

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos 2

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua
(Organizador)

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos 2

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Engenharia química: desenvolvimento de novos processos e produtos 2

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia química: desenvolvimento de novos processos e produtos 2 / Organizador Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0411-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.118221208>

1. Engenharia química. I. Paniagua, Cleiseano Emanuel da Silva (Organizador). II. Título.

CDD 660

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

O e-book intitulado: “Engenharia química: Desenvolvimento de novos processos e produtos 2” é constituído por oito capítulos de livros que se distribuíram em três eixos-temáticos: *i)* produção e desenvolvimento de produtos de maior eficiência e de menor custo; *ii)* utilização de biomassa e controle de variável em diferentes processos industriais e; *iii)* geração de energia e estimativa de custo para recuperar espécies em recursos hídricos.

O primeiro capítulo investigou a relação de um conjunto de filtros, utilizados em ambientes fechados, em relação à eficiência e o consumo energético resultando em um sistema que requeria um consumo de 8 W e uma eficiência de retenção de partículas abaixo do recomendado pela OMS. O capítulo 2 avaliou o desenvolvimento de produção de nanofibras via *electrospinning* a partir da análise de números adimensionais com múltiplas variáveis, os resultados sugerem estudos promissores que definiram a operação de produção de fibras pela via *electrospinning*.

Os capítulos de 3 a 5 avaliaram: *i)* a importância do controle de temperatura no processo de esterilização de alimentos a partir de um modelamento matemático por meio de simulação computacional; *ii)* influência da temperatura na produção de ácido cítrico utilizando fungos da espécie *Aspergillus Awamori e*; *iii)* extração de xilose e glicose a partir do eucalipto (*Eucalyptus sp.*) a partir do pré-tratamento utilizando o ácido peracético e hidróxido de sódio.

Por fim, os capítulos de 6 a 8 apresentaram trabalhos que avaliaram: *i)* utilização da energia térmica a partir de resíduos de *Chillers*, gerados em unidades hospitalares; *ii)* análise de custo para recuperar microalgas a partir de processos de microfiltração e; *iii)* remoção de arsênio (III) em matrizes aquosa empregando carbono pirolisado como adsorvente.

Nesta perspectiva, a Atena Editora vem trabalhando de forma a estimular e incentivar cada vez mais pesquisadores do Brasil e de outros países a publicarem seus trabalhos com garantia de qualidade e excelência em forma de livros, capítulos de livros e artigos científicos.

Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

PROJETO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE AR UTILIZANDO MEIOS FILTRANTES DE NANOFIBRAS

Alessandro Estarque de Oliveira

Mônica Lopes Aguiar

Vádila Giovana Guerra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212081>


CAPÍTULO 2..... 17

OBTENÇÃO DE ADIMENSIONAIS PARA O ESTUDO DE *ELECTROSPINNING*

Alessandro Estarque de Oliveira

Mônica Lopes Aguiar

Vádila Giovana Guerra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212082>


CAPÍTULO 3..... 33

CONTROLE INFERENCIAL PARA ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS

Danúbia Lucas Meira Gontijo

Rafael Yuri Medeiros Barbosa

Rubens Gedraite

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212083>

CAPÍTULO 4..... 47

PRODUÇÃO DE ÁCIDO CÍTRICO POR *ASPERGILLUS AWAMORI* E INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA EM SISTEMA DESCONTÍNUO


Emanuel Souza Barros

José Eduardo Olivo

Deivid Jonathan Souza Barros

Edvan Vinicius Gonçalves

Carlos Hiroaki Missaki Kuwabara

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212084>

CAPÍTULO 5..... 53

EXTRAÇÃO DE XILOSE E GLICOSE DE *EUCLYPTUS* sp. PRÉ- TRATADOS COM ÁCIDO PERACÉTICO E HIDRÓXIDO DE SÓDIO

Eduardo de Souza Costa Antunes

Ezequiel Marcelino da Silva

Raquel Marchesan

Adriane Maria Ferreira Milagres


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212085>

CAPÍTULO 6..... 69

VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO USO DO CALOR RESIDUAL DOS CHILLERS

PARA PROCESSOS DE AQUECIMENTO EM HOSPITAIS


Breno Wasserstein
Carlos Eduardo Bonazzola Ribeiro
Eliandro Barbosa de Aguiar

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212086>

CAPÍTULO 7..... 86

ESTIMATIVA DO CUSTO DE CAPITAL DA MICROFILTRAÇÃO EM UM PROCESSO CONTÍNUO DE RECUPERAÇÃO DE MICROALGAS

Gilzza Garcia Borges
Rafael Bruno Vieira
Thamayne Valadares de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212087>

CAPÍTULO 8..... 99

REMOCIÓN DE ARSÉNICO (III) POR MEDIO DE CARBÓN DE PIROLISIS EN FASE ACUOSA

Octavio Trejo-Chavero
Lidia Soriano-Piña
Cecilia Mercado-Zúñiga
Juventino Barojas-Huerta
María Teresa Torres-Mancera
Raquel Eunice Hernández Ramírez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1182212088>

SOBRE O ORGANIZADOR..... 104

ÍNDICE REMISSIVO..... 105

ESTIMATIVA DO CUSTO DE CAPITAL DA MICROFILTRAÇÃO EM UM PROCESSO CONTÍNUO DE RECUPERAÇÃO DE MICROALGAS

Data de aceite: 01/08/2022

Gilzza Garcia Borges

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
Uberlândia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4223160027620685>

Rafael Bruno Vieira

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
Uberlândia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8217534758331184>

Thamayne Valadares de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
Uberlândia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6373988987586203>

RESUMO: As microalgas são muito utilizadas em várias áreas, como, por exemplo, nas indústrias alimentar, química e farmacêutica, dentre outras. A recuperação de microalgas por meio de um processo de floculação-sedimentação seguida da microfiltração e centrifugação é julgada dispendiosa, visto que, principalmente na microfiltração, são utilizados materiais onerosos, e as membranas precisam ser repostas devido ao entupimento que ocorre durante o processo. Com intuito de minimizar os valores para realizar esse processo, empregou-se uma membrana de baixo custo, e assim, usando equações da literatura, foi estimado um custo total para o módulo de microfiltração, incluindo gastos com tubos e válvulas, instrumentos e controles,

tanques e estruturas, bomba e membrana. Visto que os números encontrados correspondem à escala de bancada, foi feito um escalonamento para conhecê-los na escala piloto. O custo total foi de 1149 dólares para a escala de bancada e de 7173 dólares para a escala piloto, o que torna o processo viável, diante do fato que no módulo microfiltração a estrutura tem uma longa vida útil e apenas a membrana seria trocada ao longo dos usos.

PALAVRAS-CHAVE: Microfiltração, custos, escala de bancada e piloto.

ESTIMATED CAPITAL COST OF MICROFILTRATION IN A CONTINUOUS MICROALGAE RECOVERY PROCESS

ABSTRACT: Microalgae are widely used in various areas, for example in the food, chemical, and pharmaceutical industries, among others. The recovery of microalgae through a flocculation-sedimentation process followed by microfiltration and centrifugation is considered expensive since, especially in microfiltration, costly materials are used and membranes need to be replaced. In order to minimize the values to perform this process, a low-cost membrane was used, and thus, using equations from the literature, a total cost for the microfiltration module was estimated, including expenses for tubes and valves, instruments and controls, tanks and structures, pump and membrane. The first cost value presented corresponds to the bench scale, and a scaling up was also made to obtain the pilot scale values. The total cost was \$ 1149 for the bench scale and \$ 7173 for the pilot scale, which makes the process feasible, since in the

microfiltration module the structure has a long life cycle and only the membrane would be changed over the cycles of use.

KEYWORDS: Microfiltration, costs, bench scale and pilot.

1 | INTRODUÇÃO

As microalgas são microrganismos unicelulares encontrados em vários ambientes, não só aquáticos, mas também terrestres e representam uma grande quantidade de espécies. É estimado que existem mais de 50.000 espécies, mas apenas um número limitado, de cerca de 30.000, foram estudados e analisados (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Esse organismo, além de ser muito importante para a manutenção da vida nos ecossistemas, já que é responsável pela produção de boa parte de O_2 , também agrega valor na área científica e industrial, por isso tem sido bastante procurado para desempenhar aplicações biotecnológicas.

O rápido crescimento das microalgas unicelulares é uma das principais vantagens para que as microalgas sejam fundamentais em vários processos. Pigmentos, ácidos graxos insaturados, proteínas, polissacarídeos, antioxidantes, enzimas e biodiesel são alguns produtos de alto valor formados por meio de técnicas com as microalgas. Ademais, elas também são usadas para a produção de ração para gado, farinha de peixe e fertilizantes orgânicos. Portanto percebe-se o real valor desse ser vivo para a sociedade (DELATTRE et al., 2016).

Como o uso das microalgas requer que sua biomassa seja separada da suspensão primeiramente, algumas técnicas são usadas para esse fim. Contudo, a recuperação é um grande desafio devido ao pequeno tamanho das células e seu desenvolvimento acelerado, (HENRIQUES, 2017). O método adequado de colheita para remover grandes quantidades de água e resultar em biomassa, pode envolver uma ou mais etapas de separação sólido-líquido e contribuir com 20-30% do custo total da separação (AHMAD et al., 2012).

A sequência floculação-sedimentação, seguida da microfiltração e por último a centrifugação é uma forma de drenagem de cultura que viabiliza a utilização das microalgas em processos futuros. A etapa de floculação-sedimentação é considerada de baixo custo, visto que utiliza materiais baratos e como é preliminar, reduz o consumo de energia e custos das fases seguintes. Por sua vez, a centrifugação pode ser aplicada a diferentes tipos de microalgas e possui uma recuperação rápida e eficiente das células, porém demanda altos custos de investimento e de operação (HENRIQUES, 2017).

A microfiltração é um tipo especial de filtração que utiliza como tamanho dos poros da membrana o diâmetro de 0,1-10 μm , e não necessita de altas pressões como força motriz, uma vez que as membranas são relativamente abertas (HENRIQUES, 2017). Além disso, esse tipo de filtração utilizando membranas é de fácil operação, baixo investimento, abrasão insignificante, baixo consumo de energia, altas taxas de filtragem e sem necessidade de

adição química (MENDES, 2019). O sistema utilizado nessa etapa é chamado *cross-flow* ou fluxo cruzado, que possibilita um processo contínuo e mais eficiente, porém possui como dificuldades o mecanismo de *fouling* e a polarização de concentração, no entanto, as vantagens dessa maneira de filtrar vencem as desvantagens e tornam o processo mais viável. Por outro lado, a filtração convencional pode causar danos ao organismos e sua capacidade de processamento de volume é limitada (AHMAD et al., 2012).

As membranas de microfiltração são recomendadas na recuperação de microalgas pelo motivo de proporcionarem maior permeabilidade e menor quantidade de incrustações em relação às outras membranas que requerem altas pressões ou operem pelo modo convencional (DAS; CHAKRABARTY; BARKAKATI, 2017; HENRIQUES, 2017). A membrana utilizada na microfiltração é a parte mais importante de todo o processo, porque o sucesso da separação depende da qualidade dela, ou seja, dos seus componentes e poros.

Há vários tipos de membranas que podem ser usadas para realizar essa técnica, as quais são feitas com agentes porogênicos, capazes de formar pequenos orifícios que facilitam a filtração. Dentre elas está a polimérica que por sua vez é formada por materiais orgânicos como fluoreto de polivinilideno (PVDF), acetato de celulose (CA), politetrafluoroetileno (PTFE), polipropileno (PP), poli (éter sulfonas) (PES), cloreto de polivinil (PVC), poliácridonitrila (PAN) e tereftalato de polietileno (PET). Outro tipo de membrana que pode ser utilizada é aquela formada por materiais inorgânicos (cerâmicos), dentre eles destaca-se o Al_2O_3 (óxido de alumínio), a alumina, a sílica, o zircônio e o titânio, que formam a matéria prima sintética (BILAD et al., 2014). Essas duas categorias se enquadram no grupo das membranas comerciais, as quais são constituídas por materiais amplamente encontrados no mercado.

Os materiais cerâmicos apresentam como características a possibilidade de operar em uma grande faixa de temperatura, altas permeabilidade e inércia química e baixas condutividade térmica e densidade. Essas vantagens propiciam a utilização desses materiais na produção de membranas e em várias outras aplicações (HENRIQUES, 2017).

Ao comparar as membranas poliméricas com as cerâmicas, nota-se diferença no que diz respeito ao valor, que para a segunda é julgado mais alto. Por outro lado, as membranas cerâmicas (inorgânicas) permitem limpezas mais eficientes e possuem vida útil maior do que as membranas orgânicas, além de poder ser utilizadas em sistemas com elevada temperatura e pH extremos (TRINDADE, 2010).

Há pouca literatura e experiência no sentido de estudo dos custos de se utilizar o módulo de microfiltração com o objetivo de recuperar microalgas. O principal motivo disso é que esse processo envolve um grande número de variáveis e fatores no projeto e na sua operação (SETHI; WIESNER, 2000). Por isso alguns custos foram ignorados neste estudo e somente aqueles relevantes foram calculados separadamente. Logo, é de grande importância analisar o custo de capital gerado no decorrer do método, porque só assim é possível julgar a viabilidade dele.

Os custos para recuperar microalgas são considerados altos, já que a microfiltração geralmente utiliza matérias primas sintéticas como forma de construir uma membrana cerâmica, isso incorpora a parte dispendiosa de toda técnica (HENRIQUES, 2017). Com a finalidade de minimizar os gastos do processo, os componentes da membrana podem ser trocados por materiais de baixo custo, como amido de mandioca e casca de ovo. Dessa forma, o custo de capital diminui, tornando o trabalho de decréscimo da concentração de microalgas mais acessível.

Existem três tipos de escala possíveis para avaliar o custo e verificar a viabilidade. Dentre eles está a escala de bancada, que também é conhecida como de laboratório, a qual utiliza equipamentos mais simples e quantidades menores. Nesse estágio é necessário que a previsão de desenvolvimento do processo seja precisa para que os custos possam ser avaliados de forma realista futuramente (TENNISON, 2000). Já a escala piloto, que mostra com mais clareza a praticabilidade, utiliza quantidades satisfatórias e equipamentos que reproduzam aqueles utilizados na escala industrial, que por sua vez utiliza valores grandes e reais. Neste trabalho, os custos serão apresentados em escala de bancada e piloto.

Por fim, pode-se perceber a importância em estudar o custo de capital do módulo de microfiltração, já que os produtos do processo (microalgas recuperadas) são utilizados em várias áreas da química e gestão ambiental, como, por exemplo, no tratamento de efluentes.

A microfiltração faz parte da sequência de recuperação de microalgas: floculação-sedimentação, microfiltração e centrifugação. Sendo assim, a análise do custo de capital no módulo de microfiltração é o objetivo principal deste trabalho.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

As microalgas utilizadas na microfiltração tiveram seu cultivo desenvolvido pelo grupo de pesquisa NPDEAS (Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energias Autossustentáveis) na Universidade Federal do Paraná. Foi utilizado pelo grupo o meio de cultura sintético Chu modificado e. Ademais, utilizou-se como concentração das microalgas o valor de 60 mg/L (MENDES, 2019). Os custos da microfiltração no processo de floculação-sedimentação/microfiltração/centrifugação foram avaliados a partir de dados do trabalho de MENDES, (2019).

As características da membrana e os equipamentos utilizados na unidade experimental foram retiradas dessa pesquisa. parte de equações foi feita a partir do trabalho de (SETHI; WIESNER, 2000) e de (NANDI; UPPALURI; PURKAIT, 2009).

A filtração utilizada no processo é do tipo *cross-flow* ou fluxo cruzado e consiste em alimentar tangencialmente a superfície da membrana permitindo a permeação, ou seja,

o fluxo alimentado passa no processo e se divide em retido e permeado como mostrado na Figura 1 item a. Como os poros da membrana vão sendo bloqueados com o passar do tempo o fluxo diminui como pode ser observado na Figura 1 item b (HENRIQUES, 2017).

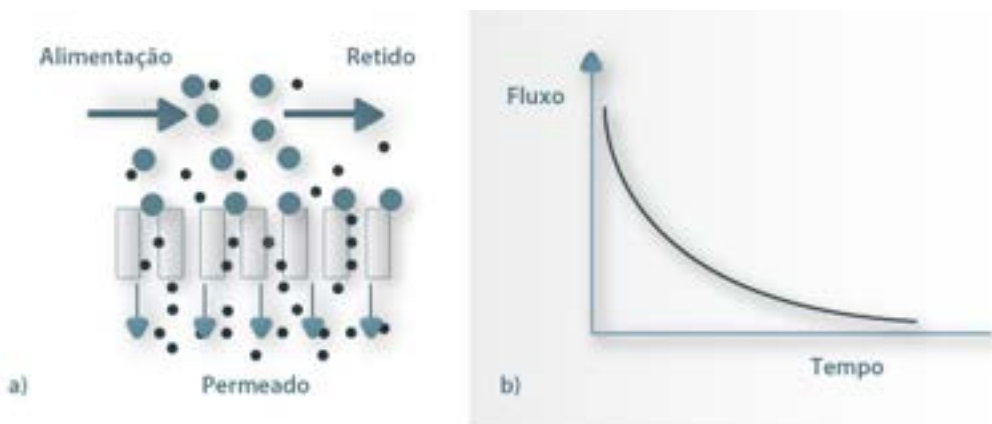


Figura 1 – Filtração tangencial.

Fonte: (LABVIRTUAL, 2020).

O sistema de filtração, especificamente, consiste de uma bomba para circulação do fluido (marca SEAFLO, modelo SFDP1-014-100-22, vazão volumétrica e pressão máxima de 5,0 L/min e 6,9 bar, respectivamente), acionada por fonte (ICEL Manaus modelo PS-6000 30V/6A), rotâmetro (Tecnofluid série TRP-330-5), manômetro (Ø63 Glicerina Genebre - 3822N com escalas de 0 a 2,0 bar) e um módulo metálico, chamado módulo de filtração, onde a membrana cerâmica é posicionada para a realização dos testes (MENDES, 2019).

A Figura 2 ilustra o sistema de microfiltração que foi utilizado na recuperação das microalgas baseado no trabalho de MENDES, (2019).

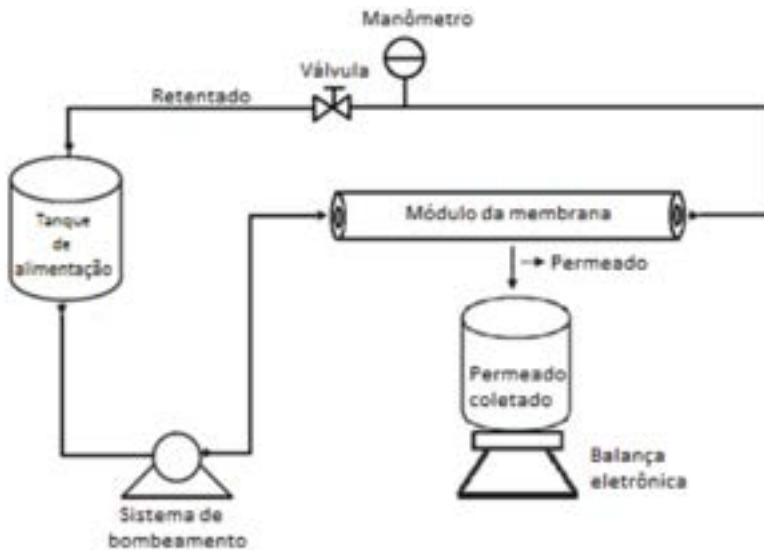


Figura 2 – Sistema de microfiltração.

Fonte: MENDES, (2019).

A membrana utilizada a partir do estudo de MENDES, (2019) é formada por argila pré-tratada a 500 °C (95% p/p), contendo amido catiônico (2,5% p/p) e casca de ovo (2,5% p/p), a qual foi denominada de M1 no referido trabalho. Suas dimensões são apresentadas na Tabela 1 e sua forma na Figura 3. A área interna da membrana (A_{memb}) para a escala de bancada foi calculada pela equação

$$A_{memb} = \pi * d * l \quad (1)$$

na qual, π é número pi , d é o diâmetro interno e l é o comprimento da membrana.

Comprimento (m)	Diâmetro interno (m)	Diâmetro externo (m)	Área interna (m ²)
0,175	0,01075	0,01885	0,005910

Tabela 1: Dimensões da membrana utilizada.

Fonte: MENDES (2019).

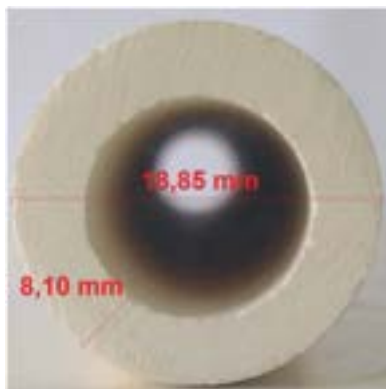


Figura 3: Membrana utilizada por MENDES, (2019).

Fonte: MENDES, (2019).

2.2 Métodos

Com a finalidade de calcular o custo total do módulo de microfiltração tanto para a escala de bancada quanto para a escala piloto foram utilizadas equações que geram os custos de tubos e válvulas, instrumentos e controles, tanques e estruturas, bomba e membrana, separadamente. Após realizar os cálculos com essas equações, foi feita uma soma para obter o valor total do processo. A Tabela 2 mostra as equações usadas para determinar os custos parciais e o custo total.

Custos	Equações	Referências	
Forma geral do custo	$C = k + (A_{mem})^n$	(2)	(SETHI; WIESNER, 2000)
Custo de tubos e válvulas	$C_{TV} = 5926,13 * (A_{mem})^{0,42}$	(3)	(SETHI; WIESNER, 2000)
Custo de instrumentos e controles	$C_{IC} = 1445,50 * (A_{mem})^{0,66}$	(4)	(SETHI; WIESNER, 2000)
Custo de tanques e estruturas	$C_{TE} = 3047,21 * (A_{mem})^{0,53}$	(5)	(SETHI; WIESNER, 2000)
Custo da bomba	$C_{bomba} = I * f_1 * f_2 * L * 81,27 * (Q * P)^{0,39}$	(6)	(SETHI; WIESNER, 2000)
Custo anual do módulo da membrana	$C_{mem} = \frac{(A_{mem})^{0,8} * Q_{mem} * i * (i + 1)^{LM}}{(i + 1)^{LM} - 1}$	(7)	(NANDI; UPPALURI; PURKAIT, 2009)

Custo total do módulo de microfiltração	$C_{total} = C_{TV} + C_{IC} + C_{TE} + C_D + C_{bomba} + C_{mem}$ (8)	
---	--	--

Tabela 2: Equações usadas para determinar os custos parciais e o custo total.

A partir das equações definidas na Tabela 2, a qual inclui o custo total que diz respeito a soma de todos os outros custos, alguns parâmetros, explícitos na Tabela 3, cujo valor não muda, foram estabelecidos e utilizados nessas equações para obter resultados precisos dos custos. Além disso, é necessário saber outros valores que variam de acordo com a escala desejada para calcular os custos.

Na escala de bancada foram utilizados para A_{mem} (área interna da membrana em m^2), Q (vazão em L/min), P (diferencial de pressão em bar), os seguintes valores: 0,005910 m^2 , 0,6 L/min e 0,7 bar, respectivamente.

Já para a escala piloto foi feito um novo cálculo para descobrir o valor da área interna da membrana fazendo um aumento de escala e utilizando a seguinte equação:

$$A_{memp} = \frac{Q}{J} \quad (9)$$

na qual Q é a vazão em m^3 /dia e J é o fluxo no estado estacionário em kg/m^2h . Para essas variáveis foram usados os seguintes valores: 1 m^3 /dia, 120 kg/m^2h , respectivamente. O resultado para a área foi aproximadamente 0,35 m^2 . A fim de realizar esse cálculo foi necessário realizar conversões de unidades e, considerou-se a densidade da água (1000 kg/m^3) como sendo aproximadamente igual à densidade da solução de microalgas, já que essa é muito diluída e que o processo atua em regime de estado estacionário (MENDES, 2019).

Com o conhecimento desses parâmetros e dessas variáveis, foi possível resolver as equações.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Índice de atualização do custo	I	2,28
Fator de ajuste para construção da bomba	f_1	1,4
Fator a ser ajustado para faixa de pressão	f_2	1
Fator correspondente à custos de laboratório	L	1
Fator correspondente ao custo do módulo da membrana ($\$/m^2$)	Q_{mem}	400
Taxa de juros anual	i	0,1

Vida útil (anos)	L_M	0,25
------------------	-------	------

Tabela 3: Parâmetros das equações.

Fonte: (NANDI; UPPALURI; PURKAIT, 2009; SETHI; WIESNER, 2000).

O modelo de equações e parâmetros apresentado acima refere-se aos custos da operação unitária microfiltração. Com o intuito de estimá-los, o programa Excel foi usado para realizar os cálculos, já que por meio dessa ferramenta, os valores obtidos se aproximam melhor da exatidão.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Escala de bancada

A primeira condição na qual os custos foram avaliados é a escala de bancada, que consiste principalmente em obter o valor do módulo de microfiltração utilizando apenas uma membrana com dimensões específicas e usando dados levantados no laboratório. Essa forma de realizar os cálculos ainda que em pequenas quantidades, possibilita adquirir noções do processo para que sua viabilidade seja julgada.

Após a estipulação das equações e de seus parâmetros e variáveis, é possível realizar o cálculo dos custos. O Excel foi a ferramenta utilizada para esse fim e por meio dele obteve-se os valores apresentados na Tabela 4.

Tipo de custo	Valor do custo em dólar (\$)
Custo de tubos e válvulas	687
Custo de instrumentos e controles	49
Custo de tanques e estruturas	201
Custo da bomba	185
Custo anual do módulo da membrana	28
Custo total do módulo de microfiltração	1149

Tabela 4: Resultados em escala de bancada (custos parciais e total)

Fonte: Autora, 2020.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, pode-se observar que o menor custo foi o da membrana. Isso deve-se ao fato de que os seus componentes são baratos, como a casca de ovo e o amido de mandioca. Por outro lado, tudo que envolve a operação da microfiltração mostrou-se como custos mais altos, como os tubos, válvulas, tanques e estruturas. O motivo disso é a utilização de materiais e equipamentos mais caros para construir o módulo de filtração. Embora deva se considerar que a vida útil do módulo de filtração é muito longa, em torno de vários anos. E que nesse sistema de microfiltração

apenas a membrana seria reposta com maior frequência a qual apresenta um custo mais baixo. Logo, os resultados possuem uma diferença de valores de acordo com cada tipo de custo.

3.2 Escala piloto

A partir da dedução de que o processo em questão se comportaria da mesma forma para uma escala maior, foram definidos os resultados para a escala piloto, na qual os dados levantados no laboratório foram submetidos a um aumento de escala (escalonamento). Dessa forma é ainda mais fácil julgar a viabilidade do processo.

Assim como para a escala de bancada, a ferramenta Excel foi utilizada para o cálculo dos custos na escala piloto, que são apresentados na Tabela 5.

Tipo de custo	Valor do custo em dólar (\$)
Custo de tubos e válvulas	3800
Custo de instrumentos e controles	719
Custo de tanques e estruturas	1739
Custo da bomba	185
Custo anual do módulo da membrana	729
Custo total do módulo de microfiltração	7173

Tabela 5: Resultados em piloto (custos parciais e total)

Fonte: Autora, 2020.

Da mesma maneira que foi observado para a escala de bancada, o custo da membrana é considerado bem mais baixo do que àqueles correspondentes à operação do processo, devido aos materiais baratos utilizados para sua confecção. Isso ocorre porque o que muda de uma escala para a outra é a quantidade de membranas e não sua composição. Ao dividir $0,35 \text{ m}^2$ (área das membranas em escala piloto) por $0,005910 \text{ m}^2$ (área de uma única membrana, utilizada em escala de bancada), o valor retornado é de aproximadamente 59, ou seja, foram utilizadas 59 membranas em escala piloto para uma vazão de $1 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Ao comparar os dois tipos de escala no que diz respeito à vazão Q utilizada, percebe-se que o escalonamento realizado pode ser eficiente, visto que em escala de bancada a vazão foi de $0,6 \text{ L}/\text{min}$, que ao converter as unidades, resulta em $0,864 \text{ m}^3/\text{dia}$. Esse valor está próximo de $1 \text{ m}^3/\text{dia}$, o qual foi adotado na escala piloto.

Além disso, outro ponto possível de análise é o custo em dólar gasta por metro quadrado de área da membrana, que no caso é de aproximadamente $4738 \text{ \$/m}^2$, já que o valor encontrado de 28 dólares para a escala de bancada é correspondente à $0,005910 \text{ m}^2$. Com esse dado em mãos é possível saber a quantidade de membranas gastas para 1 m^2 de área da membrana. Ao dividir esse valor por $0,005910 \text{ m}^2$ o resultado é 169, ou seja, 1

m² rende 169 membranas, considerando 0,005910 m² a área de cada membrana.

Como são muitas membranas, uma grande quantidade de solução pode ser filtrada. Como 59 membranas filtram 1 m³/dia de solução, então 169 membranas filtram aproximadamente 3 m³/dia. Percebe-se que o valor para a vazão tratada diariamente é bastante alto, por isso seria viável utilizar a composição da membrana adotada (argila pré-tratada, amido catiônico e casca de ovo), já que ela é de baixo custo por ser feita com resíduos.

Na literatura existem poucos estudos relacionados ao custo de operação do processo em questão. No entanto, no que diz respeito ao valor para a membrana, incluindo a fabricação e os materiais utilizados, alguns autores apresentaram seus resultados.

Estudos realizados por Nandi et al. (2009) mostraram 130 \$/m² como valor da membrana de baixo custo. Esse valor encontra-se abaixo da média do custo de uma membrana desenvolvida com materiais cerâmicos, que segundo seu trabalho, é de 400 \$/m². Outros autores como Tennison (2000) e Das et al. (2017) chegaram em seus estudos, para os custos da membrana, nos valores de 598,90 \$/m² e 92 \$/m², respectivamente, sendo o último desenvolvido para uma membrana feita com materiais crus, ou seja, materiais de baixo custo, assim como foi feito nesse trabalho.

Como pode ser visto, o valor encontrado por metro quadrado (4738 \$/m²) é bem acima dos valores dos trabalhos citados, embora espere-se que com o aumento de escala, os custos de produção das membranas diminuam. No entanto, vale ressaltar que nesses estudos, não é apresentado o comportamento das membranas em relação ao fluxo, isto é, a eficiência das membranas. Por isso torna-se inviável comparar esses custos de forma realista.

4 | CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que a microfiltração utilizando membranas de baixo custo na sequência de recuperação de microalgas: floculação-sedimentação, microfiltração e centrifugação é viável. Isso pode ser observado por meio da análise do custo de capital para esse processo, que gerou um custo total de 1149 dólares para a escala de bancada e de 7173 dólares para a escala piloto, ao somar todos os custos parciais.

As equações adotadas para a análise do custo de capital foram selecionadas conforme o tipo de custo. Elas foram divididas em custos de tubos e válvulas, instrumentos e controles, tanques e estruturas, bomba, membrana e a equação de custo total, que é a soma dos outros valores. A partir disso, foi possível determinar o resultado para cada equação, utilizando a área interna da membrana, calculada de acordo com a escala.

Ao comparar os dois tipos de escala, observou-se uma eficiência no escalonamento adotado já que os valores para vazão ficaram próximos, os quais foram 0,864 m³/dia e 1

m³/dia, para a escala de bancada e piloto, respectivamente. Além disso, foi observado a quantidade de membranas utilizadas e a porção de solução que elas filtram, mostrando que o processo de microfiltração para a separação de microalgas é apropriado, porque o valor que é filtrado é alto.

Referências na literatura são escassas para um custo total, mas não para a membrana. Como os estudos levados em questão não apresentam o comportamento das membranas, os valores encontrados não foram apropriados para uma comparação mais realista.

Portanto, a análise do custo de capital possibilitou que a etapa de microfiltração no processo tratado fosse factível e possível de ser aplicada.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos dos autores a CAPES, CNPq e a Fundação Araucária pelo auxílio econômico para realização do trabalho. Agradecimentos também aos Programas de Pós-graduação e Graduações em Universidade Federal de Uberlândia e da Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A. L. et al. Crossflow microfiltration of microalgae biomass for biofuel production. **Desalination**, v. 302, p. 65–70, 2012.

BILAD, M. R. R. et al. Membrane technology in microalgae cultivation and harvesting: A review. **Biotechnology Advances**, v. 32, n. 7, p. 1283–1300, nov. 2014.

DAS, B.; CHAKRABARTY, B.; BARKAKATI, P. Separation of oil from oily wastewater using low cost ceramic membrane. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 10, p. 2559–2569, 2017.

DELATTRE, C. et al. Production, extraction and characterization of microalgal and cyanobacterial exopolysaccharides. **Biotechnology Advances**, v. 34, n. 7, p. 1159–1179, 2016.

HENRIQUES, J. D. D. O. **AVALIAÇÃO DA SEPARAÇÃO DE MICROALGAS *Acutodesmus obliquus* A PARTIR DE MEMBRANAS CERÂMICAS INCORPORADAS COM AGENTES POROGENICOS**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2017.

LABVIRTUAL. **Escoamento em processos de membranas; a) Fluxo cruzado; b) Declínio do fluxo de permeado**.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 217–232, 2010.

MENDES, A. L. **Efeito da filtração tangencial associada à floculação na separação de microalgas *Tetrademus obliquus***. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2019.

NANDI, B. K.; UPPALURI, R.; PURKAIT, M. K. **Treatment of oily waste water using low-cost ceramic membrane: Flux decline mechanism and economic feasibility.** [s.l.: s.n.]. v. 44

SETHI, S.; WIESNER, M. R. Simulated cost comparisons of hollow-fiber and integrated nanofiltration configurations. **Water Research**, v. 34, n. 9, p. 2589–2597, 2000.

TENNISON, S. Current hurdles in the commercial development of inorganic membrane reactors. **Membrane Technology**, n. 128, p. 4–9, 2000.

TRINDADE, R. S. Caracterização de membranas poliméricas aplicadas ao processo de microfiltração. **Ufrgs**, 2010.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acetato de celulose (CA) 88

Ácido cítrico 47, 48, 49, 50, 51, 52

Ácido peracético (PAA) 53, 55, 56, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66

Açúcares 49, 53, 57, 58, 64, 66, 67

Agentes porogênicos 97

Álcool polivinílico (PVA) 1, 6, 17

Aquecimento 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 58, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81

Aspergillus awamori 47, 48, 49, 52

Autoclave 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 46

B

Biomassa 50, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 87

Biorreator 49, 50

C

Carbón 99, 100, 101, 102, 103

Células fúngicas 50

Centrifugação 86, 87, 89, 96

Chiller 69, 70, 72, 73, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84

Cinzas 58, 59

Combustível fóssil 69, 70, 71, 72, 83, 84

Condensador 70, 72, 73, 74, 75, 80, 82, 83

Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) 57, 61

D

Desaeração 34, 37

Deslignificação 53, 55, 60, 65, 67

E

Ecossistemas 87

Efeito estufa 69, 70

Eficiência energética 69, 70

Electrospinning 1, 2, 6, 17, 18, 19, 22, 28, 30, 31, 32

Energia elétrica 69, 71, 77, 78, 80, 81

Energia térmica 81

Enzimas 3, 52, 53, 54, 55, 58, 63, 64, 65, 67, 87

Escala de bancada 86, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97

Esterilização 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 45, 46

Etapa de exaustão 36

Eucalyptus 53, 54, 55, 56, 67

F

Filtração 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 17, 18, 19, 22, 23, 27, 28, 30, 60, 65, 87, 88, 89, 90, 94, 97

Floculação-sedimentação 86, 87, 89, 96

Fungos 2, 49, 55, 64

G

Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) 69, 71, 77

Glicana 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64

Glicose 50, 53, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67

Gravimetria 57

H

Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) 1

Hemicelulose 53, 54, 55, 63, 64, 67, 68

Hidrólise 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67

High Efficiency Particulate Arrestance (HEPA) 2

I

Indústria de alimentos 33, 35

L

Lacase 53, 55, 56, 58, 65

Lignina 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 64, 65, 67, 68

Lignocelulósicos 53, 54, 55

M

Madeira 53, 61

Manômetro 37, 90

Mecanismo de *fouling* 88

Meio ambiente 69, 70, 72
Membrana 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97
Microalgas 86, 87, 88, 89, 90, 93, 96, 97
Microfiltração 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98
Microrganismo 34, 49, 51
Minimum Efficiency Reporting Values (MERV) 1, 2, 3, 5
Modelo matemático 34, 39, 40, 45, 46
Monômero 62

N

Nanofibras 1, 3, 6, 9, 13, 17, 18, 19, 22, 23
Nanopartículas 1, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 17, 18, 19, 24

O

Organização Mundial de Saúde (OMS) 1, 3, 9

P

Pirolisis 99, 100, 101, 102, 103
Polímero 6, 18, 19, 23, 24, 60
Processamento térmico 34, 35, 39, 46
Processos industriais 33
Produto alimentício 33, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45

R

Reaproveitamento 53
Rejeito térmico 70, 72
Remoción 99, 100, 101, 102
Resfriamento 33, 35, 36, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 78, 81, 83

S

Separação gás-sólido 18
Serragem 56, 57, 59, 64
Solvente 18, 19, 22
Substrato 47, 49, 50, 51, 52, 53, 59

T

Temperatura 3, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 49, 51, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 66, 67, 69, 73, 74, 75, 76, 80, 88

Termômetro 37, 38

V

Volatile Organic Compounds (VOCs) 2

X

Xilana 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65

Xilose 53, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 65, 66, 67

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos 2

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos 2