

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

OBTENÇÃO DE ADIMENSIONAIS PARA O ESTUDO DE ELECTROSPINNING

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 24/05/2022

Alessandro Estarque de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos
São Carlos – SP
<https://orcid.org/0000-0001-7900-2874>

Mônica Lopes Aguiar

Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos
São Carlos – SP
<https://orcid.org/0000-0003-4540-5776>

Vádila Giovana Guerra

Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos
São Carlos – SP
<https://orcid.org/0000-0002-0096-6329>

RESUMO: Números adimensionais são facilitadores para a descrição matemática de relações entre diferentes forças envolvidas em diversos fenômenos, bem como para a realização de experimentos e análises com múltiplas variáveis. No presente trabalho, são apresentados adimensionais desenvolvidos a partir do teorema de Vaschy-Buckingham, considerando o processo de produção de nanofibras via *electrospinning*. No desenvolvimento, as propriedades físico-químicas do fluido são colocadas em destaque. Os adimensionais obtidos foram utilizados com dados experimentais da literatura e suas possíveis aplicações foram exploradas em um

estudo teórico sobre filtração de nanopartículas. Foi possível utilizar o adimensional e os dados experimentais da literatura para prever a performance de meios filtrantes de álcool polivinílico (PVA) produzidos com diferentes tempos de fiação para diferentes distribuições de tamanho de partícula. Com a utilização dos adimensionais, futuros trabalhos poderão definir regimes de operação e nos quais poderá ser possível obter fibras a partir de *electrospinning* de acordo com as propriedades da solução, bem como definir regimes de ocorrência de nódulos (*beads*) nas fibras de acordo com estas propriedades.

PALAVRAS-CHAVE: Números adimensionais. Filtração de Ar. *Electrospinning*. Nanofibras. Nanopartículas.

OBTENTION OF DIMENSIONLESS NUMBERS FOR THE STUDY OF ELECTROSPINNING

ABSTRACT: Dimensionless numbers are useful to describe relationships between different forces involved in several phenomena, besides their use for the execution of experiments and analyses with several variables. The dimensionless numbers presented in this work were developed using the Vaschy-Buckingham theorem considering the process of nanofibers production via *electrospinning*. In the theoretical development, the physical-chemical properties of the polymer fluid were highlighted. The dimensionless numbers obtained were used with experimental data from the scientific literature and their possible applications were explored in

a theoretical study on nanoparticle filtration. It was possible to use the dimensionless number and the experimental data to predict the performance of polyvinyl alcohol (PVA) filter media produced with different spinning times for different particle size distributions. By using the dimensionless numbers, further works may determine operation regimes in which the obtention of fibers through electrospinning are viable in accordance with the solution properties. They also may determine operation regimes in which beads appear in the fibers in accordance with these properties.

KEYWORDS: Dimensionless Numbers. Air Filtration. Electrospinning. Nanofibers. Nanoparticles.

1 | INTRODUÇÃO

A filtração de gases é um dos processos mais exitosos de separação gás-sólido para a mitigação da emissão de particulados à atmosfera, sendo possível obter eficiências de coleta próximas a 100% em uma ampla faixa granulométrica (SUTHERLAND; CHASE, 2008). Sua operação baseia-se na atuação conjunta de uma série de mecanismos físicos que culminam na aderência da partícula dispersa no fluido sobre a fibra do meio filtrante. Contudo, a coleta de nanopartículas é dificultada devido à sua massa desprezível (que resulta em baixas eficiências dos mecanismos gravitacionais e inerciais) e pequeno volume (baixa eficiência de interceptação direta) (HINDS, 1998).

A confecção de meios filtrantes contendo nanofibras através do processo de *electrospinning* tem sido uma aposta tecnológica para contornar este problema. Este método consiste na passagem de fluido polimérico por um capilar conectado a uma fonte de alta tensão, que gera uma diferença de potencial entre o capilar e um coletor localizado a uma distância específica. As forças elétricas advindas da diferença de potencial, a partir de uma voltagem crítica, superam a tensão superficial do fluido. Isto forma um jato que se prolonga de uma formação cônica conhecida como cone de Taylor e que se estende até atingir o coletor, produzindo um emaranhado de fibras com a volatilização do solvente que solubilizava o polímero, no caso de o fluido polimérico ser uma solução (RENEKER; CHUN, 1996).

Como forma de abordagem do complexo processo de *electrospinning* de soluções poliméricas, o emprego de números adimensionais com as propriedades destes fluidos (condutividade elétrica, tensão superficial e viscosidade) e variáveis de processo (vazão de alimentação, voltagem aplicada, distância entre agulha e coletor, rotação do coletor, campo elétrico, condições ambientais etc.) poderia reduzir a quantidade de variáveis a serem avaliadas. Na literatura científica, números adimensionais que foram obtidos a partir do teorema dos grupos π de Vaschy-Buckingham têm alcançado sucesso na minimização do número de variáveis avaliadas, simplificando os esforços na aquisição de resultados teóricos e experimentais para processos sob a influência de múltiplos efeitos (WELTY, 2008). Alguns trabalhos envolvendo *electrospinning*, de fato, produziram números adimensionais

para descrever especificamente a formação e instabilidade dos jatos de polímero e as características das fibras produzidas (FENG, 2001; McKINLEY, 2005; GADKARI, 2014; YARIN *et al.*, 2014). Contudo, não foi encontrado um trabalho que sumarizasse as principais variáveis de processo e as propriedades do fluido, desde a formação do cone de Taylor até a evaporação do solvente durante a deposição das fibras no coletor, especialmente no caso de coletores rotativos. Salienta-se que este tipo de aparato promove uma fluidodinâmica distinta relacionada à deposição das fibras, ao seu alinhamento na trama de acordo com a velocidade de rotação e à maior taxa de evaporação de solvente quando se compara com processos usando-se coletores fixos (RAMAKRISHNA *et al.*, 2005; MEDEIROS *et al.*, 2008).

Neste trabalho, será apresentado um desenvolvimento de adimensionais a partir da teoria dos grupos π de Vaschy-Buckingham, que poderá ser demonstrado como útil em estudos envolvendo o processo de *electrospinning*, sendo este um processo que sofre influência de inúmeras variáveis de alimentação e operacionais. Os adimensionais desenvolvidos neste trabalho serão aplicados utilizando-se dados experimentais obtidos na literatura para a predição da eficiência de meios filtrantes de nanofibras para a filtração de nanopartículas. Com os resultados deste trabalho, espera-se que estudos posteriores possam averiguar demais aplicações dos adimensionais obtidos para que, em caso de êxito, facilitem futuros estudos sobre este processo.

2 | DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Para a obtenção dos adimensionais, foi realizado um levantamento das principais variáveis que influenciam o processo de *electrospinning* quanto às condições de alimentação (propriedades da solução polimérica) e condições operacionais (vazão de alimentação de solução, voltagem, diâmetro da agulha/capilar etc) (RAMAKRISHNA *et al.*, 2005; YARIN *et al.*; 2014). Assim, a Tabela 1 apresenta as variáveis consideradas para a aplicação do teorema π de Vaschy-Buckingham (WELTY, 2008) baseando-se nos resultados recorrentes da literatura.

Símbolo	Variável	Dimensões do Sistema Internacional de Unidades
ω'	Diâmetro da fibra	[L]
α'	Densidade do fluido	[M L ⁻³]
β'	Viscosidade do fluido	[M L ⁻¹ T ⁻¹]
γ'	Condutividade do fluido	[A ² T ³ M ⁻¹ L ⁻³]
δ'	Tensão superficial do fluido	[M T ⁻²]
ε'	Voltagem	[M L ² A ⁻¹ T ⁻³]
ζ'	Distância entre agulha e coletor	[L]

η'	Diâmetro da agulha	[L]
θ'	Vazão do fluido	[L ³ T ⁻¹]
ϕ'	Rotação do coletor	[L T ⁻¹]
ψ'	Pressão de vapor do fluido	[M L ⁻¹ T ⁻²]

Tabela 1. Variáveis consideradas para a obtenção dos grupos π

Da Tabela 1, verifica-se a existência de 11 variáveis principais (sendo a variável ω' designada como dependente das demais) e 4 dimensões (comprimento L, massa M, tempo T e intensidade de corrente elétrica A). Portanto 7 grupos π possíveis. Aqui, não estão sendo consideradas propriedades adimensionais, como as permissividades elétricas relativas do meio e do fluido (YARIN *et al.*, 2014). De acordo com o teorema, um grupo principal de variáveis deve ser considerado de forma a aparecer em todos os agrupamentos formados (WELTY, 2008). Tendo em vista a preocupação com as propriedades físico-químicas do fluido, as variáveis β' , γ' e δ' foram escolhidas para formar o grupo principal. Assim, o desenvolvimento dos grupos π resulta em:

$$\pi_1: \alpha'^a \times \beta'^b \times \gamma'^c \times \delta'^d \times \zeta'^1 = L^0 \times M^0 \times T^0 \times A^0 \quad (1.a)$$

$$L: -3a - b - 3c + 0 + 2 = 0 \quad (1.b)$$

$$M: a + b - c + d + 1 = 0 \quad (1.c)$$

$$T: 0 - b + 3c - 2d - 3 = 0 \quad (1.d)$$

$$A: 0 + 0 + 2c + 0 - 1 = 0 \quad (1.e)$$

Resolvendo o sistema de equações composto pelas Equações 1.b–e de forma a compor um adimensional π_1 , tem-se que $a=0$; $b=0,5$; $c=0,5$; $d=-1$. Assim, o grupo π_1 fica:

$$\pi_1 = \frac{\text{velocidade} \times (\text{viscosidade} \times \text{condutividade})^{1/2}}{\text{tensão superficial}} \quad (1.f)$$

A obtenção dos demais grupos π é análoga:

$$\pi_2: \alpha'^a \times \beta'^b \times \gamma'^c \times \delta'^d \times \zeta'^1 = L^0 \times M^0 \times T^0 \times A^0 \quad (2.a)$$

$$L: -3a - b - 3c + 0 + 1 = 0 \quad (2.b)$$

$$M: a + b - c + d + 0 = 0 \quad (2.c)$$

$$T: 0 - b + 3c - 2 + 0 = 0 \quad (2.d)$$

$$A: 0 + 0 + 2c + 0 + 0 = 0 \quad (2.e)$$

$$\pi_2 = \frac{\text{densidade} \times \text{tensão superficial} \times \text{distância agulha coletor}}{\text{viscosidade}^2} \quad (2.f)$$

Por possuírem a mesma dimensão que ζ , ω' e η' possuem desenvolvimento análogo. Assim:

$$\pi_3 = \frac{\text{densidade} \times \text{tensão superficial} \times \text{diâmetro agulha}}{\text{viscosidade}^2} \quad (3)$$

$$\pi_4 = \frac{\text{densidade} \times \text{tensão superficial} \times \text{diâmetro fibras}}{\text{viscosidade}^2} \quad (4)$$

Para os demais grupos:

$$\pi_5: \alpha^{a^5} \times \beta^{b^5} \times \gamma^{c^5} \times \delta^{d^5} \times \theta^{e^5} = L^0 \times M^0 \times T^0 \times A^0 \quad (5.a)$$

$$L: -3a - b - 3c + 0 + 3 = 0 \quad (5.b)$$

$$M: a + b - c + d + 0 = 0 \quad (5.c)$$

$$T: 0 - b + 3c - 2 - 1 = 0 \quad (5.d)$$

$$A: 0 + 0 + 2c + 0 + 0 = 0 \quad (5.e)$$

$$\pi_5 = \frac{\text{densidade}^3 \times \text{tensão superficial} \times \text{vazão}}{\text{viscosidade}^3} \quad (5.f)$$

$$\pi_6: \alpha^{a^6} \times \beta^{b^6} \times \gamma^{c^6} \times \delta^{d^6} \times \psi^{e^6} = L^0 \times M^0 \times T^0 \times A^0 \quad (6.a)$$

$$L: -3a - b - 3c + 0 - 1 = 0 \quad (6.b)$$

$$M: a + b - c + d + 1 = 0 \quad (6.c)$$

$$T: 0 - b + 3c - 2 - 2 = 0 \quad (6.d)$$

$$A: 0 + 0 + 2c + 0 + 0 = 0 \quad (6.e)$$

$$\pi_6 = \frac{\text{viscosidade} \times \text{rotação coletor}}{\text{tensão superficial}} \quad (6.f)$$

$$\pi_7: \alpha^{a^7} \times \beta^{b^7} \times \gamma^{c^7} \times \delta^{d^7} \times \phi^{e^7} = L^0 \times M^0 \times T^0 \times A^0 \quad (7.a)$$

$$L: -3a - b - 3c + 0 + 1 = 0 \quad (7.b)$$

$$M: a + b - c + d + 0 = 0 \quad (7.c)$$

$$T: 0 - b + 3c - 2 - 1 = 0 \quad (7.d)$$

$$A: 0 + 0 + 2c + 0 + 0 = 0 \quad (7.e)$$

$$\pi_7 = \frac{\text{viscosidade}^3 \times \text{pressão de vapor}}{\text{tensão superficial}^3 \times \text{densidade}} \quad (7.f)$$

Como descrito por Welty (2008), os parâmetros adimensionais permitem relacionar a predominância das forças atuantes em uma superfície de controle durante um fenômeno físico. O parâmetro π_1 , por exemplo, pode determinar a predominância entre as forças elétricas (campo elétrico, representado pela voltagem aplicada), viscosas (viscosidade) e de coesão entre as moléculas do fluido (tensão superficial) exercidas sobre o fluido. O parâmetro π_5 , quando se considera a vazão de fluido na ponta de seção transversal circular da agulha, pode ser rearranjado como segue:

$$\pi_5 = \frac{\text{densidade} \times \text{tensão superficial} \times \text{diâmetro agulha}}{\text{viscosidade}^3} \times \frac{\pi}{4} \times \frac{\text{viscosidade} \times \text{densidade} \times \text{diâmetro agulha}}{\text{viscosidade}} = \frac{1}{\text{Oh}} \times \frac{\pi}{4} \times Re \quad (8)$$

em que Oh é um adimensional conhecido como número de Ohnesorge, que relaciona exclusivamente as forças inerciais, viscosas e a tensão superficial do fluido (McKINLEY, 2005) e Re é o número de Reynolds, bastante utilizado em Mecânica dos fluidos para a determinação de regimes de escoamento diversos e que relaciona forças inerciais e viscosas no fluido (WELTY, 2008). Neste caso em específico da Equação 8, no qual o comprimento característico foi tomado como sendo o diâmetro da agulha, a velocidade em questão é a razão entre a vazão do fluido polimérico e a área de seção transversal da

agulha.

A combinação de adimensionais também pode resultar em outros parâmetros conhecidos. A razão π_1/π_2 resulta em:

$$\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\text{voltagem}}{\text{distância agulha-coletor}} \times \frac{\text{intensidade} \times \text{condutividade}}{\text{tensão superficial}^2 \times \text{densidade}} \quad (9)$$

sendo a razão voltagem e distância entre agulha e coletor comumente designada de campo elétrico pseudo-homogêneo (RIEHLE, 1997; SHIN *et al.*, 2001; GADKARI *et al.*, 2014; ZARGARIAN; HADDADI-ASL, 2017). No entanto, como a distância entre agulha e coletor está relacionada não apenas com a intensidade do campo elétrico, mas também com o tempo disponível para o desenvolvimento do jato e para a evaporação do solvente presente nas fibras durante a deposição (*flight time*) (TONG, WANG, 2010; ZAKARIA *et al.*, 2012; CAO *et al.*, 2018), pode ser mais conveniente manter a distância agulha-coletor como variável separada da voltagem.

Especialmente quanto à taxa de evaporação de solvente nas fibras durante sua deposição sobre o coletor, os adimensionais π_7 e π_8 , juntamente a π_2 , podem ser úteis para descrever o comportamento de secagem do solvente durante o processo, sendo o parâmetro π_8 específico para coletores rotativos. Embora reconheça-se que as condições operacionais promovam diferentes taxas de evaporação e, com isto, a produção de fases cristalinas distintas no material formado (GILLER *et al.* 2010), trabalhos da literatura geralmente preocupam-se com o efeito da rotação do coletor sobre o alinhamento das fibras formadas, característica interessante para Engenharia de Tecidos (BOLAND *et al.*, 2001; MEDEIROS *et al.*, 2008; TONG, WANG, 2010; ANINDYAJATI *et al.*, 2015). Contudo, a literatura referente ao efeito da rotação de coletores rotativos sobre a fluidodinâmica do jato e sua secagem ainda é incipiente e estudos futuros podem ser realizados utilizando-se adimensionais como estes.

3 | METODOLOGIA

Com o propósito de relacionar o conteúdo dos adimensionais com os resultados obtidos no presente trabalho, foram realizadas algumas predições utilizando o ferramental teórico para o cálculo da eficiência teórica de filtração utilizado por Oliveira *et al.* (2021a). Também foram utilizados dados experimentais de Oliveira *et al.* (2021b) obtidos para as propriedades das soluções poliméricas de PVA, diâmetros de fibra e a densidade de empacotamento de meios filtrantes de nanofibras de PVA produzidas por *electrospinning*, exibidos na Tabela 2. Assim, se buscou estimar a eficiência de coleta, a queda de pressão e, conseqüentemente, o fator de qualidade avaliando faixas de tamanho de partículas (diferentes medianas) e tempos de fiação distintos dos utilizados nestes trabalhos.

Para a determinação da queda de pressão dos meios filtrantes limpos (ou queda de pressão inicial, que determina o consumo energético do processo), utilizou-se a equação

obtida por Davies (1953), que é expressa como:

$$\frac{\Delta P_0 \times (D/2)^2}{L \times v_g} = v \times 16\sigma^{1,5} \times (1 + 56\sigma^{-3}) \quad (10)$$

sendo μ_g e v respectivamente a viscosidade e a velocidade do ar.

O fator de qualidade (q_f) foi usado para avaliar a performance dos meios filtrantes, baseado na eficiência de coleta global e na queda de pressão inicial, como segue (HINDS, 1998):

$$q_f = \frac{-\ln[1 - E(\%)/100]}{\Delta P_0} \quad (11)$$

em que E é a eficiência de coleta global calculada de acordo com a modelagem matemática de Oliveira *et al.* (2021a).

C (% m/m)	μ (Pa.s)	S (S/m)	σ (N/m)	D (nm)	α (-)
0	3,27E+00	7,87E-02	4,89E-02	234	0,047
0,25	4,91E+00	7,92E-02	3,65E-02	229	0,047
0,50	3,54E+00	7,72E-02	3,43E-02	186	0,043
0,75	3,64E+00	7,76E-02	3,36E-02	191	0,052
1,00	3,59E+00	7,66E-02	3,24E-02	180	0,054

Legenda: C: concentração de surfactante; μ : viscosidade; ρ : densidade; S: condutividade elétrica; σ : tensão superficial; D: diâmetro de fibra; α : densidade de empacotamento.

Tabela 2. Caracterização dos elementos filtrantes de Oliveira *et al.* (2021b)

Como o estudo experimental de Oliveira *et al.* (2021b) consistiu no estudo da variação da concentração de surfactante Triton X-100 na solução polimérica sobre o diâmetro das nanofibras formadas, as propriedades dos meios filtrantes na presente análise poderiam ser ajustadas em função desta variável, a princípio. No entanto, isto limitaria a abrangência da análise, uma vez que os resultados obtidos não seriam representativos em estudos posteriores nos quais a concentração do polímero fosse a variável alterada na composição das soluções, por exemplo. Assim, se buscou relacionar as variáveis finais (eficiência, queda de pressão e fator de qualidade) em função das propriedades físicas das soluções. Para isto, o adimensional criado no estudo foi utilizado, uma vez que um único adimensional (τ_1) reúne informações sobre a tensão superficial, a viscosidade e a condutividade elétrica. Dessa forma, a variável “concentração de surfactante” foi utilizada apenas para obter funções polinomiais simples que expressam a relação da concentração com as propriedades da solução a fim de se obter τ_1 como função destas.

Salienta-se que os meios filtrantes produzidos experimentalmente por Oliveira *et al.* (2021b) foram produzidos sobre substratos constituídos de meios filtrantes de microfibras de celulose. No entanto, tais substratos foram utilizados apenas como suporte mecânico naquele trabalho, já que possuíam baixas eficiência e queda de pressão na filtração

de nanopartículas. Por isso, no presente trabalho desconsiderou-se a presença de tais substratos nos cálculos.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para exemplificar a utilização dos adimensionais em dados reais, foram utilizados os dados da Tabela 2 para relacionar os adimensionais π_1 (referente às propriedades da solução polimérica) e π_4 (contendo a variável diâmetro de fibra). Assim, a Figura 1 (a) apresenta os resultados calculados. A curva da Figura 1 (a) mostra um comportamento de máximo na concentração de 0,25% m/m de surfactante, o que está relacionado ao aumento expressivo da viscosidade em relação à solução sem surfactante (50% de variação desta propriedade frente às variações de 0,54% e -25% respectivamente para a condutividade elétrica e tensão superficial). Assim, a variação de π_1 para este caso está mais associada à variação da viscosidade e da tensão superficial, visto que o Triton X-100 utilizado é um surfactante não-iônico. O adimensional π_1 possui dependência inversamente proporcional com esta propriedade, conforme Equação 1.f. Em relação à dependência do diâmetro das fibras com as propriedades da solução, o comportamento exibido na Figura 1 (b) exhibe decréscimo de acordo com a lei de potência (R^2 igual a 0,9708).

Conforme mencionado anteriormente, a utilização da variável concentração de surfactante como variável independente limitaria a abrangência da análise teórica, uma vez que os resultados obtidos não poderiam não ser representativos em estudos posteriores nos quais a concentração do polímero fosse a variável alterada na composição das soluções, por exemplo. Dessa forma, a variável concentração de surfactante foi utilizada no presente estudo apenas para obter funções polinomiais simples que expressam a relação da concentração com as propriedades da solução a fim de se obter π_1 como função destas, como mostra a Figura 2. Em outros estudos, outras variáveis (como a concentração de polímero) podem eventualmente ser utilizadas para obter os valores destas propriedades. Visto que a faixa de zero a 0,25% m/m apresentou valores de propriedades destoantes do restante da faixa de concentrações, possivelmente devido às diferentes interações do surfactante em solução (Oliveira *et al.*, 2021b), optou-se por trabalhar apenas com a faixa de 0,25-1,0% m/m. A relação entre o adimensional π_1 e a concentração já está exibida na Figura 1 (a).

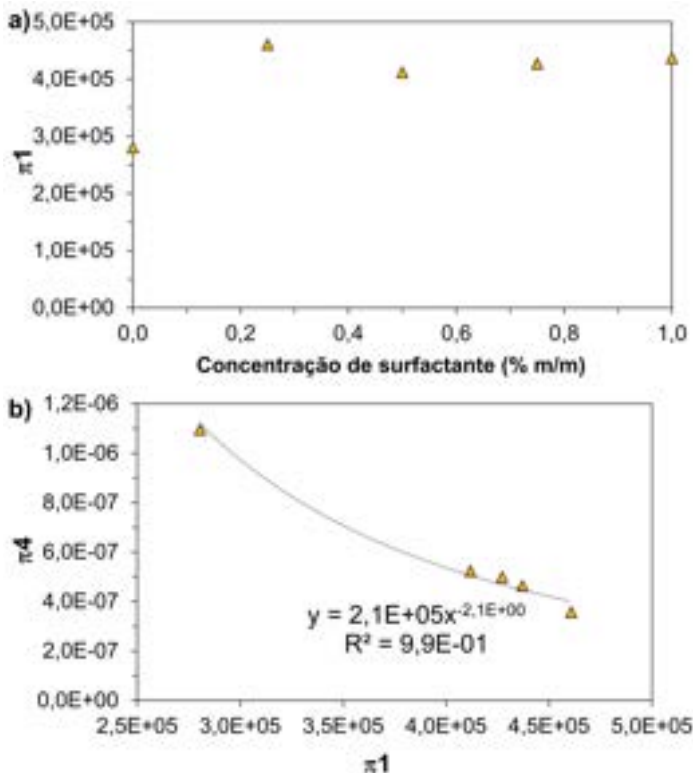


Figura 1. Adimensional π_1 em função da concentração de PVA (a) e π_1 em função de π_2 (b)

Com os ajustes polinomiais, foi possível obter pontos para serem plotados nos gráficos além daqueles quatro obtidos experimentalmente referentes às concentrações avaliadas (0,25; 0,50; 0,75; 1,0% m/m). Deste modo, para a obtenção das eficiências globais de coleta em função de π_1 , foram utilizadas as equações do trabalho teórico de Oliveira *et al.* (2021a). A queda de pressão foi obtida a partir da equação de Davies (1953). Foram feitas simulações considerando medianas de distribuição em termos mássicos de 20; 50; 100 e 200 nm, com desvios padrões geométricos de 1,61 para todas as distribuições. Este último parâmetro é igual ao do trabalho experimental de Oliveira *et al.* (2021b), enquanto a mediana naquele trabalho era de ~90 nm em termos mássicos. Além da faixa de concentração de surfactante (implícito no adimensional), foi considerado também o tempo de fiação. Manteve-se a velocidade de ar de 5 cm/s, bem como as demais condições ambientais e propriedades físicas da partícula, conforme utilizadas no trabalho de Oliveira *et al.* (2021b).

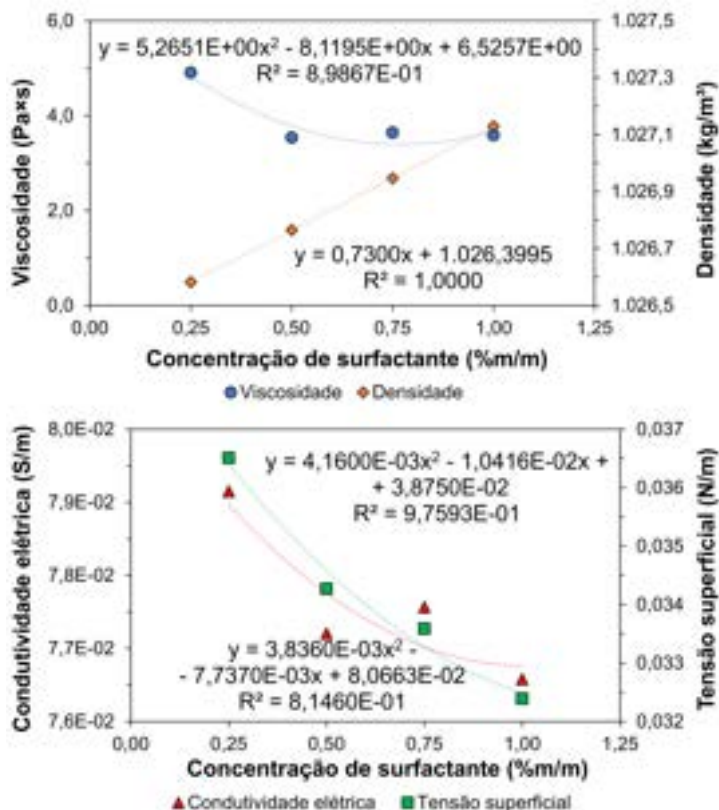


Figura 2. Propriedades das soluções de PVA utilizadas no trabalho de Oliveira *et al.* (2021b) em função da concentração de surfactante

Para introduzir a discussão, a Figura 3 exibe como os dados se apresentam quando dados em termos do adimensional π_1 (gráficos à esquerda) e de concentração do surfactante (gráficos à direita), para a mediana de 20 nm.

Conforme se verifica na Figura 3, o comportamento das curvas com a variável concentração é bastante oscilatório. Os perfis utilizando o adimensional são mais suaves. Tal diferença de comportamentos decorre de o adimensional não ter uma relação linear com a concentração. Em outras palavras, o acréscimo entre 0,25 e 1,0% m/m de concentração não corresponde linearmente ao acréscimo entre $\sim 4,1$ e $\sim 4,4 \times 10^5$ de π_1 . Isto ocorre uma vez que tal parâmetro aglutina várias propriedades da solução que possuem relações distintas com a concentração de surfactante (Oliveira *et al.*, 2021b). No entanto, como exibido na Figura 3, os fenômenos físicos envolvidos na produção das fibras e sua relação intrínseca com as propriedades da solução continuam a ser descritos pelo adimensional. Além disso, a forma das curvas obtidas com π_1 permite uma parametrização mais simples (polinômios de baixo grau) para análises teóricas. Assim, os próximos gráficos (Figuras 4 e 5) serão dados apenas em termos do adimensional.

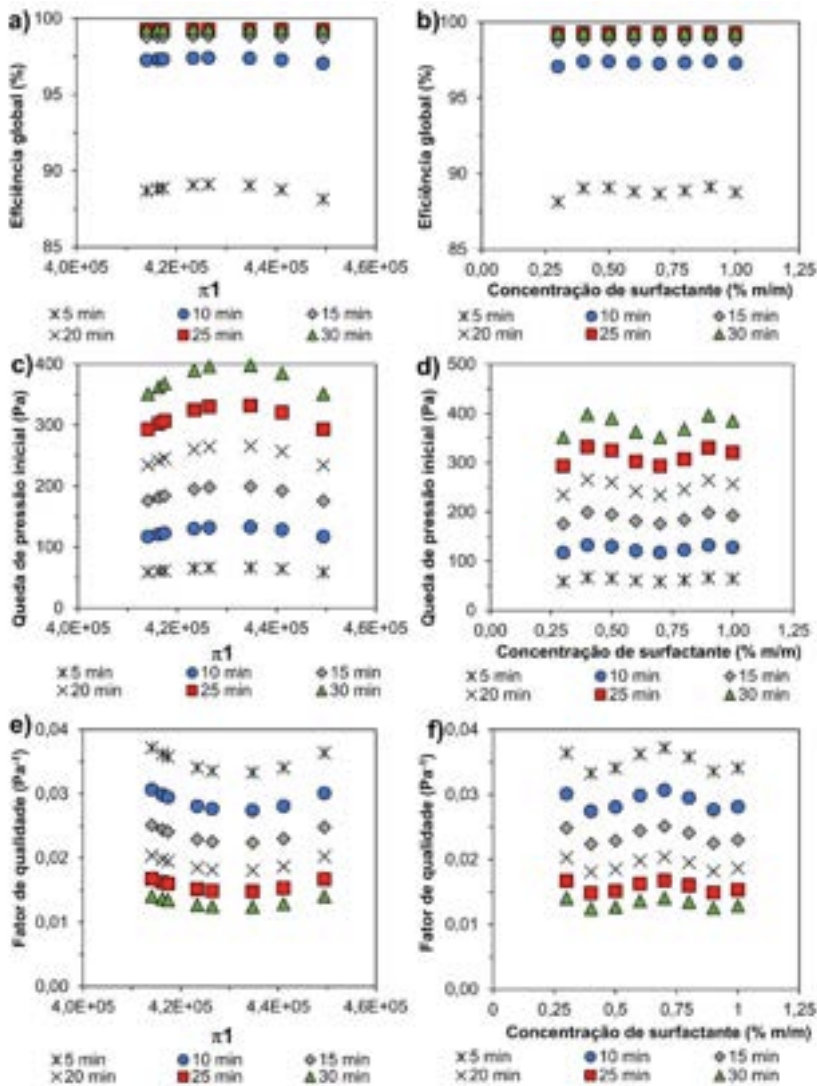


Figura 3. Eficiência (a, b), queda de pressão inicial (c, d) e fator de qualidade (e, f) em função de π_1 (gráficos à esquerda) e da concentração de surfactante (à direita)

Dos resultados das Figuras 4 e 5, fica claro que o fator de qualidade decai abruptamente com o aumento da mediana de tamanho de partícula utilizada. É preciso lembrar que o mínimo de eficiência fracionária (para cada diâmetro de partícula) de filtração encontra-se geralmente na região entre 100 e 200 nm (HINDS, 1998), o que prejudica a eficiência global de coleta. Visto que a queda de pressão é mais fortemente afetada pelo aumento da espessura da camada de fibras (que aumenta com o tempo de fiação) que a eficiência, o fator de qualidade decai bruscamente com essa variável, uma vez que a eficiência das fibras fiadas não está próxima o suficiente de 100% para que o fator de

qualidade aumente expressivamente.

Uma consequência direta desta modelagem matemática é poder identificar previamente, a partir de uma queda de pressão limite, por exemplo, quais condições experimentais fornecem as melhores performances de filtração: obtendo-se as propriedades físicas do fluido, estando na faixa avaliada para o adimensional, seria possível calcular π_1 e realizar as devidas combinações com o tempo de fiação para obter a performance desejada. Estudos experimentais com as outras variáveis de operação do *electrospinning* (voltagem, distância agulha-coletor etc.) poderiam revelar as relações dos outros adimensionais com as variáveis de filtração e novas simulações poderiam ser feitas, assim por diante.

Aqui é preciso frisar que o ferramental teórico utilizado para as simulações (Oliveira *et al.*, 2021a), superestimou os dados experimentais para partículas abaixo de 100 nm de diâmetro, seja pela simplicidade de algumas equações ou pela desconsideração de efeitos como a ressuspensão das partículas. Ainda assim, seria possível nortear pesquisas experimentais posteriores, que poderiam confirmar ou não o afastamento dos dados teóricos.

5 | CONCLUSÕES

Neste estudo foram exploradas algumas aplicações dos adimensionais obtidos pelo teorema π de Vaschy-Buckingham para simplificar a análise da influência das propriedades físico-químicas sobre o processo de *electrospinning*. Comportamentos puderam ser evidenciados e sinalizaram que o diâmetro das fibras pode ser predito a partir das propriedades das soluções poliméricas (viscosidade, condutividade elétrica e tensão superficial), a depender de sua composição. Também foi possível utilizar o adimensional π_1 e os dados experimentais obtidos no presente trabalho para prever a performance de meios filtrantes de PVA produzidos com diferentes tempos de fiação por *electrospinning* para diferentes faixas de tamanho de partícula.

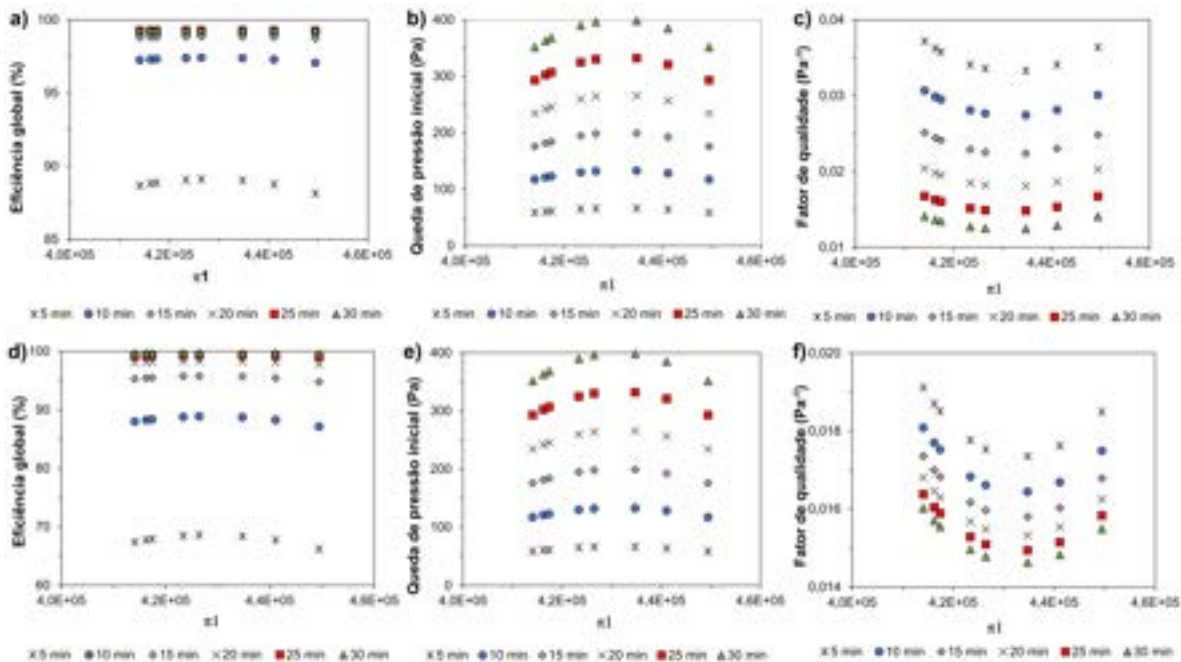


Figura 4. Eficiência (a, d), queda de pressão inicial (b, e) e fator de qualidade (c, f) em função de τ_i para mediana de 20 nm (a, b, c) e 50 nm (d, e, f)

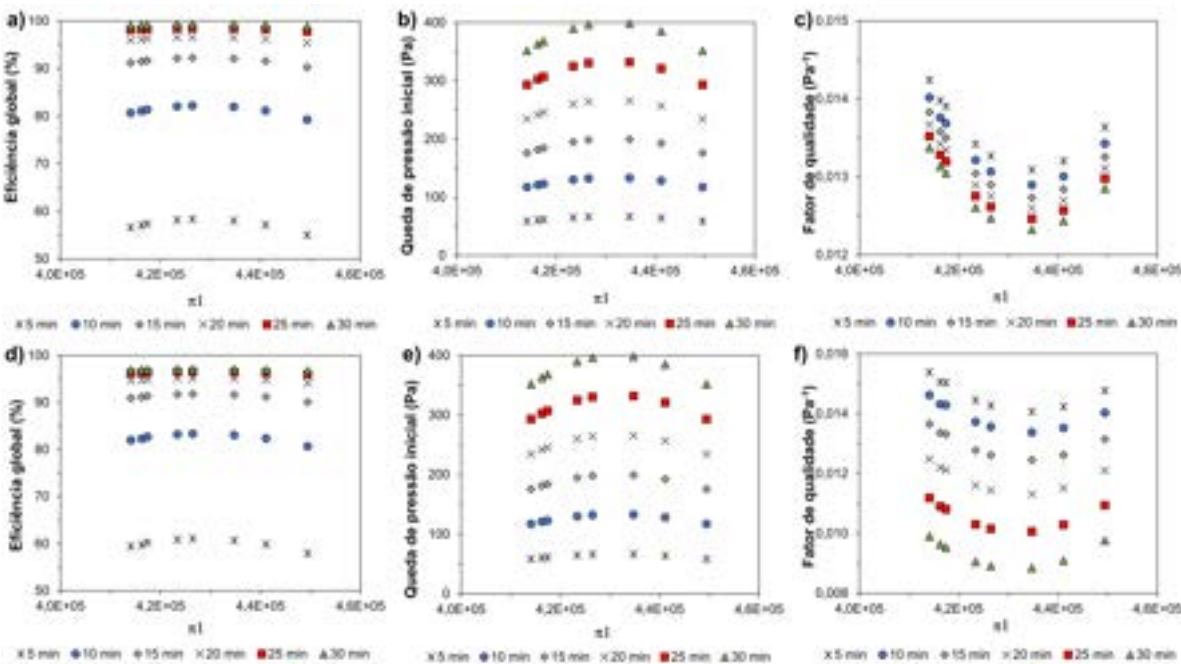


Figura 5. Eficiência (a, d), queda de pressão inicial (b, e) e fator de qualidade (c, f) em função de τ_i para mediana de 100 nm (a, b, c) e 200 nm (d, e, f)

O adimensional π_1 , atuando como intermediário entre as propriedades das soluções poliméricas e as variáveis de filtração, forneceu curvas de comportamentos mais suaves que utilizando-se a variável independente “concentração da solução”, podendo indicar maior praticidade e aplicabilidade para uso em análises teóricas deste tipo.

Com a utilização dos adimensionais, futuros trabalhos poderão definir regimes de operação nos quais é possível obter fibras a partir de *electrospinning* de acordo com as propriedades da solução, bem como definir regimes de ocorrência de nódulos (*beads*) nas fibras de acordo com estas propriedades. Ainda, os resultados exibidos neste trabalho consideravam as condições operacionais constantes (voltagem, vazão de alimentação de solução polimérica, temperatura e umidade, rotação do coletor no caso de coletor rotativo etc). Entretanto, estes adimensionais podem ser utilizados em um planejamento estatístico de experimentos para a obtenção de correlações para o processo que independam do sistema de unidades adotado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (141299/2019-3) e à Capes (001) pelo apoio financeiro fornecido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANINDYAJATI, A.; BOUGHTON, P.; RUYS, A. **The Effect of Rotating Collector Design on Tensile Properties and Morphology of Electrospun Polycaprolactone Fibres**. MATEC Web of Conferences, vol. 27, 02002, 2015.
- BOLAND, E. D.; WNEK, G. E.; SIMPSON, D. G.; PAWLOWSKI, K. J.; BOWLIN, G. L. **Tailoring tissue engineering scaffolds using electrostatic processing techniques: A study of poly(glycolic acid) electrospinning**. Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, vol. 38, n. 12, pp. 1231 – 1243, 2001.
- CAO, D.; SHI, Y.; FU, Z.; LI, X.; YANG, L.; YAN, D. **Controllable fabrication of micro/nanostructures by electrospinning from polystyrene/poly(vinyl alcohol) emulsion dispersions**. Journal of Applied Polymer Science, vol. 135, n. 26, 46288, 2018.
- DAVIES, C. N. **The Separation of Airborne Dust and Particles**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 167, n. 1b, pp. 185 – 213, 1953.
- FENG, J. J. **The stretching of an electrified non-Newtonian jet: A model for electrospinning**. Physics of Fluids, vol. 14, n. 11, pp. 3912 – 3926, 2001.
- GADKARI, S. B. **Scaling analysis for electrospinning**. Springer Plus, vol. 3, 705, 2014. Retirado de: <<http://www.springerplus.com/content/3/1/705>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- GILLER, C. B.; CHASE, B.; RABOLT, J. F.; SNIVELY, C. M. **Effect of solvent evaporation rate on the crystalline state of electrospun Nylon 6**. Polymer, vol. 51, pp. 4225 – 4230, 2010.

HINDS, C. W. **Aerosol Technology: Properties, Behaviour, and Measurement of Airborne Particles**. 2^a ed. New York: John Wiley, 1998.

McKINLEY, G. **Dimensionless Groups For Understanding Free Surface Flows of Complex Fluids**. *Rheology Bulletin*, vol. 74, n. 2, 2005. Retirado de: <<https://www.rheology.org/SoR/Publications/RheoBulletin/Collection?Page=3&Count=12&YearStart=1937&YearEnd=2020>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

MEDEIROS, E. S.; MATTOSO, L. H. C.; ITO, E. N.; GREGORSKI, K. S.; ROBERTSON, G. H.; OFFEMAN, R. D.; WOOD, D. F.; ORTS, W. J.; IMAM, S. H. **Electrospun Nanofibers of Poly(vinyl alcohol) Reinforced with Cellulose Nanofibrils**. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 2, n. 3, pp. 231 – 242, 2008.

OLIVEIRA, A. E.; AGUIAR, M. L.; GUERRA, V. G. **Theoretical Analysis of Air Filtration Phenomena for a Micro-Fibrous Filter Medium Enhanced with Electrospun Nanofibres**. *Aerosol Science and Engineering*, v. 5, p. 81–92, 2021a.

OLIVEIRA, A. E.; AGUIAR, M. L.; GUERRA, V. G. **Improved filter media with PVA/citric acid/Triton X-100 nanofibres for filtration of nanoparticles from air**. *Polymer Bulletin*, v. 78, p. 6387–6408, 2021b.

RAMAKRISHNA, S.; FUJIHARA, K.; TEO, W.-E.; LIM, T.-C.; MA, Z. **Electrospinning Process**. In: _____. *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. New Jersey: World Scientific. Hoboken: John Wiley & Sons. pp. 90 – 154, 2005.

RENEKER, D. H.; CHUN, I. **Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning**. *Nanotechnology*, vol. 7, n. 3, p. 216 – 223, 1996.

RIEHLE, C. **Electrostatic precipitation**. In: SEVILLE, J. P. K. (ed) *Gas cleaning in demanding applications*. London: Blackie Academic & Professional, 1997, pp. 193–228.

SHIN, Y. M.; HOHMAN, M. M.; BRENNER, M. P.; RUTLEDGE, G. C. **Experimental characterization of electrospinning: the electrically forced jet and instabilities**. *Polymer*, vol. 42, pp. 9955 – 9967, 2001.

SUTHERLAND, K. CHASE, G. **Filters and Filtration Handbook**. 5^a ed. [s.l.]: Elsevier, 2008.

TONG, H.-W.; WANG, M. **Electrospinning of fibrous polymer scaffolds using positive voltage or negative voltage: a comparative study**. *Biomedical Materials*, vol. 5, 054110, 2010.

WELTY, J. R.; WICKS, C. E.; WILSON, R. E.; RORRER, G. L. **Dimensional Analysis and Similitude**. In: _____. *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*. 5^a ed. Danvers: John Wiley & Sons, pp. 125–136, 2008.

YARIN, A. L.; POURDEYHIMI, B.; RAMAKRISHNA, S. **General quasi-one-dimensional equations of dynamics of free liquid jets, capillary and bending instability**. In: _____. *Fundamentals and Applications of Micro- and Nanofibers*. New York: Cambridge University Press. pp. 63 – 88, 2014.

ZAKARIA, S. M.; ZEIN, S. H. S.; OTHMAN, M. R.; JANSEN, J. A. **Hydroxyapatite nanoparticles: Electrospinning and calcination of hydroxyapatite/polyvinyl butyral nanofibers and growth kinetics**. Journal of Biomedical Materials Research, vol. 101A, pp. 1977 – 1985, 2012.

ZARGARIAN, S. SH.; HADDADI-ASL, V. **Surfactant-assisted water exposed electrospinning of novel super hydrophilic polycaprolactone based fibers**. Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology, vol. 45, n. 5, pp. 871 – 880, 2017.

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](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA QUÍMICA:

Desenvolvimento de novos
processos e produtos 2