



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA**

**SISTEMA PARA PRÉ-TRATAMENTO DE BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR**

ZHANG YUAN

BRASÍLIA, 2016

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

ZHANG YUAN

**SISTEMA PARA PRÉ-TRATAMENTO DE BAGAÇO DE
CANA-DE AÇÚCAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Brasília,
como parte das exigências do programa
de graduação em Química Tecnológica,
para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Moreira da
Silva

BRASÍLIA, 2016

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Professor, Fábio Moreira da Silva por aceitar a ser meu orientador mesmo estando tão atarefado e me ajudar nesta longa caminhada da minha formação acadêmica.

À Embrapa pela oportunidade do estágio.

Aos professores do Instituto de Química, por compartilharem os seus conhecimentos e a sua experiência e contribuírem para a minha formação.

A todas as demais pessoas que contribuíram, direta e indiretamente, para que o presente texto pudesse ser desenvolvido.

BRASÍLIA, 2016

Lista de figuras

Figura 1 - Participação de países selecionados no consume mundial de petróleo ...	11
Figura 2 - Cana de açúcar	14
Figura 3 - Bagaço de cana de açúcar	15
Figura 4 - Excedente de Bagaço de cana de açúcar	18
Figura 5 - Divisão das paredes	20
Figura 6 - Estrutura da parede celular vegetal	20
Figura 7 - Componentes de materiais lignocelulósicos	21
Figura 8 - Representação da estrutura linear da celulose, formadas pelas unidades celobiose	23
Figura 9 - Representação das ligações de hidrogênios na estrutura da celulose	24
Figura 10 - Monossacarídeos constituintes das hemiceluloses	25
Figura 11 - Estrutura simplificada da lignina	27
Figura 12 - Representação da quebra da biomassa	30
Figura 13 - Ação das celulases durante a hidrólise enzimática	32
Figura 14 - Esquema do processo de produção	35
Figura 15 - Reator dimensionado	42
Figura 16 - Dimensões padrão do reator	Erro! Indicador não definido.
Figura 17 - Tipo de rotor	42
Figura 18 - Tanque de reservatório PP	43
Figura 19 - Tanque de reservatório PEAD	44
Figura 21 - Seleção de rotores com relação à volume de massa agitadas em função da viscosidade e a da velocidade de rotação do rotor	60
Figura 22 - Seleção de rotores em função da viscosidade	61

Lista de tabelas

Tabela 1 - Abaixo representa a taxa dos materiais lignocelulósicos presentes em cada tipo de biomassa	22
Tabela 2 - Tabela dos tipos de pré-tratamentos utilizados	28
Tabela 3 - Relações de tanque e agitadores	37
Tabela 4 - Valores do dimensionamento do reator	38
Tabela 5 - Valores do cálculo de potência	39
Tabela 6 - Parâmetro da caldeira	41
Tabela 7 - Tabela de liquido vapor da água	55
Tabela 8 - Velocidades recomendadas	55
Tabela 9 - Tamanho da tubulação com o fluxo volumétrico recomendado	56
Tabela 10 - Classificação dos rotores mais comuns	57
Tabela 11 - Características da bomba centrífuga	58
Tabela 12 – Consumo de energia agitadores em número de potência (ϕ) e número de Reynolds (N_{RE})	59

Lista de siglas e abreviaturas

ANP – Agencia Nacional do Petróleo

APP – Área planta piloto

EISA – Energy Independence and Security Act

CGEE – Centro de gestão de estudos estratégicos

DF – Distrito Federal

GO – Goiás

GP – Grau de polimerização

KW – Kilo Watts

MJ – Mega Joule

OCDE – Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômicos

ph - Potencial hidrogeniônico

PEA – Policy Energy Act

Proálcool

RPM – Rotações por minutos

Sumário

Resumo.....	8
Objetivos.....	10
1.1. Objetivos geral.....	10
1.1. Objetivos específicos	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Biocombustíveis.....	10
2.2. Etanol	11
2.3. Perspectiva Nacional.....	13
2.4. Cana de açúcar: a matéria-prima.....	14
2.5. Produção de açúcar e etanol.....	16
2.6. Bagaço de cana de açúcar	17
3. Materiais lignocelulósicos.....	18
3.1. Estrutura celular e seus aspectos	19
3.2. Composição química.....	21
3.3. Celulose.....	22
3.4. Hemicelulose	24
3.5. Lignina	26
4. Pré-tratamento dos materiais.....	27
4.1. Pré-tratamento auto-hidrólise	28
4.2. Pré-tratamento realizado no estágio da EMBRAPA Agro energia.....	30
4.3. Inibidores.....	31
4.4. Coquetel enzimático	31
5. Material e métodos	33
6. Resultado e discussões	33
6.1. Dimensionamento	34
6.2. Moagem da biomassa	34
6.3. Pré-tratamento	34
6.4. Hidrolise enzimática.....	35
6.4.1. Dimensionamento do reator	36
6.4.2. Cálculo da potência de agitação do sistema.....	38
6.4.3. Cálculo de quantidade calor	39
6.5. Tipo de reator	41
6.5.1. Tipo de agitador	42
6.5.2. Tipo de bomba	43
6.6. Separação do bagaço tratado.....	43

6.7. Tubulações utilizadas.....	44
6.8. Cálculo da capacidade produtiva.....	44
7. Conclusão.....	46
8. Referências bibliográficas	47
9. ANEXOS.....	55

Resumo

A introdução do etanol na matriz energética brasileira ocorreu, no início do século XX, e foi concretizada em 1975 com o lançamento do Programa Nacional do Álcool (Pro - Álcool), cujo objetivo era a substituição em larga escala e a redução da dependência nacional em relação aos produtos derivados de petróleo, da qual foi financiado pelo governo do Brasil durante a crise do petróleo (1975 – 1979). O etanol, também conhecido como álcool etílico representa a substância orgânica de fórmula C_2H_6O , cuja sua produção ocorre desde os tempos antigos por meio do processo de fermentação dos açúcares encontrados em produtos de origem vegetal. Sendo que ainda hoje, o etanol industrial é obtido pelo mesmo processo, entretanto de maneira mais eficiente e em grande escala. O etanol feito a partir da cana de açúcar gera uma grande quantidade de bagaço que é denominado como resíduo, sendo ele podendo ser transformado em adubo ou queimado na maioria das vezes em caldeiras para a obtenção de energia, entretanto esse processo é extremamente prejudicial ao meio ambiente devido à grande quantidade de poluição gerada e também traz consequências a saúde humana, principalmente para a população que reside próximo das indústrias onde ocorre este processo. Devido a esses problemas, pesquisas foram elaboradas baseando no reaproveitamento do bagaço para a produção do etanol.

A tecnologia da primeira geração é baseada na fermentação alcoólica dos carboidratos, por exemplo, no caldo de cana de açúcar (modelo de produção brasileiro) ou em hidrolisados enzimáticos do amido de milho (modelo de produção norte americana). Enquanto que a tecnologia de segunda geração (Bioetanol ou etanol celulósico ou também conhecido como etanol de segunda geração) utilizam resíduos ou bagaços agrícolas para a produção de etanol, entretanto o processo fermentativo é baseado nos carboidratos liberados da biomassa vegetal por meio da hidrólise da celulose e das hemiceluloses. Para ser pragmático o processo basicamente é uma alternativa para a produção do etanol a partir de sorgo, milho, beterraba e principalmente bagaço ou palha da cana de açúcar. O processo é visto como uma forma de aumentar a produção do etanol no Brasil, sem ter de investir em aumento da plantação, devido ao fato do seu aproveitamento de resíduos. Além de ser

considerada uma das mais importantes alternativas à consolidação de um modelo sustentável para a produção de combustíveis renováveis.

Atualmente o Brasil é considerado o maior produtor mundial de cana de açúcar e tem um grande potencial para produzir o etanol de segunda geração feito a partir do bagaço da cana de açúcar, pois há uma grande concentração de matérias primas e com fácil acesso, podendo transformar o Brasil em um grande produtor no mercado internacional. Por isso tem a necessidade de aprofundar esta técnica para a obtenção deste novo biodiesel, em que pode ser uma das possibilidades mais promissoras e ambientalmente sustentáveis para a substituição do combustível fósseis.

Palavra-chave: Biomassa vegetal. Bagaço da cana de açúcar. Processo fermentativo.

Objetivos

1.1. Objetivos geral

Dimensionar um sistema para o pré-tratamento de bagaço de cana de açúcar.

1.1. Objetivos específicos

Por meio de dados da literatura e a partir de resultados obtidos em trabalho de pesquisa será proposto um sistema de pré-tratamento de biomassa.

Além de dimensionar e especificar os equipamentos envolvidos no processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biocombustíveis

Estima-se que a matriz energética do planeta tem participação total de 80% de combustível fóssil, sendo 40% de petróleo, 30% de carvão mineral, 30% de gás natural e a biomassa atuando com apenas 10% da matriz energética mundial.

O petróleo ainda é a fonte de energia dominante, países como os Estados Unidos e a China estão entre os principais consumidores deste recurso. Entretanto, devido ao esgotamento do petróleo num futuro próximo e as ameaças ambientais que a exploração de petróleo ocasiona, principalmente com as emissões de CO₂, a busca por outras fontes alternativas tem sido cada vez maior (ANP, 2009).

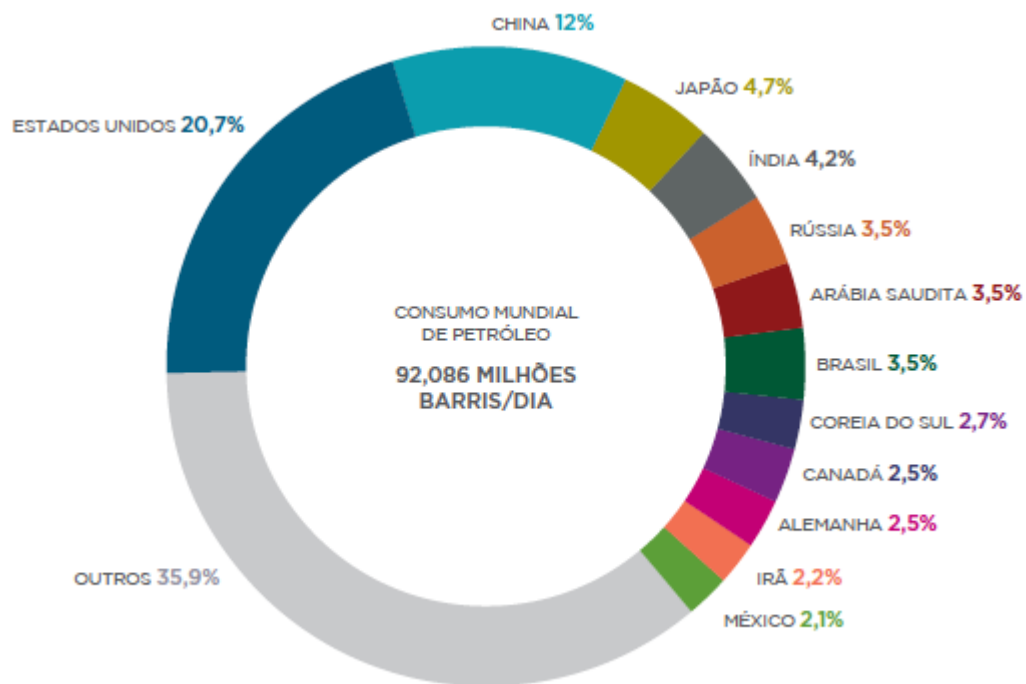


Figura 1 - Participação de países selecionados no consume mundial de petróleo

Fonte - BP Statistical Review of World Energy 2015

Com isso, a indústria química do século XXI será forçado a passar por uma completa reestruturação, recorrendo ao uso de recursos renováveis como matéria-prima básica e a biotecnologia para a realização de transformações químicas (BRDTAC, 2002; NRC, 2000; WILKE, 2000).

2.2. Etanol

O etanol ou álcool etílico de forma molecular C_2H_5OH é produzido desde a antiguidade através do processo de fermentação dos açúcares encontrados em produtos vegetais, sendo que ainda hoje, grande parte do etanol industrial é obtido ainda pelo mesmo processo.

O uso de fontes alternativas como o bioetanol tem gerado grandes interesses devido à alta dos preços e aos problemas ambientais causados pelos combustíveis fósseis, pois trata-se de um produto orgânico renovável

com características de combustível, que poderá contribuir para a redução do efeito estufa e diminuir vultuosamente a poluição. Atualmente, o uso do biocombustível corresponde apenas 10% da energia mundial, no entanto, estimativas indicam que a utilização mundial do mesmo será de 27% em 2050 (IEA, 2010).

Vários países estão interessados nas iniciativas que envolvem o uso do álcool como a fonte de combustível dominante, sendo que alguns já aderiram o uso, entre os quais se destacam: Alemanha, França, Austrália, Guatemala, Nicarágua, Índia, Nova Zelândia, Japão e Coreia do Sul (CASTRO, 2005).

O tratado implementado pela PEA, Policy Energy Act, seguida pela EISA, Energy Independence and Security Act, mostra que em 2022 deverá haver uma demanda de cerca de 35 bilhões de galões de bioetanol por ano do mundo inteiro (LIMAYEM & RICKE, 2012).

Neste âmbito, estudos de modelagem feitos por Giacomo et Giacomo et al.; (2012) indicaram que uma planta piloto produziria cerca de 40.000 t etanol/ano a partir de 240.000 t biomassa/ano.

Os Estados Unidos e o Brasil produzem juntos o etanol a partir do milho e da cana de açúcar, sendo que os Estados Unidos têm uma preferência maior pelo milho, enquanto que o Brasil tem uma preferência pela cana de açúcar, sendo que os dois países juntos são considerados os maiores produtores mundiais de etanol, correspondendo cerca de 90% da produção global de etanol. De acordo com a Associação de Combustíveis Renováveis, a produção de etanol foi de 10,9 e 12,82 bilhões de galões nos anos de 2009 e 2010, respectivamente (LIMAYEM & RICKE, 2012), representando 55% da produção mundial.

2.3. Perspectiva Nacional

A troca da gasolina pelo etanol no Brasil iniciou-se em meados de 1975, quando o governo lançou o Programa do Álcool (Proálcool). Hoje em dia, o Brasil é considerado um dos líderes mundiais no uso de combustíveis renováveis, tendo a posse de 850 milhões de hectares de área total, dos quais cerca de 8 milhões são utilizadas para a plantação de cana de açúcar (CONAB, 2011).

O Brasil apresenta uma das maiores proporções mundiais no uso de matriz energética renovável, onde 45% da energia fornecida são de origem renovável, contrastando significativamente com a média mundial de apenas 14%, e mais ainda com a média dos países que compõem a Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômicos (OCDE), em sua grande maioria países desenvolvidos, de apenas 8% (EPE, 2012).

A produção no Brasil em 2010 foi de 27 bilhões de litros de etanol, um aumento com relação ao volume de 2002 (12,5 bilhões de litros), vale ressaltar que são dados antes da introdução dos veículos flexfuel. Em abril de 2003, a Empresa Volkswagen lançou o Gol Total Flex, que foi considerado o primeiro veículo com tecnologia flexfuel a chegar no mercado, sendo que esse veículo foi desenvolvido em parceria com a Empresa Magneti Marelli.

Com isso houve um crescimento estrondoso no uso de carros flexfuel, chegando a cerca de 70% total de carros do Brasil. Hoje em dia, os dados indicam cerca de 90% total de carros flexfuel que circulam no país. Em janeiro de 2012, o setor automotivo alcançou a marca de 15,60 milhões de veículos bicompostíveis licenciados desde 2003 e a sua participação estimada na frota total de veículos leves foi de 48% (CENBIO, 2011; MMA, 2012)

O Brasil por ser um país tropical é um diferencial extremamente positivo para a produção de energia de biomassa, por isso, devemos considerar que a quantidades de bagaços de cana-de-açúcar gerado pelos processos de produção de etanol tenham a chance de se tornar matéria prima para outros processos produtivos, como por exemplo a produção de etanol de segunda

geração, por meio de tecnologias portadoras de futuros, gerando mais empregos e desenvolvimento.

2.4. Cana de açúcar: a matéria-prima

A cana-de-açúcar é um vegetal do tipo gramínea, que tem origem asiática e pertence a uma das mais importantes e maiores famílias de angiospermas, a Poaceae. Entre as seis espécies mais conhecidas, duas são consideradas silvestres (*Saccharum robustum* Brandes e Jewiest e *Saccharum spontaneum* L.) e quatro cultivadas (*Saccharum officinarum* L., *Saccharum sinense* Roxb., *Saccharum edule* Hassk e *Saccharum barberi* Jewiest.) (DANIELS & ROACH, 1987).



Figura 2 - Cana de açúcar

Fonte: SIFAEG (2013)

Basicamente a cana de açúcar são herbáceas, perenes, caule do tipo colmo cheio, com nós e entrenós (de onde saem gemas), epiderme característica raiz fasciculada e flores monoclinas (JOLY, 2002).

Além disso, as folhas da cana-de-açúcar são alternas ou opostas, e possuem nervuras paralelinérveas e bainhas largas, que são lineares e podendo chegar a 140 centímetros de comprimento e produzindo um fruto

pequeno, do tipo cariopse. Dentre seus constituintes químicos estão o ácido hidrociânico, o ácido ascórbico, sais minerais (sobretudo de cálcio e de ferro), fibras e sacarose.

O Brasil é considerado um dos maiores produtores mundiais de cana de açúcar, juntamente com a Índia, Tailândia, China e Paquistão. A cana de açúcar é considerada uma das culturas agrícolas mais importantes em países tropicais, e no Brasil ela é utilizada principalmente na produção de álcool (etanol) e açúcar, no interior paulista, principal produtor mundial de cana-de-açúcar, é uma das regiões mais desenvolvidas do Brasil, possuindo elevados índices de desenvolvimento urbano e renda per capita muito acima da média nacional (BNDES, 2006).

O bagaço de cana de açúcar é um resíduo que apresenta um alto teor de carboidratos, com isso o seu processamento biotecnológico é uma alternativa atrativa nas biorrefinarias celulósicas, visando a produção associada às usinas sucroalcooleiras e integrando outros resíduos da cadeia produtiva (CUNHA et al., 2005; DIAS et al., 2009).



Figura 3 - Bagaço de cana de açúcar

Fonte: ARYSTA (2014)

2.5. Produção de açúcar e etanol

A produção do açúcar ocorre em diversas etapas, primeiramente a cana de açúcar é prensada, e é submetida a uma etapa de sulfitação, seguida de clarificação e finalmente a cristalização, onde é obtido o produto para ser comercializado (NANDY et al., 2002). Podemos obter diversos tipos de açúcares, por meio de um melaço um xarope altamente viscoso que é produzido e contendo cerca de 35% (p/p) de sacarose e 15% (p/p) de açúcares invertidos (glicose e frutose).

Enquanto que para a produção de etanol, o caldo da cana de açúcar ou o melaço são fermentados, resultando em uma solução com um teor alcoólico entre 6-8% (v/v) (COSTA et al., 2001; ROGERS, 2005) e após a destilação do meio fermentado e da retificação do destilado, podemos obter um produto com cerca de 94-96% (v/v) de etanol (RYAN & JOHNSON,2001).

Um exemplo disso são as usinas que produzem tanto açúcares quanto álcool, onde para cada tonelada de cana de açúcar processada são gerados 100 a 150 kg de açúcares e 70 a 90 litros de etanol, além de produzir 300 kg de bagaço, que poderia ser reaproveitados para a produção, 980 litros de vinhoto e entre outros resíduos (NANDY et al., 2002).

O vinhoto, também conhecido como resíduo da destilação fracionada do caldo de cana de açúcar fermentado durante a produção de etanol, tem sido reaproveitado na produção de fertilizante e na produção de biogás. Enquanto que os resíduos compostos da mistura de bagaço moído na torta de filtro e no lodo da decantação, provenientes do processo de clarificação do açúcar são utilizados como fertilizantes, devido a sua composição rico em cálcio, nitrogênio e potássio.

Além disso, a biomassa microbiana, proveniente do esgotamento do reciclo celular são utilizadas na indústria alimentícia para a produção de ração, uma vez que esse produto possui mais de 40% de proteína. Há estudos para a utilização da biomassa seca também na alimentação humana, principalmente na produção de gás carbônico (CO₂), para as fábricas de refrigerantes e indústria química (ROGERS, 2005).

A cana de açúcar possui um alto potencial energético e é desmembrado em seus três principais contribuintes, onde para tonelada de cana de açúcar,

1.700 MJ vem do etanol produzido, enquanto que 2.100 e 2.150 MJ são referentes ao bagaço e à palha, respectivamente (MOREIRA, 2000).

Vale lembrar que a palha não é considerada um resíduo industrial, e muitas vezes é queimado no campo da colheita, prejudicando o meio ambiente. Sendo que ela poderia ser utilizada para outros processos, devido ao seu enorme potencial energético e biotecnológico.

2.6. Bagaço de cana de açúcar

As biomassas lignocelulósicas são geralmente resíduos agrícolas que apresenta uma fonte potencial de produtos biotecnológicos de alto valor agregado (PITARELO, 2007; RAMOS, 2003; NIGAM e SINGH, 2000). O bagaço de cana de açúcar é um resíduo lignocelulósico, constituído basicamente por celulose, hemicelulose e lignina, compondo em média, 28% do peso da cana de açúcar, sendo que sua composição elementar é de 44,6% de carbono, 5,8% de hidrogênio, 44,5% de oxigênio, 0,6% de nitrogênio, 0,1% de enxofre e 4,4% de outros elementos.

Para obter esses açúcares são necessárias aplicações de técnicas que permite a sua extração, como por exemplo no caso da extração de xilose, são utilizadas diferentes metodologias de solubilização e hidrólise, dentre as quais o pré-tratamento ácido é normalmente empregado (BETANCUR & PEREIRA JR, 2010; FUJITA et al., 2004).

Devemos salientar também que o bagaço de cana é um dos subprodutos da indústria da cana, sendo este extremamente valioso, pois é um resíduo representativo da consolidada indústria brasileira na produção de bioetanol. Produzida na proporção 280 kg/t de cana, o bagaço é proveniente da moagem da cana de açúcar e é composto por fibras e resíduos de caldo açucarado (CTC, 2010).

Segundo os dados da Companhia Nacional de Abastecimento houve um crescimento de 7,3% na safra de 2014 e atingiu 596.63 milhões de toneladas, gerando cerca de 180 milhões de toneladas de bagaço de cana. Nos dias de hoje, 90% do bagaço gerado na usina é consumido para a produção de energia por meio da co-geração, tornando a usina autossustentável energeticamente.



Figura 4 - Excedente de Bagaço de cana de açúcar

Fonte: PINIWEB (2010)

Mesmo podendo ser utilizado para a geração de energia ou como suplemento para alimentação animal, ainda há uma grande quantidade de bagaço que poderia ser aproveitado para a produção de diversos bens da sociedade, como por exemplo na produção de etanol, papel, celulose, madeira prensada, revestimento acústicos, enzimas, alcaloide, e forragem para agricultura (CUNHA et al., 2005, PANDEY et al., 2000; SILVA et al., 2009).

3. Materiais lignocelulósicos

Materiais lignocelulósicos são matérias fibrosos, que formam matrizes complexas compostas por lignina sendo oriundas de celulose, e com uma rígida estrutura polimérica de glicose. Em geral as matérias lignocelulósicos são encontrados na biomassa vegetal como bagaço de cana e entre outros resíduos, que constituem em matéria prima para obtenção de diversos tipos de produtos, como por exemplo o etanol e ração (BINOD et al., 2010; YAMASHITA et al., 2008; DEMIRBAS, 2003).

Pelo fato de apresentar uma grande quantidade disponível desse material foi estimado que possam ser gerados cerca de 490 bilhões de litros de biocombustível, podendo ser ampliado em até 16 vezes na sua produção anual. Portanto, essas matérias fibrosas podem suprir em grande escala a produção deste combustível, utilizando apenas resíduos agroindustriais.

Sendo que o bagaço de cana, a palha de arroz, de trigo e de milho são considerados as matérias lignocelulósicas mais promissoras para serem empregadas em bioprocessos.

Mesmo que esses resíduos sejam utilizados principalmente como combustíveis, e ração de animal, uma grande parte ainda é inutilizada, constituindo-se em excedentes e muitas vezes queimados causando grande prejuízo ao ambiente. A indústria de celulose gera, ainda, resíduos industriais, contendo alto teor de fibra de celulose, cerca de 80%, que poderiam se tornar matéria-prima. Entretanto, isso não ocorre, principalmente por causa da falta de etapas de processos durante o pré-tratamento e também por causa da abundância desse material (SILVA, et al., 2009).

Segundo a associação brasileira de celulose e papel, a produção mundial de papel cresceu 35%; nos últimos 10 anos, com cerca de 9,4 milhões de toneladas; sendo que o Brasil somou 8,2 milhões de toneladas de papel em 2004 e ocupou a posição de sétimo maior fabricante mundial de celulose (BRACELPA, 2006).

3.1. Estrutura celular e seus aspectos

Pelo fato do material ser oriundo de vegetais, a sua estrutura celular é composta por uma parede celular rígida de polissacarídeo e com propriedades físico-químicas tais como resistência, elasticidade e plasticidade.

Conforme ilustrado na figura abaixo, a parede celular dos materiais lignocelulósicos é formada por arranjos/concêntricos divididos em camadas com diferente composição química e orientação dos elementos estruturais (FENGEL & WEGENER, 1991).

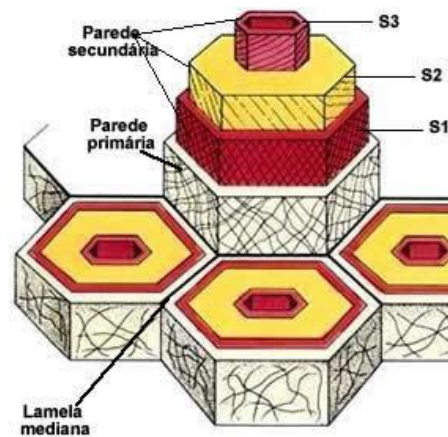


Figura 5 - Divisão das paredes

Fonte: Adaptado de AMABIS

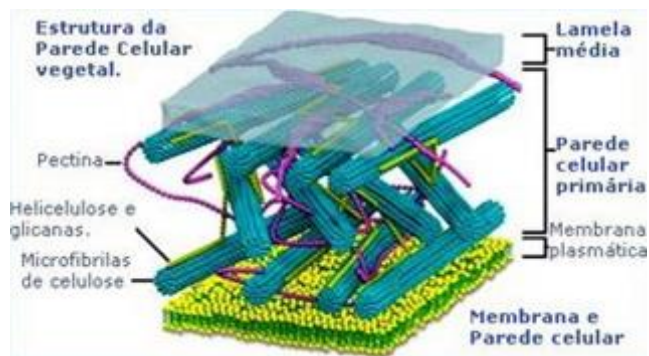


Figura 6 - Estrutura da parede celular vegetal

Fonte: Adaptado de AMABIS

Como podemos ver na figura acima a parede primária é a camada depositada durante o aparecimento da célula, onde as fibrilas de celulose formam arranjos com aspectos de redes. Sendo composta por proteínas, pectinas, celulose e poliose (hemicelulose).

Nas células vegetais jovens a parede primária é fina e elástica, enquanto que nas células adultas esta parede sofre um espessamento, que pode formar internamente à parede primária, uma parede secundária, composta por suberina, hemicelulose e lignina. A parede celular das células vegetais é formada basicamente por pectina, celulose, glicoproteínas e com uma estrutura de rede composta por fibrilas de celulose. Dentro da parede celular há várias camadas distintas, a camada mais interna que delimita o lúmen

celular, denominada de lamela terciária; a camada intermediária formada pela parede secundária, que pode ser formada por quatro lamelas, lamela transicional, parede primária, lamela média, camada externa, em contato com a parede primária. A lamela média é uma camada fina (0,2 a 1 µm) que une as células entre si para formar o tecido e possui grandes quantidades de lignina (SJÖSTRÖM, 1981; FENGEL & WEGENER, 1991).

As fibrilas que compõem na formação da parede celular são formadas por um conjunto de agregação de mais ou menos 250 microfibrilas, que são constituídos por pequenas moléculas de celulose, onde cada molécula de celulose é formada por mais de mil resíduos de glicose, os quais se interligam por pontes de oxigênio. Dentro das fibrilas as moléculas de celuloses podem estar rearranjadas de forma desordenadamente ou ordenadamente, formando micelas de estrutura cristalina. (FENGEL & WEGENER, 1991).

3.2. Composição química

As matérias lignocelulósicos são basicamente compostos por extrativos (ésteres, álcoois e esteroides) e inorgânicos (sulfatos, oxalatos, carbonatos e silicatos de cálcio, potássio e magnésio), além da celulose, hemicelulose e lignina. Podendo variar as proporções entre os seus constituintes, dependendo do tipo de planta, idade, tempo de colheita e condição ou estagio de crescimento (JEFFRIES e JIN, 2000).

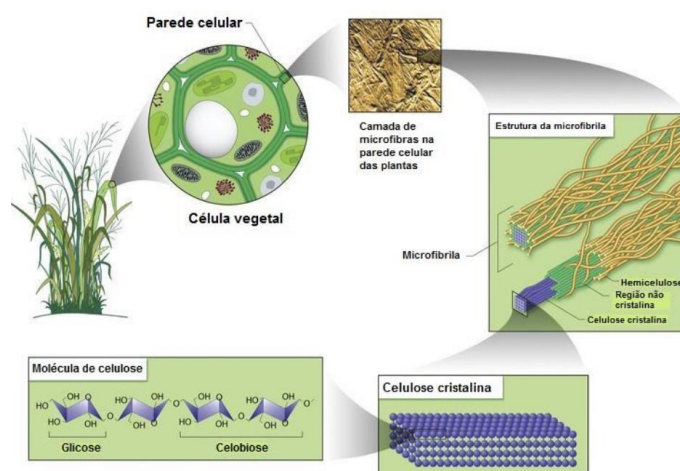


Figura 7 - Componentes de materiais lignocelulósicos

Fonte: Adaptado de US DOE, 2007

Como podemos ver a tabela abaixo mostra a composição de alguns dos principais materiais lignocelulósicos utilizados nas indústrias.

Tabela 1 - Abaixo representa a taxa dos materiais lignocelulósicos presentes em cada tipo de biomassa

Resíduos	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Proteínas	Cinzas
Palha de arroz	32-47%	19-27%	5 a 4%	-	12,4%
Palha de trigo	35-47%	20-30%	8-15%	3,1%	10,1%
Palha de milho	42,6%	21,6%	8,2%	5,1%	4,3%
Bagaço de cana de açúcar	33-36%	28-30%	18,4%	3%	2,4%

Fonte: SARKAR et al. (2012)

3.3. Celulose

A celulose, hemicelulose, e a lignina ainda constituem uma grande proporção na composição desses materiais lignocelulósicos, sendo que a celulose hemicelulose são estruturas duras e fibrosas, entremeadas por uma macromolécula composta por álcoois aromáticos, a lignina, que se encontra unida por ligações covalentes e de hidrogênio. É considerada matéria orgânica mais abundante da Terra, representando cerca de 50% de toda biomassa do planeta.

Detalhadamente a sua estrutura é formada pela união de moléculas de β -D-glicose através de ligações β -1,4-glicosídicas carbono-carbono, onde várias ligações de hidrogênios são estabelecidas com os diferentes grupos de hidroxilas das cadeias justapostas de glicose, formando uma estrutura impermeável a água e insolúvel, originando fibras compactas que compõem a parede celular dos vegetais, dando origem a um polímero linear (LEMOS, 2001).

Além disso, dependendo da origem e do possível grau de degradação a sua cadeia de celulose pode variar de 1.000 a 15.000 (FENGEL & WEGENER, 1991). Sua estatura é expressa em termos de grau de

polimerização, ou seja, pelo número de unidades de glicose anidra que contém em cada fibra. Entretanto, por meio da análise em HPLC podemos concluir que a cadeia polimérica apresenta unidades de repetição do tipo celbiose, o motivo disso deve-se as ligações do tipo β , onde os monômeros de glicose são rearranjados através de uma rotação de 180° (STRYER, 1996).

Essas ligações permitem não só apenas ligações intramoleculares, mas também ligações intermoleculares, do tipo ligações de hidrogênio e forças de Van Der Waals, formando uma estrutura simétrica, altamente cristalina, estável e com uma alta força de tensão (ZHANG & LYND, 2004).

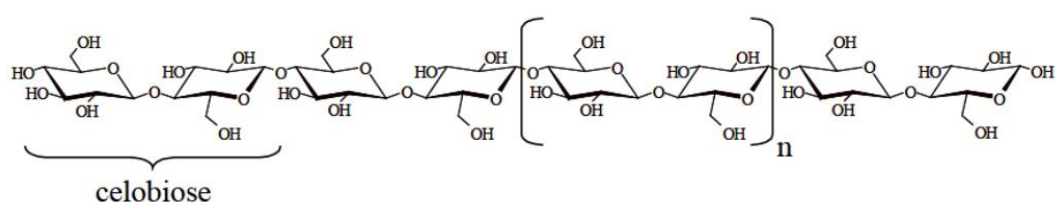


Figura 8 - Representação da estrutura linear da celulose, formadas pelas unidades celbiose

Fonte: MARTINS, 2005.

A formação das microfibrilas que compõem nas paredes celulares deve-se principalmente pela ligação de hidrogênio intermolecular entre as moléculas de glicoses adjacentes, onde o C6-OH e o oxigênio do C3 são ligados ao longo da cadeia de celulose, formando então uma estrutura rígida com o alinhamento das moléculas (FENGEL & WEGENER, 1991).

Devido a essas ligações de hidrogênio, podem apresentar na estrutura duas regiões distintas, a cristalina e a amorfa ou desordenadas (BRISTOW & KOLSETH, 1986; MITRA & MUKHELJEE, 1980). As regiões cristalinas apresentam um arranjo ordenado das cadeias moleculares, originando espaçamentos interatômicos, onde se repetem tridimensionalmente e difratam-se raios-X, enquanto que nas regiões amorfas ou desordenadas, as cadeias assumem formas deformadas e encurvadas (SJÖSTRÖM, 1981; LAKABI, 1990).

Porém não existe limites definidos entre essas duas regiões, apresentando apenas uma transição contínua entre elas, podendo apresentar desde regiões desordenados com cadeia mais ou menos paralelas até completamente aleatórias (KOGA, 1988).

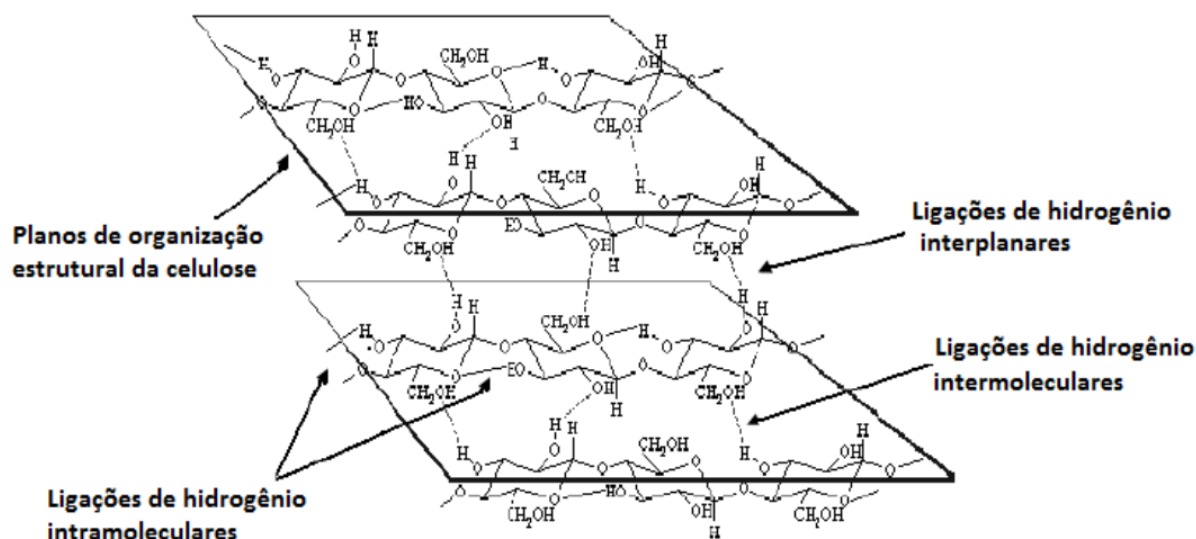


Figura 9 - Representação das ligações de hidrogênios na estrutura da celulose

Fonte: GARRET & GRISHAM (1999)

3.4. Hemicelulose

Além da celulose, outro componente essencial que constitui a parede celular das plantas são as hemiceluloses. A hemicelulose é basicamente uma macromolécula de polissacarídeo solúvel em água e facilmente solubilizados em solução alcalina, sendo composto por diferentes tipos de açúcares pertencentes aos grupos das pentoses, hexoses, ácidos hexenurônicos e desoxiexoses, que estão ligadas intrinsecamente com a celulose, definindo propriedades à parede celular e desempenhando funções de regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas (FENGEL & WEGENER, 1991; LIMA & RODRIGUES, 2007).

A hemicelulose é um polissacarídeo formado principalmente por cadeias poliméricas ramificadas onde estão intercaladas às microfibrilas da celulose, sendo divididas em xilanas, mananas, galactanas e galacturonanas e suas unidades monoméricas são unidas por ligações do tipo 1,3; 1,4; e 1,6; sendo que as xilanas estão presentes em maiores proporções, das quais são unidas por ligação do tipo β -1,4 (RAMOS, 2003; SZENGYEL, 2000; BISSOON et al., 2002).

Diferentemente da celulose, as hemicelulose são macromoléculas ramificadas que apresentam cadeias curtas com um grau de polimerização de 100 a 200 unidades de açúcares, sendo derivado de vários tipos de unidades de açúcares. Além disso, são bastante suscetíveis a processos de tratamentos químicos, pelo fato de serem amorfas e solúveis em meio básico (SHLESER, 1994).

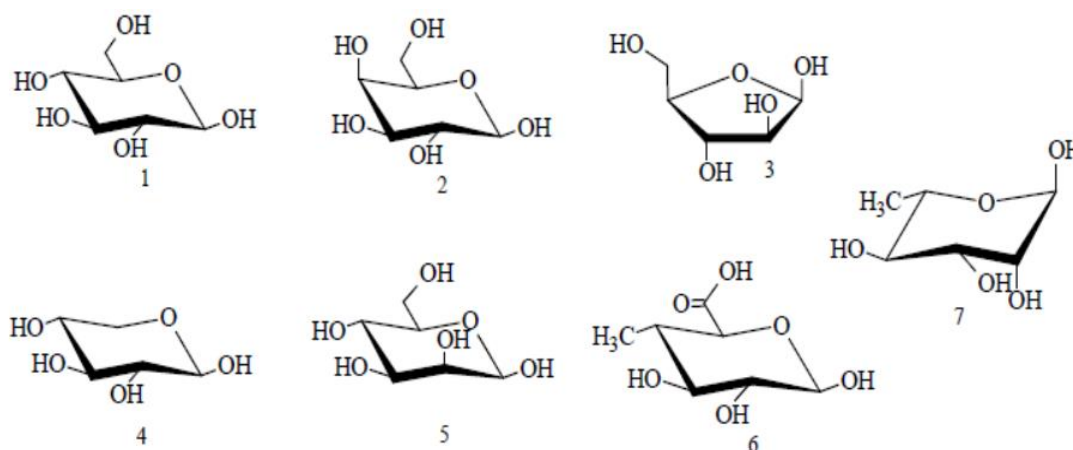


Figura 10 - Monossacarídeos constituintes das hemiceluloses

Onde: (1) D-Glucose; (2) D-Galactose; (3) L-Arabinose; (4) D-Xilose; (5) D-Manose; (6) 4-O-Metil-D-Glucurônico; (7); L-Ramnose.

Fonte: SJÖSTRÖM (1999)

3.5. Lignina

As ligninas são substâncias de estruturas complexas e macromoléculas orgânicas naturais mais abundantes da Terra, ocupando cerca de 30% dos carbonos da biosfera (FENGEL & WEGENER, 1991). Com uma estrutura bastante heterogênea, formado principalmente por uma rede de anéis aromáticos unidos por meio de ligações alquil-aril-éter, e com um arranjo amorfo de altas quantidades de ligações cruzadas entre os anéis (FENGEL & WEGENER, 1991).

Constituído por macromoléculas, a lignina apresenta macromoléculas tridimensionais fenilpropanóidicas formadas pela polimerização dos álcoois p-cumarílico, coniferílico e sinapílico, resultando em diferentes tipos de ligninas, como por exemplo, a combinação dos álcoois coniferílico e p-cumarílico geram estruturas mais complexas do que as formadas pelos álcoois coniferílico e sinapílico (FENGEL & WEGENER, 1991; ABREU & OERTEL, 1999).

Incorporada como o último componente na formação da parede celular, a lignina é interpenetrada nas fibrilas, dando à parede celular características como a rigidez, impermeabilidade, e resistência a ataques microbiológicos. (FENGEL & WEGENER, 1991; MESHITSUKA & LSOGAI, 1996). Essa ligação permite originar estruturas rígidas e fortes na molécula da celulose presentes na fibra vegetal e gerando estruturas resistente ao impacto, compressão e dobra na madeira.

Pelo fato de ser altamente energética, a lignina pode ser reaproveitada ou utilizada para gera energia necessários ao processo de produção de etanol e também ser utilizada para a formação de diversos tipos de produtos, como por exemplo, compostos fenólicos, aromáticos, ácidos dibásicos e metil, formado pela reação da fração fenólica com álcoois (WYMAN, 1994).

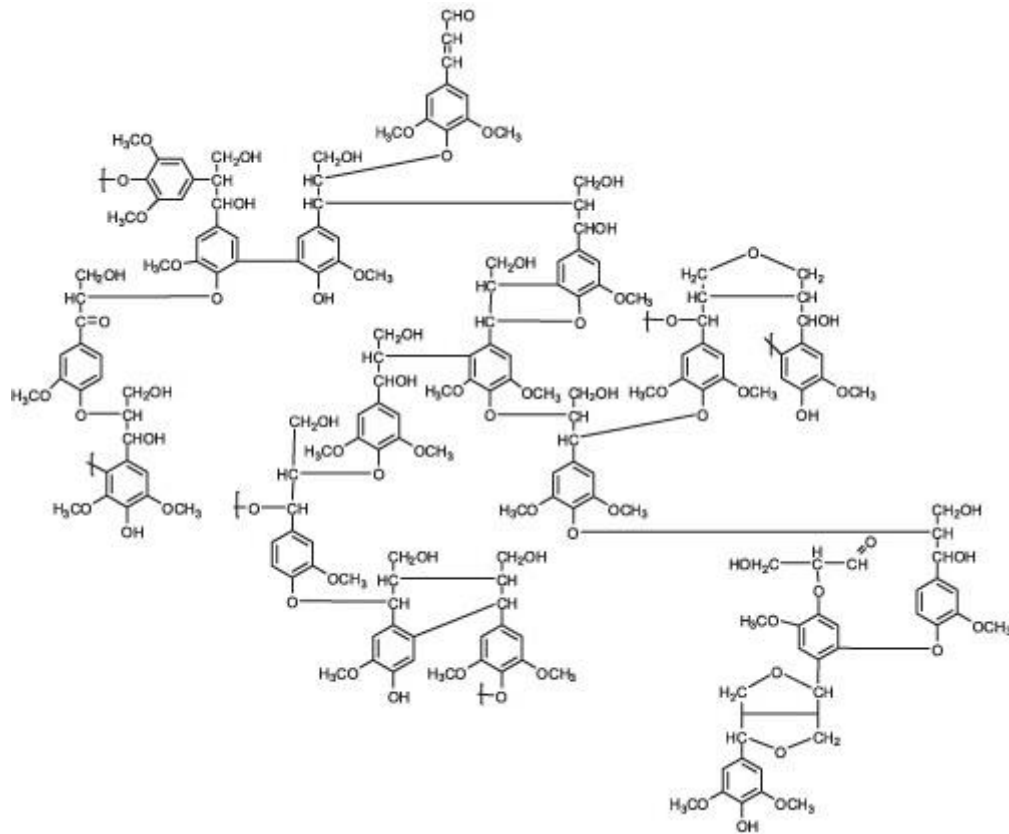


Figura 11 - Estrutura simplificada da lignina

Fonte: FENGEL & WEGNER (1991)

4. Pré-tratamento dos materiais

O pré-tratamento é um processo que tem como principal objetivo aumentar a área de superfície de contato do material. A aplicação do pré-tratamento em biomassa lignocelulósicos tem como função aumenta a porosidade do material e assim aumentando a eficiência das enzimas durante a hidrolise enzimática da celulose para posterior fermentação, além de reduzir a cristalinidade da celulose. Os processos utilizados para a separação e o aproveitamento dos componentes da biomassa incluem diversas técnicas, abrangendo processos como físicos, químicos, mecânicos, e biológicos e suas combinações (SUN e CHENG, 2002; MOSIER et al., 2005; SÁNCHEZ e CARDONA, 2008).

No entanto, a eficiência da técnica do pré tratamento deve ser levado em conta em termos de funcionalidade, seletividade e do rendimento, pois essas etapas influenciam fortemente no processo, determinando a composição, o rendimento e a toxicidade final do produto e conseqüentemente influenciado no seu custo final. (BAUDEL, 2006).

A tabela abaixo apresenta alguns dos métodos de pré tratamentos utilizados, junto com as suas condições operacionais.

Tabela 2 - Tabela dos tipos de pré-tratamentos utilizados

Pré-tratamento	Agentes	Condições	Observações	Referências
Ácido	HCl, H ₂ SO ₄ e HNO ₃	Concentrações de ácidos diluídos.	30% da massa inicial foi convertida em açúcares.	Hernandez-Salas et al. (2009).
Alcalino	Na (OH)	Concentrações diluídas.	Hidrólise do 74,9% das hemiceluloses.	Peng et al. (2009).
Explosão a vapor	Água, SO ₂ e H ₂ , SO ₄	121 °C e 4 horas e com concentrações diluídas	Solubilização da hemicelulose em 93%	Martin et al (2007).

Fonte: Adaptado de Alvira et al. (2010)

4.1. Pré-tratamento auto-hidrólise

A produção do etanol pode ser feita em dois principais tipos de operações industriais: descontínuo (batelada), contínuo (KEIM, 1983). Sendo que o sistema batelada é voltada geralmente para produções de baixa escala, enquanto que o contínuo é mais utilizado em produções de alta escala. Entretanto, houve uma maior utilização do processo por batelada, principalmente devido a sua versatilidade, facilitando a sua operação das condições durante as reações (CGEE, 2009).

Em um processo operado em batelada, os nutrientes são adicionados no tanque permanecendo até o final do processo (fermentação) (KEIM, 1983). Há casos em que os nutrientes são adicionados gradualmente ao reator e a vazão de alimentação pode ser constante ou variado, sendo que a escolha

adequada da vazão pode levar a melhores resultados no rendimento final (CHENG, et al. 2009; ANDRIETTA et al., 2010).

A alteração do volume pode ou não ocorrer, dependendo da taxa de concentração do substrato e a da taxa de evaporação durante o processo. O processo de batelada alimentada possui vantagens em comparação ao processo de batelada simples, como a baixa concentração de açúcar residual, diminuição do tempo de fermentação e maior produtividade, além da reutilização da cultura, pois quando uma porção do caldo de fermentação é retirada em intervalos de tempos, uma parte desta cultura é utilizada novamente como inóculo para a próxima fermentação, que tem como vantagem a não necessidade de propagação do inóculo evitando contaminações e perda de tempo com a propagação do inóculo (ROUKAS, 1996).

O processo de pré tratamento por auto hidrolise é feito somente com água como único solvente sob alta temperatura e alta pressão, devido o reator ser hermeticamente fechado durante o processo. Essas condições promovem a quebra e a clivagem das ligações dos complexos das lignina-carboidrato e a ruptura das ligações glicosídicas dos polissacarídeos. Além disso, a diminuição de pH produzida causa a catalise da biomassa promovendo a despolimerização da hemicelulose (processo autocatalítico) (MOSSIER et al., 2005).

A temperatura é elevada na faixa de 180 a 300 °C e longos períodos de reação causando a dissolução da fração hemicelulósica. O GP (grau de polimerização) da celulose também pode diminuir com o aumento do tempo e da temperatura de reação (ROGALINSKI et al., 2008). Entre as técnicas de pré tratamento, a auto hidrolise destaca-se pelo fato de usar somente água, sem aditivos no seu processo, baseando apenas na exposição do material a alta temperatura e a alta pressão por um tempo determinado, a água quente atua como solvente penetrando na estrutura fibrilar da biomassa, hidratando a celulose e retirando a fração hemicelulósica, gerando assim uma massiva quebra e desagregação da matriz da biomassa, tornando assim as fibras de celuloses mais expostas e acessíveis na hidrolise enzimática (SADDLER et al., 1993; MOSIER et al., 2005).

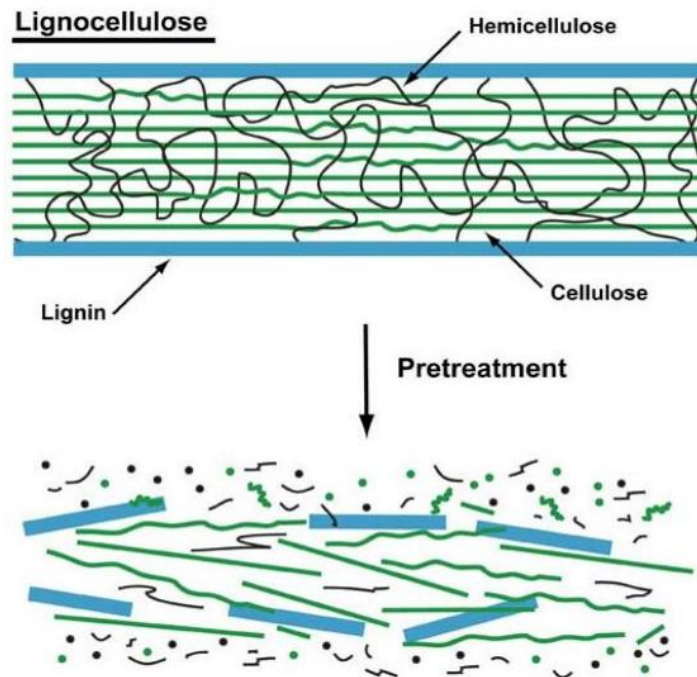


Figura 12 - Representação da quebra da biomassa

Fonte: Adaptado de BIOCMBUSTIVEIS (2015)

Como consequência das reações, o subproduto é um sólido constituído por fibras reativas e hidrolisado com uma mínima concentração de subprodutos tóxicos para os processos fermentativos (SÁNCHEZ e CARDONA, 2008).

Além disso, o pré-tratamento por auto hidrólise aportam concretamente na redução dos custos do processo, já que não requer reatores resistentes a corrosão, nem de tratamentos adicionais de detoxificação (usados nos tratamentos ácidos) (LIU e WYMAN, 2003).

4.2. Pré-tratamento realizado no estágio da EMBRAPA Agro energia

O processo realizado durante o estágio utilizou-se uma quantidade de aproximadamente 500 gramas de bagaço de cana de açúcar proveniente de Usina Jalles Machado Gianésia – GO, com massa úmida iniciada estimada de 220 kg, com cerca de 50% de matéria seca, depois o material passou por um processo de moagem em um moinho de 24 facas para definir a sua granulometria (1,1 mm a 2,5 mm de diâmetro) e também para aumentar a sua superfície de contato durante o processo.

A reação de pré-tratamento teve uma duração de aproximadamente 3 horas e foi processada em um reator agitado de aço inoxidável de 20 litros de rotor do tipo âncora. O processo inicia-se com a adição de 500 g de bagaço de cana + 5 litros de água (solvente) sob uma condição de temperatura de aproximadamente 180 °C e com uma rotação de 450 RPM. Pelo fato do reator apresentar uma temperatura variável, devido as perdas de calor, houve uma manutenção continuamente para a regulação da temperatura. Depois do material ser pré tratado, ele é resfriado para ser fermentado sob ação de um coquetel enzimático, que dura em torno de 2 dias para que ocorra a produção o etanol.

4.3. Inibidores

Os inibidores são formados em consequência das altas temperaturas durante os pré-tratamentos, originando a formação de compostos que podem interferir nas etapas posteriores, como a hidrólise enzimática e a fermentação. Os principais inibidores gerados devido as altas temperaturas são: ácido acético (formado pela hidrólise do grupo acetil), aldeídos, álcoois aromáticos, compostos fenólicos (formados devido a degradação da lignina) e furaldeídos (furfural e 5-hidroximetilfurfural) (RANATUNGA et al., 1997, JARDINI et al., 2009).

4.4. Coquetel enzimático

A hidrólise enzimática é um processo em que ocorre a conversão da celulose à glicose, por meio de um grupo de enzimas conhecidos como celulasas ou celulotícas. As celulasas são enzimas que degradam a celulose, rompendo as ligações glicosídicas das microfibrilas de celulose, gerando a liberação de compostos como oligossacarídeos, celobiose e glicose.

O coquetel usado durante a reação é uma mistura de diversas enzimas, possibilitando assim um alto rendimento dos produtos gerados. Pelo menos três grupos principais de celulasas estão envolvidos no processo de hidrólise da celulose, a endoglucase (a qual ataca regiões de baixa cristalinidade na

fibra celulósica, criando cadeias com extremidades livres), a exuglucanase (a qual se liga nas extremidades das cadeias e gera principalmente glicose e celobiose), e β -glucosidase (responsável por clivar a celobiose produzindo duas moléculas de glicose).

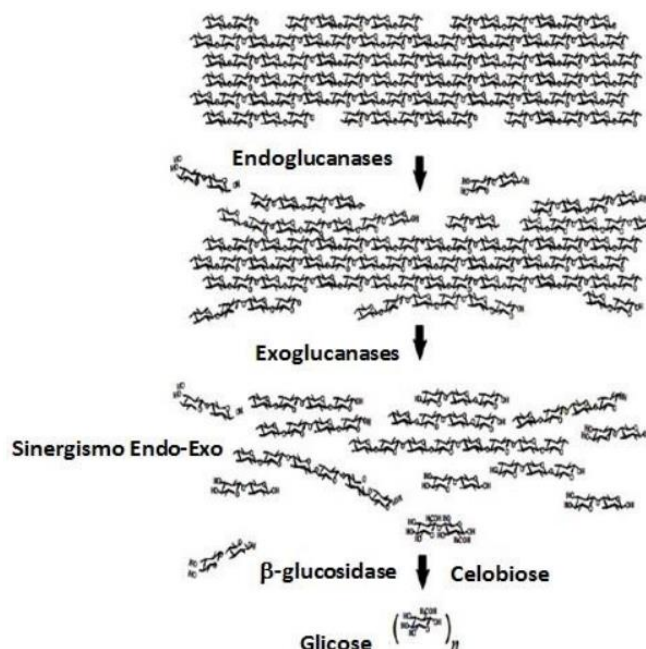


Figura 13 - Ação das celulasas durante a hidrólise enzimática

Fonte: PITARELO (2007)

O rendimento da hidrólise enzimática depende de vários fatores como por exemplo: o tipo substrato, a concentração do substrato, o pH do meio, a concentração do material a ser hidrolisado, e a temperatura em que ocorre a reação. Um fator importante na hidrólise enzimática é a resistência de transferência de massa durante o seu processo, devido a interação entre as moléculas de enzimas com a camada estagnada de filme líquido, a qual cerca as partículas sólidas de celulose, sendo que esta resistência determina a reação global. Com isso, a taxa de reação é determinada pelos três eventos seguintes, a taxa de transferência de massa da enzima; a taxa de adsorção da enzima na superfície do substrato; e a taxa de catálise da celulose (GAN et al., 2003; OLSSON et al., 1996).

Diante das características estruturais da celulose, verifica-se que o ataque enzimático é determinado para acessibilidade dos sítios ativos de ligação da celulase, gerando adsorção da enzima do substrato e conseqüentemente a liberação da glicose. A adsorção das celulasas e a concepção do complexo enzima/substrato são os passos cruciais na hidrólise enzimática de celulose.

(GAN et al., 2003).

5. Material e métodos

Nesta sessão serão descritos os procedimentos experimentais das metodologias requeridas para a caracterização do bagaço de cana antes e após a etapa do pré-tratamento.

Foram baseados e adaptados do o estágio na Empresa Embrapa Agro energia junto com um levantamento bibliográficos dos dados técnicos na literatura, onde será realizado um dimensionamento de um sistema para o processo do pré-tratamento, além das avaliações dos equipamentos utilizados durante os processos.

A fim de avaliar a eficiência do pré-tratamento, será utilizado processo de hidrólise enzimática e avaliado a quantidade de açúcares e inibidores liberados.

6. Resultado e discussões

A partir das técnicas adquiridas da literatura e do estágio realizado foi proposto um modelo de pré-tratamento com a utilização da água como solvente, cujo objetivo é aumentar a porosidade do material e assim a sua eficiência na fermentação durante a hidrólise enzimática para a produção do etanol.

Estabeleceu-se uma capacidade produtiva mensal de 54,04 litros de etanol, a partir de 960 kg de bagaço de cana, com a duração 20 dias de operação por mês, junto com a utilização de 4 reatores agitados com rotor do tipo âncora, sob uma condição de 180 °C e uma rotação de 450 RPM.

O processo de pré-tratamento está dividido 4 partes:

- A moagem
- Pré-tratamento
- Separação do bagaço tratado
- Hidrolise enzimática

6.1. Dimensionamento

Neste item serão descritos equipamentos envolvidos no processo de pré-tratamento do bagaço de cana de açúcar.

6.2. Moagem da biomassa

O processo inicia-se com a moagem do material, com isso 960 kg de bagaço de cana passaram um moinho de faca M.R. Manesco & Ranier com uma capacidade produtiva de 40 a 55 kg por hora e com uma potência de 250W (1/3 HP). O objetivo da moagem é diminuir ao máximo as dimensões do material para que tenha uma maior superfície de contato no pré-tratamento, o material moído apresentará as dimensões na faixa de 1,1 mm a 2,5 mm de diâmetro.

6.3. Pré-tratamento

Após a moagem, o material é transportado para os 4 reatores com adição de água até um volume de 300 L, na qual é alimentado por uma bomba centrífuga que opera com uma vazão de 2000 L/h. Durante a reação, são mantidas condições de rotação a 450 RPM, com uma temperatura de 180° C, com duração de aproximadamente 3 horas para o término do processo. Após finalizar o pré tratamento o material é resfriado até a uma temperatura de 50°C por meio de serpentinas colocadas no reator.

6.4. Hidrolise enzimática

Após o líquido ser extraído e armazenado em tanques de 2000 litros, eles são bombeados novamente para os reatores e com adição de um coquetel enzimático fará o processo da hidrolise enzimática por meio da fermentação durante 1,5 dias para a produção do etanol sob uma temperatura de 30 °C.

O esquema abaixo representa o funcionamento do processo:

- Primeiramente a água do tanque é bombeada para os 4 reatores para dar o início a reação;
- O vapor quente é circulado pelos tubos na parede dos reatores, assim pré-aquecendo a água contida nos reatores;
- A saída do vapor de água tem temperatura de aproximadamente 70° C;
- Após o termino da reação que durante em torno de 2,5 dias, o produto formado através da hidrolise enzimática (etanol) é transferido para os tanques de reserva;
- Os restos de impurezas dos bagaços contidos nos cestos são retirados, e os reatores são limpos para a continuidade para as próximas reações;

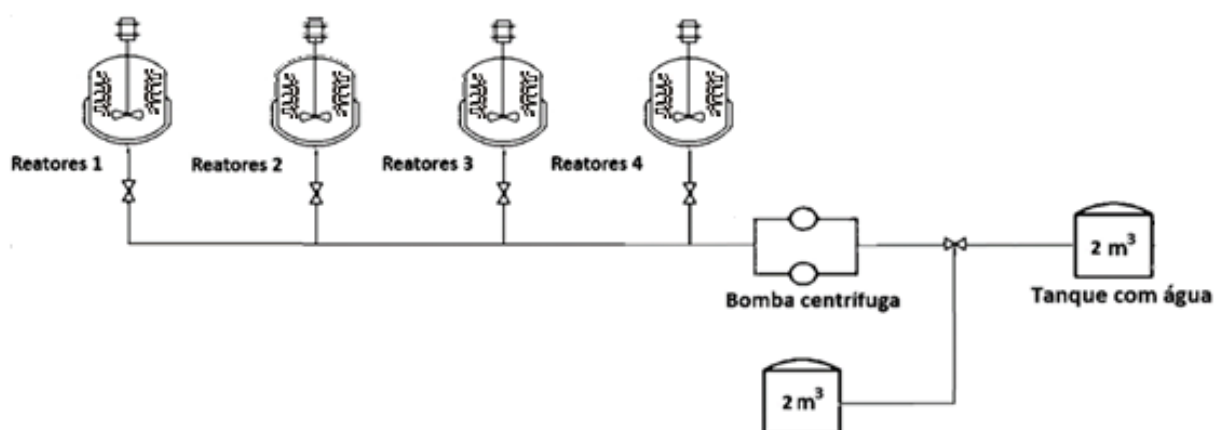


Figura 14 - Esquema do processo de produção

A água no tanque é bombeada até os reatores, e após o término das reações, a solução formada é transferido para os tanques de reserva.

6.4.1. Dimensionamento do reator

O dimensionamento do tamanho dos 4 reatores cujo volume é 1m^3 (1000 litros) cujas suas dimensões são mostradas abaixo:

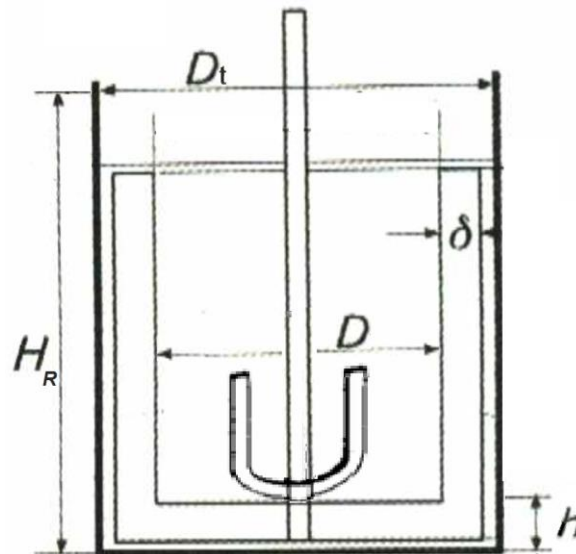


Figura 15 - Dimensões padrão do reator

Fonte: Adaptado de TERRON (2012)

Considerando as relações tanque/agitador para alguns tipos de agitadores e tipos de rotores, de acordo com a referência Tintas – ciências e tecnologia, encontradas no capítulo 16 da página 665,

Tabela 3 - Relações de tanque e agitadores

$\frac{D_t}{D} = 3,0$ <p>D = 0,27 m, como precisa deixar espaço para o cesto e a serpentina de vapor utilizou-se então, D = 0,22 m.</p> <p>Logo,</p> $\frac{D_t}{D} = 3,6$
$\frac{H}{D} = 4,95$
$\frac{h}{D} = 0,33$
<p>Vol. útil = $\pi \times R^2 \times H$</p> <p>O volume útil também pode ser calculado da seguinte maneira,</p> $\text{Volume útil} = \frac{\text{Peso do bagaço}}{\text{Densidade}} + \frac{\text{Peso da água}}{\text{Densidade da água}}$
$\text{Vol. Reator} = \pi \times R^2 \times H_R$

Fonte: Tintas - Ciência e Tecnologia (2009)

Onde,

D_t = Diâmetro do reator (m)

D = Diâmetro do agitador (m)

H = Nível de líquido com o bagaço no tanque (m)

h = Altura do agitador em relação ao fundo do tanque (m)

R = Raio do tanque (m)

H_R = Altura do reator (m)

δ = Espaço deixado entre o tanque e o agitador

Peso do bagaço = kg

Densidade do bagaço = kg/m³

Peso da água = kg

Densidade da água = kg/m³

Volume útil = Volume de bagaço com a água (m³)

Volume do reator = Volume total de líquido (m³)

Tabela 4 - Valores do dimensionamento do reator

Termos	Valor utilizado
D _t	0,8 m
D	0,22 m
H	1,09 m
h	0,07 (7 cm)
R	0,40 m
H _R	2,00 m
Peso do bagaço	30 kg
Densidade do bagaço	120 kg/m ³
Peso da água	300 kg
Densidade da água	1000 kg/m ³
Volume útil	0,55 m ³
Volume total do reator	1 m ³

6.4.2. Cálculo da potência de agitação do sistema

Para o cálculo da potência da agitação do sistema transferida foi utilizando as seguintes equações encontradas no capítulo 16 de Fazenda (2009)

$$Re = \frac{D^2 N \rho}{\eta} \quad 1$$

$$P = \frac{\phi N^3 D^5 \rho}{gc} \quad 2$$

Onde:

D – Diâmetro do disco (m);

ρ – Densidade do fluido (kg/m³);

η – Viscosidade dinâmica (Pa.s);

N – Número de rotações do eixo (rps);

gc – Fator de conversão (9,807 N/Kgf/ms²);

P – Potência (kgxm/s);

Re – número de Reynolds;

ϕ - Função de potência frente ao número de Reynolds.

A função de potência “ ϕ ” é dada em Fazenda (2009) de acordo com o número de Reynolds obtido na equação 3.

Para o cálculo da potência do agitador os valores utilizados encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 5 - Valores do cálculo de potência

Termos da equação	Valor utilizado
D	0,22 m
ρ	120 kg/m ³
η	1000 Pa.s
N	0,6 rps (50 RPM)
Re	28953
ϕ	1900
P	21,56 kg.m/s (0,28 cv)

6.4.3. Cálculo de quantidade calor

$$Q_1 = m \times c \times \Delta T$$

$$Q_2 = m \times l$$

$$Q_3 = m_1 \times c_1 \times \Delta T$$

Onde,

Q_1 – Quantidade de calor sensível até 100 °C.

Q_2 – Quantidade de calor latente do líquido saturado.

Q_3 – Quantidade de calor do bagaço.

m – Massa (300 litros ou 300 kg).

m_1 – Massa do bagaço de cana (30 kg).

c – Calor específico da água (1,0 cal/g °C).

c_1 – Calor específico do bagaço de cana (0,75 cal/g °C – aquecimento do bagaço com 75% de água, cujo C_p é igual a 1,0730625).

ΔT – Variação de temperatura (180 °C – 0 °C).

l – Calor latente (kJ/kg ou cal/g), segundo a tabela o valor é da entalpia do líquido saturado 763,22 kJ/kg.

Logo,

$$Q_1 = 300.000 \text{ g} \times 1,0 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \times (100 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_1 = 21 \times 10^6 \text{ cal ou } 87.906 \times 10^3 \text{ J (H}_2\text{O} = 30 \text{ } ^\circ\text{C a } 100 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$Q_2 = 300 \text{ kg} \times 763.220 \text{ kJ/kg} = 228.966 \text{ kJ (Vapor saturado de H}_2\text{O} = 100 \text{ } ^\circ\text{C a } 180 \text{ } ^\circ\text{C)}, \text{ de acordo com o anexo na tabela 5.}$$

$$Q_3 = 0,75 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \times 30.000 \text{ g} \times (180 \text{ } ^\circ\text{C} - 30 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q_3 = 27 \text{ Mcal ou } 113.022 \text{ kJ}$$

$$Q_T = 87.906 \text{ kJ} + 228.996 \text{ kJ} + 113.022 \text{ kJ}$$

$$Q_T = 3,375 \text{ kcal } 331.009 \text{ kJ}$$

Supondo 2 horas para aquecer o reator, então a quantidade de potência necessária será:

$$P = \frac{331.009 \text{ kJ}}{2 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h}} = 45,97 \text{ kJ/s ou } 45,97 \text{ kW}$$

Por medida de segurança houve um aumento de 50% da potência calculado, então:

$$P = 45,97 \text{ kW} \times 1,5 = 68,96 \text{ kW}$$

Com esse parâmetro de potência, foi selecionado a caldeira de vapor vertical elétrica CVS-VE-120, cujas as características encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 6 - Parâmetro da caldeira

Modelo	Prod. Vapor Água a 20 °C	Prod. Vapor Água a 80 °C	Potencia elétrica	Peso vazia (kg)
CVS-VE-120	120	132	90	290

Fonte: Arauterm

6.5. Tipo de reator

O tanque reacional utilizado possui uma tampa com válvula para alívio de pressão e optando-se por um sistema tampado para que o operador não entre em contato direto com os vapores produzidos durante a reação e para que o motor também não seja exposto a esses vapores. O reator utilizado tem um volume de 1 m³ (1000 litros) com serpentinas de resfriamento e um cesto inox com aberturas de 1 mm no espaço interno, cuja função é facilitar a extração o liquido do material processado.

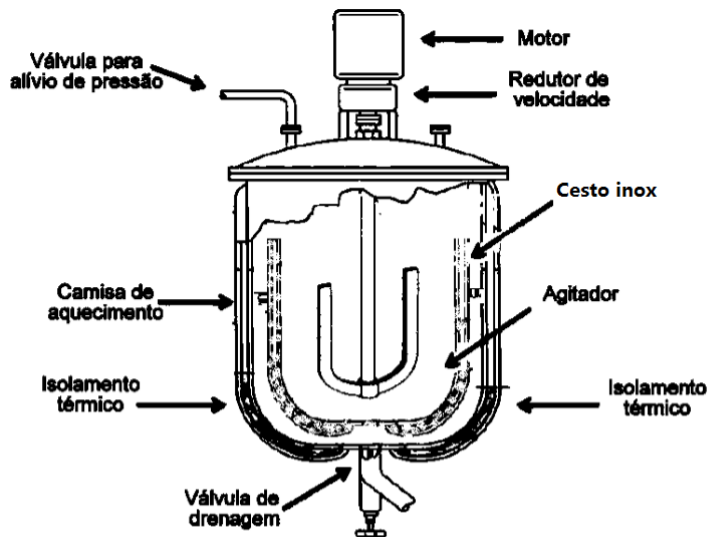
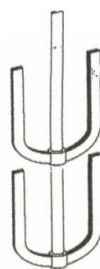


Figura 16 - Reator dimensionado

Fonte: Adaptado de TERRON (2012)

6.5.1. Tipo de agitador

A escolha do tipo de agitador para a produção do material pré tratado foi feita com base na faixa de viscosidade da biomassa que varia de 5.000 – 50.000 (mPa * s). Na literatura utilizada informa que não existe uma regra muito específica para a escolha do agitador, entretanto durante o estágio foi utilizado o rotor do tipo âncora para a realização das misturas.



Âncora

Figura 17 - Tipo de rotor

Fonte: Adaptado de TERRON (2012)

6.5.2. Tipo de bomba

A bomba centrífuga utilizada é da série BCR-2010 da marca Schneider que opera numa vazão de 2000 L/h e com limite de temperatura de operação em até 55 °C, sob uma potência de 0,75 CV ou 550 W.

6.6. Separação do bagaço tratado

Para a separação do bagaço tratado foi utilizado no reator um cesto cilíndrico com abertura de aproximadamente 1,1 mm. O líquido é retirado pela parte inferior do reator por meio das bombas centrífugas e armazenado em tanques de polipropileno 2000 litros para ser posteriormente utilizado na hidrólise enzimática.

- Tanque reservatórios polipropileno - PP para armazenamento da solução de etanol com capacidade de 2000 litros



Figura 18 - Tanque de reservatório PP

Fonte: Adaptado de BELFANO

- Tanque reservatórios polietileno de alta densidade – PEAD para armazenamento de água potável e água residual com capacidade de 2000 litros.



Figura 19 - Tanque de reservatório PEAD

Fonte: Adaptado de BELFANO

6.7. Tubulações utilizadas

Durante o processo, os líquidos são transportados no interior dos tubos por meio de bombas consistindo-se em uma etapa importante dos processos industriais. De acordo com Crane (1976) e Ludwing (1964) a velocidade recomendada para o líquido quando o solvente utilizado é água para a descarga de bomba é de 1,8 a 3,6 m/s com o tamanho na faixa de 1 pol para os tubos.

- As tubulações utilizadas são do tipo CPVC (Cloro de polivinila clorado) com resistência a corrosão, além de pode ser operado com um limite de temperatura em até 70 °C.

6.8. Cálculo da capacidade produtiva

Para determinarmos a concentração de glicose, foi feita inicialmente uma pré análise da solução tratado a partir de 20 g de bagaço-de-cana com uma solução de 160 ml (em uma diluição na proporção de 1 para 8 em relação ao bagaço) junto com o processo de fermentação, obteve-se então uma concentração de 17,1 g/L (Silva, G. M. 2015. 125p), de etanol solução.

- Cálculo para os reatores de 1 m³.

O cálculo deve iniciar considerando que a parte experimental será preenchido com $\frac{1}{3}$ do volume do reator de 1 m³, pelo fato do bagaço de cana apresentar alta retenção de água. Como a proporção é de 500 g de bagaço por 5 litros de água, de acordo com a produção realizado no estágio, logo para 300 litros de água utilizaremos aproximadamente 30 kg de bagaço.

Massa do bagaço = $\frac{500 \text{ g de bagaço}}{5 \text{ l de água}} \times 300 \text{ L de água} = 30 \text{ kg de bagaço de cana}$.

Levando em conta que a produção seja de 20 dias de operação por mês e que a auto-hidrólise e a fermentação enzimática dure em torno de 2,5 dias para serem processados, então consegue-se realizar:

$$\frac{20 \text{ dias por mês}}{3 \text{ dias por batelada}} = 6,5 \text{ bateladas por mês.}$$

Com isso a quantidade processada por mês no reator será de:

6,5 batelas por mês \times 30 kg = 195 kg de bagaço por mês em 1 reator. Serão utilizados para a produção 4 reatores, logo o bagaço total:

$$4 \times 195 \text{ kg de bagaço} = 780 \text{ kg de bagaço}$$

A quantidade de solução total produzida será de: 195 kg de bagaço por $\frac{\text{mês}}{\text{reator}}$ \times 6,5 L de solução por $\frac{\text{mês}}{\text{reator}}$ \times 1 $\frac{\text{m}^3}{1000 \text{ l}} = 1,267 \text{ m}^3$ de solução por mês em 1 reator, como são 4 reatores, então a quantidade final será de 5,07 m³ de solução por mês.

Como a concentração da solução de etanol é igual a $\frac{17,1 \text{ g de etanol}}{\text{lítro de solução}}$ (Silva, G. M. 2015. 125p), então a quantidade de etanol produzida por mês será de:

$$\frac{17,1 \text{ g de etanol}}{\text{lítro de solução}} \times \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times 1,267 \text{ m}^3 = 22,425 \text{ kg de etanol para cada reator.}$$

Utilizando 4 reatores para a produção, a quantidade de etanol total produzida por mês será de 4 * 22,425 = 89,703 kg de solução de etanol.

7. Conclusão

O bagaço de cana-de-açúcar por ser uma biomassa extremamente barato, é uma das principais fontes alternativas para se produzir energia limpa, principalmente pelo fato de os combustíveis fósseis estarem cada vez mais escassos. Diante disso, estabeleceu-se um pré-tratamento para o bagaço, por meio do processo de auto-hidrólise com a utilização de água, sem a adição de outros aditivos, mostrando-se um processo simples em comparação com os demais tipos de pré-tratamento (por exemplo: ácido e alcalino).

Pelo fato de ser uma técnica recente e diante dos resultados obtidos, pode-se dizer que o processo apresenta uma baixa taxa de produção, por isso estudos são necessários para aperfeiçoar melhor esse tipo de processo.

8. Referências bibliográficas

ANDRIETTA, S. R.; FERREIRA, E.; ANDRIETTA, M. G. S. Avaliação da influência da velocidade de alimentação sobre o rendimento e produtividade dos processos de produção de etanol operando em batelada alimentada. 7 p. Campinas. Disponível

em: <http://www.enq.ufc.br/eventos/sinaferm/trabalhos_complestos/t043.doc>. Acesso em: 20 de janeiro de 2016.

ALVIRA, P.; TOMÁS-PEJÓ, M.; BALLESTEROS, M. & NEGRO, M.J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, Vol. 101, 2010.

AMABIS. *Biologia das células, Fisiologia Vegetal*. Segunda edição, Editora Moderna Versão 2015. Disponível em: http://portal.virtual.ufpb.br/biologia/novo_site/Biblioteca/Livro_5/7-Fisiologia_Vegetal.pdf

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2009). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Disponível em www.anp.gov.br. Acesso em março de 2010

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2006). Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acessado em: 05/ 2009

ARYSTA. Life Science. Disponível em: www.arysta.com.br/app/webroot/arquivos/a795673dfdb37ad51ddb9d4da5d3fd57.jpg

ARAUTERM Fonte: www.arauterm.com.br/php/index.php

BETANCUR, G. J. V & Pereira, Jr. N. Sugarcane bagasse as feedstock for second generation ethanol production. Part I: diluted acid pre-treatment optimization. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2010.

BELFANO, Tecnoplásticos. Disponível em: www.belfano.com.br/index.php/tanques-reservatorios/reservatorios-cilindricos-de-polipropileno-pp/#prettyPhoto

BAUDEL, H. M.; ABREU, C. A. M.; ZACCHI, G. (2006) Direct Catalytic Hydrogenation of Bioethanol-from-Sugarcane Bagasse Effluents over Ru/C Catalyst: An Eco-Efficient Environmentally-Friendly Approach. In: XX Simpósio Ibero-Americano de Catálise, Gramado/ RS. Anais XX SICAT.

BAUDEL, H.M. Pré-tratamento e hidrólise. In: WORKSHOP TECNOLÓGICO SOBRE: HIDRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE ETANOL, PROJETO PROGRAMA DE PESQUISAS EM POLÍTICAS PÚBLICAS. 3; 2006, Campinas. Palestra... Campinas: UNICAMP, 2006. Disponível em:

<http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/Hidrolise%20Baudel%20Aprese nta%E7%E3o.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2016.

BNDES (2006) Ampliação da produção de etanol e co-geração de energia elétrica. Disponível em: <www.bndes.gov.br/conhecimento/.pdf>. Acessado em: 03 de abril de 2016.

BRISTOW, J. A. & KOLSETH, P. (1986) Paper Structure and Properties, International Fiber Science and Technology Series, v. 8, Marcel Dekker, Inc., New York.

BIOCOMBUSTIVEIS (2015), disponível em: <http://biocombustiveis2g.xpg.uol.com.br/pretreatment.png>

BISSOON, S.; CHRISTOV, L.; SINGH, S. Bleach boosting effects of purified xylanase from *Thermomyces lanuginosus* SSBP on bagasse pulp. *Process. Biochem.*, v. 37, p. 567-572, 2002.

CASTRO, A. Produção e propriedades de celulases de fungos filamentosos, obtidas a partir de celulignina de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). Dissertação de Tese de Mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA – CTC, 2010. Características físicoquímicas do bagaço de cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.ctcanavieira.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=370&Itemid=1325>. Acesso em: 05 de julho de 2016.

COSTA, F. H. N.; BUZATO, J. B.; CELLIGOI M. A. P. C.; TANO, M. S. Fermentação contínua por *Zymomonas mobilis* ATCC 29191 em concentrações elevadas de sacarose. *Revista de Ciências Exatas e Naturais*, v. 3, n. 2, p. 201-207, 2001.

CENBIO, Centro de Referência em Biomassa (2011). Disponível em:<<http://cenbio.iee.usp.br> >. Acessado em: 07/2012.0

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil. Brasília, 2009. 536 p. Disponível em:<http://www.cogen.com.br/paper/2010/Livro_Bioetanol_Cana_Acucar_2009.pdf>. Acesso em: 18 de dezembro de 2010.

C.J. Geankoplis, 1993. *Transport Process and Unit Operations*, 3ª edição, Prentice-Hall

CHENG, N. G.; HASAN, M.; KUMORO, A. C.; LING, C. F.; THAM, M. Production of ethanol by fed-batch fermentation. *Journal of Science and Technology*, v.17, n.2, p.399-408, 2009

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento (2011) Disponível em:<<http://www.conab.gov.br>>. Acessado em: 09/2012.

CUNHA, M.A.A.; SOLVA, S.S.; CARVALHO, W.; SANTOS, J.C. Uso de células imobilizadas em gel PVA: uma nova estratégia para a produção biotecnológica de Xilitol a partir de bagaço de cana-de-açúcar. Ciências Agrárias, Teresina, v. 26, p. 61-70, 2005.

CUZENS & MILLER, 1997; RODRÍGUEZ-CHONG et al., 2004

DANIELS, J. & ROACH, B. T. (1987) Taxonomy and evolution in sugarcane. In: Sugarcane improvement through breeding-Heinz DJ, ed. Amsterdam: Elsevier Press, p. 7-84.

DEMIRBAS, A. Energy and environmental issues relating to greenhouse gas emissions in Turkey. Energy Convers Manage, v. 44, p. 201–213, 2003

DIAS, M.O.S.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C.E.V; WOLF

MACIEL, M. R. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process, Chemical Engineering Research and Design, v. 87, p. 1206-1216, 2009.

Estrutura celular vegetal. Versão 2015. Disponível em: <http://professores.unisanta.br/maramagenta/celulavegetal.asp>

EPE, Empresa de Pesquisa de Energética (2012). Disponível em:<<https://ben.epe.gov.br>>. Acessado em: 09/2012.

Fazenda, Jorge M. R. Tintas - Ciência e Tecnologia – 4ª edição ver. E ampl.- São Paulo. Blincher, 2009.

FENGEL, D. & WEGENER, G. (1991) Wood and cellulosic chemistry. New York, p. 189-200.

FIGUEIRA, H. V. O.; ALMEIDA S. L. M.; LUZ, A. B.; Cominuição; In: Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, 2004; capítulo quatro

FUNDAMENTOS DA TERMODINÂMICA, de Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke e Gordon J. Van Wylen, Editora Edgard Blücher Ltda.

FUJITA, Y.; ITO, J.; UEDA, M.; FUKUDA, H.; KONDO, A. Synergistic Saccharification and direct fermentation to ethanol of amorphous cellulose by use of an engineered yeast strain codisplaying three types of cellulolytic enzyme. Appl. Environ. Microbiol., v. 70, n. 2, p. 1207-1212, 2004

GARRET, R. H. & GRISHAM, C. M. (1999) Biochemistry 2 ed., Saunders College Publishing, Harcourt Brace, New York.

GAN, Q.; ALLEN, S. J.; TAYLOR, G. Kinetic dynamics in heterogeneous enzymatic hydrolysis of cellulose: an overview, an experimental study and mathematical modeling. *Bioprocess Biotechnology*, v.38, p.1003-1018, 2003.

IEA, International Energy Agency (2008). Disponível em: <<http://www.geografiaparatodos.com.br>>. Acessado em: 08/2012

Instituto de Eletrotécnica e Energia e Centro Nacional de Referência em Biomassa. ATLAS DE BIOENERGIA. Metodologias de cálculo da conversão energética das biomassas selecionadas. Disponível em: <[Http://cenbio.iee.usp.br/download/metodologiabiomassa.pdf](http://cenbio.iee.usp.br/download/metodologiabiomassa.pdf)> Acesso em: 06 fev. 2014.

JARDINE, J. G.; DISPATO, I.; PERES, M. R. Considerações sobre o Bioetanol lignocelulósico para subsidiar a elaboração de conteúdo da Árvore de Conhecimento Agroenergia. 2009. 28 p. Embrapa Informática Agropecuária. Campinas, SP, 2009

JEFFRIES, T. W.; JIM, Y. S. Metabolic engineering or improved fermentation of pentoses by yeasts. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v.3, n.5, p.495-509, 2000.

JOLY, A. B. (2002). Botânica: Introdução à taxonomia vegetal. 13ª ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional.

KOGA, M. E. T. (1988) Celulose e papel, 2.ed. São Paulo IPT/ SENAI, v. 1, p. 46-113

LAKABI, I. Estudos de cristalinidade e mecanismo de sorção de água em Biopolímeros. Tese de Doutorado em Ciências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1990.

LIMA, A. O. S. & RODRIGUES, A. L. Sacarificação de resíduos celulósicos com bactérias recombinantes como estratégia para redução do efeito estufa, *Revista de ciências ambientais*, v. 1, n. 2, p. 5-18, 2007.

LEMOS, J. L. S. Estudo da produção de xilanases por *Aspergillus awamori* em bagaço de cana. Dissertação de Tese de Doutorado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2001

LIMAYEM, A.; RICKE, S.C.; Lignocellulosic biomass for bioethanol production: Current perspectives, potential issues and future prospects, *Progress in Energy and Combustion Science*. doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.002, 2012.

KEIM, C. R. Technology and economics of fermentation alcohol - an update. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 5, n. 2, p. 103-114, 1983.

MARTINS, L. F.; MARTINS, L. F.; KOLLING, D.; CAMASSOLA, M.; DILON, A. J. P.; RAMOS, L. P. (2005) Perfil hidrolítico das cellulases de *Penicillium*

echinulatum. In: Simpósio Nacional de Bioprocessos, Anais do XV Simpósio Nacional de Bioprocessos, Recife, Brasi

MATSUSHIKAA, A.; GOSHIMAA, T.; FUJII, T.; INOUEA, H.; SAWAYAMAB, S.; YANOA, S. Characterization of non-oxidative transaldolase and transketolase enzymes in the pentose phosphate pathway with regard to CAPÍTULO 8: Referências Bibliográficas 199 xylose utilization by recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 51, p. 16–25, 2012

McMILLAN, J. D. (1994) Pretreatment of lignocellulosic biomass. In: M.E. Himmel, J.O. Baker and R.P. Overend, Editors, *Enzymatic Conversion of Biomass for Fuels Production*, American Chemical Society, Washington, DC, p. 292–324.

MESHITSUKA, G. & ISOGAI, A. (1996) Chemical structures of cellulose, hemicellulose, and lignin, In: HON, D. N. S., SHIRAISHI, N., (Ed.). *Chemical modification of lignocellulosic materials*. New York: M. Dekker, p. 11-34

MOSIER, N.; WYMAN, C.; DALE, B.; ELANDER, R.; LEE, Y. Y.; HOLTZAPPLE, M.; LADISCH, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, v.96, p.673-686, 2005.

MITRA, G. B. & MUKHELJEE, E. P. S. X-ray diffraction study of fibrous polymers. Degree of paracrystallinity- a new parameter for characterizing fibrous polymers. *Polymer*, v. 21, n.12, p.1403, 1980.

MOREIRA, J. R. Sugarcane for energy- recent results and progress in Brazil. *Energy for Sustainable Development*, v. 4, n.3, p. 43-54, 2000

MIISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Biomassa. Brasília, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>> 2012

NANDY, T.; SHASTRY, S.; KAUL, S. N. Wastewater management in a cane molasses distillery involving bioresources recovery. *Journal of Environmental Management*, v. 65, p. 25-38, 2002

NIGAM, P.S.; SINGH, A. Production of liquid biofuels from renewable resources, *Progress in Energy and Combustion Science*. in press doi: 10.1016/j.physletb.2003.10.071.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. Nutrient requirements of dairy cattle. 7.rev.ed. Washinton, D.C., 2001. 381p

OLSSON, L; HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. *Enzyme and Microbial Technology*, v.18, p.312-331, 1996

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, v. 74, p. 69-80, 2000.

PINIWEB. Bagaço excedente (2010). Disponível em: piniweb.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/imagens/i223061.jpg

PITARELO, A. P. Avaliação da Susceptibilidade do Bagaço e da Palha de Cana-de-Açúcar a Bioconversão via pré-Tratamento a Vapor e Hidrólise Enzimática. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-graduação em Química, Sub-área de Química Orgânica, Universidade Federal do Paraná, PR. 2007. 125 p.

PITARELO, A.P. Avaliação da Susceptibilidade do Bagaço e da Palha de Cana-de-Açúcar a Bioconversão via Pré-tratamento a Vapor e Hidrólise Enzimática. 2--7. 142p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RAMOS, L. P. The chemistry involved in the pretreatment of lignocellulosic materials. *Química Nova*, v. 26, p. 863-871, 2003

RANATUNGA, T. D.; JERVIS, J.; HELM, R. F.; McMILLAN, J. D.; WOOLEY, R. J. The effect of overliming on the toxicity of dilute acid pretreated lignocellulosics: the role of inorganics, uronic acids and ether-soluble organics. *Enzyme and Microbial Technology*, v.27, n. 3–5, p. 240–247, 2000.

RITTER, S. K. (2008) Calling All Chemists: Chemists and chemical engineers will be providing the thousands of technologies needed to achieve a more sustainable world. Disponível em <<http://www.jomar.pro.br/portal/modules>>. Acessado em: 05/2009.

ROGERS, P. L.; JEON, Y. J.; SVENSON, C. J. Application of biotechnology to industrial sustainability. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 83, n. 6, p. 499–503, 2005.

ROUKAS, T. Ethanol production from non-sterilized beet molasses by free and immobilized *Saccharomyces cerevisiae* cells using fed-batch culture. *Journal Food Engineering*, v.27, p.87-98, 1996.

RYAN, D. & JOHNSON R. Dialysis and ultrafiltration of molasses for fermentation enhancement. *Separation and Purification Technology*, v. 22-23, p. 239-245, 2001

SARKAR, N.; GHOSH, S. K.; BANNERJEE, S.; AIKAT, K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, v. 37, p. 19-27, 2012

SANCHES-PERES, M. F.; SOUSA, S. R.; LALUCE, C. Obtaining Strains of *Saccharomyces* Tolerant to High Temperatures and Ethanol. *Methods in Biotechnology*, v.14, p. 356-367. 2000.

SHLESER, R. (1994) Ethanol Production in Hawaii: Processes, Feedstocks and Current Economic Feasibility of Fuel Grade Ethanol Production in Hawaii, Prepared for State of Hawaii. Disponível em: <http://hawaii.gov/dbedt/info/energy> acessado em: 06/2009.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. *Química Nova*, v.32, p.661-671, 2009.

SILVA, G. M. AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE HIDRÓLISE ENZIMÁTICA E FERMENTAÇÃO UTILIZANDO O BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL 2G.2015. 125 p. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

SCARAMUCCI, J. A. & CUNHA, M. P. (2005) O agronegócio da cana-de-açúcar como vetor de desenvolvimento. In: Fórum permanente de energia & ambiente. Campinas, UNICAMP. Disponível em: <<http://www.cori.unicamp.br>>. Acessado em: 12/02/2016

SCHNEIDER, Bombas centrífugas. Disponível em: www.schneider.ind.br/produtos/motobombasdesuperf%C3%ADcie/light/centr%C3%ADfugasmonoest%C3%A1gio/bcr/#InfoparaPedido

SILVA, N. L. C., BASTOS, H. B., BETANCUR, G. J. V., MAEDA, R. N. & PEREIRA JR, N. Produção de etanol de segunda geração a partir de biomassas residuais da indústria de celulose. XVII Simpósio Nacional de Bioprocessos, 2009.

SJÖSTRÖM, E. (1981) Wood polysaccharides. *Wood chemistry, Fundamentals and applications*. New York Academic, p. 51-67.

STRYER, L. (1996) *Bioquímica*, 4 Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1000 p

SUN, Y. & CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 1, p. 1-11, 2002

SZENGYEL, Z. Ethanol from wood: Cellulase enzyme production. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Química, Lund University, Suécia, 2000.

SARKAR, N.; GHOSH, S. K.; BANNERJEE, S.; AIKAT, K. Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. *Renewable Energy*, v. 37, p. 19-27, 2012.

Sindicatos da indústria de fabricação de etanol do Estado de Goiás - SIFAEG (2014).

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, v.83, p.1-11, 2002.

TERRON (2012). Operações unitárias para químicos, farmacêuticos e engenheiros. Editora LTC.

ZHANG, Y. H. P. & LYND, L. R. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: Noncomplexed cellulase systems. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 88, n. 7, p. 797-824, 2004.

WYMAN, C.E. Ethanol from lignocelulosic biomass: technology, economics and opportunities. *Bioresource Technology*, v. 50, p. 3-16, 1994

W.L. McCabe, J.C. Smith, P. Harriot, 1993. Unit Operations of Chemical Engineering, 5ª edição, McGraw-Hill, New York

MAIORELLA, B.; BLANCH, H.W.; WILKE, C.R. Byoproduct inhibition effects on ethanolic fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology and Bioengineering*, v.25, p. 103-121, 1983

YAMASHITA, Y.; KUROSUMI, A.; SASAKI, C.; NAKAMURA Y. Ethanol production from paper sludge by immobilized *Zymomonas mobilis*. *Biochemical Engineering Journal*, v. 42, p. 314–319, 2008

9. ANEXOS

Tabela 7 - Tabela de liquido vapor da água

Temp. °C <i>T</i>	Sat. press. MPa <i>P_{sat}</i>	Specific volume m ³ /kg		Internal energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/(kg · K)		
		Sat. liquid <i>v_f</i>	Sat. vapor <i>v_g</i>	Sat. liquid <i>u_f</i>	Evap. <i>u_{fg}</i>	Sat. vapor <i>u_g</i>	Sat. liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. vapor <i>h_g</i>	Sat. liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. vapor <i>s_g</i>
150	0.4758	0.001091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001127	0.19405	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001134	0.17409	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001141	0.15654	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001149	0.14105	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001157	0.12736	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001164	0.11521	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001173	0.10441	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001181	0.09479	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001190	0.08619	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001199	0.07849	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001209	0.07158	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001219	0.06537	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001229	0.05976	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001240	0.05471	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083

Fonte: Adaptado de Fundamentos da Termodinâmica

As tabelas abaixo apresentam as velocidades, perdas de carga, descarga de bombas centrifugas recomendadas para o processo do pré-tratamento quando o solvente utilizado e apenas água.

Tabela 8 - Velocidades recomendadas

Fluido	Velocidade recomendada (m/s)
Água	
-Linha principal de abastecimento	2,4 a 3,0
-Linha de entrada ou saída de equipamento	2,4 a 3,7
-Linhas de sucção de bomba	1,0 a 2,4
-Linhas de descarga de bomba	1,8 a 3,6

Fonte: Adaptado de TERRON (2012), Crane 1976 e Ludwin 1964

Tabela 9 - Tamanho da tubulação com o fluxo volumétrico recomendado

Linhas de sucção					Linhas de descarga		
Fluxo volumetrico		Tamanho de tubos	Velocidades		Tamanho de tubos	Velocidades	
gal/min	m ³ /h	pol	pés/s	m/s	pol	pés/s	m/s
10	2,3	1	3,7	1,1	3/4	6,0	1,8
100	22,7	2 1/2	6,7	2,0	2	9,6	2,9
500	114	5	8,0	2,4	3 1/2	16,2	4,9
2,000	454	8	12,8	3,9	6	22,2	6,8

Fonte: Adaptado de TERRON (2012), Mott, 2006

Tabela 10 - Classificação dos rotores mais comuns

Nº	Classe	Nº	Subclasse	Figura Nº
1	Hélices (<i>propeller</i>)			
		1a	hélice marinha (<i>marine type propeller</i>)	9.5(d)
2	Turbinas (<i>turbines</i>)			9.3
		2a	lâminas verticais retas (<i>flat blade</i>)	9.3(a)
		2b	disco com lâminas verticais retas (<i>disk flat blade</i>)	9.3(b)
		2c	ventoinha inclinada (<i>pitched vane</i>)	9.3(c)
		2d	lâminas curvas (<i>curved blade</i>)	9.3(d)
		2e	lâminas tombadas (<i>tilted blade</i>)	9.3(e)
		2f	lâminas verticais retas vedadas (<i>shrouded</i>)	9.3(f)
		2g	lâminas inclinadas retas (<i>pitched blade</i>)	9.3(g)
		2h	lâminas inclinadas curvas (<i>pitched curved blade</i>)	9.3(h)
		2i	lâminas com extremidade em flecha (<i>arrow-head</i>)	9.3(i)
3	Pás			9.4
		3a	básica (<i>basic paddle</i>)	9.4(a)
		3b	lâminas inclinadas invertidas (<i>reverse pitch</i>)	9.4(b)
		3c	lâminas vitrificadas (<i>glassed</i>)	9.4(c)
		3d	âncora (<i>anchor</i>)	9.4(d)
		3e	folha (<i>leaf</i>)	9.4(e)
		3f	portal (<i>gate</i>)	9.4(f)
		3g	dedos (<i>finger</i>)	9.4(g)
		3h	duplo movimento (<i>double motion</i>)	9.4(h)
		3i	espiral (<i>helix</i>)	9.4(i)
4	Alto cisalhamento			9.6
		4a	disco plano (<i>plain disk</i>)	9.6(b)
		4b	disco com dentes ou disco plano modificado (<i>saw-tooth disk ou modified disk</i>)	9.6(c)
		4c	cone modificado (<i>modified cone</i>)	9.6(e)
		4e	turbina modificada (<i>modified turbine</i>)	-
5	Recíprocos	5	—	-

Fonte: Adaptado de TERRON (2012) de Uhi e Gray, 1966, Rase, 1977, Gerhartz, 1988

Tabela 11 - Características da bomba centrífuga

Modelo	Potência (cv)	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Motor Monofásico com Capacitor e Proteção Térmica	
				127 V	220 V
				Código	Código
BCR-2000	1/4	3/4	3/4	87105291-00	87105292-00
	1/3	3/4	3/4	87108261-00	87108262-00
	1/2	3/4	3/4	87107649-00	87107656-00

Rotor fechado de alumínio.

Modelo	Potência (cv)	Ø Sucção (pol)	Ø Recalque (pol)	Motor Monofásico com Capacitor e Proteção Térmica	
				127 V	220 V
				Código	Código
BCR-2010	1/2	1	1	87106824-00	87106829-00
	3/4	1	1	87106834-00	87106851-00
	1	1	1	87106856-00	87106861-00

Rotor fechado de Noryl® com 30 % de fibra de vidro (maior resistência). Modelos BCR-2000 e BCR-2010: motor WEG IP-00, com capa de proteção, proteção térmica e capacitor permanente, 2 polos, 60Hz.

Temperatura máxima do líquido bombeado: 55 °C. Equipamento desenvolvido para uso exclusivamente residencial.

Fonte: Adaptado de SCHNEIDER

6.13 Consumo de energia de agitadores tipo palheta em número de potência (Φ) e número de Reynolds (NRi)

Tabela 12 – Consumo de energia agitadores em número de potência (ϕ) e número de Reynolds (N_{RE})

NRe	ϕ					NRe	ϕ				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
3		12.180				1.150	1.900	1.717	2.310	0,824	0,415
6		5.707				1.350	1.900	1.736	2.293	0,817	0,381
9		4.005				1.550	1.900	1.753	2.285	0,807	0,353
12		3.411				1.750	1.900	1.768	2.258	0,790	0,341
15		3.002	7.003			1.950	1.900	1.781	2.032	0,768	0,312
30		2.017	5.405	1.820		2.150	1.900	1.793	1.980	0,757	0,296
45		1.859	4.861	1.591		2.350	1.900	1.804	1.949	0,749	0,282
55	3.874	1.737	4.607	1.506		2.550	1.900	1.814	1.926	0,733	0,269
65	3.622	1.581	4.527	1.402		2.750	1.900	1.824	1.902	0,728	0,259
75	3.420	1.578	4.517	1.380	1.834	2.950	1.900	1.833	1.888	0,724	0,255
85	3.252	1.568	4.493	1.322	1.714	3.150	1.900	1.841	1.873	0,721	0,253
95	3.110	1.555	4.491	1.302	1.613	3.350	1.900	1.849	1.855	0,719	0,252
105	2.987	1.556	4.386	1.217	1.528	3.550	1.900	1.856	1.830	0,715	0,225
115	2.880	1.565	4.229	1.209	1.454	3.750	1.900	1.863	1.815	0,702	0,218
125	2.785	1.574	4.137	1.203	1.389	3.950	1.900	1.870	1.709	0,708	0,212
135	2.700	1.581	4.029	1.197	1.332	4.150	1.900	1.876	1.723	0,707	0,233
145	2.624	1.589	3.986	1.193	1.282	4.350	1.900	1.870	1.738	0,704	0,232
155	2.554	1.396	3.946	1.185	1.236	4.550	1.900	1.868	1.750	0,701	0,230
160	2.522	1.599	3.927	1.155	1.215	5.000	1.900	1.855	1.726	0,699	0,228
175	2.433	1.508	3.874	1.126	1.157	10.000	1.900	1.850	1.491	0,653	0,211
190	2.354	1.517	3.826	1.110	1.106	15.000	1.900	1.850	1.428	0,628	0,204
205	2.283	1.525	3.752	1.108	1.062	25.000	1.900	1.850	1.197	0,600	0,193
220	2.219	1.532	3.674	1.106	1.022	35.000	1.900	1.850	1.167	0,597	0,186
245	2.161	1.539	3.603	1.106	0,896	45.000	1.900	1.850	0,941	0,595	0,182
250	2.108	1.546	3.537	1.105	0,908	55.000	1.900	1.850	0,920	0,594	0,178
265	2.059	1.552	3.477	1.104	0,873	65.000	1.900	1.850	0,901	0,591	0,172
280	2.014	1.558	3.420	1.103	0,846	75.000	1.900	1.850	0,856	0,589	0,170
295	1.972	1.563	3.368	1.102	0,831	85.000	1.900	1.850	0,835	0,587	0,168
300	1.959	1.563	3.351	1.002	0,813	95.000	1.900	1.850	0,826	0,584	0,167
400	1.900	1.597	3.076	0,958	0,708	100.000	1.900	1.850	0,811	0,580	0,152
500	1.900	1.621	2.879	0,901	0,624	250.000	1.900	1.850			0,145
600	1.900	1.642	2.727	0,892	0,582	400.000	1.900	1.850			0,140
700	1.900	1.659	2.605	0,873	0,524	550.000	1.900	1.850			0,137
800	1.900	1.675	2.504	0,860	0,506	700.000	1.900	1.850			
900	1.900	1.869	2.418	0,841	0,465	850.000	1.900	1.850			
1.000	1.900	1.701	2.343	0,826	0,448	1.000.000	1.900	1.850			

Fonte: Tintas - Ciência e Tecnologia, Capítulo 16 (2009)

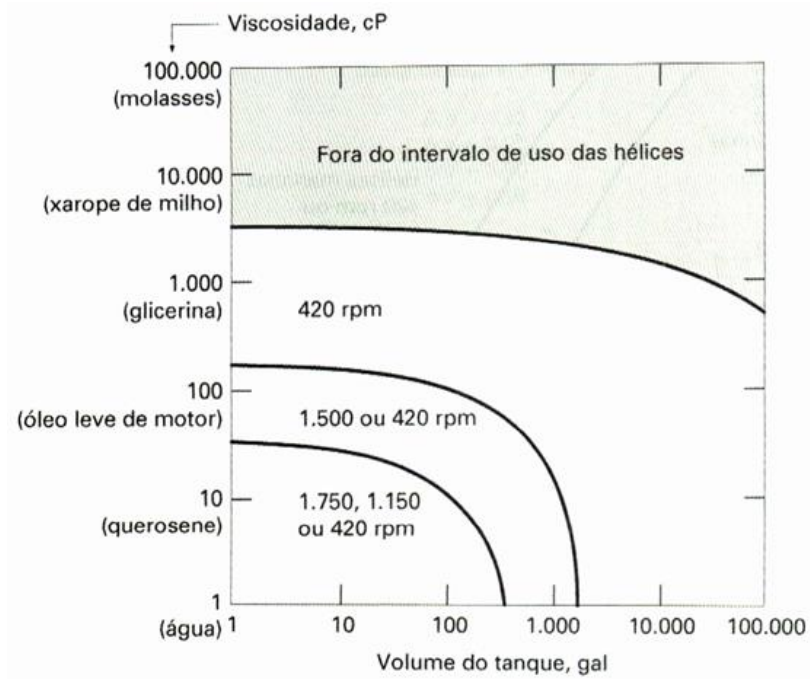


Figura 20 - Seleção de rotores com relação à volume de massa agitadas em função da viscosidade e a da velocidade de rotação do rotor

Fonte: Adaptado de TERRON (2012) de Rase, 1977

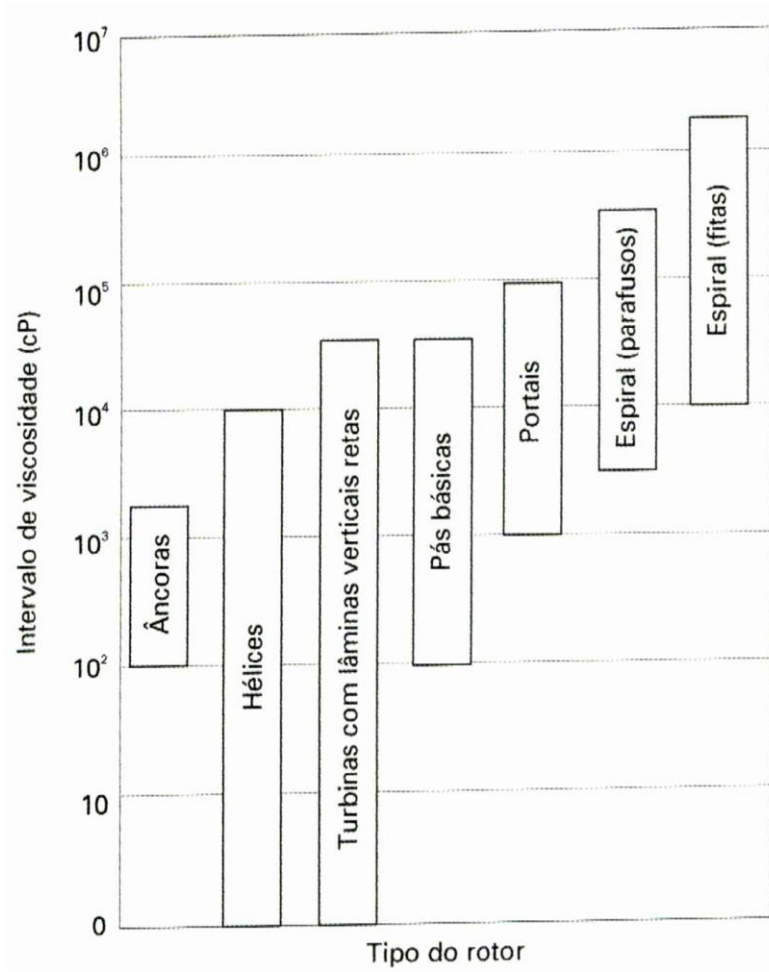


Figura 21 - Seleção de rotores em função da viscosidade

Fonte: Adaptado de TERRON (2012) de Rases