

## PRÉ-TRATAMENTOS DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA PARA OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Alyxandra Carla de Medeiros Batista<sup>1</sup>  
Isabelle Mariane de Lima Ferreira<sup>2</sup>  
Aruzza Mabel de Moraes Araújo<sup>3</sup>  
Amanda Duarte Gondim<sup>4</sup>

### RESUMO

A demanda por novas fontes de matéria prima para os biocombustíveis faz com que seja necessária a procura por novas fontes mais limpas e sustentáveis, dentre dessas fontes, a biomassa lignocelulósica vem se destacando nos estudos e nas aplicações como fonte renovável, sustentável e de baixo custo. Porém, a biomassa lignocelulósica não pode ser utilizada in natura, devido uma série de problemas que inviabilizam seu uso, para solucionar esses problemas, é necessário aplicar tratamentos com a finalidade de melhorar o aproveitamento dessa matéria-prima. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo realizar um levantamento bibliográfico sobre os tipos de processos de pré-tratamentos aplicados na biomassa lignocelulósica, os quais são classificados em quatro grupo gerais, como os processos físicos, processos físico-químicos, processos químicos e os processos biológicos, os quais ainda se subdividem em grupos mais específicos, que são os processos: secagem, moagem, explosão de vapor, processo AFEX, organosolv, processo ácido e processo alcalino, entre outros. A partir do levantamento, foi possível observar que existem vários processos de pré-tratamentos que podem ser aplicados na biomassa lignocelulósica, onde a escolha depende das características do material e dos produtos que desejam ser obtidos.

**Palavras-chave:** Biomassa lignocelulósica; Pré-tratamentos; Processos químicos; Processos Físicos; Processos biológicos.

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, têm-se visto a intensa preocupação sobre os problemas ambientais devido ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e do efeito estufa, provocado pelas emissões dos gases poluentes provenientes da combustão dos combustíveis fósseis, com isso despertou o interesse por produzir combustíveis mais limpos, renováveis, sustentáveis e de baixo custo. (ALONSO; WETTSTEIN; DUMESIC, 2012; EICHLER et al., 2015; MIDILLI, 2016; SANTIAGO; RODRIGUES, 2017; KUMAR et al., 2020)

---

<sup>1</sup> Doutoranda do Curso de Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, [alyxandra@ufrn.edu.br](mailto:alyxandra@ufrn.edu.br);

<sup>2</sup> Doutoranda do Curso de Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, [limaisabelle94@gmail.com](mailto:limaisabelle94@gmail.com);

<sup>3</sup> Professora Visitante da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, [aruzzamabel@gmail.com](mailto:aruzzamabel@gmail.com);

<sup>4</sup> Professora orientadora: Adjunta, Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, [amandagondim.ufrn@gmail.com](mailto:amandagondim.ufrn@gmail.com);

Para a produção desses combustíveis renováveis, a biomassa lignocelulósica vem se destacando por apresentar características promissoras devido ser uma matéria-prima renovável, apresentar queima limpa com redução de particulados e de gases poluentes como os NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, ciclo de vida curto, e sua principal vantagem é devido ser uma matéria prima que não compete com o mercado alimentício, desempenhando um papel importante na sustentabilidade ambiental, social, industrial e energética do país. (KUMAR et al., 2009; LUQUE et al., 2010; MIDILLI, 2016; SAEED et al., 2012; SAINI; SAINI; TEWARI, 2014)

Como opções de biomassa lignocelulósica, estão os resíduos industriais e urbanos, resíduos do processamento de alimento, resíduos agrícolas e florestais como a casca do arroz, o bagaço e a palha do milho, as microalgas e etc. (LIU; ABRAHAMSON; SCOTT, 2012; SAINI; SAINI; TEWARI, 2014; ZHANG et al., 2010)

Sabe-se que para a obtenção dos biocombustíveis, a biomassa lignocelulósica necessita passar por processos de conversão, os quais podem ser a fermentação, a pirólise, a sacarificação, hidrólise enzimática, entre outros. (BOUXIN; JACKSON; JARVIS, 2014; KUMAR et al., 2009)

No entanto, para um efetivo aproveitamento tem-se visto que é de suma importância a aplicação dos processos de pré-tratamento, como o nome já diz, são processos que são aplicados na biomassa antes dela passar pelo processo de conversão. Esses processos de pré-tratamento têm sua relevância devido atuar na parede celular da fibra da biomassa, rompendo-a para facilitar o contato com o constituinte de interesse para ser utilizado no processo de conversão. Estes constituintes principais da biomassa lignocelulósica são a celulose, a hemicelulose e a lignina. (BARAL; SHAH, 2017; SANTIAGO; RODRIGUES, 2017)

Alguns trabalhos relatam as características de cada processo de pré-tratamento, assim como as vantagens e desvantagens e os mecanismos de reação que envolve cada um. Esses processos são classificados em processos de pré-tratamentos físicos, físico-químicos, biológicos e as combinações entre eles, estes últimos se destacam por apresentarem melhor rendimento da extração do constituinte de interesse. No presente trabalho, serão apresentados os métodos de pré-tratamento que são aplicados na biomassa lignocelulósica em geral, de uma maneira direta, objetiva e comparativa entre os processos.

## **REFERENCIAL TEÓRICO**

A seguir, será apresentado o referencial teórico sobre os tipos de processos de pré-tratamento aplicados na biomassa lignocelulósica.

## BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Dentre as fontes alternativas de energia, que incluem a eólica, solar, nuclear, biomassa, geotérmica, hidrotérmica etc., a energia proveniente da biomassa lignocelulósica tem sido, recentemente, muito pesquisada, principalmente, pelo seu grande potencial industrial, especialmente na produção de biocombustíveis, o qual pode ser um complemento ou substituir parcial ou totalmente o combustível derivado do petróleo. (EICHLER et al., 2015; KUMAR et al., 2009)

A biomassa pode ser definida como sendo todo material biológico, ou seja, recurso natural que pode ser transformado em energia, chamado de bioenergia. (EICHLER et al., 2015) Este material compreende uma variedade de matérias-primas, as quais são os produtos e resíduos da agricultura, da floresta, como também plantas aquáticas e fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos. (AKALIN; KARAGÖZ, 2014; BATISTA, 2019; FÉLIX et al., 2018). Os tipos de biomassa utilizados para a obtenção de energia são: resíduo da madeira, o bagaço e a palha do milho, bagaço da cana-de-açúcar, casca de arroz, estrume, casca de coco verde, lixo biodegradável, microalgas, entre vários que existem. (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; CHUNDAWAT et al., 2020; LU et al., 2012; LUQUE et al., 2010)

Os produtos obtidos a partir do manuseio da biomassa dependem tanto do tipo do material lignocelulósico quanto da tecnologia de processamento aplicado no processo de conversão. (BATISTA, 2019; EICHLER et al., 2015; MATHEW et al., 2016)

Os biocombustíveis provenientes da biomassa lignocelulósica são obtidos através de diferentes rotas tecnológicas que são classificados em processos bioquímicos como por exemplos a fermentação, sacarificação, hidrólise enzimática; processos químicos como a transesterificação, hidroprocessamento, craqueamento catalítico e síntese de Fischer-Tropsch ou processos termoquímicos: combustão, gaseificação, liquefação e pirólise. (BOUXIN; JACKSON; JARVIS, 2014; EICHLER et al., 2015)

A estrutura rígida e complexa da biomassa lignocelulósica foi desenvolvida para proteger seus constituintes da degradação dos microorganismos e animais. (ZHAO; ZHOU; LIU, 2012) Devido a essa rigidez e aos fatores físico-químicos estruturais e composicionais, existem vários exemplos de resistência natural à ruptura das ligações químicas existentes na fibra da biomassa, como pode-se citar o grupo acetil presente na hemicelulose que interfere na ação catalítica das enzimas, causando a diminuição do rendimento da hidrólise; a cristalinidade característica da celulose que ocasiona a diminuição da área superficial, o que diminui a ação das enzimas; a presença da lignina que age como uma barreira física protetora, bloqueando que bactérias e fungos devastam as células da fibra, conseqüentemente, dificulta o

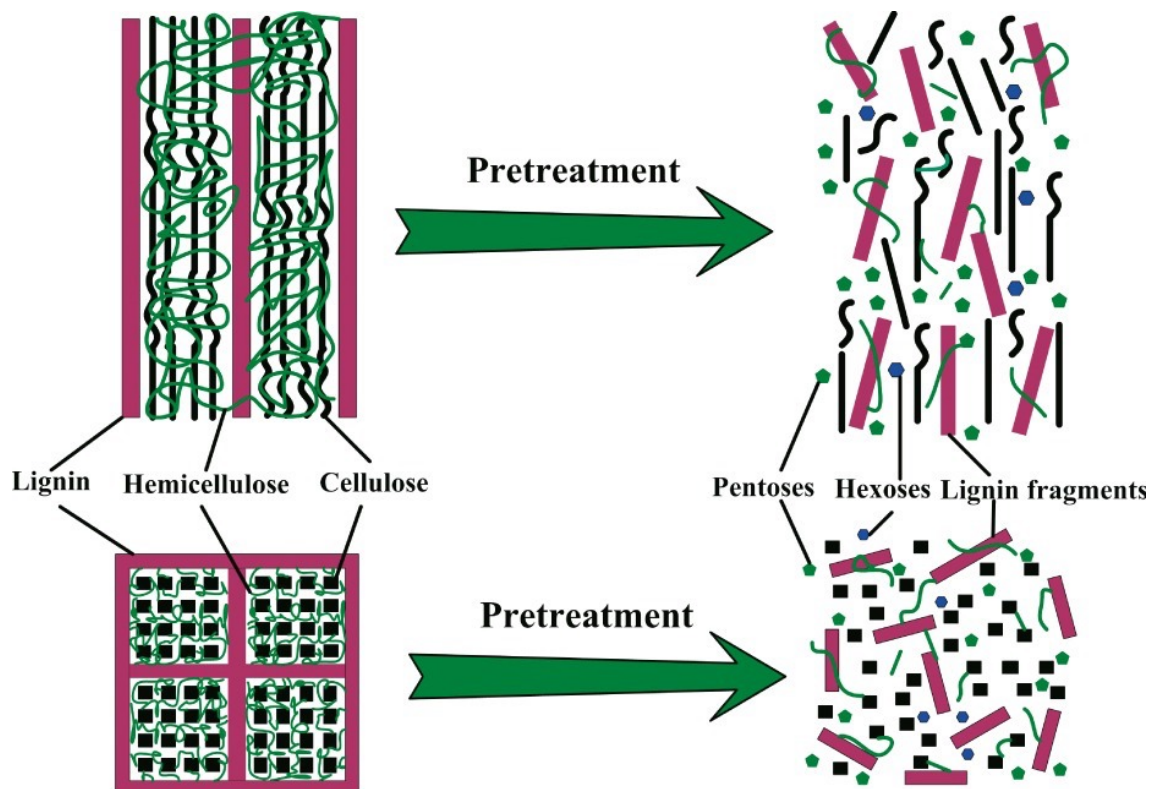
acesso dos agentes de conversão, entre vários outros exemplos. (KUMAR et al., 2009; SANTIAGO; RODRIGUES, 2017; ZHANG et al., 2010)

A lignocelulose é o principal constituinte da parede celular da biomassa lignocelulósica, e é composta, principalmente, por uma estrutura aromática denominada lignina, por polímeros de carboidratos os quais são denominados de celulose e hemicelulose, o primeiro e um homopolissacarídeo e o segundo e um heteropolissacarídeos, além desses constituintes principais há uma quantidade menor de minerais, extrativos e cinzas. (ALONSO; WETTSTEIN; DUMESIC, 2012; LIU; ABRAHAMSON; SCOTT, 2012; LU et al., 2012) A fração de cada componente varia de espécie para espécie de biomassa, assim como também, da idade e de outras condições do meio de cultivo. (GÍRIO et al., 2010; SANTIAGO; RODRIGUES, 2017; KUMAR et al., 2009)

## PROCESSOS DE PRÉ-TRATAMENTOS DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Os processos de pré-tratamentos correspondem aos processos que antecedem os processos de conversão ou de processamento, estes processos preparam a matéria-prima com a finalidade de melhorar a digestibilidade dos constituintes, ou seja, tornar o constituinte de interesse acessível para o processo de transformação e, conseqüentemente, aumentar o rendimento do biocombustível. (KARAPATZIA et al., 2016; KUMAR et al., 2009) A finalidade do pré-tratamento na biomassa lignocelulósica é ilustrado na **Figura 1** a seguir.

**Figura 1:** Ilustração da atuação do processo de pré-tratamento na fibra da biomassa lignocelulósica



Fonte: Adaptada de Zhao, Zhang e Liu (2012).

O tipo de pré-tratamento utilizado depende, principalmente, das características da biomassa e, também, do processo de conversão que será aplicado para obtenção do biocombustível ou bioproduto desejado. (EICHLER et al., 2015; MATHEW et al., 2016)

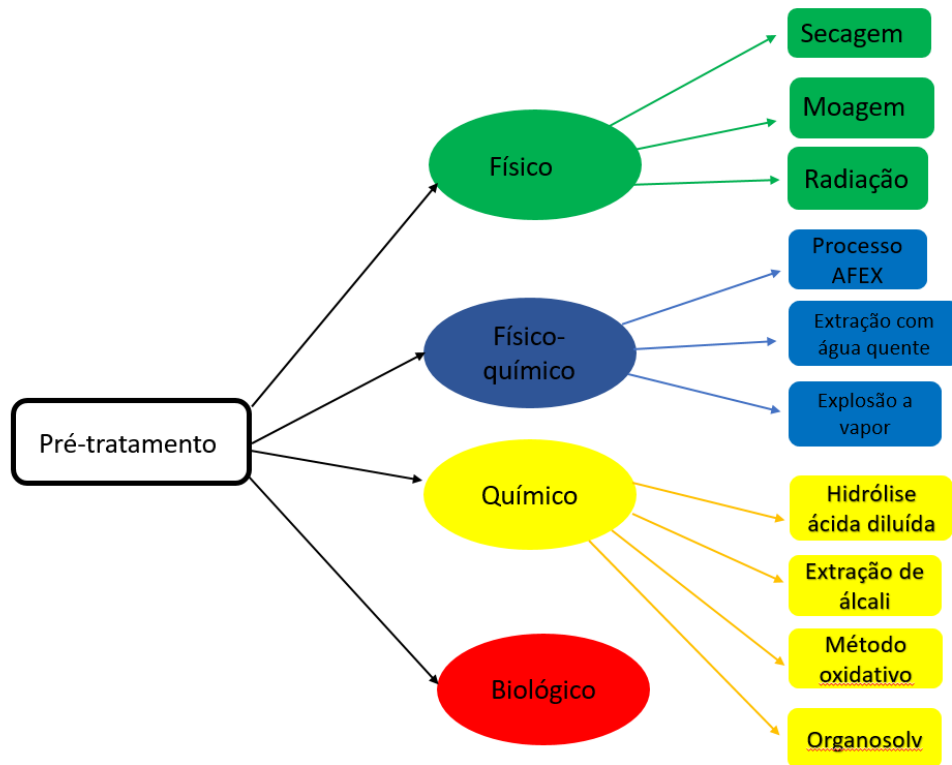
Geralmente, os processos de pré-tratamentos objetivam a quebra estrutural da lignina e da hemicelulose, diminuir a cristalinidade presente na celulose para facilitar a ação dos agentes hidrolizantes, por exemplo, como os ácidos e as enzimas, e aumentar a área superficial a partir do aumento da porosidade da estrutura. Também, devem proporcionar a formação de açúcar, evitar a deterioração dos carboidratos, evitar a formação de produtos inibidores para os seguintes processos de conversão que a biomassa irá passar, como por exemplos, a fermentação e a hidrólise, e por ultimo, e de suma importância para toda a cadeia produtiva, ter um bom custo-benefício. (HEISE et al., 2017; PENG et al., 2012; KUMAR et al., 2009)

Os métodos mais comuns incluem a secagem e a redução da granulometria do material e, normalmente, ocorre a combinação de diferentes tipos de processos de pré-tratamentos

visando o aumento do rendimento do produto. (EICHLER et al., 2015; SANTIAGO; RODRIGUES, 2017)

Os métodos de pré-tratamentos são classificados em diferentes categorias: físicos (secagem, moagem, radiação), físico-químicos (explosão a vapor, AFEX, extração com água quente) químicos (hidrólise ácida diluída, extração de álcali, método oxidativo e organosolv), biológicos ou uma combinação deles, estão apresentados no fluxograma da **Figura 2**. A seguir, serão listados os principais tipos de pré-tratamentos, assim como suas principais características e diferenças.

**Figura 2:** Fluxograma contendo os tipos de processos de pré-tratamento que podem ser aplicados na biomassa lignocelulósica.



Fonte: Autoria própria (2021).

## PROCESSOS FÍSICOS

Os processos de pré-tratamento do tipo físico são os que fazem uso de algum processo físico, como a secagem, radiação, com o objetivo de preparar a biomassa pra receber outro tipo de pré-tratamento ou processo de conversão da biomassa.



- Secagem

A secagem ou pré-tratamento térmico corresponde ao processo de evaporar a umidade presente na biomassa. Normalmente, é o primeiro processo de pré-tratamento que a biomassa é submetida caso apresente algum grau de umidade. Este processo pode ser realizado tanto ao ar livre ou utilizar uma fonte de calor para acelerar o processo. Em alguns casos, este método também é utilizado para separar a celulose da hemicelulose e lignina, pois quando a biomassa lignocelulósica é submetida a uma faixa de temperatura entre 150 a 180°C, ocorre a solubilização parcial desses dois componentes, facilitando a separação da celulose. (QUINTERO; RINCÓN; CARDONA, 2011) Um dos métodos que está sendo utilizado para retirar a umidade presente na biomassa e de maneira rápida, consiste na utilização do processo de liofilização, o qual proporciona a remoção da umidade presente na biomassa, convertendo diretamente a água em estado congelado em um estado gasoso, sem passar pela fase líquida. (BATISTA, 2019; MONDAL et al., 2017)

- Moagem

A moagem ou trituração corresponde ao processo de pré-tratamento do tipo físico com a finalidade de reduzir o tamanho das partículas do material, conseqüentemente, irá aumentar a área superficial e proporcionar o aumento da permeabilidade dos agentes que irão atuar nos processos de conversão posteriormente. (CORDEIRO et al., 2013) Pode ser utilizado para diminuir a cristalinidade da celulose, normalmente, utiliza-se um moinho de bolas. (KUMAR et al., 2009; KUMAR et al., 2020)

- Radiação

Neste método, normalmente utiliza a radiação de raios  $\gamma$  de microondas ou de ultrassons, com o objetivo de quebrar as ligações intermoleculares, diminuindo a cristalinidade e aumento a área superficial da celulose. Geralmente, este método é aplicado combinado com outro tipo de método de pré-tratamento, normalmente, um método químico. (KUMAR et al., 2009; ZHAO; ZHANG; LIU, 2012)

## PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS

Os processos de pré-tratamento do tipo físico-químico são os que fazem uso de algum método físico-químico com o objetivo de facilitar o acesso ou a extração do constituinte de

interesse, para, posteriormente, obter maior rendimento no processo de transformação do material em biocombustível.

- Processo AFEX

O processo AFEX refere-se ao método de pré-tratamento de expansão da fibra de amônia (AFEX), o qual provoca a retirada dos grupos acetil da hemicelulose e descristalização da celulose. O método consiste na mistura da amônia líquida à biomassa em um reator fechado, onde há o controle da temperatura e pressão, e tempo reacional por volta de 5 minutos. Geralmente, utiliza-se a temperatura entre 60 a 180°C e a pressão aproximadamente 2MPa. Quando atinge a pressão desejada, abre-se uma válvula para liberar a pressão abruptamente, onde causa a evaporação da amônia e a temperatura do meio reacional diminui, com isso, a descompressão da amônia causa poros na parede celular e aumenta a área superficial, aumentando, conseqüentemente, o acesso e a digestibilidade da celulose. (CHUNDAWAT et al., 2020; LEE; JAMEEL; VENDITTI, 2010; MATHEW et al., 2016; KUMAR et al., 2020)

- Extração com água quente

Neste método de pré-tratamento, a biomassa lignocelulósica, principalmente, a qual contém maior fração de celulose, como a madeira e o seu resíduo, é colocado em contato com a água líquida em temperatura elevada e pressão controlada, neste método não há perda de calor por vaporização. A água quente solubiliza a hemicelulose, principalmente, tornando a celulose mais acessível para os processos de conversão posteriormente. (LU et al., 2012; QUINTERO; RINCÓN; CARDONA, 2011)

Durante o processo, a água quente atua dissolvendo as frações dos ácidos presentes na estrutura, com isso o pH do meio diminui devido a alta concentração de ácidos, os quais vão agir como catalisador do meio reacional, acelerando o processo e obtendo como resultado, a dissolução de uma grande parte da hemicelulose que se encontra no estado amorfo e parte da lignina, diminuição da cristalinidade e aumento da porosidade da celulose, conseqüentemente, maior área superficial e permeabilidade, o que vai proporcionar uma maior interação entre o material e os agentes de conversão. Tal método é mais favorável e viável para o meio ambiente do que os métodos mais usuais como a utilização de solventes ácidos e bases e, consideravelmente, apresenta menor custo em relação aos demais métodos químicos (CORDEIRO et al., 2013; LU et al., 2012).



- Explosão a vapor

Neste método de pré-tratamento, a biomassa é submetida a um vapor saturado sob pressão controlada e temperatura relativamente alta, podendo ser de 160 a 260°C. Inicialmente, o processo consiste na utilização de alta pressão e, em seguida, a pressão é diminuída de repente, causando uma descompressão explosiva nas fibras da biomassa. Este processo causa degradação da hemicelulose e da lignina. É considerado um dos métodos mais promissores de pré-tratamento, pois associa a modificação química dos componentes da biomassa e a degradação física da parede celular lignocelulósica. (BARAL; SHAH, 2017; KUMAR et al., 2009; KUMAR et al., 2020; ZHAO; ZHANG; LIU, 2012)

## PROCESSOS QUÍMICOS

Os processos de pré-tratamento do tipo químico são os que fazem uso de alguma substância ou solvente químico com o intuito de dissolver ou remover o constituinte de interesse. (KUMAR et al., 2009)

- Hidrólise ácida diluída

A hidrólise ácida diluída utiliza algum ácido diluído como solvente, podendo ser o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) ácido nítrico ( $HNO_3$ ) ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), ácido clorídrico ( $HCl$ ), ácido carbônico sob temperatura controlada entre 100 a 215°C, com concentração variando de 0,5 a 5% durante alguns minutos. (CARDOSO et al., 2013; LOOW et al., 2016; JUNG; KIM, 2015; ZHAO; ZHOU; LIU, 2012; ZHANG et al., 2010)

Este tipo de pré-tratamento tem sido utilizado com o intuito de aumentar a digestibilidade enzimática da celulose, como por exemplo, utilizada para converter os glicanos em açúcares para facilitar a fermentação. (KARAPATSIA et al., 2016; ZHAO; ZHOU; LIU, 2012) Durante esse processo, a hemicelulose é quase toda hidrolisada, a celulose permanece sólida quase totalmente, porém os monossacarídeos são degradados, ou seja, neste método a hemicelulose é mais prontamente hidrolisada que a celulose (ALVIRA et al., 2010; LENIHAN et al., 2010).

- Solvente básico/ extração de álcali

O método que utiliza um solvente básico, normalmente uma solução de hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de cálcio ( $Ca(OH)_2$ ) ou amônia

também chamado de extração de álcali, é aplicado com objetivo de extrair a hemicelulose. O processo consiste na utilização de íons de hidroxila, geralmente, que causam o inchaço da celulose, hidrólise dos ésteres presentes na estrutura da lignina e a clivagem das ligações de hidrogênio entre a celulose e a hemicelulose, causando assim a separação da hemicelulose da estrutura. (CARDOSO et al., 2013; LOOW et al., 2016; PENG et al., 2012; SANTIAGO; RODRIGUES, 2017)

- Método oxidativo

Este método de pré-tratamento químico refere-se à adição de um solvente oxidativo, como o peróxido de hidrogênio, oxigênio, ozônio (ozonólise) ou o ácido peracético, à biomassa. A principal aplicação deste método de pré-tratamento é solubilizar a hemicelulose e a lignina, ou seja, provoca a deslignificação e ruptura das fibras da parede celular e, conseqüentemente, aumentar o acesso a celulose. Uma característica positiva deste método é que pode utilizar a biomassa úmida, ou seja, facilita muito o processo de pré-tratamento e evita o custo com energia do processo de secagem. (QUINTERO; RINCÓN; CARDONA, 2011; ROSSBERG et al., 2017 ZHAO; ZHANG; LIU, 2012)

- Organosolv

O método Organosolv consiste no método de pré-tratamento químico o qual utiliza solventes orgânicos (metanol, etanol, acetona, etilenoglicol) podendo ser na forma de solução aquosa ou não, com ou sem a adição de catalisador (HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), característica que o faz diferenciar dos demais processos químicos, sob temperatura na faixa de 100 a 250°C. Este método é utilizado objetivando a ruptura e remoção da lignina e da hemicelulose, a partir da respectiva dissolução, aumentando a porosidade e, conseqüentemente, tornando a celulose mais acessível. (BOUXIN; JACKSON; JARVIS, 2014; SUN; TREVORAH; OTHMAN, 2018; ZHANG; WU, 2014; ZHAO; ZHANG; LIU, 2012)

## PROCESSOS BIOLÓGICOS

Os processos de pré-tratamento do tipo biológico são os que fazem uso de algum microrganismo como os fungos e as bactérias com objetivo de degradar a fibra da parede celular, geralmente a lignina, e aumentar o acesso ao constituinte de interesse. Porém, os fungos são os agentes mais utilizados, os chamados fungos de podridão branca e os de

podridão parda. É considerado um dos métodos de pré-tratamento mais econômico e ecologicamente favorável, pois é realizado em condições brandas de temperatura e pressão, não necessitam de produtos químicos, no entanto, requer monitoramento contínuo e é caracterizado como um processo mais demorado em relação aos outros. (GÍRIO et al., 2010; KUMAR et al., 2020)

## PROCESSOS COMBINADOS

Os processos combinados referem-se à utilização de mais de um método de pré-tratamento simultaneamente. Geralmente, consiste na aplicação de um método físico e um químico, com por exemplos, a utilização do método térmico juntamente com a hidrólise ácida, onde o ácido atua como um catalisador, diminuindo a temperatura do meio reacional e, conseqüentemente, o tempo do processo. Da mesma maneira acontece se usar um solvente alcalino, o álcali irá atuar como um catalisador do processo, normalmente, é utilizado a cal -  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (QUINTERO; RINCÓN; CARDONA, 2011). Há também a combinação do processo de moagem com a utilização de ácido diluído como foi relatado por Liu e colaboradores (2018).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na realização deste levantamento bibliográfico sobre os tipos de pré-tratamentos aplicados na biomassa lignocelulósica, foi possível observar que existe uma grande variedade de opções e, também, a possibilidade da combinação de mais de um tipo de processo de pré-tratamento, o que, geralmente, é mais utilizado devido aumentar a digestibilidade da biomassa, aumentar a acessibilidade ao constituinte de interesse e, conseqüentemente, aumentar o rendimento do processo com menor custo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte pela oportunidade de realização deste estudo. Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 37.1 pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

AKALĎN, Mehmet Kuddusi; KARAGÖZ, Selhan. Analytical pyrolysis of biomass using gas chromatography coupled to mass spectrometry. **Trac Trends In Analytical Chemistry**, [s.l.], v. 61, p.11-16, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trac.2014.06.006>.

ALONSO, David Martin; WETTSTEIN, Stephanie G.; DUMESIC, James A.. Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. **Chemical Society Reviews**, [S.L.], v. 41, n. 24, p. 8075, 2012. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c2cs35188a>.

ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, E.; BALLESTEROS, M.; NEGRO, M.J.. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 101, n. 13, p. 4851-4861, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>.

BARAL, Nawa Raj; SHAH, Ajay. Comparative techno-economic analysis of steam explosion, dilute sulfuric acid, ammonia fiber explosion and biological pretreatments of corn stover. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 232, p. 331-343, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.068>.

BATISTA, Alyxandra Carla de Medeiros. Conversão térmica e termocatalítica da biomassa de microalgas utilizando Hbeta. 2019. 124f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

BOUXIN, Florent P.; JACKSON, S. David; JARVIS, Michael C.. Organosolv pretreatment of Sitka spruce wood: conversion of hemicelluloses to ethyl glycosides. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 151, p. 441-444, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.105>.

CARDOSO, Wilton Soares; TARDIN, Flávio Dessaune; TAVARES, Gabriella Peterlini; QUEIROZ, Paula Viana; MOTA, Samuel Sampaio; KASUYA, Maria Catarina Megumi; QUEIROZ, José Humberto de. Use of sorghum straw (*Sorghum bicolor*) for second generation ethanol production: pretreatment and enzymatic hydrolysis. **Química Nova**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 623-627, 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422013000500002>.

CHUNDAWAT, Shishir P. S.; PAL, Ramendra K.; ZHAO, Chao; CAMPBELL, Timothy; TEYMOURI, Farzaneh; VIDETO, Josh; NIELSON, Chandra; WIEFERICH, Bradley; SOUSA, Leonardo; DALE, Bruce E.. Ammonia Fiber Expansion (AFEX) Pretreatment of Lignocellulosic Biomass. **Journal Of Visualized Experiments**, [S.L.], n. 158, p. 1-8, 18 abr. 2020. MyJove Corporation. <http://dx.doi.org/10.3791/57488>.

CORDEIRO, Nereida; ASHORI, Alireza; HAMZEH, Yahya; FARIA, Marisa. Effects of hot water pre-extraction on surface properties of bagasse soda pulp. **Materials Science And Engineering: C**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 613-617, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msec.2012.10.005>.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E. O. Em Biomassa para energia; Cortez, L.A.B.; Lora, E.E.S.; Gómez, E. O., eds.; Editora Unicamp: Campinas, 2008, cap. 1.

EICHLER, Paulo; SANTOS, Fernando; TOLEDO, Marcilio; ZERBIN, Patrícia; SCHMITZ, Guilherme; ALVES, Camila; RIES, Lúcias; GOMES, Fernando. PRODUÇÃO DO BIOMETANOL VIA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA. **Química Nova**, [s. l.], v. 38, n. 6, p. 828-835, 2015.

FÉLIX, Camila Ribeiro de Oliveira et al. Pirólise rápida de biomassa de eucalipto na presença de catalisador Al-MCM-41. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.1-11, 8 jan. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170005.0251>.

GÍRIO, F.M.; FONSECA, C.; CARVALHEIRO, F.; DUARTE, L.C.; MARQUES, S.; BOGEL-LUKASIK, R.. Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 101, n. 13, p. 4775-4800, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.088>.

HEISE, Katja; ROSSBERG, Christine; STRÄTZ, Juliane; BÄURICH, Christian; BRENDLER, Erica; KELLER, Harald; FISCHER, Steffen. Impact of pre-treatments on properties of lignocelluloses and their accessibility for a subsequent carboxymethylation. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 161, p. 82-89, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.12.066>.

JUNG, Young Hoon; KIM, Kyoung Heon. Acidic Pretreatment. **Pretreatment Of Biomass**, [S.L.], p. 27-50, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-800080-9.00003-7>.

KARAPATSIA, Anna; PAPPAS, Ioannis; PENLOGLOU, Giannis; KOTROTSIOU, Olympia; KIPARISSIDES, Costas. Optimization of Dilute Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Phalaris aquatica L. Lignocellulosic Biomass in Batch and Fed-Batch Processes. **Bioenergy Research**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 225-236, 1 out. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-016-9793-4>.

KUMAR, Parveen; BARRETT, Diane M.; DELWICHE, Michael J.; STROEVE, Pieter. Methods for Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Efficient Hydrolysis and Biofuel Production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 48, n. 8, p. 3713-3729, 20 mar. 2009. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ie801542g>.

KUMAR, R.; STREZOV, V.; WELDEKIDAN, H.; HE, J.; SINGH, S.; KAN, T.; DASTJERDI, B.. Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: a review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 123, p. 109763, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109763>.

LEE, Jung Myoung; JAMEEL, Hasan; VENDITTI, Richard A.. A comparison of the autohydrolysis and ammonia fiber explosion (AFEX) pretreatments on the subsequent enzymatic hydrolysis of coastal Bermuda grass. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 101, n. 14, p. 5449-5458, jul. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.055>.

LENIHAN, P.; OROZCO, A.; O'NEILL, E.; AHMAD, M.N.M.; ROONEY, D.W.; WALKER, G.M.. Dilute acid hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 156, n. 2, p. 395-403, 15 jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.061>.

LIU, Shijie; ABRAHAMSON, Lawrence P.; SCOTT, Gary M.. Biorefinery: ensuring biomass as a sustainable renewable source of chemicals, materials, and energy. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 39, p. 1-4, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.042>.

LIU, Wei; CHEN, Wei; HOU, Qingxi; WANG, Si; LIU, Fang. Effects of combined pretreatment of dilute acid pre-extraction and chemical-assisted mechanical refining on enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 8, n. 19, p. 10207-10214, 2018. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c7ra12732d>.

LOOW, Yu-Loong; WU, Ta Yeong; JAHIM, Jamaliah Md.; MOHAMMAD, Abdul Wahab; TEOH, Wen Hui. Typical conversion of lignocellulosic biomass into reducing sugars using dilute acid hydrolysis and alkaline pretreatment. **Cellulose**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 1491-1520, 18 abr. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-016-0936-8>.

LU, Houfang; HU, Ruofei; WARD, Al; AMIDON, Thomas E.; LIANG, Bin; LIU, Shijie. Hot-water extraction and its effect on soda pulping of aspen woodchips. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 39, p. 5-13, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.054>.

LUQUE, Rafael; LOVETT, Jon C.; DATTA, Bipasa; CLANCY, Joy; CAMPELO, Juan M.; ROMERO, Antonio A.. Biodiesel as feasible petrol fuel replacement: a multidisciplinary overview. **Energy & Environmental Science**, [S.L.], v. 3, n. 11, p. 1706, 2010. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c0ee00085j>.

MATHEW, Anil Kuruvilla; PARAMESHWARAN, Binod; SUKUMARAN, Rajeev Kumar; PANDEY, Ashok. An evaluation of dilute acid and ammonia fiber explosion pretreatment for cellulosic ethanol production. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 199, p. 13-20, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.121>.

MIDILLI, Adnan. Green hydrogen energy system: a policy on reducing petroleum-based global unrest. **International Journal Of Global Warming**, [S.L.], v. 10, n. 1/2/3, p. 354-370, 25 jul. 2016. Inderscience Publishers. <http://dx.doi.org/10.1504/ijgw.2016.077906>. Disponível em: <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJGW.2016.077906>. Acesso em: 14 abr. 2021.

MONDAL, Madhumanti et al. Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review. **3 Biotech**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.1-21, 30 maio 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13205-017-0727-4>.

PENG, Feng; BIAN, Jing; REN, Jun-Li; PENG, Pai; XU, Feng; SUN, Run-Cang. Fractionation and characterization of alkali-extracted hemicelluloses from peashrub. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 39, p. 20-30, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.034>.

QUINTERO, Julián A.; RINCÓN, Luis E.; CARDONA, Carlos A.. Production of Bioethanol from Agroindustrial Residues as Feedstocks. **Biofuels**, [S.L.], p. 251-285, 2011. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-385099-7.00011-5>.

SAEED, Abrar; JAHAN, M. Sarwar; LI, Haiming; LIU, Zehua; NI, Yonghao; VAN HEININGEN, Adriaan. Mass balances of components dissolved in the pre-hydrolysis liquor of kraft-based dissolving pulp production process from Canadian hardwoods. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 39, p. 14-19, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.039>.



SAINI, Jitendra Kumar; SAINI, Reetu; TEWARI, Lakshmi. Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments. **3 Biotech**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 337-353, 21 ago. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13205-014-0246-5>.

SANTIAGO, Bárbara Luiza Silva; RODRIGUES, Fábio de Ávila. PROCESSAMENTO DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL: uma revisão. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**, [S.L.], v. 3, n. 7, p. 1011-1022, 6 set. 2017. Universidade Federal de Vicosa. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl3iss7pp1011-1022>.

SUN, Wangqiyue; TREVORAH, Raymond; OTHMAN, Maazuza Z.. Fractionation of spent liquor from organosolv-pretreatment using lignin-incompatible extraction. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 269, p. 255-261, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.097>.

ZHANG, Hongdan; WU, Shubin. Efficient Sugar Release by Acetic Acid Ethanol-Based Organosolv Pretreatment and Enzymatic Saccharification. **Journal Of Agricultural And Food Chemistry**, [S.L.], v. 62, n. 48, p. 11681-11687, 21 nov. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/jf503386b>.

ZHANG, Rui; LU, Xuebin; SUN, Youshan; WANG, Xinying; & ZHANG, Shuting. (2010). Modeling and optimization of dilute nitric acid hydrolysis on corn stover. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(2), 306–314. doi:10.1002/jctb.2529

ZHAO, Xuebing; ZHANG, Lihua; LIU, Dehua. Biomass recalcitrance. Part II: fundamentals of different pre-treatments to increase the enzymatic digestibility of lignocellulose. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, [S.L.], v. 6, n. 5, p. 561-579, 13 jun. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/bbb.1350>.

ZHAO, Xuebing; ZHOU, Yujie; LIU, Dehua. Kinetic model for glycan hydrolysis and formation of monosaccharides during dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 105, p. 160-168, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.075>.