

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

CONTROLE INFERENCIAL PARA ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS

Data de aceite: 01/08/2022

Data de submissão: 15/07/2022

Danúbia Lucas Meira Gontijo

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Química
Uberlândia – MG
<http://lattes.cnpq.br/0611251737457951>

Rafael Yuri Medeiros Barbosa

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Química
Uberlândia – MG
<https://orcid.org/0000-0003-3616-0818>

Rubens Gedraite

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade
de Engenharia Química
Uberlândia – MG
<https://orcid.org/0000-0002-4921-3774>

RESUMO: A economia de energia em processos industriais é um tema cada dia mais atual. Na indústria de alimentos, muita energia é empregada nos processos de esterilização de produtos alimentícios industrializados. Neste trabalho é apresentado o algoritmo de controle que foi desenvolvido e testado no aplicativo matlab/simulink™ visando permitir a economia de energia durante o processo de esterilização. O algoritmo consistiu em estimar a temperatura do produto alimentício utilizando modelo identificado para calcular o valor do índice de letalidade em tempo real. O modelo executa simultaneamente o cálculo da letalidade para a etapa de aquecimento

e para a etapa de resfriamento, a partir de um valor predeterminado da temperatura do produto. Estes valores são somados e o resultado é continuamente comparado com um valor de referência; quando a igualdade entre estes valores é verificada, um sinal discreto é gerado, permitindo interromper o aquecimento e iniciar o resfriamento. Os resultados obtidos foram validados por comparação com os disponíveis na literatura e revelaram boa aderência a estes últimos.

PALAVRAS-CHAVE: Modelamento matemático, simulação computacional, esterilização industrial.

INFERENTIAL CONTROL FOR FOOD STERILIZATION

ABSTRACT: Energy saving in industrial processes is an increasingly current topic. In the food industry, a lot of energy is used in the sterilization processes of industrialized food products. This work presents the control algorithm that was developed and tested in the matlab/simulink™ application in order to allow energy savings during the sterilization process. The algorithm consisted of estimating the temperature of the food product using an identified model to calculate the value of the lethality index in real time. The model simultaneously performs the calculation of lethality for the heating step and for the cooling step, from a predetermined value of the product temperature. These values are summed and the result is continuously compared to a reference value; when the equality between these values is verified, a discrete signal is generated, allowing to stop heating and start cooling. The results obtained were validated by

comparison with those available in the literature and showed good adherence to the latter.

KEYWORDS: Mathematical modeling, computer simulation, industrial sterilization.

1 | INTRODUÇÃO

O processamento térmico de alimentos industrializados consiste no aquecimento de embalagens em autoclaves pressurizadas, que podem ser estacionárias ou rotativas, verticais ou horizontais, e/ou contínuas ou descontínuas. O processamento térmico deve ser especificado por especialistas que, para cada sistema formado por equipamento/ embalagem/alimento, definem as condições de processo, a saber: duração, temperatura de operação, temperatura mínima inicial do alimento, perfil de pressão e programa de desaeração da autoclave (Ohlsson & Bengtsson, 2000).

Em face destes requisitos de qualidade e de segurança, grande cuidado é tomado no cálculo destes tempos de processamento, assim como no controle do tempo e da temperatura vigentes durante os mesmos, para evitar que o alimento seja submetido a um subprocessamento ou a um sobreprocessamento.

“Embora os processos possam ser criteriosamente definidos, a sua aplicação no dia-a-dia da produção industrial foge da idealidade. Problemas operacionais como a falta de energia, queda na geração de vapor de água e falha nos sistemas de controle ocorre com bastante frequência e causam desvios de processo pela flutuação da temperatura do meio de aquecimento. Outros desvios de processo podem ocorrer quando há alteração de parâmetros básicos de processo, tais como: temperatura inicial do produto, tempo de processo mais curto e temperatura do meio de aquecimento uniformemente mais baixa. Quando estes desvios acontecem, o lote - em geral - é reprocessado ou segregado para análise dos registros por um especialista que deve tomar decisões quanto à liberação deste ou o seu descarte. Estes procedimentos são dispendiosos, demorados e quando a opção é feita pelo reprocessamento, resultam num comprometimento da qualidade do alimento” (Germer, 1997).

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo matemático inferencial que será empregado em conjunto com o sistema de controle da autoclave, com a finalidade de garantir determinado nível de letalidade previamente estabelecido para o microrganismo de referência. A letalidade é um índice tipicamente utilizado em processamento térmico de produtos alimentícios, usada para avaliar a mortalidade imposta ao microrganismo de referência.

O emprego de modelos matemáticos capazes de prever as características do produto em função de alterações nas condições de processo é fundamental para um bom desempenho dos sistemas de controle baseados em computador que sejam executados em tempo real (Akterian, 1999).

2 | O PROCESSO DE ESTERILIZAÇÃO DE ALIMENTOS

A esterilização térmica de alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas é um dos métodos mais utilizados quando se diz respeito à preservação de alimentos. É um fator determinante ao bem-estar nutricional da população mundial. Eliminar esporos de bactérias, microrganismos nocivos ao corpo humano, é um dos principais objetivos na esterilização térmica. Esses microrganismos quando presentes nos alimentos produzem uma série de toxinas que mesmo sendo em quantidades infinitesimais, podem ser letais.

Para isso existe o tratamento térmico desses produtos, que consiste em aquecer esses alimentos enlatados em autoclaves pressurizadas em temperatura especificadas e por um período de tempo pré-definido, seguido por uma etapa de resfriamento. Este tratamento deve ser especificado de acordo com cada alimento e também depende muito do tipo de autoclave empregada.

De um modo geral, a indústria de alimentos tem procurado utilizar de forma mais intensiva os sistemas de automação nos processos de enlatamento, com a finalidade de garantir que o processamento térmico imposto elimine, com segurança, os microrganismos indesejáveis no produto alimentício. Para se alcançar tal meta é essencial que o processamento térmico sofra um rígido controle toda vez que for empregado. Na Figura 1 é apresentado um fluxograma de engenharia que mostra as malhas de controle de uma autoclave vertical típica.

Para que a esterilização seja bem sucedida, é de fundamental importância o controle da temperatura à qual o alimento será exposto e do tempo de exposição àquela temperatura (Gedraite & Leonhardt, 1997). A malha de controle de temperatura da autoclave empregada neste trabalho é mostrada na Figura 1. Ela irá atuar após o período de exaustão, que tem por finalidade eliminar o ar presente no interior da autoclave.

A cronometragem do período de exaustão e a do período de manutenção na temperatura necessária à letalidade dos microrganismos indesejáveis é feita por meio de um controlador lógico programável.

Uma vez alcançada a esterilização desejada, deve-se proceder ao resfriamento da autoclave por meio da injeção de água. Nesta etapa do processo é muito importante o controle da pressão no interior da autoclave, para se evitar que os recipientes que contenham o alimento sejam danificados. A malha de controle de pressão, mostrada na Figura 1, irá atuar após o término da etapa de aquecimento, ajustando a vazão de ar comprimido que é alimentado à autoclave.

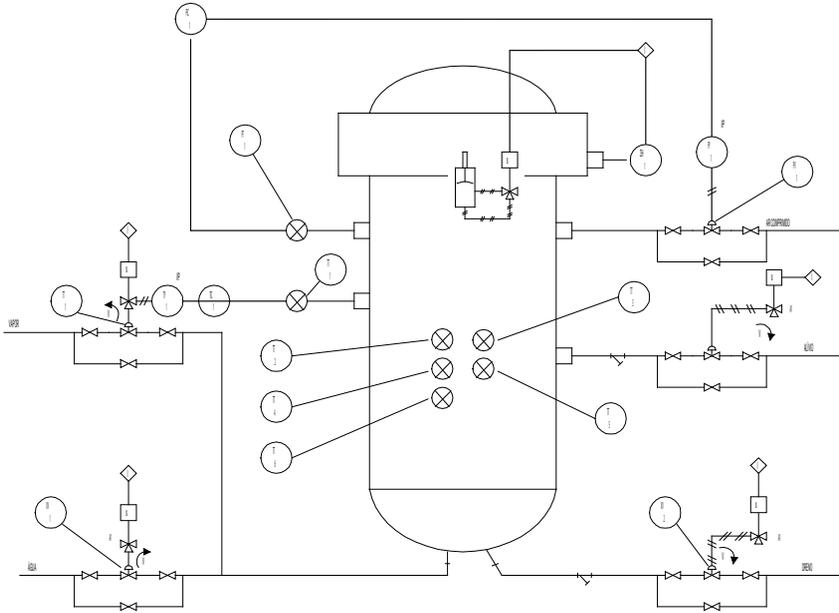


Figura 1 - Fluxograma de engenharia de uma autoclave estacionária vertical

O controle da temperatura e da pressão no interior da autoclave é feito por controladores e indicadores eletrônicos microprocessados e o intertravamento da mesma é tipicamente realizado por meio de controlador lógico programável. Ele tem por finalidade principal impedir a colocação da mesma em operação se a tampa não estiver travada, além de impedir a abertura da tampa se a pressão interna for superior à pressão atmosférica. Para a medição da pressão e das temperaturas foram usados transmissores eletrônicos microprocessados, que permitem a obtenção de maior confiabilidade e maior precisão nas medições efetuadas (Gedraite & Leonhardt, 1997).

Tipicamente, o sistema de controle da autoclave é empregado para gerar o perfil de temperatura desejado para a autoclave em função do tempo. O perfil de temperatura típico para uma autoclave estacionária é mostrado na Figura 2. Com base nesta figura pode-se distinguir, fundamentalmente, três fases de operação da autoclave, a saber: aquecimento, esterilização e resfriamento. A fase de aquecimento compreende as etapas de exaustão e de aquecimento propriamente dito da autoclave. A etapa de exaustão tem por finalidade a eliminação do ar existente no interior da autoclave, enquanto que a etapa de aquecimento visa atingir a temperatura pré-fixada para a esterilização.

A primeira atividade a ser executada quando do início da operação da autoclave é a etapa de exaustão (ou remoção do ar). Considerando que o vapor de água é utilizado como meio de transferência de calor em autoclaves, devido, entre outras razões, aos maiores coeficientes de transferência de calor verificados, para que possamos tirar vantagem de seu uso, devemos eliminar o ar presente no interior da autoclave. A presença do ar, não

somente reduz a transferência de calor, mas, quando a exaustão não for total, o ar restante ao redor dos recipientes poderá agir como isolante e provocar a corrosão e queima de sua superfície (Rodrigues et al., 1998).

Mesmo quando a autoclave se encontre com sua capacidade máxima ocupada, a maior parte do espaço total disponível é preenchida pelo ar. Em autoclaves horizontais, após seu preenchimento, 80% do seu espaço se encontra ocupado pelo ar. Em autoclaves verticais 60% da sua capacidade é tomada pelo ar. Para removermos todo este ar é necessário algum tempo de circulação do vapor com as válvulas de exaustão abertas, pois o ar deve ser desalojado dos espaços formados entre os recipientes. Por outro lado, devemos lembrar que, devido à superfície dos recipientes se encontrar em temperaturas inferiores à de saturação do vapor, ocorrerá uma condensação inicial. Por esta razão, a velocidade de fornecimento de vapor deve ser elevada para compensar as possíveis condensações, eliminar o ar presente e para que a temperatura de esterilização seja alcançada rapidamente (Gedraite, 1999).

Uma vez que a temperatura recomendada para a exaustão seja atingida, deve-se manter a autoclave nesta temperatura pelo tempo necessário para se assegurar a eliminação do ar presente e, em seguida, providenciar que a válvula de exaustão seja fechada. Geralmente este intervalo de tempo é determinado experimentalmente e está baseado na concordância entre o valor da pressão lida no manômetro e a temperatura indicada no termômetro de mercúrio, ambos instalados no corpo da autoclave. Este procedimento não é uma indicação segura de que todo ar foi eliminado, no entanto, enquanto esta concordância não for verificada, deve-se prosseguir com a desaeração (Leonhardt, 2003; Gedraite, 1999).

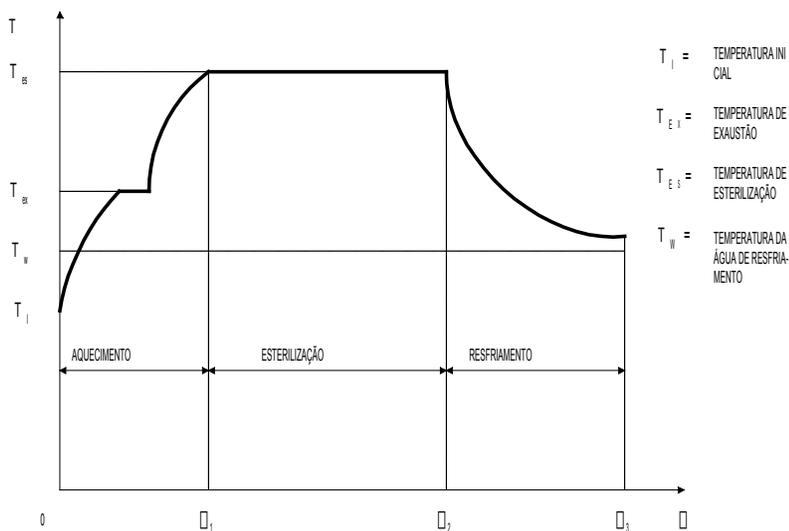


Figura 2 - Perfil de temperatura da autoclave em função do tempo
(adaptado de Leonhardt, 2003)

A seguir, deve-se continuar o fornecimento de vapor de água, até que seja alcançada a temperatura adequada para a esterilização do produto alimentício. A partir deste ponto, deve-se iniciar o fechamento gradual da válvula de controle que é empregada para ajustar o valor da vazão de vapor de aquecimento. Este procedimento evita uma diminuição acentuada da temperatura, que geralmente ocorre quando esta válvula é fechada abruptamente. A partir deste ponto, tem início a cronometragem do tempo de processamento, o que é feito pelo sistema de automação da autoclave. Durante a fase de esterilização, os seguintes cuidados são necessários (Toledo, 1994):

- Manter a temperatura da autoclave um grau acima da temperatura recomendada, para compensar flutuações;
- Verificar periodicamente, através do termômetro de mercúrio, a temperatura da autoclave;
- Verificar se, em todos os sangradores, o vapor está escoando normalmente;
- verificar o tempo de processamento e, uma vez esgotado este tempo, iniciar imediatamente a operação de resfriamento.

O resfriamento do sistema é conduzido na própria autoclave, sob pressão controlada. Esta pressão pode ser mantida praticamente constante, tanto com a introdução de vapor de água quanto com a introdução de ar comprimido. Quando utilizamos vapor de água para obtermos a pressão desejada, deve-se adotar os seguintes procedimentos (Leonhardt, 2003; Gedraite, 1999):

1. Decorrido o tempo pré-fixado para a esterilização, deve-se providenciar a interrupção do fornecimento de vapor de água e o fechamento da válvula de dreno. A elevação da pressão da autoclave é feita pela alimentação de vapor de água, fornecido pelo topo, de maneira a se manter uma pressão cerca de 2 psi maior que a pressão de esterilização.
2. Atingida a pressão desejada, introduzimos água e vapor pela base até termos preenchido um quarto de capacidade da autoclave com água em ebulição. Isto feito, fechamos o vapor da base e, controlando a vazão de vapor no topo, continuamos a introduzir água. Este procedimento é necessário para evitarmos a condensação súbita do vapor, o que provocaria uma deformação permanente dos recipientes.
3. Quando a água chega ao topo, o sistema de automação faz com que a válvula de extravasamento seja gradualmente aberta, executando assim o controle da pressão, o que deve ser feito até que a temperatura do produto atinja 60 -70 °C. Devemos ter em mente que, se o escoamento através da canalização de extravasamento for bem controlado, a pressão de resfriamento pode ser mantida sem a introdução de vapor de água no equipamento.
4. Tendo alcançado esta temperatura, deve-se iniciar o relaxamento da pressão, que dependerá, fundamentalmente, do tipo de produto que está sendo processado. Se o alimento é aquecido por convecção, o relaxamento deve ser feito na base de 2

psi/minuto. Caso seja aquecido por condução, a redução de pressão deve ser mais lenta e a velocidade de relaxação deve ser de 1 psi/minuto. Dependendo do tipo de produto, pode ser necessário manter a pressão de resfriamento por 10 a 15 minutos após a temperatura do produto ter atingido 60 - 70°C.

5. Uma vez atingida pressão manométrica nula, o alimento já se encontra praticamente frio. Porém, caso seja necessário, devemos prosseguir com o resfriamento até que a temperatura do produto atinja 35 - 40 °C. Esta temperatura final é conveniente para favorecer a evaporação da água superficial dos recipientes, quando os retiramos da autoclave.

Quando a pressão na operação é conseguida através de ar comprimido, o procedimento a ser adotado é praticamente o mesmo. Terminada a esterilização, interrompe-se o fornecimento do vapor de água e fecha-se a válvula de dreno. Tem início a injeção de ar comprimido pelo topo da autoclave, de modo a se obter a pressão desejada, após o que tem início o fornecimento de água de resfriamento pela base. Naturalmente, a tendência da pressão é cair, daí a necessidade de um controle adequado da pressão interna da autoclave. No instante em que a água atinge o topo, o sistema de automação abre a válvula de dreno, mantendo a pressão estipulada para o resfriamento. O relaxamento da pressão, que será realizado de acordo com o tipo de produto, só deve se iniciar após a temperatura do produto ter atingido 60 - 70°C.

Tanto no caso da pressão de resfriamento ser obtida com vapor, como com ar comprimido, a vazão de água, bem como sua circulação, deve satisfazer a certos requisitos básicos como: (i)- para encher a autoclave devemos gastar, no máximo, 5 minutos e (ii)- no caso da autoclave ter entrada de água pela base e pelo topo, deve-se inverter a introdução de água, ou seja, inicialmente a água é fornecida durante 5 minutos pela base, em seguida durante mais 5 minutos pelo topo, e assim alternadamente até o final do processo (**Leonhardt, 2003**).

A preocupação em se evitar o desperdício do agente de aquecimento utilizado, em geral o vapor de água saturado, através da otimização do tempo de processamento térmico imposto ao produto alimentício, assegurando que o nível de letalidade acumulada desejado seja alcançado, motivaram o estudo da possibilidade de aplicação de uma estratégia de controle mais elaborada, que será apresentada na sequência.

O sistema de controle considerado neste trabalho foi baseado no emprego de modelo matemático a parâmetros concentrados para estimar a temperatura do produto alimentício em tempo real. O modelo utilizado foi do tipo semiempírico identificado, obtido a partir de experimentos realizados com o sistema em estudo (Gontijo et al, 2021; Larousse & Brown, 1997).

3 | CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO PROCESSO

O sistema de controle da autoclave é empregado visando gerar o perfil de temperatura desejado para a autoclave, conforme já abordado em Veloso et al. (2015).

A esterilização de um produto alimentício depende essencialmente da taxa de penetração de calor no mesmo (Teixeira & Balaban, 1996).

Quando produtos alimentícios são colocados numa embalagem, que por sua vez é colocada numa autoclave e processada termicamente através da condensação do vapor de água saturado, a taxa de transferência de calor para os mesmos depende dos seguintes fatores (Fontana et al., 2001):

- coeficientes de transferência de calor;
- propriedades físicas do produto e da embalagem;
- diferença de temperatura entre o produto alimentício e autoclave;
- tamanho da embalagem.

Neste trabalho optou-se por utilizar um produto sólido cujo mecanismo de transporte de calor seja essencialmente condutivo.

A principal vantagem advinda do uso de modelos matemáticos capazes de estimar o histórico da temperatura do produto é o fato de que se pode analisar flutuações imprevistas na temperatura da autoclave. Assim sendo, na ocorrência de uma diminuição inesperada da temperatura da autoclave, o modelo fornecerá rapidamente o histórico das temperaturas e calculará o valor do nível de letalidade atingido.

Assim, na ocorrência de uma perturbação na temperatura da autoclave, o modelo deverá prever a resposta correta da temperatura no interior do produto para este desvio (Larousse & Brown, 1997).

Para que haja consistência entre o modelo apresentado neste trabalho e a realidade, algumas considerações foram feitas (Gontijo et al., 2021). As mesmas são apresentadas a seguir:

- modelo à parâmetros concentrados;
- o produto em estado sólido;
- o transporte de calor no interior do produto ocorre por condução;
- o transporte de calor na interface superfície da embalagem/vapor de água de aquecimento ocorre por convecção;
- o *headspace* foi considerado desprezível no interior da embalagem.

O modelo matemático foi desenvolvido tomando-se por base a aplicação de um balanço global de energia no volume de controle correspondente ao conjunto embalagem/produto (Teixeira et al., 1999). A equação do balanço global de energia aplicada ao sistema

número 2 e (iii)- o modelo que representa a estratégia de controle inferencial propriamente dita, marcado na figura com o número 3.

O modelo que representa a etapa de aquecimento foi explicado em Veloso et al. (2015), tendo sido no presente modelo incluída a equação utilizada para o cálculo do índice de letalidade (F_0) correspondente à etapa de aquecimento.

A partir do comportamento simulado da temperatura da autoclave, considerando uma perturbação do tipo degrau em seu valor, é calculada a temperatura do produto alimentício em estudo, utilizando o conjunto de funções (blocos) identificados por *MODELO Talim*. Com base no valor da temperatura do alimento é calculado o valor de F_0 correspondente à etapa de aquecimento, por meio do bloco de função identificado por *Calc F_0 aquecim*. O valor de F_0 calculado é enviado para os blocos que representam a estratégia de controle inferencial do processo.

Quando a temperatura do produto alimentício se torna maior do que 100°C, a estratégia de controle inferencial é acionada. Isto ocorre quando a temperatura do produto alimentício ultrapassa em 20°C a temperatura anteriormente citada. O critério utilizado para a escolha do valor de 100°C baseia-se no fato de que o valor de F_0 não é significativo para valores menores de temperatura (Gedraite et al., 1998).

A partir da condição citada no parágrafo anterior, é iniciada a simulação da etapa de resfriamento, representada no modelo por meio do chaveamento do valor nulo para o valor 120°C, que é a diferença de temperatura aplicada no degrau da etapa de aquecimento. O conjunto de blocos identificados por *MODELO Talim* calculam a temperatura do produto alimentício e o bloco de função identificado por *Calc F_0 resfriam* calcula o valor de F_0 correspondente à etapa de resfriamento.

Os valores calculados de F_0 nas etapas de aquecimento e de resfriamento são somados, dando origem ao valor do F_0 total, o qual será comparado com o valor de F_0 target para calcular o sinal de desvio que será utilizado pela estratégia de controle inferencial para interromper o processo. Este será interrompido quando o valor do sinal de desvio for menor ou igual a um limite preestabelecido pelo operador do processo.

A validação do modelo utilizado para o cálculo da temperatura do produto alimentício foi feita pela comparação dos resultados obtidos pela simulação computacional com aqueles apresentados na literatura (Gedraite et al., 1998).

4 | RESULTADOS & DISCUSSÃO

Quando o sistema de controle inferencial é posto a funcionar, ele continuamente compara o valor de F_0 target com o valor de F_0 total para interromper o aquecimento e iniciar o resfriamento. O cálculo do valor de F_0 total é feito com base no valor simulado de F_0 resfriam, o qual começa a ser computado quando a temperatura do alimento ultrapassa em 20°C o valor estabelecido como critério que é 100°C. Na Figura 4 é apresentado o

comportamento temporal da temperatura do alimento e do sinal de controle considerado, na qual se pode perceber que aproximadamente no instante $t = 70$ minutos a temperatura do produto alimentício atende ao critério estabelecido.

O sistema de controle inferencial passa então a computar a contribuição do resfriamento no cálculo do valor de F_0 total. O sistema de controle continua atuando até que a diferença entre os valores de F_0 total e de F_0 target seja nula. Quando isto acontece, aparece na tela do computador a mensagem gerada pelo bloco de função *Check Static Gap* informando que a condição definida para interromper o processo de aquecimento foi alcançada. Esta condição é ilustrada na Figura 5.

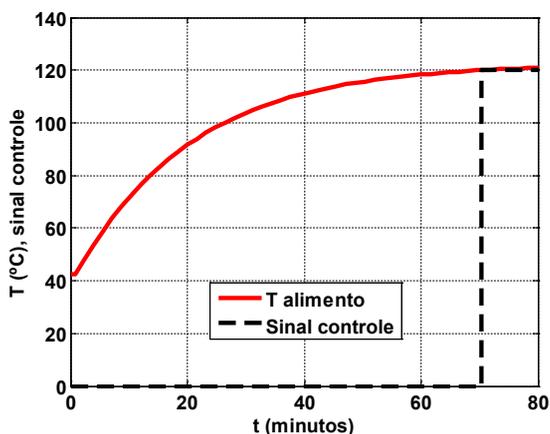


Figura 4 - Condição de início do cálculo do valor de F_0 resfriam

No processo estudado neste trabalho, o instante em que o valor de F_0 total iguala o valor de F_0 target é igual a 202,98 segundos. Quando esta condição é atingida, a estratégia de controle inferencial interrompe a execução da etapa de aquecimento e inicia a etapa de resfriamento, como mostrado na Figura 6. O bloco de função do aplicativo simulink™ que é responsável por esta ação é o bloco seletor lógico configurado no início de resfriamento. O papel deste bloco é comparar o sinal gerado pela diferença entre o valor de $F_0(t)$ integrado ao longo do tempo e o valor previamente estabelecido de 65 com o valor definido internamente àquele bloco como ponto de ajuste. Quando esta condição é atendida, o bloco *seletor lógico início de resfriamento* passa a gerar o sinal correspondente à diminuição da temperatura de 120°C para 20°C, iniciando a simulação da etapa de resfriamento. Na Figura 7 é apresentado o comportamento temporal do valor calculado de F_0 aquecim e na Figura 8 o comportamento temporal do valor calculado de F_0 resfriam.

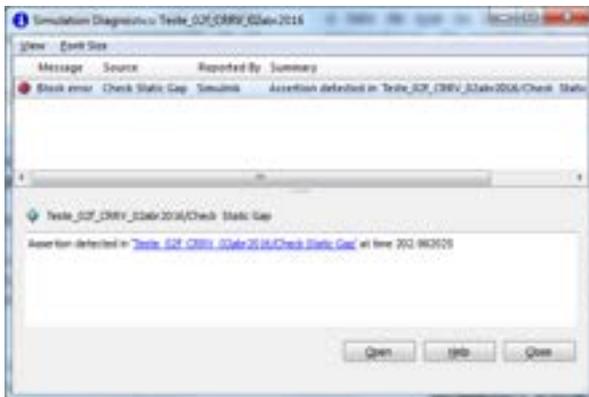


Figura 5 - mensagem informando que a condição definida para a interrupção do processo foi alcançada

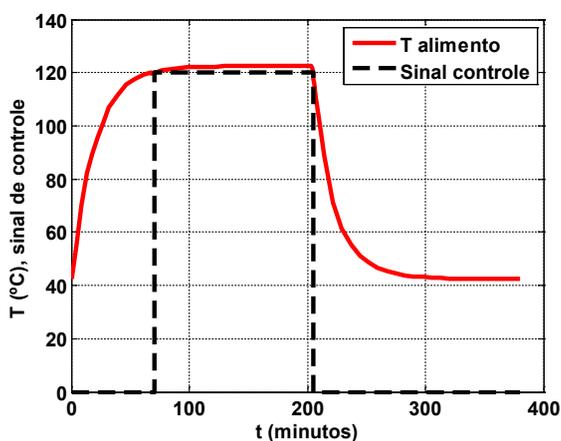


Figura 6 - Condição de início do cálculo do valor de F_0 resfriam e de efetivo início da etapa de resfriamento

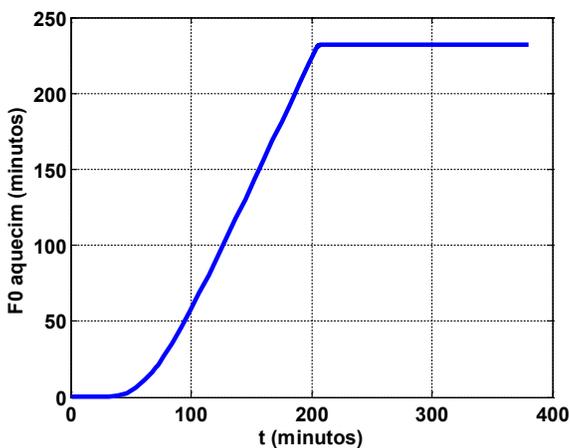


Figura 7 - Comportamento temporal do valor calculado de F_0 aquecim

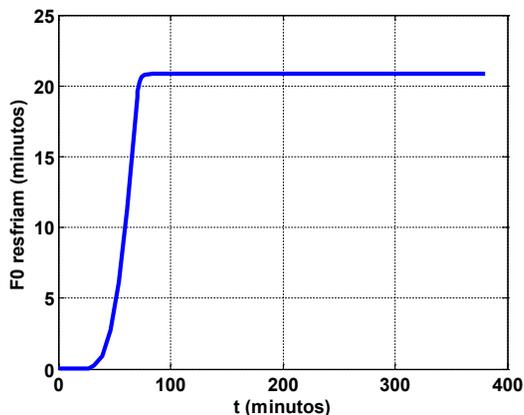


Figura 8 - Comportamento temporal do valor calculado de F_0 resfriam

5 | CONCLUSÕES

A estratégia de controle inferencial proposta neste trabalho foi considerada satisfatória para fins de controle do processo de esterilização de produtos alimentícios empregando o calor como agente de esterilização.

Pode-se, portanto, empregar o modelo matemático em estudo para fins de controle regulatório de processo, visando melhorar o desempenho da operação da autoclave.

Por se tratar de modelo a parâmetros concentrados, o modelo matemático desenvolvido poderá ser facilmente implementado em código computacional que permita a troca de informações em tempo real com o sistema de controle instalado em autoclaves estacionárias tipicamente utilizadas na indústria alimentícia.

Este modelo pode ser adaptado para estudo do transporte de calor em diferentes embalagens.

6 | NOMENCLATURA

$A=$	Área de troca térmica da embalagem (m^2)
$\bar{c}_{p,a}=$	Calor específico médio do produto alimentício ($J / kg \cdot ^\circ C$)
$U=$	Coefficiente global de transporte de calor entre o fluido e a embalagem do produto alimentício ($W / m^2 \cdot ^\circ C$)
$M_a=$	Massa do produto alimentício (kg)
$\dot{Q}=$	Calor transferido por unidade de tempo (W)
$T_a(t)=$	Temperatura do produto alimentício no instante considerado ($^\circ C$)
$T_r(t)=$	Temperatura da autoclave no instante considerado ($^\circ C$)
$\frac{dT_a(t)}{dt}=$	Variação da temperatura do produto alimentício com o tempo ($^\circ C/s$)

REFERÊNCIAS

- AKTERIAN, S. G. "On-line control strategy for compensating for arbitrary deviations in heating-medium temperature during batch thermal sterilization processes", *Journal of Food Engineering*, vol.39, pp. 1- 7, 1999
- FONTANA, A. J.; WACKER, B.; CAMPBELL, C. S. & CAMPBELL, G. S. **Simultaneous Thermal Conductivity, Thermal Resistivity, and Thermal Diffusivity Measurement of Selected Foods and Soils.** *In: Proceedings of 2001 ASAE Annual International Meeting*, California, EUA, 2001.
- GEDRAITE, R. **Desenvolvimento e implementação de algoritmo computacional para garantir um determinado nível de letalidade acumulada para microrganismos presentes em alimentos industrializados.** 1999, São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- GEDRAITE, R.; BASTOS, J. L. F.; GARCIA, C. A **Utilização de Modelagem Matemática para Otimizar o Controle da Temperatura de Alimentos Processados em Autoclaves Estacionárias,** *In: Proceedings. of VIII Congreso Latino-americano de Control Automatico*, Viña del Mar – Chile, vol.2, pp. 679 – 683, 1998.
- GEDRAITE, R.; LEONHARDT, G. F. **Modernização da Instrumentação de Autoclave estacionária para Esterilização de Alimentos.** *In: Anais do ISA SHOW BRASIL/97*, São Paulo/SP, 1997.
- GERMER, S. P. M. **Avaliação dos desvios no processamento térmico de alimentos em conserva,** *Informativo FRUTHOTEC*, vol. 3, no. 2, pp. 2-3, 1997.
- GONTIJO, D. L. M.; BARBOSA, R. Y. M.; SILVA, J. C.; GEDRAITE, R. **Emprego de modelo matemático para melhorar o controle do processo de esterilização de alimentos.** *In: Anais da I Semana de Engenharia de Alimentos da UFU*, Patos de Minas/MG, 2021.
- LAROUSSE, J. & BROWN, B. E. **Food Canning Technology**, New York, Wiley - VCH Inc., 1997.
- LEONHARDT, G. F. **Notas de Aula da Disciplina Operações Unitárias da Indústria de Alimentos - ENLATAMENTO: Tecnologia e Engenharia.** Departamento de Engenharia Química e de Alimentos da Escola de Engenharia Mauá, 2003.
- OHLSSON, T. & BENGTTSSON, N. **Minimal processing technologies in the food industry**, Cambridge, CRC Press, 2000.
- TEIXEIRA, A. A. & BALABAN, M. O. **Computer Applications in Thermal Processing of Canned Foods.** ITAL, Campinas, 1996.
- TEIXEIRA, A. A.; BALABAN, M. O.; GERMER, S. P. M.; SADAHIRA, M. S.; TEIXEIRA NETO, R. O. & VITALI, A. A. **Heat Transfer Model Performance in Simulation of Process Deviations,** *Journal of Food Science*, vol. 64, no. 3, pp. 488 - 493, 1999.
- VELOSO, C. R. R.; HAMADA, H. & GEDRAITE, R. **Estratégia de controle utilizada para economizar energia em processos de esterilização de alimentos.** *In: Anais da XX Jornada em Engenharia Química*, Uberlândia/MG, 2015.

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