciação		(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)	(132,14)
Lucro tributável		20,00	103,01	186,03	269,04	269,04	269,04	269,04	269,04	269,04	269,04
Imposto de renda		(5,00)	(25,75)	(46,51)	(67,26)	(67,26)	(67,26)	(67,26)	(67,26)	(67,26)	(67,26)
Outras taxas		(2,00)	(10,30)	(18,60)	(26,90)	(26,90)	(26,90)	(26,90)	(26,90)	(26,90)	(26,90)
Capital de giro	(149,47)										149,47
Lucro líquido		13,00	66,96	120,92	174,88	174,88	174,88	174,88	174,88	174,88	174,88
Depreciação		132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14	132,14
Fluxo de caixa	(1494,74)	145,14	199,09	253,05	307,01	307,01	307,01	307,01	307,01	307,01	456,49
VPL	-1494,74	129,59	158,72	180,12	195,11	174,21	155,54	138,88	124,00	110,71	146,98
PBS	-1494,74	-1349,61	-1150,51	-897,46	-590,45	-283,44	23,57	330,58	637,59	944,61	1401,09
PBD	-1494,74	-1365,16	-1206,44	-1026,32	-831,21	-657,01	-501,46	-362,59	-238,59	-127,88	19,10

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 30 - Fluxo de caixa para o cenário B (valores em K USD)

Item	Construção					Operação					
Ano base	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa ocupacional	-	70%	80%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t)	0	79,83	91,24	102,64	114,05	114,05	114,05	114,05	114,05	114,05	114,05
Investimento inicial	(2628,85)										
Receita bruta		1074,74	1228,28	1381,81	1535,35	1535,35	1535,35	1535,35	1535,35	1535,35	1535,35
Custo fixo		(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)	(613,70)
Custo variável		(111,41)	(127,33)	(143,24)	(159,16)	(159,16)	(159,16)	(159,16)	(159,16)	(159,16)	(159,16)
Depreciação		(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)	(258,21)
Lucro tributável		91,42	229,04	366,66	504,28	504,28	504,28	504,28	504,28	504,28	504,28
Imposto de renda		(22,86)	(57,26)	(91,66)	(126,07)	(126,07)	(126,07)	(126,07)	(126,07)	(126,07)	(126,07)
Outras taxas		(9,14)	(22,90)	(36,67)	(50,43)	(50,43)	(50,43)	(50,43)	(50,43)	(50,43)	(50,43)
Capital de giro	(292,09)										292,09
Lucro líquido		59,42	148,88	238,33	327,78	327,78	327,78	327,78	327,78	327,78	327,78
Depreciação		258,21	258,21	258,21	258,21	258,21	258,21	258,21	258,21	258,21	258,21
Fluxo de caixa	(2920,95)	317,64	407,09	496,54	585,99	585,99	585,99	585,99	585,99	585,99	878,09
VPL	-2920,95	283,60	324,53	353,43	372,41	332,51	296,88	265,07	236,67	211,31	282,72
PBS	-2920,95	-2603,31	-2196,22	-1699,68	-1113,69	-527,70	58,29	644,29	1230,28	1816,27	2694,36
PBD	-2920,95	-2637,34	-2312,81	-1959,39	-1586,98	-1254,47	-957,59	-692,52	-455,84	-244,53	38,19

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 31 - Fluxo de caixa para o cenário C (valores em K USD)

Item	Construção					Operação					
Ano base	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa ocupacional	-	70%	80%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t)	0	160	182,48	205,29	228,10	228,10	228,10	228,10	228,10	228,10	228,10
Investimento inicial	(5194,52)										
Receita bruta		1950,30	2228,91	2507,53	2786,14	2786,14	2786,14	2786,14	2786,14	2786,14	2786,14
Custo fixo		(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)	(983,11)
Custo variável		(222,82)	(254,65)	(286,48)	(318,32)	(318,32)	(318,32)	(318,32)	(318,32)	(318,32)	(318,32)
Depreciação		(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)	(510,22)
Lucro tributável		234,15	480,94	727,72	974,50	974,50	974,50	974,50	974,50	974,50	974,50
Imposto de renda		(58,54)	(120,23)	(181,93)	(243,63)	(243,63)	(243,63)	(243,63)	(243,63)	(243,63)	(243,63)
Outras taxas		(23,42)	(48,09)	(72,77)	(97,45)	(97,45)	(97,45)	(97,45)	(97,45)	(97,45)	(97,45)
Capital de giro	(577,17)										577,17
Lucro líquido		152,20	312,61	473,02	633,43	633,43	633,43	633,43	633,43	633,43	633,43
Depreciação		510,22	510,22	510,22	510,22	510,22	510,22	510,22	510,22	510,22	510,22
Fluxo de caixa	(5771,69)	662,42	822,82	983,23	1143,64	1143,64	1143,64	1143,64	1143,64	1143,64	1720,81
VPL	-5771,69	591,44	655,95	699,85	726,80	648,93	579,40	517,33	461,90	412,41	554,05
PBS	-5771,69	-5109,27	-4286,45	-3303,21	-2159,57	-1015,93	127,71	1271,35	2414,99	3558,64	5279,45
PBD	-5771,69	-5180,24	-4524,29	-3824,45	-3097,64	-2448,71	-1869,31	-1351,98	-890,08	-477,67	76,38

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 32 - Fluxo de caixa para o cenário D (valores em K USD)

Item	Construção				Operação						
Ano base	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa ocupacional	-	70%	80%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t)	0	39,92	45,62	51,32	57,02	57,02	57,02	57,02	57,02	57,02	57,02
Investimento inicial	(1297,79)										
Receita bruta		487,81	557,50	627,19	696,87	696,87	696,87	696,87	696,87	696,87	696,87
Custo fixo		(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)	(262,00)
Custo variável		(44,12)	(50,42)	(56,72)	(63,02)	(63,02)	(63,02)	(63,02)	(63,02)	(63,02)	(63,02)
Depreciação		(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)	(128,61)
Lucro tributável		53,09	116,47	179,86	243,24	243,24	243,24	243,24	243,24	243,24	243,24
Imposto de renda		(13,27)	(29,12)	(44,96)	(60,81)	(60,81)	(60,81)	(60,81)	(60,81)	(60,81)	(60,81)
Outras taxas		(5,31)	(11,65)	(17,99)	(24,32)	(24,32)	(24,32)	(24,32)	(24,32)	(24,32)	(24,32)
Capital de giro	(144,20)										144,20
Lucro líquido		34,51	75,71	116,91	158,11	158,11	158,11	158,11	158,11	158,11	158,11
Depreciação		128,61	128,61	128,61	128,61	128,61	128,61	128,61	128,61	128,61	128,61
Fluxo de caixa	(1441,98)	163,12	204,32	245,52	286,72	286,72	286,72	286,72	286,72	286,72	430,92
VPL	-1441,98	145,64	162,88	174,76	182,21	162,69	145,26	129,70	115,80	103,39	138,74
PBS	-1441,98	-1278,87	-1074,55	-829,03	-542,31	-255,59	31,13	317,84	604,56	891,28	1322,20
PBD	-1441,98	-1296,34	-1133,46	-958,71	-776,49	-613,80	-468,54	-338,84	-223,04	-119,65	19,10

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 33 - Fluxo de caixa para o cenário E (valores em K USD)

Item	Construção				Operação						
Ano base	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa ocupacional	-	70%	80%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t)	0	79,83	91,24	102,64	114,05	114,05	114,05	114,05	114,05	114,05	114,05
Investimento inicial	(2567,21)										
Receita bruta		886,04	1012,61	1139,19	1265,76	1265,76	1265,76	1265,76	1265,76	1265,76	1265,76
Custo fixo		(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)	(414,09)
Custo variável		(88,23)	(100,84)	(113,44)	(126,05)	(126,05)	(126,05)	(126,05)	(126,05)	(126,05)	(126,05)
Depreciação		(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)	(254,41)
Lucro tributável		129,30	243,27	357,24	471,21	471,21	471,21	471,21	471,21	471,21	471,21
Imposto de renda		(32,32)	(60,82)	(89,31)	(117,80)	(117,80)	(117,80)	(117,80)	(117,80)	(117,80)	(117,80)
Outras taxas		(12,93)	(24,33)	(35,72)	(47,12)	(47,12)	(47,12)	(47,12)	(47,12)	(47,12)	(47,12)
Capital de giro	(285,25)										285,25
Lucro líquido		84,04	158,12	232,21	306,29	306,29	306,29	306,29	306,29	306,29	306,29
Depreciação		254,41	254,41	254,41	254,41	254,41	254,41	254,41	254,41	254,41	254,41
Fluxo de caixa	(2852,46)	338,46	412,54	486,62	560,70	560,70	560,70	560,70	560,70	560,70	845,95
VPL	-2852,46	302,19	328,87	346,37	356,34	318,16	284,07	253,63	226,46	202,19	272,37
PBS	-2852,46	-2514,00	-2101,46	-1614,84	-1054,14	-493,44	67,26	627,96	1188,66	1749,36	2595,30
PBD	-2852,46	-2550,26	-2221,39	-1875,03	-1518,69	-1200,53	-916,47	-662,83	-436,38	-234,18	38,19

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 34 - Fluxo de caixa para o cenário F (valores em K USD)

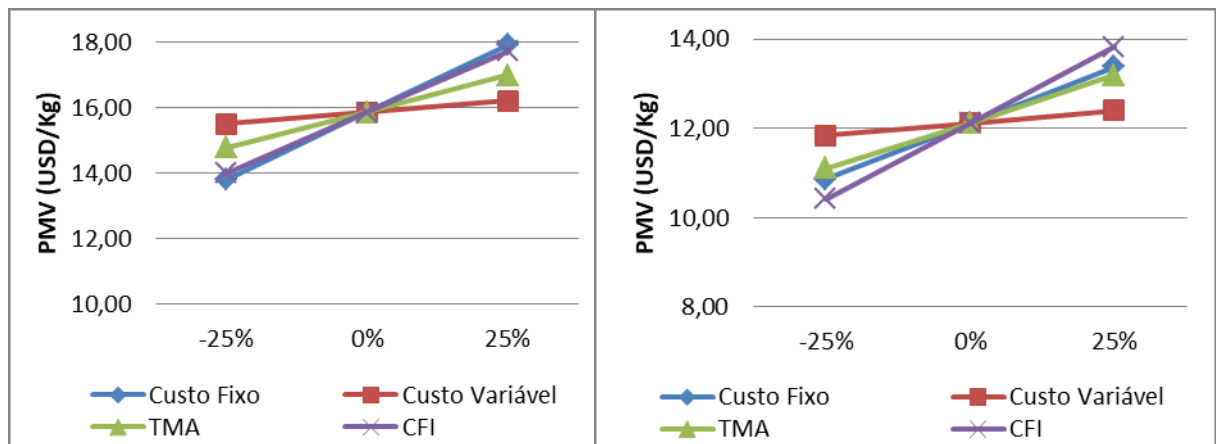
Item	Construção				Operação						
Ano base	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Taxa ocupacional	-	70%	80%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Produção (t)	0	159,67	182,48	205,29	228,10	228,10	228,10	228,10	228,10	228,10	228,10
Investimento inicial	(5093,16)										
Receita bruta		1679,78	1919,74	2159,71	2399,68	2399,68	2399,68	2399,68	2399,68	2399,68	2399,68
Custo fixo		(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)	(717,85)
Custo variável		(176,47)	(201,68)	(226,89)	(252,09)	(252,09)	(252,09)	(252,09)	(252,09)	(252,09)	(252,09)
Depreciação		(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)	(504,74)
Lucro tributável		280,72	495,48	710,24	925,00	925,00	925,00	925,00	925,00	925,00	925,00
Imposto de renda		(70,18)	(123,87)	(177,56)	(231,25)	(231,25)	(231,25)	(231,25)	(231,25)	(231,25)	(231,25)
Outras taxas		(28,07)	(49,55)	(71,02)	(92,50)	(92,50)	(92,50)	(92,50)	(92,50)	(92,50)	(92,50)
Capital de giro	(565,91)										565,91
Lucro líquido		182,47	322,06	461,66	601,25	601,25	601,25	601,25	601,25	601,25	601,25
Depreciação		504,74	504,74	504,74	504,74	504,74	504,74	504,74	504,74	504,74	504,74
Fluxo de caixa	(5659,07)	687,21	826,80	966,39	1105,99	1105,99	1105,99	1105,99	1105,99	1105,99	1671,89
VPL	-5659,07	613,58	659,12	687,86	702,88	627,57	560,33	500,29	446,69	398,83	538,31
PBS	-5659,07	-4971,86	-4145,06	-3178,66	-2072,68	-966,69	139,30	1245,29	2351,28	3457,26	5129,16
PBD	-5659,07	-5045,49	-4386,37	-3698,51	-2995,63	-2368,06	-1807,74	-1307,44	-860,75	-461,92	76,38

Fonte: O autor, 2022.

3.6. Análise de sensibilidade

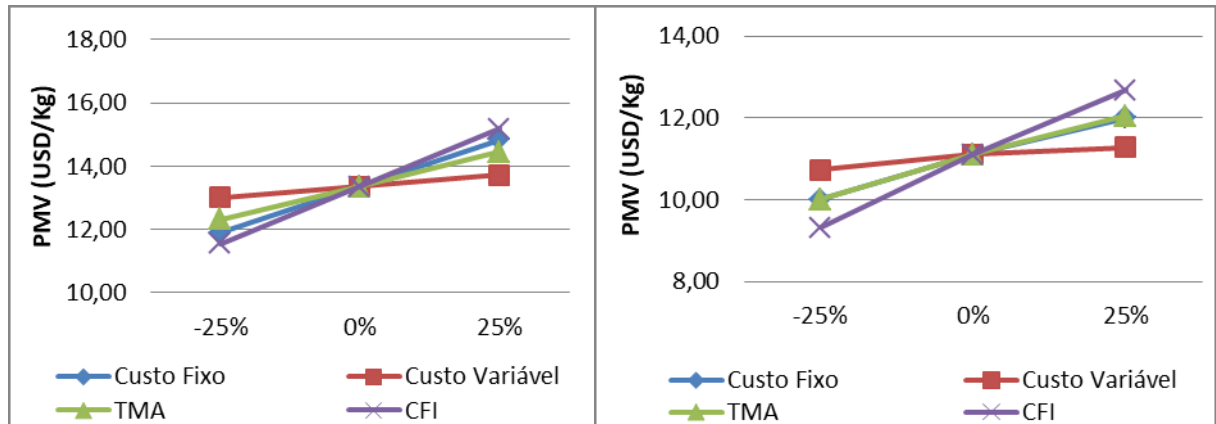
Na Figura 22, é analisado o impacto sobre o preço mínimo de venda em todos os cenários, enquanto nas Figuras 23 e 24 são apresentados os impactos sobre o VPL do projeto.

Figura 22 - Análise de sensibilidade sobre o preço mínimo de venda para todos os cenários



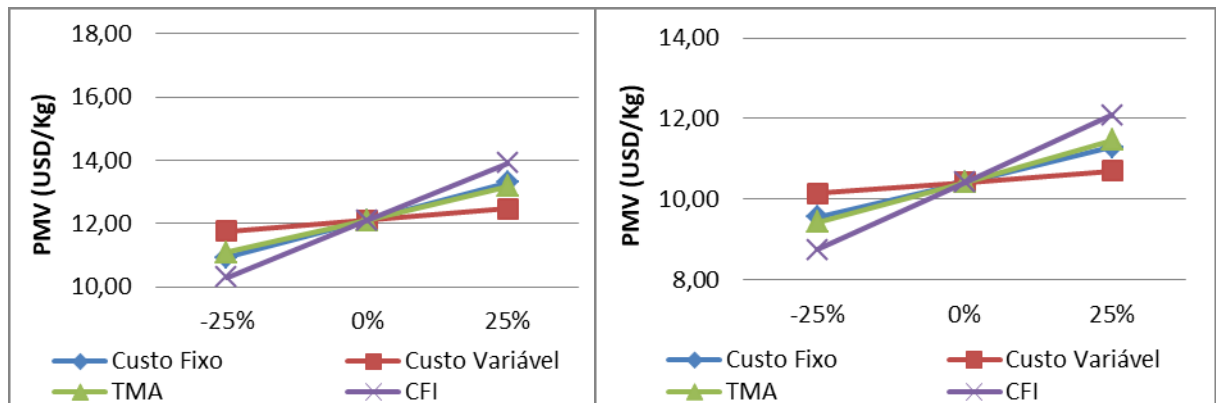
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

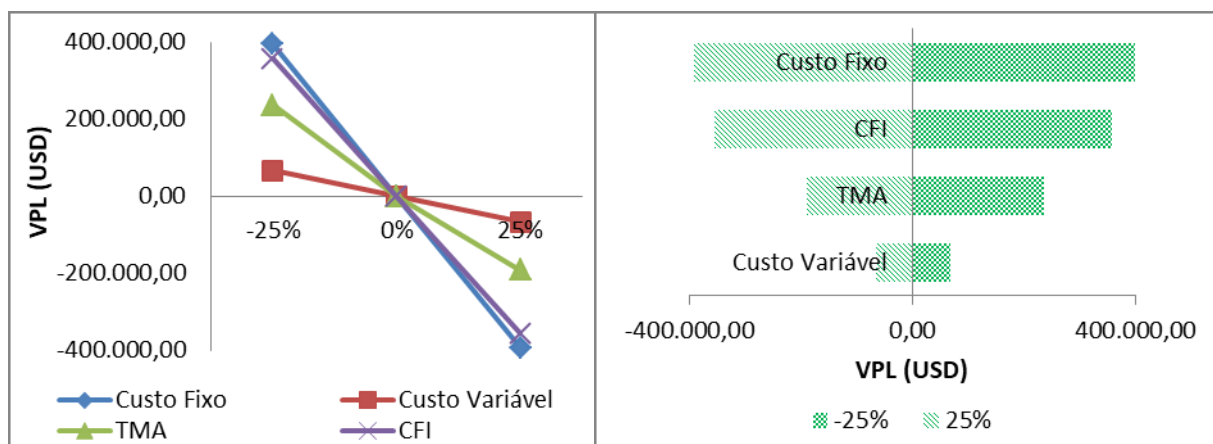
(f)

Legenda: (a) Cenário A; (b) Cenário D; (c) Cenário B; (d) Cenário E; (e) Cenário C; (f) Cenário F.

Fonte: O autor, 2022.

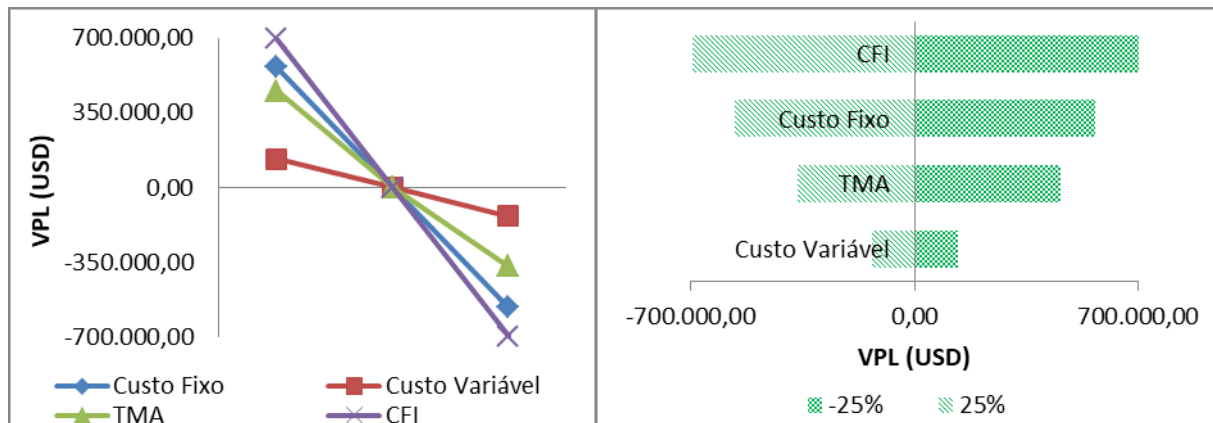
O custo variável apresenta o menor impacto sobre o preço mínimo de venda em relação a outras variáveis analisadas. Por outro lado, o capital fixo de investimento (CFI) apresentou o maior impacto sobre o preço mínimo de venda para todos os cenários, exceto para o cenário A, que o custo fixo apresentou uma variação um pouco maior.

Figura 23 - Análise de sensibilidade e gráfico de tornado dos cenários A, B e C sobre o VPL



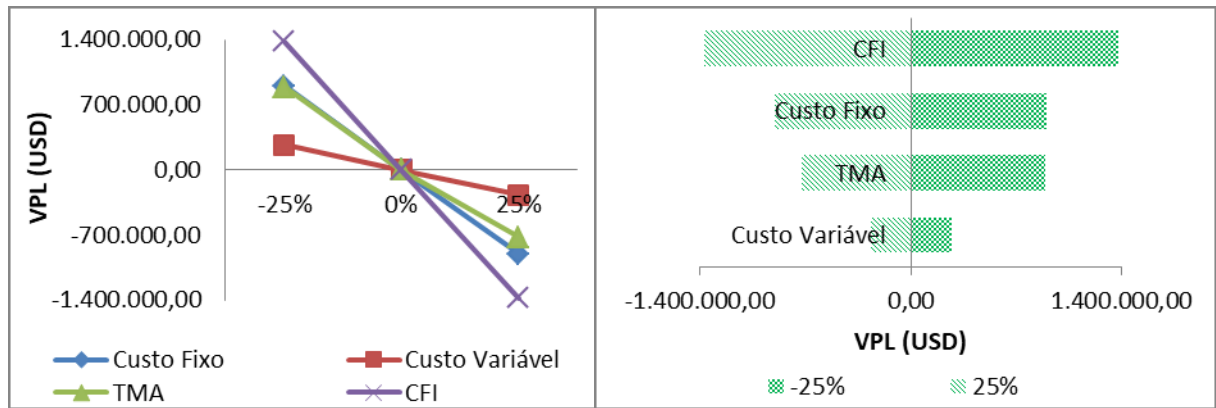
(a)

(b)



(c)

(d)



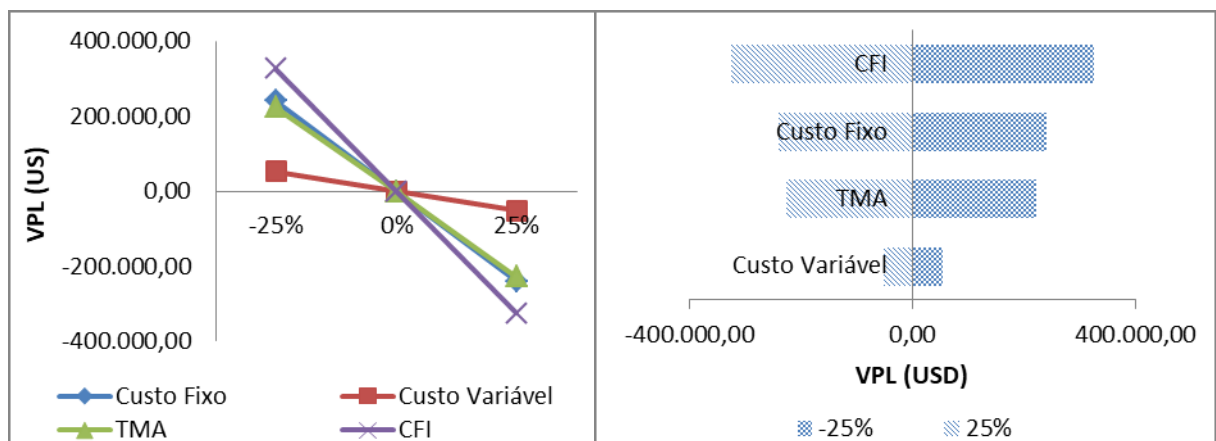
(e)

(f)

Legenda: (a) e (b) Cenário A; (c) e (d) Cenário B; (e) e (f) Cenário C.

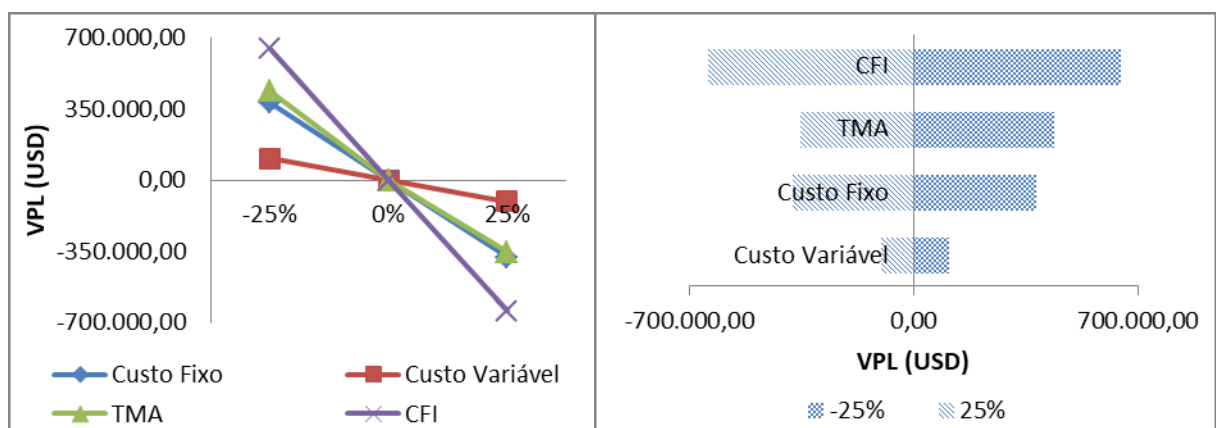
Fonte: O autor, 2022.

Figura 24 - Análise de sensibilidade e gráfico de tornado dos cenários D, E e F sobre o VPL



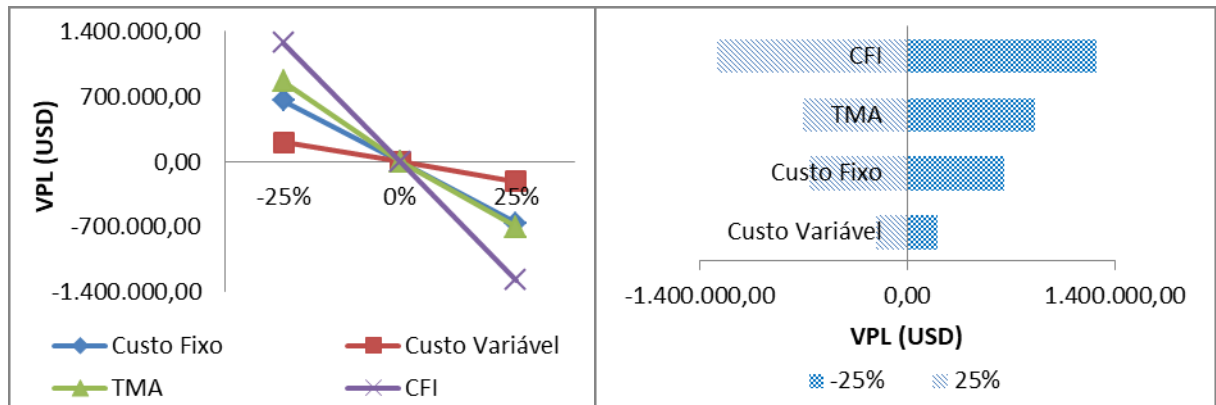
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Legenda: Legenda: (a) e (b) Cenário D; (c) e (d) Cenário E; (e) e (f) Cenário F.

Fonte: O autor, 2022.

Para a análise do VPL, mais de uma análise gráfica foi realizada para cada cenário. O procedimento tradicional de análise de sensibilidade utiliza a reta de variação percentual. Porém, há outras formas de representar graficamente a análise de sensibilidade. O gráfico de tornado também mostra a variação percentual do VPL do projeto com a alternância de $\pm 25\%$ nas variáveis escolhidas. Porém, sua organização se dá em ordem decrescente, com a variável de maior impacto sobre o valor central do VPL no topo e a de menor impacto na base do gráfico, tendo assim um formato semelhante ao fenômeno natural do tornado.

Ao verificar o impacto de cada variável individualmente, podem-se determinar quais são as mais relevantes em termos de risco para o projeto. Todos os cenários apresentam alta sensibilidade a alterações no CFI, com exceção do cenário A, que é mais sensível ao custo fixo. Em contrapartida, o custo variável apresenta o menor impacto sobre o projeto. A TMA e o custo fixo apresentam impactos intermediários.

Apesar de a análise ser de fácil implementação, há algumas desvantagens. Para se aproximar mais da realidade é importante considerar a combinação simultânea das alternativas. Apesar disso, foi possível avaliar qual variável apresenta o maior e o menor impacto para o preço mínimo de venda e para o VPL do projeto, tendo um resultado satisfatório para uma análise de risco preliminar.

3.7. Considerações finais

A metodologia utilizada neste trabalho permitiu realizar a avaliação técnico-econômica de seis cenários de produção de celulose microfibrilada (MFC), utilizando o método de *grinding*. O estudo também permitiu verificar os efeitos de escala, obtendo resultados mais vantajosos. Com as estimativas do capital fixo de investimento, custos fixos e variáveis, foi possível determinar o custo de produção, o valor do preço mínimo de venda e preço de mercado da MFC. Os resultados são compatíveis com os valores de mercado, que estão na faixa de USD 9/kg a USD 221/kg, que por sua vez dependem do tipo de processamento empregado.

Foi considerada que para a produção de MFC, é necessário a passagem da suspensão aquosa em torno de 25 vezes pelo *grinder*, sendo um resultado bastante conservador. Na literatura é encontrado métodos de produção com 10 passagens. Sendo assim, é possível aumentar ainda mais a capacidade de produção se for considerado um menor número de passagens pelo equipamento.

Contudo, este trabalho possui uma avaliação técnico-econômica bem detalhada, descrevendo os principais custos avaliados no processo de produção. A MFC se mostrou um material de uso versátil e economicamente viável que pode facilmente substituir o carbomer 980, para fabricação do álcool em gel.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A pandemia do COVID-19 gerou grande desabastecimento do álcool em gel em todo o Brasil. A falta do produto nas prateleiras, se deve principalmente ao fato de um dos seus constituintes, responsável pela textura de gel (carbomer 980), também ter sofrido grande escassez devido à alta demanda. Com isso, surge a importância de produtos alternativos, capazes de substituí-lo, sendo economicamente viáveis.

Este estudo teve como objetivo propor uma avaliação técnico-econômica da produção da celulose microfibrilada (MFC) em escala comercial, visando preparar o país para um eventual novo enfrentamento de pandemia que demanda a produção de álcool em gel, e identificando os principais custos associados à sua produção. Foram analisados cenários de co-localização e construção de uma nova planta, avaliando os efeitos de um aumento de escala. Entretanto, o aumento de produção é limitando a capacidade do moinho, sendo possível aumentar a escala de produção apenas diminuindo o número de passagens ou colocando mais de um *grinder* em paralelo. O processo se mostrou relativamente simples e com poucos equipamentos. Foram estimados os custos de produção, preço mínimo de venda e o preço de mercado.

O cenário de co-localização apresentou melhores resultados, pois é construído a partir de uma planta de papel e celulose já existente, exigindo menos equipamentos, mão-de-obra e custos com polpa de celulose e água. Os custos de produção também são menores por tonelada produzida, variando de USD 6,47/kg a USD 11,24/kg (equivalente seco). Os preços mínimos de venda estimados ficaram entre USD 10,42/kg e USD 15,85/kg (equivalente seco). Já os preços de mercado estimados ficaram entre USD 10,52/kg e USD 15,95/kg (equivalente seco), dentro da faixa de preços comerciais da MFC que é de USD 9,00/kg a USD 221,00/kg (equivalente seco), com preços mais baixos para métodos de produção mais simples, como refinadores a disco e o *grinder*.

As análises de sensibilidade demonstraram que o custo fixo de investimento (CFI), apresentou um grande impacto sobre o preço mínimo de venda e o VPL do projeto. Para o cenário A, o impacto do custo fixo é mais significativo. Por outro lado os custos variáveis apresentaram menos impacto nos custos envolvidos. A depreciação também apresentou uma grande parcela sobre o preço mínimo de venda, indicando que é uma variável a ser determinada com bastante cautela.

O preço do Carbomer 980 no mercado varia de USD 8,00/kg a USD 20,00/kg. O uso de modificadores de reologia alternativos, como o MFC, apresenta um custo final um pouco mais elevado, porém dado à crise em meio a pandemia, seu uso pode ser considerado. O carbômer 980 chegou a ficar indisponível no mercado, demandando alternativas viáveis de potenciais substituintes no mercado nacional, evitando a dependência do mercado internacional. Além disso, há uma tendência mundial na substituição de produtos derivados do petróleo por produtos de origem renovável.

Com a normalidade na demanda do álcool em gel, as empresas podem vender MFC pelo preço de mercado sugerido obtendo lucro e melhorando seus produtos. O melhor preço sugerido é para o cenário com maior escala de produção (4 grinders) em co-localização (cenário F), onde é possível comercializar a MFC por USD 10,52/kg, com VPL de USD 76.381,07, indicando ser a melhor opção de projeto disponível. Dessa forma, a MFC pode se tornar atrativo no mercado, já que encontra aplicações em diversos setores, além de poder atuar no enfrentamento de uma eventual nova pandemia. Diante de todos os benefícios do MFC, ele também pode futuramente substituir os plásticos e alumínio de embalagens de alimentos, reduzindo a emissão de gás carbônico (CO_2) e contribuindo para um futuro mais sustentável.

Sugestões para trabalhos futuros

- Simular os processos em diferentes cenários em simulador de processos, acoplando-os ao processo Kraft;
- Utilizar um método de depreciação não linear, sendo este mais condizente com a realidade;
- Realizar análise de sensibilidade variando diferentes variáveis ao mesmo tempo, utilizando a simulação de Monte Carlo;
- Acoplar um sistema de secagem de MFC ao final do processo, visto que, o produto final formado é uma solução aquosa com 3% em massa de celulose, encarecendo sua distribuição;
- Realizar uma avaliação técnico-econômica da produção do álcool em gel produzido a base de MFC.

REFERÊNCIAS

- ABDUL KHALIL, H. P. S. et al. Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: A review. *Carbohydrate Polymers*, v. 99, p. 649–665, jan 2014.
- ALIBABA. Disponível em: <portuguese.alibaba.com/g/carbopol-980.html>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- ALVES, É. D. et al. Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v. 16, n. 26, p. 101-220, Jul 2015.
- ANVISA. Resolução de Diretoria Colegiada – RDC N° 350, de 19 de março de 2020.
- ARVIDSSON, R.; NGUYEN, D.; SVANSTRÖM, M. Life Cycle Assessment of Cellulose Nanofibrils Production by Mechanical Treatment and Two Different Pretreatment Processes. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 11, p. 6881-6890, Jun 2015.
- ASSIS, C. A. et al. Conversion Economics of Forest Biomaterials: Risk and Financial Analysis of CNC Manufacturing. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 11, n. 4, p. 682–700, Jun 2017a.
- ASSIS, C. A. et al. Cellulose micro- and nanofibrils (CMNF) manufacturing - financial and risk assessment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 12, n. 2, p. 251–264, Dec 2017b.
- ATALLA, R. H.; VANDERHART, D. L. Native Cellulose: A Composite of Two Distinct Crystalline Forms. *Science*, v. 223, n. 4633, p. 283–285, Jan 1984.
- ATALLA, R. H.; WHITMORE, R. E.; VANDERHART, D. L. A highly crystalline cellulose from *Rhizoclonium hieroglyphicum*. *Biopolymers*, v. 24, n. 2, p. 421–423, Fev 1985.
- AULIN, C. et al. Self-Organized Films from Cellulose I Nanofibrils Using the Layer-by-Layer Technique. *Biomacromolecules*, v. 11, n. 4, p. 872–882, Mar 2010.
- BÄCKSTRÖM, M.; BOLIVAR, S.; PALTAKARI, J. Effect of ionic form on fibrillation and the development of the fibre network strength during the refining of the kraftpulp. *O Papel: Revista Mensal de Tecnologia em Celulose*, v. 73, n. 7, p. 57–65, 2012.
- BASTOS, J. B. V. et al. Addressing scale and seasonality in the design of sugarcane to ethylene glycol biorefineries. *Journal of Cleaner Production.*, v. 337, artigo 130585, Feb 2022.
- BAJPAI, P. *Pulp and Paper Industry: Nanotechnology in Forest Industry*. [S.l.]: Elsevier, 2016.
- BARDET, R.; BELGACEM, M. N.; BRAS, J. Different strategies for obtaining high opacity films of MFC with TiO₂ pigments. *Cellulose*, v. 20, n. 6, p. 3025–3037, Dec 2013.

BONDANCIA, T. J. et al. Production of nanocellulose using citric acid in a biorefinery concept: effect of the hydrolysis reaction time and techno-economic analysis. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 59, n. 25, p. 11505–11516, May 2020.

BRINCHI, L. Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: Technology and applications. *Carbohydrate Polymer*, v. 94, n. 1, p. 154–169, Apr 2013.

BRK AMBIENTAL. Disponível em:

<<https://www.brkambiental.com.br/limeira/servicos/estrutura-tarifaria>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

CAMPOS, E. S.; FOELKEL, C. *A evolução tecnológica do setor de celulose e papel no Brasil*. São Paulo: ABTCP – Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2016.

CARRILLO, C. A.; LAINE, J.; ROJAS, O. J. Microemulsion Systems for Fiber Deconstruction into Cellulose Nanofibrils. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 6, n. 24, p. 22622–22627, Dec 2014.

CHARREAU, H.; CAVALLO, E.; FORESTI, M. L. Patents involving nanocellulose: analysis of their evolution since 2010. *Carbohydrate Polymers*, v. 237, art. 116039, Jun 2020.

CHAKRABORTY, A.; SAIN, M.; KORTSCHOT, M. Cellulose microfibrils: A novel method of preparation using high shear refining and cryocrushing. *Holzforschung*, v. 59, n. 1, p. 102–107, Jan 2005.

CHAKRABORTY, A.; SAIN, M.; KORTSCHOT, M. Reinforcing potential of wood pulp-derived microfibrils in a PVA matrix. *Holzforschung*, v. 60, p. 53–58, Jan 2006.

CHAUVE, G.; BRAS, J. Industrial point of view of nanocellulose materials and their possible applications. In: Handbook of Green Materials. *World Scientific*, p. 233–252, 2014.

CHENG, Q.; WANG, S.; RIALS, T. G. Poly(vinyl alcohol) nanocomposites reinforced with cellulose fibrils isolated by high intensity ultrasonication. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 40, n. 2, p. 218–224, Feb 2009.

CHERIAN, B. M. Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion. *Carbohydrate Polymers*, v. 81, n. 3, p. 720–725, Jul 2010.

CHINGA-CARRASCO, G. Cellulose fibres, nanofibrils and microfibrils: the morphological sequence of MFC components from a plant physiology and fibre technology point of view. *Nanoscale Research Letters*, v. 6, art. 417, p. 1–7, Jun 2011.

CORREIA NETO, J. F. *Elaboração e avaliação de projetos de investimento: considerando o risco*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

DAIRY ENGINEERING. Disponível em:

<www.dairyengineering.com/homogenizers>. Acesso em: 10 dez. 2021.

DAMÁSIO, R. A. P. et al. Defibrillation phenomenon and parameters to control MFC production. *O papel*, v. 82, n. 3, p. 88-92, Mar 2021.

DEEPA, B. et al. Structure, morphology and thermal characteristics of banana nano fibers obtained by steam explosion. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 2, p. 1988–1997, 2011.

DEBZI, E. M. et al. The $I\alpha \rightarrow I\beta$ transformation of highly crystalline cellulose by annealing in various mediums. *Macromolecules*, v. 24, n. 26, p. 6816–6822, Dec 1991.

DUFRESNE, A.; CAVAILLÉ, J.Y.; VIGNON, M.R. Mechanical behavior of sheets prepared from sugar beet cellulose microfibrils. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 64, n. 6, p. 1185–1194, May 1997.

DUFRESNE, A. *Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials*. 2. ed. Berlin: De Gruyter, 2017.

DUFRESNE, A. Nanocellulose Processing Properties and Potential Applications. *Current Forestry Reports*, v. 5, p. 76 – 89, Mar 2019.

EMBRAPA FLORESTAS. *Ttflorestal, transferência de tecnologia florestal*: Eucalipto, 2019. Disponível em: <www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 11 jul. 2022.

_____. *Ttflorestal, transferência de tecnologia florestal*: Pínus, 2020. Disponível em: <www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 11 jul. 2022.

ERIKSEN, Ø.; SYVERUD, K.; GREGERSEN, Ø. The use of microfibrillated cellulose produced from kraft pulp as strength enhancer in TMP paper. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, v. 23, n. 3, p. 299-304. Mar 2008.

FENGEL, D.; WEGENER, G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. 1. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 1983

FIRJAN. *Energia elétrica: Custo e qualidade para a competitividade da indústria nacional*, 2017. Disponível em: <www.firjan.com.br/firjan/empresas/competitividade-empresarial/temas-em-destaque/energiaeletrica/custo/default-7.htm>. Acesso em: 15 Jan. 2022.

FORMULÁRIO NACIONAL DA FARMACOPEIA BRASILEIRA. 2.ed. Brasília, 2012.

GATENHOLM, P.; KLEMM, D. Bacterial nanocellulose as a renewable material for biomedical applications. *MRS Bull*, v. 35, n. 3, p. 208–213, Mar 2010.

HAMAD, W. Y.; MIAO, C.; BECK, S. Growing the Bioeconomy: Advances in the Development of Applications for Cellulose Filaments and Nanocrystals. *Industrial Biotechnology*, v. 15, n. 3, p. 133–137, Jun 2019.

HAYDARY, J. *Chemical process design and simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys applications*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2019.

HENRIKSSON, M. et al. An environmentally friendly method for enzyme-assisted preparation of microfibrillated cellulose (MFC) nanofibers. *European Polymer Journal*, v. 43, n. 8, p. 3434–3441, Aug 2007.

HERRICK, F.W. et al. Microfibrillated cellulose: morphology and accessibility. *J. Appl. Polym. Sci. Polym. Symp*, v. 37, p. 797–813. Jan 1983.

HUANG, Z.M. et al. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Compos. Sci. Technol*, v. 63, n. 15, p. 2223–2253, Nov 2003.

IBÁ. *Relatório anual 2020*. Disponível em: <
<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em: 25 Ago. 2021.

IPEA. *Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada*. Disponível em: <
www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=38590&module=M>. Acesso em: 25 fev. 2022.

JORDÃO, C; CLARO, F.C; MAGALHÃES, W. Viabilidade econômica da produção de celulose nanofibrilada por desfibrilação mecânica. In: WORKSHOP DE NANOTECNOLOGIA APLICADA AO AGRONEGÓCIO, 9., 2017, São Paulo: Rede Agro Nano, 2017. p. 28 - 31.

KARANDE, V. S. et al. Nanofibrillation of cotton fibers by disc refiner and its characterization. *Fibers and Polymers*, v. 12, n. 3, p. 399–404, Jun 2011.

KARGARZADEH, H. et al. Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose*, v. 25, p. 2151–2189, Feb 2018.

KLEMM, D. et al. Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angew. Chem. Int. Ed.*, Weinheim, v. 50, n. 24, p. 5438 – 5466, May 2011.

KOSE, R. et al. “Nanocellulose” As a single nanofiber prepared from pellicle secreted by *Gluconacetobacter xylinus* using aqueous counter collision. *Biomacromolecules*, v. 12, n.3, p. 716–720, Feb 2011.

KOVALENKO, V. I. Crystalline cellulose: structure and hydrogen bonds. *Russian Chemical Reviews*, v. 79, n. 3, p. 231–241, 2010.

LAPPONI, J. C. *Projetos de investimento na empresa*. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LI, J. et al. Homogeneous isolation of nanocellulose from sugarcane bagasse by high pressure homogenization. *Carbohydrate Polymers*, v. 90, n. 4, p. 1609–1613. Nov 2012.

LI, M.-C. et al. Cellulose nanoparticles as modifiers for rheology and fluid loss in bentonite water-based fluids. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 7, n. 8, p. 5006–5016, Feb 2015.

LIIMATAINEN, H. et al. Sulfonated cellulose nanofibrils obtained from wood pulp through regioselective oxidative bisulfite pre-treatment. *Cellulose*, v. 20, n. 2, p. 741–749, Jan 2013.

MATCHES. *Estimativa de custo de equipamentos*, 2014. Disponível em:
< www.matche.com/equipcost/Default.html >. Acesso em: 15 dez. 2021.

MAGALHÃES, W; DEGENHARDT, J. *Nova formulação de álcool gel (MicroCelol) com celulose microfibrilada (MFC): avaliação em Escherichia coli*. Comunicado técnico 444, Embrapa, 2020.

MATEOS-ESPEJEL, E.; SAVULESCU, L.; PARIS, J. Base case process development for energy efficiency improvement, application to a Kraft pulping mill. Part I: Definition and characterization. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 89, n. 6, p. 742-752, Jun 2011.

MALHERBE, S.; CLOETE, T. E. Lignocellulose biodegradation: fundamentals and applications. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 1, n. 2, p. 105-114, Jun 2002.

MASUKO SANGYO. Disponível em:
< www.masuko.com/English/product/MasscolloderZB20-100.html >. Acesso em: 6 dez. 2021.

MARKET RESEARCH REPORT. Disponível em:
< www.fortunebusinessinsights.com/carbomer-market-102999 >. Acesso em: 25 fev. 2022.

MICROFLUIDICS. Disponível em:
< www.microfluidics-mpt.com/microfluidizers/m700?hsLang=en >. Acesso em: 12 nov. 2021.

MILLER, J. Cellulose nanomaterials: State of the industry. The road to commercialization. Paper days, *University of Maine Pulp and Paper Foundation*, Mar 2017.

MOON, R. J. et al. Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Review*, v. 40, n. 7, p. 3941-3994, 2011.

MONTEIRO, B. et al. *Espessantes celulósicos para álcool gel e as estratégias do SENAI para atendimento emergencial*. Rio de Janeiro: SENAI, Serviço nacional de aprendizagem industrial, 2020. 6 p. Relatório técnico.

NAKAGAITO, A. N.; YANO, H. The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, v. 78, n. 4, p. 547-552, 2004.

NECHYPORCHUK, O; BELGACEM, M.N; BRAS, J. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, França, v. 93, p. 2- 25, Dec 2016.

NEOENERGIA. Disponível em:

< www.neoenergiaelektro.com.br/sua-casa/tarifas-taxas-e-tributos >. Acesso em: 20 Jan. 2022.

NIELSEN. *Impacto da Covid-19 nas vendas de produtos de giro rápido no Brasil e ao redor do mundo*, USA: The Nielsen Company, 2020.

PÄÄKKÖ, M. et al. Enzymatic Hydrolysis Combined with Mechanical Shearing and High-Pressure Homogenization for Nanoscale Cellulose Fibrils and Strong Gels. *Biomacromolecules*, v. 8, n. 6, p. 1934–1941, May 2007.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D.; WEST, R. E. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 2002.

RÅNBY, B.G. Aqueous colloidal solutions of cellulose micelles. *Acta Chem.Scand.* v. 3, p. 649–650, 1949.

SAITO, T. et al. Homogeneous suspensions of individualized microfibrils from tempo-catalyzed oxidation of native cellulose. *Biomacromolecules*, v. 7, n. 6, p. 1687–1691, Jun 2006.

SEBEN, L.; PAULA, I. C.; VIANA, S. G. Seleção de processo de polpeamento de celulose flexível a diferentes materiais vegetais frente a critérios ambientais e econômicos da sustentabilidade. *VIII Congresso nacional de excelência em gestão*, Jun 2012.

SIRÓ, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. *Cellulose*, v. 17, n. 3, p. 459–494, feb 2010.

SIRVIÖ, J. A.; VISANKO, M.; LIIMATAINEN, H. Deep eutectic solvent system based on choline chloride-urea as a pre-treatment for nanofibrillation of wood cellulose. *Green Chemistry*, v. 17, n. 6, p. 3401–3406, 2015.

SOUZA, D. T. DE; ONOYAMA, M. M.; SANTOS, P. S. S. Celulose proveniente de fibras alternativas: uma solução viável? *Agroenergia em Revista*, v. 4, n. 9, p. 64–67, 2015.

SPENCE, K.L. et al. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods. *Cellulose*, v. 18, p. 1097–1111, Apr 2011.

SHMULSKY, R.; JONES, P.D. *Forest Products and Wood Science*. 6. ed. Estados Unidos da América: Wiley-Blackwell, 2011.

SUN, X. F. et al. Characteristics of degraded cellulose obtained from steam-exploded wheat straw. *Carbohydrate Research*, v. 340, n. 1, p. 97–106, Jan 2005.

SUN, L. et al. Soy protein isolate/cellulose nanofiber complex gels as fat substitutes: rheological and textural properties and extent of cream imitation. *Cellulose*, v. 22, n. 4, p. 2619–2627, Jun 2015.

TANIGUCHI, T.; OKAMURA, K. New films produced from microfibrillated natural fibres. *Polymer International*, v. 47, n. 3, p. 291–294, Nov 1998.

TAPPI. *Production Summary of Cellulose Nanomaterials, 2018*. Disponível em: <<https://www.tappinano.org/whats-up/production-summary/>>. Acesso em: 31 set. 2021

TEODORO, M; CUSTODIO, J. M. F; NAPOLITANO, H. B. Polimorfismo Químico: Panorama Legislativo e Aplicação Farmacêutica. *Revista Processos Químicos*, p. 175-179, 2018.

TEJADO, A. et al. Energy requirements for the disintegration of cellulose fibers into cellulose nanofibers. *Cellulose*, v. 19, n. 3, p. 831–842, Mar 2012.

TOWLER, G. P.; SINNOTT, R. K. *Chemical engineering design: principles, practice, and economics of plant and process design*. 2. ed. USA: Butterworth-Heinemann, 2013.

TURBAK, A.F.; SNYDER, F.W.; SANDBERG, K.R. Microfibrillated cellulose: A new cellulose product. Properties, uses, and commercial potential. *J. Appl. Polym. Sci. Polym. Symp*, v. 37, p. 815–827, 1983.

TURBAK, A.F.; SNYDER, F.W.; SANDBERG, K.R. *Microfibrillated cellulose*. US n. 4.483.743, 18 oct. 1982, 20 nov. 1984.

UETANI, K.; YANO, H. Nanofibrillation of Wood Pulp Using a High-Speed Blender. *Biomacromolecules*, v. 12, n. 2, p. 348–353, 2011.

WÅGBERG, L. et al. The build-up of polyelectrolyte multilayers of microfibrillated cellulose and cationic polyelectrolytes. *Langmuir*, v. 24, n. 3, p. 784–795, Jan 2008.

WALECKA, J.A. An investigation of low degree of substitution carboxymethylcelluloses. *Tappi*, v. 39, p. 458–463, 1956.

WANG, Q. Q. et al. Morphological development of cellulose fibrils of a bleached eucalyptus pulp by mechanical fibrillation. *Cellulose*, v. 19, n.5, p. 1631–1643, Jul 2012.

WELLARD, H. J. Variation in the lattice spacing of cellulose. *Journal of Polymer Science*, v. 13, n. 71, p. 471–476, 1954.

WERTZ, J.-L.; BÉDUÉ, O.; MERCIER, J.P. *Cellulose Science and Technology*. Nova York: EPFL Press, 2010.

ZHANG, L.; TSUZUKI, T.; WANG, X. Preparation of cellulose nanofiber from softwood pulp by ball milling. *Cellulose*, v. 22, n. 3, p. 1729–1741, Feb 2015.

ZIMMERMANN, T.; PÖHLER, E.; GEIGER, T. Cellulose Fibrils for Polymer Reinforcement. *Advanced Engineering Materials*, v. 6, n. 9, p. 754–761, Sep 2004.

APÊNDICE – Estimativa do custo dos equipamentos

Tabela 35 - Estimativa do custo dos principais equipamentos dos cenários A, B e C.

Planta isolada			
Equipamentos	Unidades	Preço unitário (USD)	Preço (USD)
Cenário A			
Grinder	1	560.410,13	560.410,13
Hidrapulper	1	13.300,00	13.300,00
Tanque	2	8.400,00	16.800,00
Bomba	2	2.000,00	4.000,00
		Frete (USD)	3.410,00
		Total (USD)	597.920,13
Cenário B			
Grinder	2	560.410,13	1.120.820,26
Hidrapulper	1	13.300,00	13.300,00
Tanque	2	12.500,00	25.000,00
Bomba	2	2.500,00	5.000,00
		Frete (USD)	4.330,00
		Total (USD)	1.168.450,26
Cenário C			
Grinder	4	560.410,13	2.241.640,52
Hidrapulper	1	17.933,47	17.933,47
Tanque	2	18.500,00	37.000,00
Bomba	2	3.100,00	6.200,00
		Frete (USD)	6.113,35
		Total (USD)	2.308.887,34

Fonte: O autor, 2022.

Tabela 36 - Estimativa do custo dos principais equipamentos dos cenários D, E e F.

Co-localização			
Equipamentos	Unidades	Preço unitário (USD)	Preço (USD)
Cenário D			
Grinder	1	560.410,13	560.410,13
Tanque	2	8.400,00	16.800,00
Bomba	2	2.000,00	4.000,00
		Frete (USD)	2080,00
		Total (USD)	583.290,13
Cenário E			
Grinder	2	560.410,13	1.120.820,26
Tanque	2	12.500,00	25.000,00
Bomba	2	2.500,00	5.000,00
		Frete (USD)	3.000,00
		Total (USD)	1.153.820,26
Cenário F			
Grinder	4	560.410,13	2.241.640,52
Tanque	2	18.500,00	37.000,00
Bomba	2	3.100,00	6.200,00
		Frete (USD)	4.320,00
		Total (USD)	2.289.160,52

Fonte: O autor, 2022.