

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
será disponibilizado somente a partir
de 13/09/2021.

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**Guaratinguetá
2020**

THIAGO AVERALDO BIMESTRE

MODELAGEM TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE UM REATOR DE CAVITAÇÃO
HIDRODINÂMICA COM TUBO DE VENTURI PARA PRÉ-TRATAMENTO DE
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na área
de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Co-orientadora: Profa. Dra. Eliana Vieira Canettieri

Guaratinguetá

2020

B611m	Bimestre, Thiago Averaldo Modelagem teórica e experimental de um reator de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi para pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar / Thiago Averaldo Bimestre – Guaratinguetá, 2020 120 f. : il. Bibliografia: f. 109-120 Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna Coorientadora: Profª Drª Eliana Vieira Canettieri 1. Cavitação. 2. Bagaço de cana. 3. Biomassa. I. Título. CDU 620.91(043)
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

THIAGO AVERALDO BIMESTRE

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador / UNESP/FEG

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
UNESP/FEG

Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP/FEG

Prof. Dr. RITA DE CÁSSIA LACERDA
BRAMBILLA RODRIGUES
EEL/USP

Prof. Dr. SILGIA APARECIDA DA COSTA
USP/EACH

Março de 2020

DADOS CURRICULARES

THIAGO AVERALDO BIMESTRE

NASCIMENTO	12.12.1986 – GUARATINGUETÁ/ SP
FILIAÇÃO	Paulo Sérgio Barbosa Bimestre Maria Bernadete Novaes Averaldo Bimestre
2007/2012	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2013/2015	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
2013/2016	Curso de Graduação em Pedagogia pela Faculdade Paulista São José, São Paulo.
2016/2020	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho a minha mãe, Maria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, pela graça da vida, pela presença real e constante, por se revelar nos mistérios do universo e na beleza da criação, fruto de diversos graus de ordem e harmonia;

A Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP, lugar onde se encontra boa parte da minha história.

A todos os professores, em especial ao meu orientador *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna* e a minha co-orientadora *Profa. Dra. Eliana Vieira Canettieri*, pelo terreno que prepararam e pelas sementes que lançaram, proporcionando transformação na mente e no coração;

Ao amigo *Prof. Dr. Jorge Luiz Rosa*, técnico do DEMAR-USP pela cordial ajuda na análise por microscopia eletrônica de varredura;

A aluna de iniciação científica *Gabriela Bonifácio* pela colaboração fundamental nas análises no laboratório de caracterização de biomassas da FEG e ao aluno *José Antônio Mantovani Júnior* pelo auxílio nas simulações computacionais;

A todos os colegas do Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, de modo especial aos técnicos *Antônio Augusto M. Rizzato*, *Rodolfo dos Santos*, e ao professor e amigo *Fernando Henrique Mayworm de Araújo* pela colaboração na fabricação do reator;

Aos meus pais, *Paulo Sérgio* e *Maria Bernadete*, minha irmã *Thatiana*, meus avós *João* e *Terezinha*, minha família, base primeira de minha formação, onde em nosso convívio aprendi a respeitar, partilhar, ter compromisso, disciplina e administrar conflitos;

A minha esposa *Livian* e a minha filha *Manuela*, minha gratidão por todo o amor, cuidado e apoio no cumprimento de mais esta etapa de minha formação;

Ao amigo *Prof. Dr. César Augusto Botura*, pelo ombro amigo nas horas difíceis e pela colaboração junto ao IAE/AMR;

“Tu me alegras, Senhor, com os teus feitos;
as obras das tuas mãos levam-me a cantar
de alegria. Como são grandes as tuas obras,
Senhor, como são profundos os teus
propósitos.”

Salmo 92:4-5

“Tenho a impressão de ter sido apenas uma
criança a brincar na praia e a encontrar, de vez
em quando, uma pedrinha ou pequenina
concha mais linda, enquanto o imenso oceano
da verdade, inexplorado, se estendia na minha
frente”

Isaac Newton

RESUMO

A agroindústria nacional brasileira dispõe de uma grande variedade de unidades agrícolas que geram elevada quantidade de resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar. Mesmo diante da crescente utilização desse material, o excedente ainda é da ordem de milhões de toneladas, causando problemas de estocagem e poluição ambiental. Devido a sua estrutura complexa e sua recalcitrância, a etapa de pré-tratamento representa o desafio mais crítico para a viabilização da utilização do bagaço de cana-de-açúcar dentro do contexto de uma biorrefinaria. O pré-tratamento busca facilitar o acesso aos componentes estruturais da biomassa, permitindo sua utilização na cadeia produtiva. Existem diferentes métodos de pré-tratamento como os físicos, químicos e biológicos ou uma combinação de todos esses, de modo que a geração de resíduos ambientalmente perigosos e/ou altos insumos energéticos é o gargalo. Neste sentido, rotas tecnológicas alternativas vem sendo estudadas e a cavitação hidrodinâmica desponta-se como uma promissora rota para o pré-tratamento de biomassa liberando grandes magnitudes de energia e induzindo a transformações físicas e químicas, favorecendo o rompimento da matriz carboidrato-lignina. Neste contexto, este trabalho empregou a cavitação hidrodinâmica para potencializar o pré-tratamento alcalino do bagaço de cana-de-açúcar. Para isto, projetou-se um reator de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi utilizando como base uma abordagem computacional para a dinâmica dos fluidos. A modelagem matemática do escoamento turbulento com a ocorrência de cavitação foi resolvida utilizando o código comercial CFD *Ansys Fluent* (v18.1) pacote acadêmico, de modo a avaliar a influência da razão de pressão, do comprimento e diâmetro da garganta e o início, crescimento e colapso das cavidades de vapor. A partir dos resultados numéricos o reator de cavitação equipado com tubo de Venturi em acrílico foi construído com diâmetro de garganta de 1,5mm e comprimento de garganta de 5,0 mm. O sistema utilizou bomba de duplo diafragma regulada para vazão de $6,10 \cdot 10^{-5}$ m³/s, com pressão de saída de 300kPa. O pré-tratamento alcalino assistido por cavitação hidrodinâmica foi realizado nas seguintes condições: concentração de NaOH (1-5% m/v), razão sólido-líquido (1-5% m/v) e tempo de reação (20-60 min) para a remoção de lignina. A metodologia de superfície de resposta permitiu determinar as condições ótimas do pré-tratamento para a máxima remoção de lignina que foi de 4,95% de NaOH, relação sólido-líquido 1,14% durante 55,96 min, o que resultou em uma remoção máxima de 56,01% de lignina. Por meio da análise morfológica, pode-se verificar as alterações nas fibras do bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado com sulcos mais porosos, indicando a efetividade e potência do pré-tratamento. A energia dissipada por quilograma de bagaço foi determinada em 4,14 MJ e a energia dissipada por volume de líquido, na zona de recuperação de pressão foi determinada em $32,5 \cdot 10^2$ kW/m³. Estes resultados demonstram que a cavitação hidrodinâmica pode ser uma ferramenta de pré-tratamento eficiente, fácil, rentável e promissora.

PALAVRAS-CHAVE: Cavitação hidrodinâmica. Pré-tratamento. Bagaço de cana-de-açúcar. Tubo de Venturi. CFD

ABSTRACT

The Brazilian national agroindustry has a large variety of agricultural units that generate high amounts of waste such as sugarcane bagasse. Even with the increasing use of this material, the surplus is still in the order of millions of tons, causing problems of stocking and environmental pollution. Due to its complex structure and recalcitrance, the pretreatment stage represents the most critical challenge for the feasibility of using sugarcane bagasse within the context of biorefinery. Pretreatment seeks to facilitate access to the structural components of biomass, allowing its use in the production chain. There are different pretreatment methods such as physical, chemical, physicochemical and biological or a combination of all of these, so that the generation of environmentally hazardous waste and / or high energy inputs is the bottleneck. In this sense, alternative technological routes have been studied and hydrodynamic cavitation emerges as a promising route for biomass pretreatment releasing large energy magnitudes and inducing physical and chemical transformations, favoring the rupture of the carbohydrate-lignin matrix. In this context, this thesis employed hydrodynamic cavitation as a physical means to improve the alkaline pre-treatment of sugarcane bagasse. The hydrodynamic cavitation reactor with Venturi tube was modeled by a computational approach to fluid dynamics, in order to evaluate the influence of the pressure ratio, the length and diameter of the throat and the beginning, growth and collapse of the vapor cavities. The continuous flow cavitation reactor equipped with acrylic venturi was constructed with a diameter and throat length of 1.5 mm and 5.0 mm, respectively. The system used a double diaphragm pump regulated for a flow rate of $6.10 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$, with an outlet pressure of 3 bar. The alkaline pre-treatment by hydrodynamic cavitation was performed to evaluate the influence of NaOH concentration (1-5%), solid-liquid ratio (1-5%) and reaction time (20-60 min) in the removal of lignin. Response surface methodology allowed us to determine optimal pretreatment conditions for maximum lignin removal. The optimum condition was 4.95% NaOH, 1.14% solid-liquid ratio for 55.96 min, which resulted in a maximum removal of 56.01% lignin. Through the morphological analysis, it is possible to verify the alterations in the fibers of the pre-treated sugarcane bagasse with more porous grooves, indicating the effectiveness and potency of the pre-treatment. The energy dissipated by biomass was determined at 4,14 MJ/kg of bagasse and the energy dissipated by volume of liquid in the pressure recovery zone was determined at $32,5.10^2 \text{ kW/m}^3$. These results demonstrate that hydrodynamic cavitation can be an efficient, easy, cost effective and promising pretreatment tool.

KEYWORDS: Hydrodynamic cavitation. Pre-treatment. Sugarcane bagasse. Venturi tube. CFD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bibliometria: Número de publicações em função do ano para diferentes palavras chave (a) “ <i>hydrodynamic cavitation</i> ” e “ <i>hydrodynamic cavitation AND pretreatment</i> ” e (b) “ <i>hydrodynamic cavitation AND Venturi tube</i> ” e “ <i>hydrodynamic cavitation AND sugarcane bagasse</i> ”.....	19
Figura 2 – Oferta interna de energia de 636,4 TWh no Brasil em 2019.....	23
Figura 3 – Estrutura molecular da celulose.....	26
Figura 4 – Composição estrutural da hemicelulose.....	27
Figura 5 – Composição estrutural das unidades precursoras da lignina.....	28
Figura 6 – Morfologia da cana-de-açúcar.....	29
Figura 7 – Diagrama esquemático do objetivo do pré-tratamento de biomassa lignocelulósica....	31
Figura 8 – Tempos de sacarificação por enzimas do sabugo de milho <i>in natura</i> e após pré-tratamentos via cavitação hidrodinâmica e ultrassônica.....	37
Figura 9 – Reator de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi.....	39
Figura 10 – Esquema de um tubo de Venturi para cavitação hidrodinâmica – (D - diâmetro de entrada, d – diâmetro da garganta, l – comprimento da garganta, θ – ângulo da seção divergente).....	40
Figura 11 – Distribuição de pressão em um tubo de Venturi em função do comprimento – (Q é a vazão do sistema, o ponto (1) é a entrada do tubo, o ponto (2) é a garganta e o ponto (3) é a descarga, e P_v é a pressão de vapor do líquido na temperatura do sistema).....	42
Figura 12 – Curva de caracterização de um tubo de Venturi de cavitação.....	43
Figura 13 – (a) Distribuição de pressão em uma placa de orifício em função do comprimento – (P_1 é a pressão na entrada da placa, P_2 é a pressão de descarga e P_v é a pressão de vapor do líquido na temperatura do sistema e (b) perfil do escoamento ao passar por uma placa de orifício.....	43
Figura 14 – Região de cavitação em tubo de Venturi para diferentes valores de pressão a jusante (pressão a montante fixa em 20bar).....	46
Figura 15 – Curvas características de tubos de Venturi com diferentes diâmetros de garganta....	47
Figura 16 – Modelagem matemática do escoamento turbulento: vistas da grade e condições de contorno.....	57
Figura 17 – Modelagem matemática: perfis de velocidade e turbulência com densidade de malha variável indicada pelo diagrama de energia cinética turbulenta.....	57

Figura 18 – Reator de cavitação hidrodinâmica experimental.....	59
Figura 19 – Usinagem do tubo de Venturi em fresa vertical com fixação do tarugo e resfriamento.....	60
Figura 20 – Fluxograma do processo de pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar.....	62
Figura 21 – Contorno de fração de vapor para diferentes pressões de entrada no tubo de Venturi...	73
Figura 22 – Gráfico de perfis de velocidade (A) e pressão (B) para diferentes condições de pressão na entrada do tubo de Venturi.....	74
Figura 23 – Contorno de fração de vapor para diferentes comprimentos de garganta do tubo de Venturi.....	76
Figura 24 – Gráficos plotando velocidade por x/D em (A) e pressão absoluta por x/D em (B) para diferentes comprimentos de garganta do tubo de Venturi.....	77
Figura 25 – Contorno da fração de vapor para diferentes diâmetros de garganta do tubo de Venturi.....	78
Figura 26 – Gráficos plotando velocidade por x/D em (A) e pressão absoluta por x/D em (B) para diferentes diâmetros da garganta do tubo de Venturi.....	79
Figura 27 – Contorno da fração de vapor gerada no tubo de Venturi devido a cavitação hidrodinâmica através da solução temporal.....	81
Figura 28 – Vista esquemática da geometria do tubo de Venturi.....	82
Figura 29 – Tubo de Venturi fabricado em acrílico.....	83
Figura 30 – Campos de velocidade, pressão e fração de vapor da geometria do tubo de Venturi fabricado.....	84
Figura 31– Contornos transversais de fração de vapor no tubo de Venturi fabricado.....	85
Figura 32 – Microscopia eletrônica de varredura (a) Bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i> ampliação 1500x; (b) bagaço <i>in natura</i> ampliação 10000x; (c) bagaço pré-tratado nas condições otimizadas ampliação 1500x e (d) bagaço pré-tratado em condições otimizadas 10000x.....	90
Figura 33 – Distribuição dos resíduos da análise estatística para validação do modelo.....	94
Figura 34 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos da análise estatística.....	94
Figura 35 – (a) Superfície de resposta para remoção de lignina em função da concentração de NaOH (X1) e do tempo (X3) e (b) curvas de contorno em função de X1 e X3 com $X2=3(0)$	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bibliometria: Publicações realizadas na base de dados SCOPUS desde 1990 até 10/01/2020.....	18
Tabela 2 – Composição estrutural de materiais lignocelulósicos.....	25
Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens dos métodos mais comuns de pré-tratamento.....	32
Tabela 4 – Fatores e níveis do planejamento experimental.....	63
Tabela 5 – Matriz estatística com os ensaios experimentais.....	64
Tabela 6 – Resultados numéricos para variações na pressão de entrada do tubo de Venturi.....	72
Tabela 7 – Dimensões das geometrias avaliadas na simulação numérica para o estudo da influência do comprimento da garganta do tubo de Venturi no fenômeno de cavitação hidrodinâmica.....	75
Tabela 8 – Resultados numéricos da influência do comprimento da garganta do tubo de Venturi no fenômeno da cavitação hidrodinâmica.....	75
Tabela 9 – Resultados numéricos do estudo da variação do diâmetro do tubo de Venturi.....	78
Tabela 10 – Resultados numéricos do cálculo transiente.....	80
Tabela 11 – Dimensões do tubo de Venturi fabricado e utilizado no reator de cavitação hidrodinâmica.....	83
Tabela 12 – Composição química do bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	85
Tabela 13 – Comparação da composição química de diferentes amostras de bagaço de cana-de-açúcar.....	86
Tabela 14 – Teores de celulose, hemicelulose e lignina após pré-tratamento de cada amostra.....	87
Tabela 15 – Valores utilizados e codificados das variáveis independentes concentração de NaOH (X1), razão sólido-líquido (X2), tempo (X3) e resposta em remoção de lignina (Y1).....	91
Tabela 16 – Coeficientes de regressão em termos dos fatores codificados.....	92
Tabela 17 – Análise de Variância (ANOVA) modelo 2FI para remoção de lignina do bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado com NaOH assistido por cavitação hidrodinâmica.....	93
Tabela 18 – Faixa de resíduos da análise estatística.....	95
Tabela 19 – Condições operacionais do ensaio para validação do modelo.....	96
Tabela 20 – Resultado predito x resultado experimental.....	97
Tabela 21 – Resultado experimental – máxima remoção de lignina, mínima concentração de álcali, máxima carga de sólido e menor tempo de reação.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFEXP	Expansão da fibra em amônia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Análise de Variância
APG II	<i>Angiosperm Phylogeny Group II</i>
BCA	Bagaço de cana-de-açúcar
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DEN	Departamento de Energia – FEG/UNESP
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
DEMAR	Departamento de engenharia de Materiais – EEL/USP
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FVM	Método do Volume Finito
HD	Cavitação Hidrodinâmica
HMF	5-Hidroximetilfurfural
IEA	Agência Internacional de Energia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PMMA	Polimetilmetacrilato
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta
US	Ultrassom

LISTA DE SÍMBOLOS

Notação	Descrição
Q	Vazão volumétrica [m ³ /s]
G_k	Geração de energia cinética turbulenta [W]
S	Termo fonte definido pelo usuário
α	Fração de volume de vapor
ν_m	Viscosidade cinemática [m ² /s]
V_m	Velocidade média [m/s]
ρ_m	Massa específica da mistura [kg/m ³]
δ_k	Número de Prandtl [adm.]
∇	Operador Gradiente
μ_m	Viscosidade absoluta [Pa.s]
ν_T	Viscosidade cinemática turbulenta [m ² /s]
δ_{ij}	Delta de Kronecker
S_{ij}	Tensor médio de taxa de deformação
k	Energia cinética turbulenta [J]
ε	Taxa de dissipação de turbulência
y_M	Dilatação na turbulência compressível
ρ_V	Massa específica do vapor [kg/m ³]
R	Transferência de massa da bolha de vapor
R_b	Raio da bolha
P_b	Pressão de superfície da bolha
P_v	Pressão de vapor [Pa]
σ_c	Número de cavitação [adm.]
$P_{r,crit.}$	Pressão crítica [Pa]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 RELEVÂNCIA CIENTÍFICA DA PESQUISA E CONTEMPORANEIDADE.....	18
2 OBJETIVOS.....	21
2.1 OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1 PERSPECTIVAS ENERGÉTICAS PARA O BRASIL	22
3.2 MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS.....	24
3.2.1 Celulose.....	25
3.2.2 Hemicelulose.....	26
3.2.3 Lignina.....	27
3.2.4 Extrativos.....	28
3.3 CANA-DE-AÇÚCAR E A UTILIZAÇÃO DO BAGAÇO COMO FONTE ENERGÉTICA.....	28
3.4 PRÉ-TRATAMENTO DE MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS.....	30
3.4.1 Pré-tratamento alcalino.....	33
3.4.2 Cavitação hidrodinâmica: uma alternativa ao pré-tratamento.....	35
3.5 REATORES DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	38
3.5.1 Reatores de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi.....	40
3.5.2 Parâmetros influenciadores em reatores de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi.....	44
3.6 MODELAGEM MATEMÁTICA DE REATORES DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	49
3.6.1 Modelos de mistura e turbulência.....	50
3.6.2 Modelo de cavitação.....	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS NO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA EM TUBO DE VENTURI.....	56
4.2 CONSTRUÇÃO DO REATOR DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA COM TUBO DE VENTURI PARA PRÉ-TRATAMENTO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	58
4.3 AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM REATOR DE CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA TIPO TUBO DE VENTURI.....	61
4.3.1 Matéria-prima: obtenção e preparo do bagaço de cana-de-açúcar.....	61
4.3.2 Pré-tratamento alcalino do BCA em reator de cavitação hidrodinâmica com tubo Venturi.....	61
4.3.3 Planejamento do experimento com metodologia de superfície de resposta (RSM).....	63

4.4 MÉTODOS ANALÍTICOS.....	64
4.4.1 Análise composicional do bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i> e após pré-tratamento.....	64
4.4.1.1 Determinação do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar.....	65
4.4.1.2 Determinação dos extrativos do bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	65
4.4.1.3 Determinação do teor de cinzas.....	66
4.4.1.4 Determinação de carboidratos estruturais e lignina no BCA.....	67
4.4.2 Determinação dos açúcares e ácido acético.....	68
4.5 ANÁLISE DA MORFOLOGIA DO BAGAÇO COM MEV.....	70
5 PARÂMETRO ENERGÉTICO: CÁLCULO DO CONSUMO DE ENERGIA NO PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO DE BCA ASSISTIDO POR CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA EM REATOR TIPO TUBO DE VENTURI.....	70
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
6.1 ANÁLISE COMPUTACIONAL FLUIDODINÂMICA: VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E FÍSICOS NA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA EM TUBO DE VENTURI.....	72
6.1.1 Influência da pressão de entrada na mecânica das cavidades de vapor.....	72
6.1.2 Influência do comprimento da garganta na cavitação hidrodinâmica em tubos de Venturi.....	74
6.1.3 Influência do diâmetro da garganta na cavitação hidrodinâmica em tubos de Venturi.....	77
6.1.4 Início, crescimento e colapso das cavidades de vapor.....	79
6.1.5 Seleção dos parâmetros operacionais e análise do tubo de Venturi fabricado.....	82
6.2 AVALIAÇÃO DO PRÉ-TRATAMENTO ALCALINO DE BCA ASSISTIDO POR CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA EM TUBO DE VENTURI.....	85
6.2.1 Análise composicional do bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	85
6.2.2 Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar via cavitação hidrodinâmica com NaOH.....	86
6.2.3 Análise morfológica do bagaço de cana-de-açúcar por microscopia eletrônica de varredura.....	89
6.2.4 Análise da superfície de resposta (RSM) para o pré-tratamento alcalino assistido por cavitação hidrodinâmica em diferentes concentrações, razão sólido-líquido e tempo reacional.....	91
6.2.5 Validação experimental.....	96
6.3 CONSUMO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PRÉ-TRATAMENTO VIA CAVITAÇÃO HIDRODINÂMICA EM TUBO DE VENTURI.....	98
7 CONCLUSÕES.....	100
8 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS.....	103
REFERÊNCIAS	104

1 INTRODUÇÃO

Com o rápido desenvolvimento de nossa sociedade e o aumento exponencial da demanda por combustíveis e produtos químicos, fica evidente a necessidade urgente de se estabelecer novas técnicas e de se utilizar novos materiais para substituir os produtos a base de combustíveis fósseis, que além de não-renováveis também impactam negativamente o meio ambiente.

A busca por novas fontes energéticas renováveis tem provocado extensas pesquisas para o desenvolvimento de rotas biotecnológicas que permitam a utilização de biomassas residuais de composição lignocelulósica para se produzir novos produtos como biocombustíveis (bioetanol, biometanol, biometano, biohidrogênio e biodiesel), biomateriais (biocompósitos, biofibras, biofilme, biogel, painéis de fibras, compósitos madeira-plástico) e produtos químicos (ácido levulínico, 5-hidroximetilfurfural, etileno, ácido acrílico, etileno glicol) (MAHMOOD *et al.*, 2019).

Entre muitas rotas sustentáveis de produção, a biomassa lignocelulósica é o biopolímero natural mais abundante e que tem emissão zero de carbono, tornando-se uma matéria-prima promissora (SARSAIYA *et al.*, 2019).

Os setores da agroindústria brasileira geram centenas de toneladas de resíduos lignocelulósicos a cada ano e que por vezes não são totalmente utilizados ou ainda estão em fase de estudos, tais como: casca e palha de arroz, coco verde, algodão, milho (sabugo e palhas), cana-de-açúcar (bagaço e palha), entre outras (SILVA *et al.*, 2020).

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2019 (MME, 2019) a cana-de-açúcar e seus derivados apresentam-se como a segunda maior fonte energética do Brasil, em tonelada equivalente de petróleo (TEP), ficando à frente da hidroeletricidade e atrás apenas do petróleo. Abundante no país, o bagaço de cana-de-açúcar constitui-se um dos mais importantes subprodutos da indústria sucroalcooleira, sendo considerado estratégico para a segurança energética nacional (CONAB, 2018).

O bagaço de cana-de-açúcar é composto principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, servindo como fonte de açúcares solúveis que através de processos químicos, enzimáticos e fermentativos podem fornecer biocombustíveis e uma variedade de bioprodutos, fornecendo uma plataforma para biorrefinarias (KLEINGESINDS, 2017).

Entretanto, o bagaço de cana-de-açúcar possui estruturas complexas que não proporcionam o seu uso direto e, portanto, a desconstrução da matriz lignocelulósica complexa altamente recalcitrante apresenta-se como o principal desafio a ser superado, através de uma etapa de pré-tratamento da biomassa (MAHMOOD *et al.*, 2019).

Os métodos de pré-tratamento são classificados como físicos, químicos, físico-químicos, biológicos e combinados (HALDER *et al.*, 2019). Além disso, algumas novas tecnologias industriais vêm despontando como candidatas promissoras para soluções sustentáveis de pré-tratamento para utilização de biomassa lignocelulósica em uma aplicação de biorrefinaria em larga escala, como radiações não ionizantes e ionizantes, campo elétrico pulsado, técnicas de ultrassom e a cavitação hidrodinâmica (HASSAN; WILLIAMS; JAISWAL, 2018).

A cavitação hidrodinâmica é um fenômeno sequencial de vaporização, geração e implosão de microscópicas bolhas de vapor, liberando grandes magnitudes de energia ao longo de uma pequena extensão. A cavitação hidrodinâmica pode ser produzida pela rotação mecânica de um rotor em um líquido ou em um escoamento através de uma constrição, como placas de orifício e tubos de Venturi. Ao passar pela constrição a pressão absoluta local cai abaixo da pressão de vapor do líquido na temperatura do escoamento, formando bolhas de vapor que implodirão na zona de recuperação de pressão a jusante da constrição (SHRIKANT; KHAMBETE, 2017). O colapso ou implosão destas bolhas de vapor geram altas temperaturas e pressões, as quais induzem a clivagem de moléculas de água para produzir radicais livres que favorecem a desconstrução da matriz carboidrato-lignina da biomassa (BADVE *et al.*, 2014).

Recentemente, muitas pesquisas vêm sendo realizadas em centros de pesquisa e universidades no Brasil e no mundo sobre a utilização da cavitação hidrodinâmica como pré-tratamento de materiais lignocelulósicos, como se observa nos estudos de Kim *et al.* (2015), Nakashima *et al.* (2016), Madison *et al.*, (2017), Sun *et al.*, (2018), Thanekar e Gogate (2019) e Ren *et al.* (2020).

Neste contexto, esta tese teve como desafio desenvolver um reator de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi para pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar, a partir de resultados de uma investigação numérica conduzida através de uma modelagem matemática do escoamento turbulento com cavitação, onde avaliou-se a influência do comprimento e diâmetro da garganta do tubo de Venturi, da pressão de entrada do sistema além da mecânica de origem, crescimento e implosão das cavidades de vapor.

O pré-tratamento alcalino assistido por cavitação hidrodinâmica em tubo de Venturi foi realizado objetivando-se a máxima remoção de lignina. Três variáveis independentes, concentração de NaOH, razão sólido-líquido e tempo de reação foram estudadas utilizando-se da análise de superfície de resposta para desenhar os ensaios.

Espera-se com este trabalho contribuir para o desenvolvimento de novos processos de pré-tratamento de biomassa lignocelulósica, introduzindo a cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi, como uma alternativa eficaz, fácil e energeticamente eficiente.

1.1 RELEVÂNCIA CIENTÍFICA DA PESQUISA E CONTEMPORANEIDADE

A análise dos dados bibliométricos foram realizadas na base de dados SCOPUS (2020) com o uso de diversas palavras chave, delimitadas ao título, resumo e palavras chave de artigos publicados em revistas e periódicos científicos. A Tabela 1 indica o número total de publicações realizadas desde 1990 até a data de realização desta pesquisa em 10/01/2020.

Tabela 1 – Bibliometria: Publicações realizadas na base de dados SCOPUS desde 1990 até 10/01/2020.

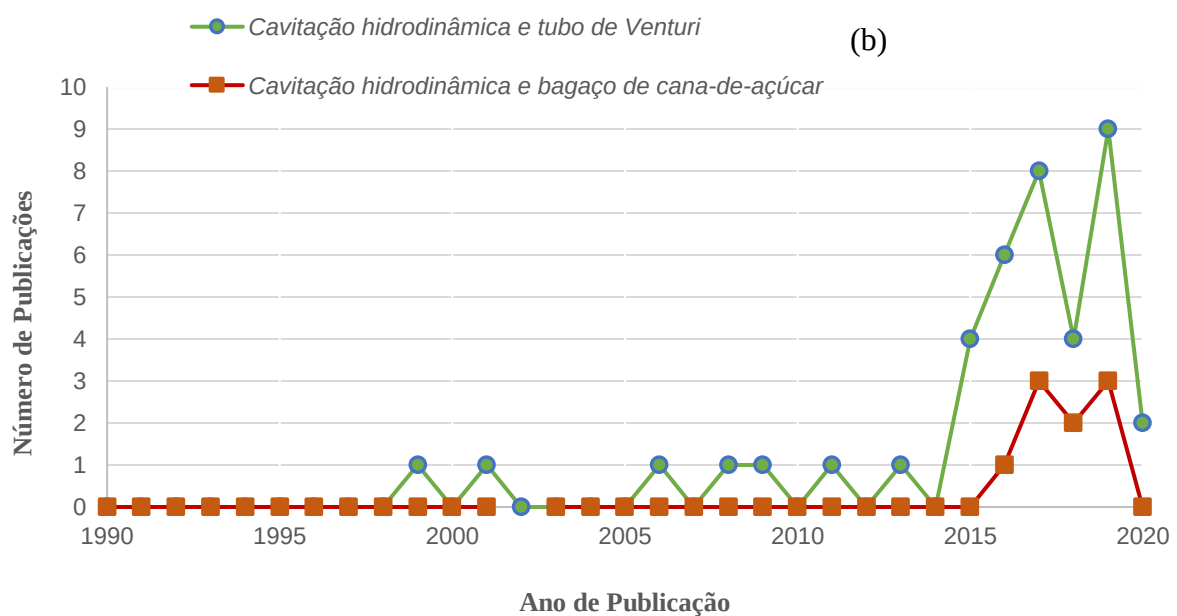
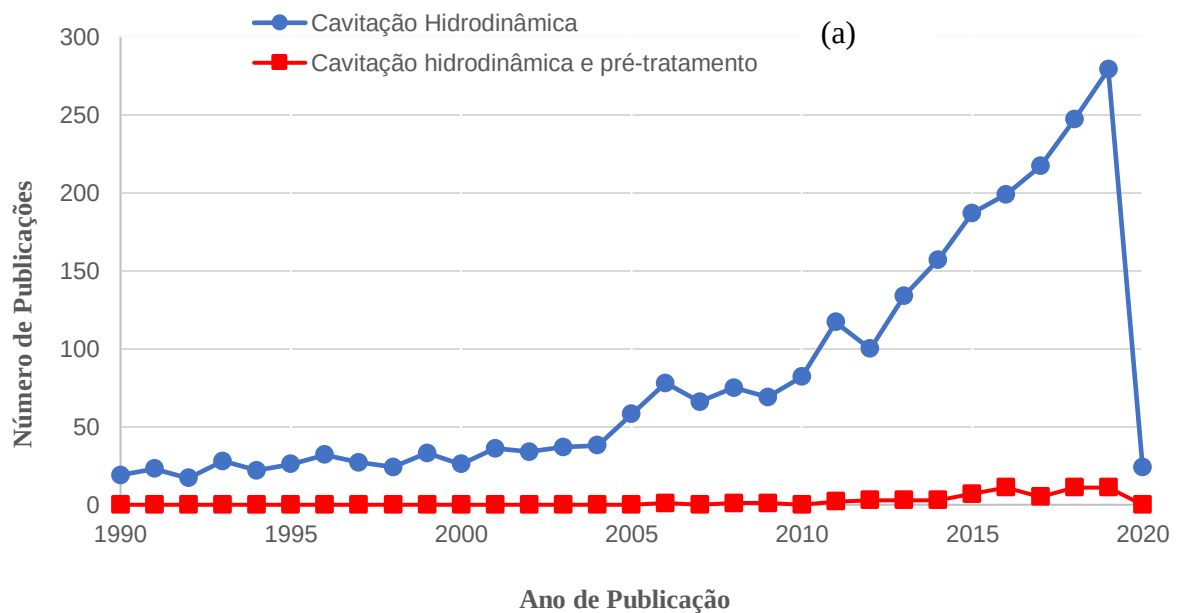
Palavras Chave	Publicações
Pré-tratamento	182.310
Bagaço de cana-de-açúcar	5544
Pré-tratamento alcalino	5281
Cavitação hidrodinâmica	2511
Pré-tratamento e hidróxido de sódio	1907
Pré-tratamento e bagaço de cana-de-açúcar	864
Cavitação hidrodinâmica e pré-tratamento	59
Cavitação hidrodinâmica e tubo de Venturi	40
Cavitação hidrodinâmica e biomassa lignocelulósica	16
Cavitação hidrodinâmica e hidróxido de sódio	14
Pré-tratamento alcalino e cavitação hidrodinâmica	9
Cavitação hidrodinâmica e bagaço de cana-de-açúcar	9
Pré-tratamento e tubo de Venturi	5
Tubo de Venturi e bagaço de cana-de-açúcar	0

Fonte: Scopus (2020).

A Figura 1.(a) ilustra o número de publicações em função do ano, quando se emprega as palavras chaves “cavitação hidrodinâmica” e “cavitação hidrodinâmica e pré-tratamento”, e a

Figura 1.(b) quando se emprega as palavras chave “cavitação hidrodinâmica e tubo de Venturi” e “cavitação hidrodinâmica e bagaço de cana-de-açúcar”.

Figura 1 – Bibliometria: Número de publicações em função do ano para diferentes palavras chave (a) “cavitação hidrodinâmica” e “cavitação hidrodinâmica e pré-tratamento” e (b) “cavitação hidrodinâmica e tubo de Venturi” e “cavitação hidrodinâmica e bagaço de cana-de-açúcar”.



Fonte: Scopus (2020).

Analizando os dados da literatura e a partir dos dados apresentados pela Figura 1.(a) e 1.(b) pode-se observar um aumento significativo na quantidade de material publicado em relação a cavitação hidrodinâmica, com especial destaque a partir de 2012, quando a incidência de publicações com a palavra chave “cavitação hidrodinâmica” aumenta de forma significativa. Contudo há relativamente poucos trabalhos sobre cavitação hidrodinâmica aplicada como pré-tratamento de biomassa. Percebe-se tal fato devido ao número relativamente pequeno para a pesquisa com as palavras chave “cavitação hidrodinâmica e pré-tratamento”, em relação ao uso da palavra chave “cavitação hidrodinâmica”, para os mesmos parâmetros de pesquisa. Outra questão relevante é o fato de a maior parte dos artigos referentes as palavras chave pesquisadas serem datados a partir de 2016. Isto mostra que o uso da cavitação hidrodinâmica como pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar, neste campo do conhecimento, é relativamente recente.

A cavitação hidrodinâmica para pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar ou de material lignocelulósico também é pouco explorada, sendo 9 artigos encontrados para a pesquisa “cavitação hidrodinâmica e bagaço de cana-de-açúcar” e 16 encontrados para as palavras chave “cavitação hidrodinâmica e biomassa lignocelulósica” até o momento da pesquisa.

O pré-tratamento com hidróxido de sódio assistido por cavitação hidrodinâmica também é pouco estudado. Para as pesquisas utilizando como palavras chave “cavitação hidrodinâmica e hidróxido de sódio” e “pré-tratamento alcalino e cavitação hidrodinâmica” foram encontrados apenas 14 e 9 artigos respectivamente.

Nesta tese, 85,83% das referências utilizadas são de artigos científicos publicados em periódicos indexados e 42% das referências foram publicadas entre os anos de 2017-2020.

7 CONCLUSÕES

O escoamento turbulento na presença de cavitação hidrodinâmica foi investigado numericamente através da solução das equações de Navier-Stokes pela técnica da decomposição das propriedades instantâneas do fluxo em uma média e flutuação (RANS). O fechamento do sistema de equações foi realizado pelo modelo de turbulência Realizável $k-\varepsilon$ juntamente ao modelo de cavitação Schnerr-Sauer. Diferentes geometrias tipo tubo de Venturi foram avaliadas através da metodologia CFD de modo a investigar os campos de fluxos obtidos pela solução do modelo matemático resolvido em software CFD comercial pelo método do volume finito. Os parâmetros geométricos e condições de operação foram testados em diferentes configurações de maneira a possibilitar análise sobre a influência de tais variáveis na formação, crescimento e colapso de cavidades de vapor. Os dados referentes à modelagem matemática, computacional e estratégia de solução numérica foram apresentados e discutidos.

Foram avaliados reatores de cavitação hidrodinâmica do tipo tubo de Venturi com pressões de operação variando de 200 a 400 kPa, com o objetivo de se utilizar os resultados como um critério de seleção de um reator de cavitação hidrodinâmica para integrar um sistema de pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar. A partir desse estudo concluiu-se que:

- O modelo de cavitação Schnerr e Sauer (2001) demonstrou-se robusto para descrever o fluxo turbulento através de tubos Venturi em regime de cavitação. Os resultados da simulação demonstraram boa concordância com a literatura para razão de pressão, número de cavitação e visualização do fluxo;

- O aumento da pressão de entrada leva a uma diminuição da razão de pressão, reduzindo o número de cavitação e indicando um regime de cavitação mais intenso, resultado confirmado pelas visualizações de fluxo;

- Através da análise das visualizações de fluxo pelos contornos de fração de vapor foi possível concluir que à medida que se aumenta a razão l/d no Venturi, retarda-se a recuperação de pressão, sugerindo que este parâmetro pode ter papel importante no controle de crescimento da bolha e nas condições finais de colapso. Os dados obtidos para diâmetro da garganta igual a 1,5 mm e comprimento da garganta igual a 5 mm sugerem um nível ótimo de atividade de cavitação para o desempenho máximo do reator com tubo de Venturi;

- A mecânica da cavitação foi investigada através da abordagem URANS onde foi possível captar o início, crescimento e colapso das cavidades em função do tempo, iniciando-se em $t = 0,5$ ms e chegando em seu valor máximo em $t = 18$ ms.;

- Os resultados apresentados e a abordagem numérica fornecem informações úteis para projeto e otimização de reatores de cavitação hidrodinâmica com tubos Venturi;

Com relação a análise composicional e morfológica do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e após pré-tratamento alcalino, para diferentes concentrações de hidróxido de sódio, razão sólido líquido e tempo reacional concluiu-se que:

- O pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar em meio alcalino com cavitação hidrodinâmica favoreceu a remoção de macrocomponentes como lignina e hemicelulose. A máxima remoção de lignina observada nos experimentos foi 56,14% e de hemicelulose de 67,70%;

- Foi possível observar em algumas amostras uma redução no percentual de celulose, entretanto, os valores são menores quando comparados a perda de celulose em pré-tratamentos ácidos;

- A morfologia do bagaço de cana-de-açúcar pré-tratado em meio alcalino com cavitação apresentou fibras com sulcos mais porosos e fragmentação em sua estrutura, provavelmente pela remoção parcial de hemicelulose e lignina, indicando a efetividade do pré-tratamento com cavitação;

- A cavitação hidrodinâmica mostrou-se energeticamente eficiente em termos do consumo de energia com um resultado de 4,41MJ/kg de bagaço;

- O modelo de Box-Behnken se mostrou uma técnica simples e prática para o planejamento de experimentos para descrever a remoção de lignina em função de três variáveis independentes do processo;

- A análise de superfície de resposta permitiu determinar as condições ótimas do pré-tratamento para obtenção da máxima remoção de lignina (4,95% de NaOH, 1,14% s/l e 55,96 min);

- O modelo estatístico para obtenção da maior deslignificação do bagaço de cana-de-açúcar foi validado experimentalmente, com resultado de 56,01% de remoção de lignina, 66,59% para a hemicelulose e perda de celulose de 1,56%, com desejabilidade global igual a 1, valor considerado aceitável e excelente;

- Levando-se em conta a otimização do pré-tratamento baseado em condições econômicas, para a máxima remoção de lignina, no menor tempo de reação, menor concentração de álcali e maior carga de sólido, o resultado obtido foi de 33,74%, com fator desejabilidade igual a 0,543;

Conclui-se finalmente que devido a sua eficácia e elevado rendimento, a cavitação hidrodinâmica pode ser usada para potencializar o pré-tratamento alcalino do bagaço de cana-de-açúcar, oferecendo potenciais vantagens na produção de bioprodutos.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

- Avaliação da recuperação e reutilização do solvente utilizado (hidróxido de sódio), reciclando-o de um pré-tratamento anterior, de modo a reduzir custos no processo;
- Realização da hidrólise enzimática da condição otimizada do bagaço pré-tratado de modo a avaliar a melhora na digestibilidade da biomassa;
- Avaliação da eficácia da cavitação hidrodinâmica utilizando-se aditivos de intensificação do processo, como o peróxido de hidrogênio, além do uso de agentes estabilizantes;
- Avaliar os efeitos de diferentes temperaturas no pré-tratamento alcalino combinado com a cavitação hidrodinâmica;
- Avaliar os efeitos da temperatura na dinâmica das bolhas de vapor, como tamanho máximo atingido e distância percorrida antes do colapso;
- Estudar o fenômeno de cavitação hidrodinâmica como pré-tratamento de bagaço de cana-de-açúcar utilizando outras bases ou outros fluidos de interesse;
- Avaliar as possibilidades de ampliação (*scale-up*) do reator de cavitação hidrodinâmica com tubo de Venturi;
- Estudar o fenômeno da cavitação hidrodinâmica na produção de biodiesel a partir do óleo de soja;
- Ampliar o estudo da cavitação hidrodinâmica como uma opção de tratamento eficiente de efluentes industriais;
- Ampliar o estudo da cavitação hidrodinâmica como uma alternativa a síntese química;
- Avaliar o fenômeno da cavitação hidrodinâmica em outros dispositivos como placas de orifício, e bocais.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-RAHEEM, M.A. *et al.* Large eddy simulation of hydrogen-air premixed flames in a small scale combustion chamber. **International Journal Of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 40, n. 7, p.3098-3109, fev. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.042>. Acesso em: 18 jan. 2019.
- AMBULGEKAR, G.V.; SAMANT, S.D.; PANDIT, A.B. Oxidation of alkylarenes using aqueous potassium permanganate under cavitation: comparison of acoustic and hydrodynamic techniques. **Ultrasonics Sonochemistry**, Oxford, v. 12, n. 1-2, p.85-90, jan. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2004.04.005>. Acesso em: 06 fev. 2019.
- ANTUNES, F. A. A. *et al.* A new facile approach for xylitol production from sugarcane bagasse in fluidized bed reactor by a novel Brazilian wild yeast. In: MÉNDEZ-VILAS, A.(ed.). **Exploring microorganisms: recent advances in applied microbiology**. Irvine & Bocaraton: Browm Walker Press, 2018. p. 116 – 119.
- APG II, Angiosperm Phylogeny Group II. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG II. **Botanical journal of the linnean society**, London, v. 141, n. 4, p.399-436, abr. 2003. Oxford university press (OUP). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1095-8339.2003.t01-1-00158.x>. Acesso em: 09 mar. 2019.
- ASHRAFIZADEH, S. M.; GHASSEMI, H. Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis. **Flow measurement and instrumentation**, Guilford, v. 42, p.6-15, abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.12.007>. Acesso em: 26 mar. 2019.
- ASSAD, L. Aproveitamento de resíduos do setor sucroalcooleiro desafia empresas e pesquisadores. **Ciência e cultura**, São Paulo, v. 69, n. 4, p.13-16, out. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602017000400005>. Acesso em: 13 fev. 2019.
- BADVE, M. P. *et al.* Hydrodynamic cavitation as a novel approach for delignification of wheat straw for paper manufacturing. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 21, n. 1, p.162-168, jan. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.006>. Acesso em: 12 fev. 2019.
- BADVE, M. P. *et al.* Modeling the shear rate and pressure drop in a hydrodynamic cavitation reactor with experimental validation based on KI decomposition studies. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 22, p.272-277, jan. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.05.017>. Acesso em: 12 fev. 2019.
- BAJPAI, P. Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production. **Springerbriefs in molecular science**, Singapore, p.423-427, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6>. Acesso em: 07 abr. 2019.

BAL, M.; REDDY, T. T.; MEIKAP, B.C. Removal of HCl gas from off gases using self-priming venturi scrubber. **Journal of hazardous materials**, Amsterdam, v. 364, p.406-418, fev. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.10.028>. Acesso em: 18 mar. 2019.

BALACHANDRAN, R. *et al.* Characterization of stable and transient cavitation in megasonically irradiated aqueous solutions. **Microelectronic engineering**, Amsterdam, v. 133, p.45-50, fev. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mee.2014.11.020>. Acesso em: 12 fev. 2019.

BALAT, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. **Energy conversion and management**, Oxford, v. 52, n. 2, p.858-875, fev. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.08.013>. Acesso em: 13 fev. 2019.

BANERJEE, S. *et al.* Hemicellulose based biorefinery from pineapple peel waste: xylan extraction and its conversion into xylooligosaccharides. **Food and bioproducts processing**, Rugby, v. 117, p.38-50, set. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2019.06.012>. Acesso: 12 fev. 2019.

BARIK, A. J.; GOGATE, P. R. Degradation of 4-chloro 2-aminophenol using a novel combined process based on hydrodynamic cavitation, uv photolysis and ozone. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 30, p.70-78, mai. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.007>. Acesso em: 14 fev. 2019.

BHOWMICK, G.; SARMAH, A. K.; SEN, R. Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products. **Bioresource technology**, Essex, v. 247, p.1144-1154, jan. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.163>. Acesso em: 14 fev. 2019.

BRANDT, A. *et al.* Deconstruction of lignocellulosic biomass with ionic liquids. **Green chemistry**, Cambridge, v. 15, n. 3, p.550-562, 2013. Royal Society of Chemistry (RSC). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/c2gc36364j>. Acesso em: 09 mar. 2019.

BRASIL, Centro de estudos avançados em economia Aplicada. **PIB de cadeias agropecuárias**. São Paulo: CEPEA, 2017. 235p. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-de-cadeias-agropecuarias.aspx>. Acesso em: 20 fev. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2018-2019**. Brasília: MME, 2019. 263p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em: 24 abr. 2019.

BRINKHORST, S.; VON LAVANTE, E.; WENDT, G. Experimental and numerical investigation of the cavitation-induced choked flow in a herschel venturi-tube. **Flow measurement and instrumentation**, Guilford, v. 54, p.56-67, abr. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.12.006>. Acesso em: 21 fev. 2019.

BOX, G.E.P., BEHNKEN, D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. **Technometrics**, Washington, v. 2, p.455-475, fev. 1960. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1266454>. Acesso em: 02 mai. 2019.

BURZIO, E. *et al.* Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 60, p.104-117, jan. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104740>. Acesso em: 17 jan. 2019.

CABRAL, D. de C. **Na presença da floresta: mata atlântica e história colonial**. Rio de Janeiro: Garamond, 2014. 535 p.

CABRAL, M. R. *et al.* Evaluation of pre-treatment efficiency on sugarcane bagasse fibers for the production of cement composites. **Archives of civil and mechanical engineering**, Poland, v. 18, n. 4, p.1092-1102, set. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2018.02.012>. Acesso em: 20 abr. 2019.

CARVALHO, S. A. D.; FURTADO, A. T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. **Revista gestão & conexões**, Vitória, v. 2, n. 1, p.22-46, 23 set. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13071/regec.2317-5087.2013.2.1.4909.22-46>. Acesso 09 abr. 2019.

CARVALHO, D. M.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J. L. Assessment of alkaline pretreatment for the production of bioethanol from eucalyptus, sugarcane bagasse and sugarcane straw. **Industrial crops and products**, Florida, v. 94, p.932-941, dez. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.069>. Acesso em: 12 dez. 2019.

CHANDRA, R.; TAKEUCHI, H.; HASEGAWA, T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: a review in context to second generation of biofuel production. **Renewable and sustainable energy reviews**, Oxford, v. 16, n. 3, p.1462-1476, abr. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.035>. Acesso: 03 mar. 2019.

CHARRIÈRE, B.; GONCALVES, E. Numerical investigation of periodic cavitation shedding in a Venturi. **International journal of heat and fluid flow**, Guilford, v. 64, p.41-54, abr. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.01.011>. Acesso em: 22 fev. 2019.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Cana-de-açúcar: safra 2018/2019: terceiro levantamento**, dez. de 2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 28 jan. de 2019.

COSTA, S. M. *et al.* Use of sugar cane straw as a source of cellulose for textile fiber production. **Industrial crops and products**, Florida, v. 42, p.189-194, mar. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.028>. Acesso em: 12 jun. 2019.

DHANDE, D. Y.; PANDE, D.W. Multiphase flow analysis of hydrodynamic journal bearing using CFD coupled fluid structure interaction considering cavitation. **Journal of king saud university - engineering sciences**, Riad, v. 30, n. 4, p.345-354, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2016.09.001>. Acesso em: 14 mar. 2019.

FERREIRA, L.R.A. *et al.* Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and sustainable energy reviews**, Oxford, v. 94, p.440-455, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>. Acesso em: 07 abr. 2019.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2014.

GHASSEMI, H.; FASIH, H. F. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter. **Flow measurement and instrumentation**, Guilford, v. 22, n. 5, p.406-412, out. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.05.001>. Acesso em: 26 mar. 2019.

GOGATE, P. R.; PATIL, P. N. Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 25, p.60-69, jul. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.016>. Acesso em: 13 jul. 2019.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; BACENETTI, J. Exploring the production of bio-energy from wood biomass. Italian case study. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 647, p.158-168, jan. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.295>. Acesso em: 22 fev. 2019.

GRABBER, J. H. *et al.* Genetic and molecular basis of grass cell-wall degradability lignin–cell wall matrix interactions. **Comptes rendus biologies**, Paris, v. 327, n. 5, p.455-465, mai. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crv.2004.02.009>. Acesso em: 5 mar. 2019.

GUNA, V. *et al.* Valorization of sugarcane bagasse by developing completely biodegradable composites for industrial applications. **Industrial crops and products**, Florida, v. 131, p.25-31, mai. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.011>. Acesso em: 27 mar. 2019.

HALDER, P. *et al.* Progress on the pre-treatment of lignocellulosic biomass employing ionic liquids. **Renewable and sustainable energy reviews**, Oxford, v. 105, p.268-292, mai. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.052>. Acesso em: 23 fev. 2019.

HASSAN, S. S.; WILLIAMS, G. A.; JAISWAL, A. K. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 262, p.310-318, ago. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>. Acesso em: 30 mar. 2019.

HELAL, M. M. *et al.* Numerical prediction of sheet cavitation on marine propellers using CFD simulation with transition-sensitive turbulence model. **Alexandria engineering journal**, Alexandria, v. 57, n. 4, p.3805-3815, dez. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2018.03.008>. Acesso em: 05 fev. 2019.

HILARES, R. T. *et al.* A new approach for bioethanol production from sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation assisted-pretreatment and column reactors. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 43, p.219-226, mai. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.01.016>. Acesso em: 24 mar. 2019.

HILARES, R. T. *et al.* Hydrodynamic cavitation-assisted alkaline pretreatment as a new approach for sugarcane bagasse biorefineries. **Bioresource technology**, Essex, v. 214, p.609-614, ago. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.004>. Acesso em: 03 fev. 2019.

HILARES^a, R. T. *et al.* Ethanol production in a simultaneous saccharification and fermentation process with interconnected reactors employing hydrodynamic cavitation-pretreated sugarcane bagasse as raw material. **Bioresource technology**, Essex, v. 243, p.652-659, nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.159>. Acesso em: 03 fev. 2019.

HILARES^b, R. T. *et al.* Hydrodynamic cavitation as a strategy to enhance the efficiency of lignocellulosic biomass pretreatment. **Critical reviews in biotechnology**, Boca Raton, v. 38, n. 4, p.483-493, 12 dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07388551.2017.1369932>. Acesso em: 04 fev. 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **A geografia da cana-de-açúcar: dinâmica territorial da produção agropecuária**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 170 p. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/dinamica_agropecuaria. Acesso em: 20 fev. 2019.

IEA BIOENERGY, **Large Industrial Users of Energy Biomass**, Finland, 2013.

IGNACIO, L. H. S.; SANTOS, P. E. A.; DUARTE, C. A. R. An experimental assessment of Eucalyptus urosemite energy potential for biomass production in Brazil. **Renewable And sustainable energy reviews**, Oxford, v. 103, p.361-369, abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.053>. Acesso em: 23 jun. 2019.

IPCC, **Climate change 2007: the physical science basis**. Cambridge, 2007.

JENSEN, M. B. *et al.* Venturi-type injection system as a potential H₂ mass transfer technology for full-scale in situ biomethanation. **Applied energy**, London, v. 222, p.840-846, jul. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.034>. Acesso em: 4 fev. 2019

Jl, D. *et al.* Experimental and numerical studies of the jet tube based on venturi effect. **Vacuum**, London, v. 111, p.25-31, jan. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.09.010>. Acesso em: 26 mar. 2019.

Jl, J. *et al.* Preparation of biodiesel with the help of ultrasonic and hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics**, Oxford, v. 44, p.411-414, dez. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.020>. Acesso em: 12 jan. 2019.

JIN, S. *et al.* Microwave assisted alkaline pretreatment to enhance enzymatic saccharification of catalpa sawdust. **Bioresource technology**, Essex, v. 221, p.26-30, dez. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.033>. Acesso em: 21 jan. 2019.

JOLY, A. B. **Botânica: introdução à taxonomia vegetal**. 13. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2002. 777 p.

JÖNSSON, L. J.; MARTÍN, C.. Pretreatment of lignocellulose: Formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. **Bioresource technology**, Essex, v. 199, p.103-112, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.009>. Acesso em: 21 fev. 2019.

KARTHIKEYAN, O. P.; VISVANATHAN, C. Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review. **Reviews in environmental science and biotechnology**, London, v. 12, n. 3, p.257-284, 16 nov. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11157-012-9304-9>. Acesso em: 08 mar. 2019.

KIM, J. S.; LEE, Y. Y.; KIM, T. H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**, Essex, v. 199, p.42-48, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.085>. Acesso em: 13 mar. 2019.

KIM, I. *et al.* Hydrodynamic cavitation as a novel pretreatment approach for bioethanol production from reed. **Bioresource technology**, Essex, v. 192, p.335-339, set. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.038>. Acesso em: 21 fev. 2019.

KLEINGESINDS, E. K. **Avaliação da hidrólise enzimática do sabugo de milho pré-tratado com ácido diluído e surfactante para a obtenção de bioetanol**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em biotecnologia industrial) - Escola de engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2017.

KOZÁK, J. *et al.* Numerical and experimental investigation of the cavitating flow within Venturi tube. **Journal of fluids engineering**, New York, v. 141, n. 4, p.1-11, 8 nov. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/1.4041729>. Acesso em: 8 set. 2019.

KOUPAIE, E. H. *et al.* Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production: a review. **Journal of environmental management**, London, v. 233, p.774-784, mar. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.106>. Acesso em: 21 fev. 2019.

KULDEEP S., VIRENDRA, K. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. **Journal of hydrodynamics**, London, v. 28, n. 2, p.293-305, abr. 2016. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s1001-6058\(16\)60631-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1001-6058(16)60631-5). Acesso em: 20 mar. 2019.

KUMARI, D.; SINGH, R. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: a critical review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Oxford, v. 90, p.877-891, jul. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>. Acesso em: 04 mar. 2019.

LAI, Z. *et al.* Optimization of key factors affecting hydrogen production from sugarcane bagasse by a thermophilic anaerobic pure culture. **Biotechnology for biofuels**, Oxford, v.7, p. 1-11, fev. 2014.

LEE, I.; OH, Y.; HAN, J. Design optimization of hydrodynamic cavitation for effectual lipid extraction from wet microalgae. **Journal of environmental chemical engineering**, London, v. 7,

n. 2, p.102-108, abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2019.102942>. Acesso em: 03 abr. 2019.

LI, Y. *et al.* Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). **Bioresource technology**, Essex, v. 156, p.342-347, mar. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.054>. Acesso em: 06 mar. 2019.

LI, X. *et al.* Inhibitory effects of lignin on enzymatic hydrolysis: the role of lignin chemistry and molecular weight. **Renewable energy**, Oxford, v. 123, p.664-674, ago. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.079>. Acesso em: 09 abr. 2019.

LI, M. *et al.* Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. **Minerals engineering**, Oxford, v. 132, p.268-274, mar. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.001>. Acesso em: 22 jun. 2019

LIU, Y. *et al.* Reinforced alkali-pretreatment for enhancing enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. **Fuel processing technology**, Amsterdam, v. 143, p.1-6, mar. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.004>. Acesso em: 20 abr. 2019.

MACHADO, A. S.; FERRAZ, A. Biological pretreatment of sugarcane bagasse with basidiomycetes producing varied patterns of biodegradation. **Bioresource technology**, Essex, v. 225, p.17-22, fev. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.053>. Acesso em: 07 abr. 2019.

MADISON, M. J. *et al.* Mechanical pretreatment of biomass – part I: Acoustic and hydrodynamic cavitation. **Biomass and bioenergy**, Oxford, v. 98, p.135-141, mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.007>. Acesso em: 8 jun. 2019.

MAHMOOD, H. *et al.* Recent advances in the pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and value-added products. **Current opinion in green and sustainable chemistry**, London, v. 20, p.18-24, dez. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.08.001>. Acesso em: 09 jan. 2020.

MARTINS, D. S. S. *et al.* Lacticacid production by lactobacillus coryniformis employing lignocellulosic biomass. In: SYMPOSIUM ON BIOTECHNOLOGY FOR FUELS AND CHEMICALS, 2., 2014, Clearwater Beach. **Abstracts** [...]. Clearwater Beach: SBFFC, 2014. 65p.

MARYANA, R. *et al.* Alkaline pretreatment on sugarcane bagasse for bioethanol production. **Energy procedia**, Amsterdam, v. 47, p.250-254, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.221>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MAURYA, D. P.; SINGLA, A.; NEGI, S. An overview of key pretreatment processes for biological conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol. **3 Biotech**, London, v. 5, n. 5, p.597-609, 3 fev. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13205-015-0279-4>. Acesso em: 17 fev 2019.

MILESSI, T. S. dos S. **Produção de etanol 2G a partir de hemicelulose de bagaço de cana-de-açúcar** *Saccharomyces cerevisiae* selvagem e geneticamente modificada imobilizadas. 2017. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

MEROUANI, S. *et al.* Experimental and numerical investigation of the effect of liquid temperature on the sonolytic degradation of some organic dyes in water. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 28, p.382-392, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.08.015>. Acesso em: 23 jun. 2019.

MOORE, P. H.; PATERSON, A. H.; TEW, T. Sugarcane: the crop, the plant, and domestication. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**, Lauderdale p.1-17, 13 dez. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118771280.ch1>. Acesso em: 13 julh. 2019.

NAKASHIMA, K. *et al.* Hydrodynamic cavitation reactor for efficient pretreatment of lignocellulosic biomass. **Industrial & engineering chemistry research**, Washington, v. 55, n. 7, p.1866-1871, 15 fev. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04375>. Acesso em: 18 fev. 2019.

NIEDZWIEDZKA, A.; SOBIESKI, W. Analytical analysis of cavitating flow in Venturi tube on the basis of experimental data. **Technical Science**, Olsztyn, v. 3, n. 19, p.215-229, 01 jun. 2016.

NREL, **Standard method for the determination of total solids in biomass**. Denver, 2009.

PATIL, P. N. *et al.* Intensification of biogas production using pretreatment based on hydrodynamic cavitation. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 30, p.79-86, mai. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.11.009>. Acesso em: 23 mar. 2019.

PATIL, M. N.; PANDIT, A. B. Cavitation: a novel technique for making stable nano-suspensions. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 14, n. 5, p.519-530, jul. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.007>. Acesso em 12 jan. 2019.

PAUL, S.; DUTTA, A. Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. **Resources, conservation and recycling**, Amsterdam, v. 130, p.164-174, mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.005>. Acesso em: 13 fev. 2019.

PENDAR, M.; ROOHI, E. Cavitation characteristics around a sphere: an LES investigation. **International journal of multiphase flow**, Elmsford, v. 98, p.1-23, jan. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.08.013>. Acesso em: 26 jan. 2019.

PEREIRA, J. R. F. **Avaliação de sistemas de sacarificação e co-fermentação simultânea em reatores de coluna visando à produção de etanol a partir de hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar**. 2018. 93 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial) - Escola de engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2018.

PHILIPPINI, R. R. **Variedades híbridas de bagaço de cana-de-açúcar**: caracterização química e hidrólise enzimática em condições de pré-tratamento diferenciadas. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado em biotecnologia industrial) - Escola de engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

PIELHOP, T. *et al.* Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. **Biotechnology for biofuels**, Oxford, v. 9, n. 1, p.243-251, 22 jul. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s13068-016-0567-1>. Acesso em: 09 fev. 2019.

PONNUSAMY, V. K. *et al.* A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. **Bioresource technology**, Essex, v. 271, p.462-472, jan. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.070>. Acesso em: 13 jun. 2019.

RAUT-JADHAV, S. *et al.* Effect of process intensifying parameters on the hydrodynamic cavitation based degradation of commercial pesticide (methomyl) in the aqueous solution. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, v. 28, p.283-293, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.08.004>. Acesso em: 28 mar. 2019.

REN, X. *et al.* Comparison of hydrodynamic and ultrasonic cavitation effects on soy protein isolate functionality. **Journal of food engineering**, Essex, v. 265, p.109-119, jan. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109697>. Acesso 07 fev. 2020.

RENAULT, H.; WERCK-REICHHART, D.; WENG, J. Harnessing lignin evolution for biotechnological applications. **Current opinion in biotechnology**, London, v. 56, p.105-111, abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2018.10.011>. Acesso em: 12 jun. 2019.

ROCHA, G. J. M. *et al.* Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. **Industrial crops and products**, Florida, v. 64, p.52-58, fev. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.11.003>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SANTOS, S. L. **Uso da cavitação hidrodinâmica como uma alternativa para a produção de biodiesel**. 2009. 79 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia Industrial, São Bernardo do Campo, 2009.

SARSAIYA, S. *et al.* Microbial dynamics for lignocellulosic waste bioconversion and its importance with modern circular economy, challenges and future perspectives. **Bioresource technology**, Essex, v. 291, p.121-134, nov. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121905>. Acesso em: 09 jan. 2020.

SCHNERR G.H.; SAUER J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, 4., 2001, New Orleans, LA. **Proceedings** [...]. New Orleans: ICMF, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Guenter_Schnerr_Professor_DrInghabil/publication/296196752_Physical_and_Numerical_Modeling_of_Unsteady_Cavitation_Dynamics/links/56f6b62308ae81582bf2f940.pdf. Acesso em: 06 abr. 2019.

SCOPUS. **Base de dados bibliográficos:** pesquisa. Disponível em: <https://www.scopus.com/search>. Acesso em: 10 jan. 2020.

SHARMA, A. *et al.* Commercial application of cellulose nano-composites – a review. **Biotechnology reports**, Amsterdam, v. 21, p.327-342, mar. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00316>. Acesso em: 08 jul. 2019.

SHARMA, A. *et al.* Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. **Chemical engineering journal**, Lausanne, v. 143, n. 1-3, p.201-209, set. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2008.04.005>. Acesso em: 08 jul. 2019.

SHIH, T. *et al.* A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. **Computers & fluids**, New York, v. 24, n. 3, p.227-238, mar. 1995. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-t](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-t). Acesso em: 14 jan. 2019.

SHRIKANT, B. R.; KHAMBEDE, A. K. Hydrodynamic cavitation: a novel treatment approach. **Materials today**, Kidlington, v. 4, n. 9, p.9680-9684, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.246>. Acesso em: 19 mar. 2019.

SIBOUT, R. *et al.* Structural redesigning arabidopsis lignins into alkali-soluble lignins through the expression of p-coumaroyl-CoA: monolignol transferase (PMT). **Plant physiology**, Bethesda, p.187-195, 29 jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1104/pp.15.01877>. Acesso em: 16 fev. 2019.

SILVA, H. da C. *et al.* Repeatability of agroindustrial characters in sugarcane in different harvest cycles. **Revista ciência agrônômica**, Jaboticabal, v. 49, n. 2, p.275-282, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20180031>. Acesso em: 15 mar. 2019.

SILVA, S. B. *et al.* Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. **Renewable energy**, Oxford, v. 147, p.1870-1879, mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.131>. Acesso em: 03 mar. 2020.

SIMPSON, A.; RANADE, V. V. Modeling hydrodynamic cavitation in Venturi: influence of Venturi configuration on inception and extent of cavitation. **Aiche journal**, New York, v. 65, n. 1, p.421-433, 5 out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.16411>. Acesso em: 14 abr. 2019.

SINGHAL, A. K. *et al.* Mathematical basis and validation of the full cavitation model. **Journal of fluids engineering**, New York, v. 124, n. 3, p.617-624, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1486223>. Acesso em: 11 jun. 2019.

SLUITER, A. *et al.* Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. In: LABORATORY ANALYTICAL PROCEDURE, 3., 2008, Golden Coast. **Abstracts** [...]. Golden Coast: NREL, 2008. 18p.

SUN, X. *et al.* An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor. **Experimental thermal and fluid science**, New York, v. 99, p.200-210, dez. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>. Acesso em: 13 mar. 2019.

SUN, S. *et al.* The role of pretreatment in improving the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. **Bioresource technology**, Essex, v. 199, p.49-58, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.061>. Acesso em: 10 jan. 2019.

THANEKAR, P.; GOGATE, P. R. Combined hydrodynamic cavitation based processes as an efficient treatment option for real industrial effluent. **Ultrasonics sonochemistry**, Oxford, p.1-12, jan. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.007>. Acesso em: 12 mar. 2019.

TRYGGVASON, G. *et al.* Multiscale issues in DNS of multiphase flows. **Acta mathematica scientia**, Beijing, v. 30, n. 2, p.551-562, mar. 2010. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0252-9602\(10\)60062-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0252-9602(10)60062-8). Acesso em: 10 jun. 2019.

ULAS, A. Passive flow control in liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi. **Flow measurement and instrumentation**, Guilford, v. 17, n. 2, p.93-97, abr. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.10.003>. Acesso em: 13 fev. 2019.

UMAGILIYAGE, A.L. *et al.* Laboratory scale optimization of alkali pretreatment for improving enzymatic hydrolysis of sweet sorghum bagasse. **Industrial crops and products**, Florida, v.74, p.977-986, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.044>. Acesso em: 06 fev. 2019.

VELMURUGAN, R.; MUTHUKUMAR, K. Ultrasound-assisted alkaline pretreatment of sugarcane bagasse for fermentable sugar production: optimization through response surface methodology. **Bioresource technology**, Essex, v. 112, p.293-299, mai. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.168>. Acesso em: 02 mar. 2019.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow UK: Pearson prentice hall, 2007. 503 p.

VIEIRA, A. C. **Produção de nanocelulose a partir da casca de eucalipto iodegradada por “*Pycnoporus sanguineus*”**. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade estadual paulista, Botucatu, 2018.

YADEGARY, M. *et al.* Citric acid production from sugarcane bagasse through solid state fermentation method using aspergillus niger mold and optimization of citric acid production by Taguchi method. **Jundishapur journal of microbiology**, Tahrán, v. 6, p.1-6, ago. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/269943821>. Acesso em: 11 nov. 2018.

YAN, Y.; THORPE, R.B. Flow regime transitions due to cavitation in the flow through an orifice. **International journal of multiphase flow**, Elmsford, v. 16, n. 6, p.1023-1045, nov. 1990. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0301-9322\(90\)90105-r](http://dx.doi.org/10.1016/0301-9322(90)90105-r). Acesso em: 15 abr. 2019.

YOO, C. G.; PU, Y.; RAGAUSKAS, A. J. Ionic liquids: promising green solvents for lignocellulosic biomass utilization. **Current opinion in green and sustainable chemistry**, London, v. 5, p.5-11, jun. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.03.003>. Acesso em: 05 jun. 2019.

ZAREEI, S. A.; AMERI, F.; BAHRAMI, N. Microstructure, strength, and durability of eco-friendly concretes containing sugarcane bagasse ash. **Construction and building materials**, Guilford, v. 184, p.258-268, set. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.153>. Acesso em: 10 nov. 2019.

ZHANG, Z. *et al.* Comparison of high-titer lactic acid fermentation from NaOH- and NH₃-H₂O₂-pretreated corncob by bacillus coagulans using simultaneous saccharification and fermentation. **Scientific reports**, Tokyo, v. 6, n. 1, p.1-10, 17 nov. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/srep37245>. Acesso em: 02 set. 2019.

ZHENG, Y. *et al.* Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. **Progress in energy and combustion science**, Oxford, v. 42, p.35-53, jun. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2014.01.001>. Acesso em: 18 mar. 2019.

ZHUANG, X. *et al.* Liquid hot water pretreatment of lignocellulosic biomass for bioethanol production accompanying with high valuable products. **Bioresource technology**, Essex, v. 199, p.68-75, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.051>. Acesso em: 10 set. 2019.

ZNIDARCIC, A.; COUTIER, D. O.; MARQUILLIE, M. A new algorithm for DNS simulations of cavitating flows using homogeneous mixture approach. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CAVITATION, 9., 2016, Lausanne. **Abstracts** [...]. Lausanne: Journal of physics conference series, 2016. 7p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283809666>. Acesso em: 08 set. 2019.

ZWART, P.J.; GERBER A.G.; BELAMRI, T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW, 5., 2004, Yokohama. **Abstracts** [...]. Yokohama: ICMF, 2004. 11p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/306205415>. Acesso em: 13 set. 2019.

WANG, S. *et al.* Studies on thermal effects of cavitation in LN₂ flow over a twisted hydrofoil based on large eddy simulation. **Cryogenics**, Guilford, v. 97, p.40-49, jan. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.11.007>. Acesso em: 14 out. 2019.

WANG, S. *et al.* Ultrasound assisted alkaline pretreatment to enhance enzymatic saccharification of grass clipping. **Energy conversion and management**, Oxford, v. 149, p.409-415, out. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.042>. Acesso em: 09 out. 2019.

WU, C.D. *et al.* Effects of operating parameters and additives on degradation of phenol in water by the combination of H₂O₂ and hydrodynamic cavitation. **Desalination and water treatment**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p.462-468, 7 out. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2013.846234>. Acesso em: 18 jun. 2019.