

# Quality function deployment applied to comparison biomass pre-treatment methods

**Abstract** - In the search for sustainable alternatives to meet the growing global demand for energy, the use of lignocellulosic biomass in biorefineries is proving to be an efficient solution for energy production with minimal environmental impact. Pretreatment of biomass is a crucial step in this process, which has a significant impact on the efficient conversion of biomass into high-value energy bioproducts. Given the variety of pretreatment methods available, the right choice is crucial for the success of a biorefinery. The aim of this study was to perform a detailed comparison between hydrodynamic cavitation and other pretreatment methods. The QFD (Quality Function Deployment) approach was used to identify and evaluate the parameters that should be prioritized in the development of new technologies. The analysis took into account factors such as energy efficiency, sustainability, scalability and environmental impact. In addition, the study compared the needs identified with the solutions and improvements proposed in the literature to confirm the relevance of these aspects to the industrial context. It was found that the two most important aspects that need to be improved for the hydrodynamic cavitation method to be considered for an industrial application are the energy requirements and the operating time. As already indicated, the effort required to improve these two aspects is greater than the others, accounting for 22.45% of the total effort required to improve this technology.

**Keywords** –lignocellulosic biomass; biorefinery; hydrodynamic cavitation; quality function deployment; biomass pretreatment.

## I. INTRODUÇÃO

Apesar dos grandes esforços globais no uso de recursos energéticos alternativos e sustentáveis com matérias primas mais limpas e renováveis em favor da preservação ambiental e da mitigação das emissões de gases de efeito estufa e nocivos a saúde humana, os combustíveis fósseis ainda se mantêm estabelecidos como a principal fonte energética global, com uma dominância superior à casa dos 80% de toda a necessidade mundial de combustíveis [1].

No âmbito de viabilizar soluções ecologicamente corretas para a demanda por energia, a utilização da biomassa como fonte energética tem ganho destaque com o desenvolvimento do conceito das biorrefinarias, unidades de geração energética que fazem o uso de rejeitos de biomassa como matéria prima para produzir bioproductos como os biocombustíveis e os bioquímicos, além da bioenergia. O conceito de biorrefinaria

tem ainda seu destaque amplificado em países cuja base econômica se dá pelo setor primário, com intensa atividade agrícola, como é o caso do Brasil e do Uruguai, devido a capacidade desses países em atuar em paralelo com esse setor, uma vez que se utilizam dos refugos como matéria prima, atrelando, portanto, um fim sustentável para toneladas de material que seriam antes descartados e gerando um retorno extremamente vantajoso [2][3].

A biomassa lignocelulósica é um material de baixo custo e abundante, constituindo-se no maior recurso renovável do mundo, compreendendo cerca de 50% de toda a biomassa disponível, mostrando-se desse modo, uma matéria prima com altíssimo potencial bioenergético sem competir com a agricultura de fins alimentícios [4][5][6].

Em relação à composição estrutural, a biomassa lignocelulósica é composta por três principais estruturas: a lignina, a celulose e a hemicelulose. Do ponto de vista da produção energética, os dois últimos são aqueles de maior interesse, uma vez que consistem na maior fonte de compostos orgânicos do material, seja através da obtenção da glicose, a partir da hidrólise da celulose ou de hexoses e pentoses, pela hidrólise da hemicelulose [7]. A lignina por sua vez, que é correspondente à segunda maior fração do material, consiste num composto fenólico responsável por estruturar a parede celular da planta, sendo um composto mais resistente quando comparado aos outros [8]. Assim, a remoção, ou ao menos a redução do teor de lignina do material, se mostra uma condição crucial para sua aplicação na produção de bioproductos, uma vez que, através de processos que impedem a ação da hidrólise, como a recalcitrância (formação de uma espécie de barreira física que impede o processo de hidrólise das fibras do material), acaba por inibir o potencial produtivo dessa fonte [9][10][11]. Nesse sentido, é de fundamental importância o emprego de um pré-tratamento, funcionando como uma etapa de quebra da biomassa, separando a fração de lignina das demais, reduzindo a recalcitrância e facilitando o acesso às enzimas na estrutura da celulose para posterior hidrólise e fermentação [12].

Existem diversos processos de pré-tratamento que podem ser aplicados em biomassas lignocelulósicas. Eles podem se diferenciar pelo seu método de ação, podendo ser físicos, químicos, biológicos ou ainda combinações desses e são escolhidos com base em três principais fatores: a composição da biomassa e as modificações que esse tratamento pode gerar

---

Este trabalho recebeu apoio em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES, código de financiamento 001.

K. S. Lemes, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, UNESP, Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, Portal das Colinas, Guaratinguetá SP, Brasil. (e-mail: [k.lemes@unesp.br](mailto:k.lemes@unesp.br)).

C.E. Tuna, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, UNESP, Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, Portal das Colinas, Guaratinguetá SP, Brasil. (e-mail: [celso.tuna@unesp.br](mailto:celso.tuna@unesp.br)).

N. P. Pérez, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, UNESP, Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, Portal das Colinas, Guaratinguetá SP, Brasil. (e-mail: [nestor.proenza@unesp.br](mailto:nestor.proenza@unesp.br)).

G. P. Vergara, Facultad de Ingenieria, Universidad de la Republica Uruguay UDELAR, Calle Julio Herrera y Reissig 565, (e-mail: [gabpena@fing.edu.uy](mailto:gabpena@fing.edu.uy)).

T.A. Bimestre, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, UNESP, Av. Ariberto Pereira da Cunha 333, Portal das Colinas, Guaratinguetá SP, Brasil. (e-mail: [thiago.bimestre@unesp.br](mailto:thiago.bimestre@unesp.br)).

na estrutura do material, o custo energético dispendido para a realização dele, bem como o impacto ambiental que este gera [13][14].

Assim, por meio do desdobramento da função qualidade (QFD), uma metodologia *lean* utilizada para a identificação de necessidades de mercado e principalmente, para alinhá-las ao desenvolvimento ou melhoria de um produto, foi adaptada de modo a permitir a comparação entre alguns métodos de pré-tratamento, trazendo enfoque especial à cavitação hidrodinâmica, considerada uma tecnologia promissora, sustentável e escalável [15][16].

A avaliação da cavitação hidrodinâmica e dos demais métodos se deu pela definição de duas necessidades básicas consideradas necessárias para a adoção de um tratamento em uma aplicação industrial: seu baixo impacto ambiental e sua possibilidade de ser replicado em larga escala. Para tanto, foram abordados cinco parâmetros iniciais e cada um dos métodos foi avaliado de acordo com seu desempenho em relação aos mesmos. A partir disso, a análise QFD possibilitou destacar quais dos parâmetros analisados devem ser levados em conta para o desenvolvimento de novas tecnologias de pré-tratamento. Os resultados obtidos atuam como uma validação dos resultados experimentais obtidos em uma série de pesquisas ao redor do mundo cujos resultados além de servirem como base, serão comentados ao longo deste trabalho.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### A. Pré-tratamento de biomassa

O processo de pré-tratamento se mostra um dos pontos chave da conversão de materiais lignocelulósicos em bioprodutos, sendo essencial para que ocorra posteriormente, uma hidrólise eficiente dessa biomassa, já que é através dessa etapa que são removidas as barreiras (físicas e químicas) que impedem o acesso ao substrato celulósico dela. Existem atualmente, diversos processos de pré-tratamento os quais podem ser aplicados na biomassa lignocelulósica. Eles podem se diferenciar pelo seu método de ação, podendo ser físicos, químicos, biológicos ou ainda combinações desses.

### B. Ácido

O processo de pré-tratamento ácido é um tratamento químico baseado na adição de ácidos à biomassa, podendo ser os mesmos diluídos ou concentrados. Em geral, são empregados nesse processo ácidos como o fosfórico, o clorídrico e o sulfúrico e sua ação promove o rompimento da estrutura lignocelulósica por meio da solubilização da hemicelulose [17].

A realização do tratamento com ácido diluído envolve a agitação da mistura ácido-biomassa a elevadas temperaturas (entre 130 °C e 210°C) pelo período de algumas horas, variando segundo as condições de execução e o tipo de biomassa tratada [18]. O tratamento em ácido concentrado por sua vez se mostra um método mais rápido, gerando resultados iguais ou ainda superiores aos obtidos com ácido diluído em questão de minutos e tendo ainda a vantagem de poder ser realizado sob temperaturas mais brandas, por volta dos 40 °C [19][20].

De modo geral, uma vez que atua somente na redução da hemicelulose do material, o pré-tratamento ácido se mostra

mais útil para casos em que a biomassa a ser tratada apresenta baixo teor de lignina, uma vez que não atua na remoção desta. Além disso, os custos envolvidos no processo de reutilização dos ácidos e bem como dos equipamentos necessários (os quais devem ser resistentes à corrosão) se mostram bastante altos, prejudicando sua aplicação em larga escala [20].

### C. Alcalino

Analogamente ao pré-tratamento ácido, que consiste no banho da biomassa em solução ácida, o pré-tratamento alcalino faz uso de soluções alcalinas (majoritariamente hidróxidos de cálcio, sódio, amônia e potássio) para realizar alterações na estrutura química do material.

Por meio do processo alcalino, ocorre não somente a solubilização da hemicelulose (ainda que em menores proporções do que no emprego de ácidos) mas também uma descristalização da estrutura lignocelulósica uma vez que, através de reações de neutralização que promovem a redução do teor de lignina da biomassa. Num geral, esse tipo de pré-tratamento possui um menor custo quando comparado ao ácido e pode ser aplicado em uma maior gama de materiais, funcionando inclusive, em conjunto com outros tratamentos físicos como a cavitação hidrodinâmica. Tem ainda como vantagem a baixa geração de inibidores como o 5-hidroximetilfurfural [21][22][23].

### D. Líquidos iônicos

A aplicação de líquidos iônicos no pré-tratamento de biomassa lignocelulósica se mostra uma alternativa bastante interessante uma vez que permite a extração seletiva de lignina posteriormente ao tratamento, uma vez que não gera alterações na estrutura química da biomassa. A diferença entre a solubilidade de lignina (altamente solúvel) e de celulose (baixíssima solubilidade) em líquidos iônicos é o que promove a separação de tais componentes, favorecendo o acesso à celulose sem que seja necessário um elevado consumo energético através de alterações de temperatura, por exemplo, uma vez que tal processo pode ser realizado a temperatura ambiente [24]. Como desvantagem do processo, têm-se que o custo desses solventes, se mostra bastante significativo, entretanto, o mesmo pode ser recuperado de forma mais simples do que ácidos e bases para que seja reaproveitado, uma vez que apresenta, em geral, baixa pressão de vapor [25].

### E. Explosão a vapor

Consistindo na exposição da biomassa lignocelulósica a um vapor de água saturado sob alta pressão e posterior descompressão brusca à temperatura ambiente, a técnica de explosão a vapor consiste num método de pré-tratamento físico bastante utilizado no processo de produção de biocombustíveis.

Neste processo, temos empregadas em um primeiro momento elevadas temperaturas e pressões de modo a gerar a penetração de moléculas de vapor de água na estrutura da biomassa. Com a súbita descompressão, caracterizada como um segundo momento do processo, ocorre a expansão e consecutiva explosão dessas moléculas de vapor, rompendo assim as ligações de lignina presentes na biomassa reduzindo seu grau de recalcitrância [26]. Ressalta-se ainda que tal processo demanda extrema atenção às suas condições de realização, tais como temperatura, pressão e tempo de

exposição ao vapor, uma vez que, quando realizado de maneira errada, em condições acima das ideais, não somente a lignina é degradada, como também ligações glicosídicas do material, dificultando sua posterior fermentação ou ainda, quando em condições abaixo das necessárias, não ocorre a completa degradação da lignina [27].

#### F. *Organosolv*

O pré-tratamento *organosolv*, envolve a atuação de solventes orgânicos na degradação da lignina e hidrólise da hemicelulose. São comumente empregados compostos como o etanol, o metanol, o etilenoglicol e a acetona, podendo ser usados puros ou diluídos em água [28]. Nessa técnica, de modo similar ao pré-tratamento com líquidos iônicos, temos a solubilização da lignina e de uma fração de hemicelulose no solvente orgânico ao passo que a celulose não se dilui. Assim, por meio da evaporação do solvente (que é posteriormente reciclado) e um processo de separação como a centrifugação ou a filtração, obtém-se um material sólido composto majoritariamente por celulose [29].

Assim como outros processos envolvendo reagentes químicos, temos o alto custo dos solventes como um ponto que inviabiliza a aplicação dessa técnica em larga escala, embora ainda apresente excelentes rendimentos e um baixíssimo impacto ambiental [30].

#### G. *Cavitação ultrassônica*

A cavitação ultrassônica se utiliza de ondas sonoras de alta frequência (na faixa de 20 a 100kHz) para gerar o fenômeno, seja por meio de uma sonda ou transdutor, variando estes em número e posição dependendo da intensidade desejada para o processo. A geração da cavitação por meio do ultrassom se mostra um método bastante efetivo no pré-tratamento de biomassa lignocelulósicas, uma vez que atua de modo a quebrar as ligações de hidrogênio presentes na estrutura molecular do material, reduzindo assim sua recalcitrância, favorecendo, portanto, a degradação da lignina que por sua vez gera uma melhora na digestibilidade dessa biomassa [31].

Seu principal ponto negativo, entretanto, consiste no elevado gasto energético que depende para tal, correspondendo a um consumo em mega joules por quilo quase quatro vezes maior que sua análoga hidrodinâmica [32].

#### H. *Cavitação Hidrodinâmica*

No processo de cavitação hidrodinâmica, a cavitação ocorre por meio da constrição mecânica do fluxo de um fluido pelo uso de equipamentos como placas de orifício e tubos de Venturi. Esse estrangulamento atua causando um aumento súbito da energia cinética e conseqüentemente, uma zona de elevada turbulência, onde ocorre o processo de formação, crescimento e colapso das bolhas de cavitação [33].

Com esse fenômeno, que pode ser controlado e dimensionado conforme a aplicação necessária (alterando a vida útil da bolha e seu tamanho máximo), gera-se uma condição extrema tanto de temperatura (que pode facilmente ultrapassar os 5000 K) quanto de pressão (1000-2000 atm) que favorece alterações violentas tanto na estrutura física da biomassa, por meio da pirólise de moléculas orgânicas, elevando sua porosidade; quanto de sua estrutura química, devido principalmente à ação de radicais oxidativos livres

bastante agressivos (como a hidroxila) que induzem o rompimento da matriz de lignina [34]. Devido a seu elevado nível de sucesso no pré-tratamento da biomassa lignocelulósica, a cavitação hidrodinâmica tem sido amplamente estudada no intuito de que se desenvolvam parâmetros ótimos, visando sua aplicação em escala comercial. Favoráveis a esse ponto tem-se a elevada taxa de remoção de lignina e hemicelulose (com uma média de 55 e 65% de remoção destes compostos respectivamente) e a viabilidade de combinação entre esse processo e outras opções de tratamento químico, maximizando seus resultados. Entretanto, assim como no caso da cavitação ultrassônica, o gasto energético mantém-se como a principal variável negativa do processo, sendo dispendida, segundo [35], uma média de 3,65 mega joules de energia por quilograma de biomassa tratada.

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

Apesar da vasta gama de tecnologias de pré-tratamento existente atualmente, inclusive com o desenvolvimento de novos e mais modernos métodos, ainda existem discordâncias quanto a aplicabilidade destes em escala industrial, de modo a torná-los uma realidade, de fato, para o mercado de bioprodutos. Aliando tal discussão à necessidade de desenvolvimento de alternativas ecológicas e sustentáveis de geração de energia, tornam se imprescindíveis estudos que realizem a comparação entre os métodos destacados atualmente pelas literaturas, buscando a parametrização de um modelo dito ideal.

Nesse sentido, este trabalho propõe a comparação das técnicas de pré-tratamento abordadas por meio da quantificação de parâmetros de interesse de cada um desses processos não somente em relação à eficiência de cada um como também de modo a avaliar sua aplicabilidade industrial e impacto no meio ambiente. A realização dessa comparação se dará por meio da adaptação de um método de análise de produtos bastante utilizado na engenharia, desenvolvido na década de 70, no Japão, denominado “*Quality Function Deployment*” ou simplesmente QFD.

O Desdobramento da Função Qualidade (QFD), segundo [15] consiste num processo sistemático capaz de traduzir requisitos de um determinado produto em características de qualidade, criando um mecanismo de vantagens competitivas utilizado no desenvolvimento ou aprimoramento do produto.

Em outras palavras, baseado nas necessidades e desejos do consumidor final, visa a quantificação de aspectos do produto relacionados a estas e o questionamento de se os mesmos se encontram de acordo ou desacordo com estes requisitos. Desse modo, o QFD possibilita o acúmulo de uma grande quantidade de informação de modo conciso, facilitando a análise do amplo espectro do problema.

A partir da chamada “*House of Quality*” (Figura 1) característica do método, torna-se possível compilar todas as informações necessárias para o desenvolvimento da melhoria.

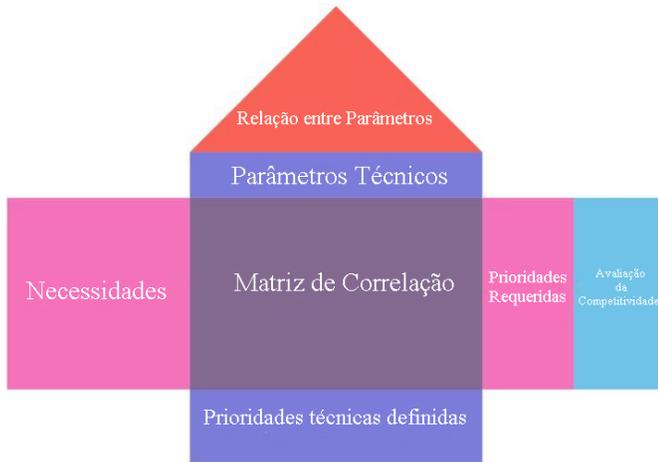


Fig. 1. Matriz expositiva do método QFD denominada “Casa da Qualidade” [15].

Com base no princípio de comparação abordado, serão testados dois aspectos essenciais para a adoção de um método pela indústria, seu impacto ambiental e sua aplicabilidade em larga escala (inseridos na “*House of quality*” como necessidades do método). Para isso, buscou-se uma análise de fatores que fossem comuns a ambos e que pudessem também ser quantificados quanto ao seu grau de relação a esse quesito. Os fatores adotados para a análise foram:

- *Resultar em alta recuperação de açúcares*

Foco principal da execução do pré-tratamento, a melhora na recuperação de açúcares é um fator extremamente relevante na análise da aplicabilidade em larga escala. Tratando mais especificamente da cavitação hidrodinâmica, objeto de maior foco do presente artigo, observa-se que sua junção a processos químicos, como o alcalino, gera resultados mais expressivos do que quando comparados aos resultados que seriam obtidos exclusivamente por meio do processo químico. [12] por exemplo, obteve uma hidrólise da biomassa cerca de 95% mais eficaz ao aliar a cavitação hidrodinâmica com o tratamento alcalino com NaOH.

- *Não produzir resíduos tóxicos*

A questão da geração de resíduos tóxicos por sua vez, consiste no principal fator vinculado ao impacto ambiental de um pré-tratamento. Métodos relacionados a reagentes ácidos, como o HCl, cuja aplicação é mencionada por [36] se mostram bastante agressivos ao meio ambiente visto que muitas vezes, o reaproveitamento desses reagentes é financeiramente inviável, fazendo com que acabem sendo descartados. Reagentes alcalis, por sua vez, correspondem a menores impactos ambientais quando descartados e ao trabalhar-se com líquidos iônicos, possui-se a vantagem do fácil reaproveitamento dos reagentes, dada sua baixa pressão de vapor. O processo *organosolv* por sua vez, por aplicar reagentes orgânicos, apresenta impacto quase nulo relacionado ao descarte de seus resíduos.

- *Ter baixa demanda energética*

A demanda energética corresponde a um fator vinculado tanto ao impacto ambiental quanto a escalabilidade do processo de pré-tratamento. Quanto menor a demanda energética gerada pelo processo, sem que haja perdas nos resultados de

recuperação de açúcares, mais industrialmente atrativo é o processo.

- *Gerar redução do tempo de operação*

De modo similar ao conceito da demanda energética, menores tempos de operação correspondem a processos mais atrativos.

- *Possuir baixo custo inicial e operacional*

O custo inicial bem como operacional para a execução de pré-tratamentos consiste também num fator de extremo interesse para a presente avaliação. De modo geral, a necessidade de altos investimentos corresponde a uma barreira para a aplicação de um método. Ao comparar neste quesito por exemplo, um tratamento alcalino e um tratamento ácido, nota-se uma vantagem da aplicação do álcali, isso porque, embora a realização se dê de modo similar, requerendo os mesmos equipamentos, o tratamento ácido dispense de um maior cuidado relacionado à resistência dos equipamentos à oxidação gerada pelo reagente em questão.

Com base na avaliação de bibliografias envolvendo os diversos tratamentos citados, levando em conta a grande diversidade de condições e tipos de biomassa avaliadas, correlacionou-se os parâmetros propostos a cada um dos métodos (Apêndice 1). Através das constatações indicadas no Apêndice 1, referente a classificação dos pré-tratamentos, elaborou-se a Tabela I, atribuindo a cada um deles uma nota de 1 a 3 em cada um dos parâmetros avaliados.

Definidas as notas de cada um dos métodos de pré-tratamento nos parâmetros considerados, o passo inicial foi a definição de pesos de cada um destes em relação às necessidades propostas: baixo impacto ambiental e possibilidade de aplicação em larga escala. Os pesos, desse modo, foram também atribuídos numa escala de 1 a 3, onde 1 representa uma influência baixa ou nula do fator em questão na necessidade avaliada e 3 um alto grau de influência, indicado pela Tabela II.

O segundo e último passo restante para a aplicação do desdobramento da função qualidade, consiste no ranqueamento dos métodos em relação a cada um dos cinco parâmetros propostos. Tal processo, foi feito por meio do cálculo do somatório da nota atribuída a cada um dos métodos multiplicado pelo peso atribuído aos parâmetros, repetindo a metodologia para ambos os aspectos analisados.

De modo a transportar tais informações ao QFD, adotou-se no campo das prioridades requeridas, uma nota de 1 a 5, sendo atribuído 5 àqueles métodos que, segundo o ranqueamento, melhor correspondem às necessidades propostas e 1 àqueles que não se adequam a elas, conforme a Tabela III.

Após isso, todas as informações apresentadas foram compiladas na casa da qualidade.

Inseridos os valores iniciais, o próximo passo foi o preenchimento da análise de competitividade entre os métodos avaliados. Para tanto, o método propõe a utilização de algumas variáveis:

- *Grau de importância (GI)*

O grau de importância corresponde a um indicador utilizado para demonstrar quão importante para o consumidor final é cada uma das necessidades. No caso da presente aplicação, quão importantes são o impacto ambiental e a aplicabilidade em larga escala para a aplicação industrial do pré-tratamento.

TABELA I  
 ATRIBUIÇÃO DE NOTAS AOS PARÂMETROS AVALIADOS NO PRÉ-TRATAMENTO

Método	Resultar em alta recuperação de açúcares	Não produção de resíduos tóxicos	Ter baixa demanda energética	Gerar redução do tempo de operação	Possuir baixo custo inicial e operacional
Ácido	3	1	2	3	2
Alcalino	3	2	2	2	3
Líquido Iônico	3	3	2	2	2
Explosão a Vapor	2	2	1	3	1
Cavitação Hidrodinâmica	2	2	2	3	1
Cavitação Ultrafônica	2	2	1	3	1
Organosolv	3	3	3	1	2

TABELA II  
 PESO ATRIBUÍDO AOS PARÂMETROS

Critério	Resultar em alta recuperação de açúcares	Não produção de resíduos tóxicos	Ter baixa demanda energética	Gerar redução do tempo de operação	Possuir baixo custo inicial e operacional
Impacto Ambiental	1	3	2	2	1
Aplicabilidade em larga escala	3	1	3	3	3

TABELA III  
 RANQUEAMENTO DOS PRÉ-TRATAMENTOS

Método	Impacto		Escalabilidade	
	Posição	Nota	Posição	Nota
Ácido	4º	2	2º	4
Alcalino	2º	4	1º	5
Líquidos Iônicos	1º	5	3º	3
Explosão a Vapor	3º	3	5º	1
Cavitação Hidrodinâmica	2º	4	4º	2
Cavitação Ultrassônica	3º	3	5º	1
Organosolv	1º	5	3º	3

Tal indicador, contudo, varia numa escala de 1 a 5 baseado na avaliação própria do consumidor. Buscando, portanto, uma análise equilibrada das necessidades, adotou-se uma condição de igual importância tanto para o impacto ambiental quanto para a reprodutibilidade em larga escala.

- *Qualidade Projetada (QP)*

Após a definição do grau de importância, parte-se para a determinação da qualidade projetada (QP) dos aspectos, isto é, com base na classificação do método analisado (cavitação hidrodinâmica) no ranqueamento feito em relação aos demais, estima-se qual a necessidade de gerar melhorias naquele aspecto a partir da comparação dele com as notas apresentadas pelos demais métodos. O valor adotado de QP, segundo o

método QFD deve ser novamente um valor inteiro entre 1 e 5 estipulados com base na análise das grandezas mencionadas.

Uma vez que a cavitação hidrodinâmica apresentou uma melhor posição quanto à necessidade de gerar baixo impacto ambiental quando comparada à sua posição na necessidade de aplicabilidade em larga escala, foi definido um maior módulo de qualidade projetada para esta segunda necessidade, pois ainda que seja preciso melhorar em relação da segunda necessidade, é a segunda aquela que demanda maior atenção. Foram adotados nesse sentido, valores iguais a 3 e 5 para impacto ambiental e escalabilidade respectivamente.

• *Índice de Melhoria (IM)*

Determinada a QP, calcula-se na sequência o índice de melhoria do aspecto, uma variável dada pela divisão da qualidade projetada pela nota correspondente à classificação do 1,5 – Para argumentos especiais, isto é, aspectos de suma importância na decisão entre os métodos disponíveis.

Uma vez que ambas as necessidades avaliadas para a análise são, como já definido, de importância crucial na escolha do método, adotou-se um AV igual a 1,5 para ambas.

• *Peso da Qualidade Exigida (QE)*

Definidas todas as variáveis mencionadas, parte-se para o cálculo do peso da qualidade exigida do aspecto, que corresponde a um índice percentual que indica a necessidade

método analisado, conforme a equação (1), onde n corresponde à nota atribuída à cavitação hidrodinâmica em razão do ranqueamento:

$$IM = \frac{QP}{n} \tag{1}$$

• *Argumento de Venda (AV)*

O argumento de venda (AV), corresponde à importância daquele aspecto para que se escolha um ou outro método, por exemplo, “quão relevante é o impacto ambiental na escolha do método de pré-tratamento a ser adotado?”

Para ele, são estipulados três valores básicos:

1 – Para argumentos óbvios, isto é, aspectos que não se mostram um diferencial relevante na escolha do método;

1,2 – Para argumentos comuns, ou seja, aspectos que tem um pequeno peso na escolha, mas não são determinantes nela;

real de desenvolvimento em cada um dos aspectos avaliados para que se atinjam as expectativas do projeto. Assim a equação (2) fica:

$$QE = GI \times IM \times AV \tag{2}$$

Deste modo, a “House of Quality” da presente análise QFD toma corpo, podendo ser apresentada como na Tabela IV:

TABELA IV  
 CASA DA QUALIDADE

Qualidade Exigida	Recuperação de Açúcares	Resíduos Tóxicos	Demanda Energética	Tempo de Operação	Custo Vinculado	GI	Ácido	Alcalino	Líquido Iônico	Explosão a Vapor	Cavitação Hidrodinâmica	Cavitação Ultrassônica	Organosolv	QP	IM	AV	Peso Absoluto QE	Peso Relativo QE
Impacto Ambiental	1	9	3	3	1	5	2	4	5	3	4	3	5	3	0,75	1,5	5,625	23,08%
Aplicabilidade em Larga Escala	9	3	9	9	9	5	4	5	3	1	2	1	3	5	2,50	1,5	18,75	76,92%
<b>Peso Absoluto da Característica</b>																		
<b>Peso Relativo da Característica</b>																		
Ácido	3	1	2	3	2													
Alcalino	3	2	2	2	3													
Líquido Iônico	3	3	2	2	2													
Explosão a Vapor	2	2	1	3	1													
Cavitação Hidrodinâmica	2	2	2	3	1													
Cavitação Ultrassônica	2	2	1	3	1													
Organosolv	3	3	3	1	2													

Legenda	
GI	Grau de Importância
QP	Qualidade Projetada
IM	Índice de Melhoria
AV	Argumento de Venda
QE	Qualidade Exigida

Vale ressaltar que no presente trabalho, a relação entre os parâmetros (o “telhado” da casa da qualidade) não foi o objetivo de foco principal, sendo, portanto, omitida na Tabela IV. Determinado o peso da qualidade exigida, o método pode ser

indicador é dado pelo somatório da multiplicação do peso atribuído a cada um dos parâmetros influentes pelo peso relativo da qualidade exigida para cada aspecto analisado, conforme equação (3):

$$\sum p * QE \tag{3}$$

finalizado com a determinação do peso da característica avaliada, ou seja, com base na qualidade exigida de cada um dos aspectos, qual deve ser o esforço de melhora em cada um dos cinco parâmetros avaliados. Com ele, torna-se possível quantificar quais parâmetros devem receber maior foco no desenvolvimento de melhorias nas necessidades propostas. Tal

Onde: p representa o peso atribuído ao aspecto na avaliação das necessidades e QE o valor percentual de peso da qualidade exigida.

#### IV. RESULTADOS

Aplicados os valores calculados, obteve-se a casa da qualidade por completo conforme indicada na Tabela V. Nela, observou-se que os dois principais aspectos cujo aprimoramento deve ser intensificado para que o método da cavitação hidrodinâmica seja viabilizado para aplicação industrial são a demanda energética e o tempo de operação.

Como indicado, o esforço em melhorias necessário para ambos se sobressai em comparação aos demais, obtendo um valor de 22,45% de todo o esforço que deve ser feito no aprimoramento dessa tecnologia.

Tais esforços por melhorias no processo de cavitação hidrodinâmica são abordados pelas mais diversas literaturas, principalmente quanto às melhoras que podem ser obtidas por

meio de uma escolha adequada da combinação biomassa/tratamento a ser utilizada. [12], em seu artigo, por exemplo, ao aplicar um método de cavitação hidrodinâmica em meio alcalino (solução de NaOH) em condições similares a biomassas de bagaço de cana de açúcar, junco e palha de milho, observou resultados de eficiência divergentes entre cada um dos ensaios, demonstrando assim, que a adoção do pré-tratamento a ser utilizado deve se basear nas características específicas da biomassa, bem como o bioproduto o qual se pretende produzir. de cada conjunto tratamento/biomassa, bem como as diferentes condições e confiabilidades apresentadas por cada um deles não permite a observação de um padrão comparativo entre o potencial desenvolvido por diferentes processos.

TABELA V  
 CASA DA QUALIDADE COM OS VALORES CALCULADOS

<b>Critério</b>	<b>Recuperação de açúcares</b>	<b>Resíduos Tóxicos</b>	<b>Demanda Energética</b>	<b>Tempo de operação</b>	<b>Custo Vinculado</b>
<b>Impacto Ambiental</b>	1	9	3	3	1
<b>Aplicabilidade em Larga Escala</b>	9	3	9	9	9
<b>Peso Absoluto da Característica</b>	7,15	4,38	7,62	7,62	7,15
<b>Peso Relativo da Característica</b>	21,09%	12,93%	22,45%	22,45%	21,09%

[31] também demonstra tal efeito por meio da comparação entre os trabalhos de [37] e [38]. Apesar de ambos realizarem a cavitação hidrodinâmica sob a ação de um mesmo reagente (a lacase, uma enzima oxidante amplamente aplicada em tratamentos de biomassa) e no mesmo tipo de biomassa, a palha de milho, os resultados de [38] se mostraram mais relevantes, uma vez que geraram uma porcentagem de 64,1% de lignina contra 47,7% obtidos por [37] com um mesmo tempo de tratamento (60 minutos). A principal variação entre os tratamentos em questão foi a temperatura de realização.

[33] ao realizar a comparação entre os estudos de [12] e [39], demonstra que o método de cavitação se mostra também um fator que pode gerar uma melhora nas condições de tempo e consumo energético do pré-tratamento. Ao passo que o tratamento aplicado por [12], utilizando uma placa de orifício como instrumento de cavitação, teve duração aproximada de 45 minutos e gerou uma hidrólise de 97,2% da celulose em 48 horas, [39] obteve com um maior tempo de tratamento (120 minutos), uma porcentagem bastante inferior, de 46% após 72 horas, ao realizar, dentre outras variações, o tratamento utilizando um tubo de Venturi como instrumento de cavitação. Desse modo, pode-se inferir que não há uma resposta única e absoluta em relação a qual o melhor pré-tratamento dentre os existentes. Uma vez que a junção de características exclusivas de cada conjunto tratamento/biomassa, bem como as diferentes condições e confiabilidades apresentadas por cada um deles não permite a observação de um padrão comparativo entre o potencial desenvolvido por diferentes processos.

#### V. CONCLUSÕES

O presente trabalho, portanto, conclui na validação, através de uma metodologia simples de análise de produto, da

necessidade de estudos que objetivam o desenvolvimento de métodos alternativos de cavitação hidrodinâmica que resultem numa redução do tempo e da demanda energética necessários, demonstrando que o desenvolvimento de novas tecnologias que gerem tais mudanças são um fator essencial seja na viabilização do método da cavitação hidrodinâmica para aplicação em escala industrial.

Neste sentido, entende-se que trabalhos futuros devem focar seus esforços em otimizar não só os parâmetros do processo de cavitação hidrodinâmica como também os mecanismos de realização destes, a análise comparativa da realização do tratamento por cavitação, sob condições similares, porém diferentes instrumentos de cavitação, se mostra um passo interessante para a obtenção de um processo otimizado, o qual possa funcionar como uma solução ambientalmente amigável para a aplicação industrial em larga escala visando também a redução de custos e a melhora dos resultados obtidos.

#### VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a contribuição da Facultad de Ingeniería - Universidad de la República Uruguay UDELAR e a Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá UNESP pelo trabalho conjunto, fruto de um acordo de cooperação da AUGM – Asociación de Universidades Grupo Montevideo.

VII. APÊNDICE

	Resultar em alta recuperação de açúcares	Não produção de resíduos tóxicos	Ter baixa demanda energética	Gerar redução do tempo de operação	Possuir baixo custo inicial e operacional	Referências
<b>Ácido</b>	Cera o fracionamento da hemicelulose e lignina, facilitando a digestibilidade, contudo, pode gerar degradação de açúcares. (Os estudos avaliados apresentaram recuperações na faixa de 75 a 90%)	Os resíduos são tóxicos, de difícil e custosa recuperação	O consumo de energia se limita à agitação e alteração de condições de pressão e temperatura quando aplicados. A consulta às literaturas permitiu a obtenção de uma valores de até 500Wh/kg de biomassa tratada	Acetna significativamente o processo de obtenção de bioproductos uma vez que melhora a digestibilidade da biomassa. (O tipo e concentração do reagente utilizado influencia diretamente no tempo de tratamento, podendo variar de poucos minutos até cerca de 6 horas)	Elevado custo relacionado à necessidade de equipamentos resistentes à corrosão e reutilização dos ácidos.	Chen, 2012; Jonsson, 2016; Didderen, 2010; Badiei 2013; Ogier 1999
<b>Alcalino</b>	Induz o fracionamento da lignina e a hemicelulose, gerando baixo índice de inibidores. (os valores médios observados foram em torno de 80%)	Resíduos de menor impacto ambiental quando comparados ao ácido.	Similar às condições de hidrólise ácida	Em geral, obteve menor influência no tempo de operação que o tratamento ácido. (O processo alcalino pode variar de 30 minutos até vários dias, baseado nas condições implementadas)	Baixo custo operacional, vinculado quase que exclusivamente à aquisição do álcali.	Park, 2012; Hlares, 2016; Bimestre, 2020; Maryama 2014; Prado, 2022
<b>Líquido Iônico</b>	Remove frações de lignina e hemicelulose, pode reduzir a cristalinidade da celulose mas também gerar a degradação de açúcares.	Resíduos com altíssima taxa de reaproveitamento, dispensando seu descarte no meio ambiente.	Uma vez que pode ser realizado, em alguns casos, à condições ambientes, tem sua demanda energética reduzida.	Promove a segregação entre lignina e celulose, facilitando a geração de bioproductos.	Elevado custo mas que pode ser reduzido significativamente com o reaproveitamento, o qual é mais simples que de ácidos por exemplo.	Badiei, 2013; Hassan, 2018; Sobrinho Chermês 2013; Ferreira, 2018
<b>Explosão a Vapor</b>	Gera baixas taxas de recuperação, entre 30 e 50%. Libera também altas concentrações de produtos de degradação da lignina e de açúcares, que são inibidores da etapa de fermentação.	O pré-tratamento por explosão a vapor tem como vantagem o baixo impacto ambiental, devido ao uso de baixas concentrações de compostos químicos, comparado aos processos de hidrólise ácida e alcalina	Elevada demanda energética para que se atinjam as condições de realização.	A redução do tamanho das partículas facilita o acesso à celulose. Aliado a um processo químico, observa-se uma ampliação nesse efeito, reduzindo ainda mais o tempo de operação necessário. É um processo relativamente rápido, com tempo de operação na faixa de 3 a 20 minutos.	Elevados custos operacionais com o controle das condições de processamento.	Didderen, 2010; Nakaema, 2021; Hassan 2018; Santiago 2017; Hartmann, 2017; Sobrinho Chermês, 2013
<b>Cavitação Hidrodinâmica</b>	Quando sozinha, atua somente na redução da geometria das partículas de biomassa. Gerando taxas de recuperação de no máximo 55%	Como é normalmente vinculado a tratamentos químicos, tem rejeitos correspondentes ao método em questão.	Consumo elevado, porém inferior quando comparado à cavitação ultrassônica e processos que dependem de agitação da mistura. A consulta às literaturas permitiu a obtenção de uma média próxima de 180Wh/kg de biomassa tratada	Assim como na exposição a vapor, a redução do tamanho das partículas facilita o acesso à celulose. Aliado a um processo químico, observa-se uma ampliação nesse efeito, reduzindo ainda mais o tempo de operação necessário.	Custo inicial para a confecção do reator é elevado.	Bimestre, 2020; Prado 2022; Sun 2021; Hlares, 2016; Scavone 2015; Ji 2006
<b>Cavitação Ultrassônica</b>	Quando sozinha, atua somente na redução da geometria das partículas de biomassa. Apresentando taxas de recuperação similares à cavitação hidrodinâmica	Como é normalmente vinculado a tratamentos químicos, tem rejeitos correspondentes ao método em questão.	A operação de equipamentos de ultrassom requer elevado consumo de energia, a consulta às literaturas permitiu a obtenção de uma média de 250Wh/kg de biomassa tratada	Atua de modo semelhante à cavitação hidrodinâmica, reduzindo o tamanho das partículas de biomassa, o que facilita o acesso à celulose. A realização aliada a um tratamento químico funciona de modo a ampliar tal efeito, reduzindo ainda mais o tempo de operação necessário.	Altíssimo custo inicial e operacional.	Zelinski, 2019; Nakaema, 2021; Silva 2019; Hassan 2018; Hlares 2016
<b>Organosolv</b>	Cera a degradação de lignina e hemicelulose. (A faixa de rendimento observada variou significativamente dentre os artigos avaliados, numa faixa de 54 a 86% de recuperação)	Baixíssimo impacto ambiental.	Baixa demanda energética, podendo em alguns casos, inclusive, ser realizado à condições ambientes.	O tempo de pré-tratamento é extremamente longo, a ponto de inviabilizar sua aplicação em larga escala. Nas aplicações observadas, o tempo efetivo mínimo foi de 60 minutos, podendo chegar até alguns dias	Custo operacional vinculado à obtenção dos compostos orgânicos.	Ogier, 1999; Silva 2017; Borges, 2018; Cardoso 2020; Rodrigues & Gambetta, 2017

## VIII. REFERÊNCIAS

- [1] REN21. Renewable 2022 Global Status Report: record growth in renewables, but world missed historic chance for a clean energy recovery. 2022. Disponível em: <https://www.ren21.net/gsr-2022/>
- [2] Romeiro, A. R. (2012). Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica. *Estudos Avançados*, 26(74), 65–92. <https://doi.org/10.1590/s0103-40142012000100006>
- [3] Prado, C. A., Cunha, M. L. S., Arruda, G. L., Cruz-Santos, M. M., Antunes, F. A. F., V.P. Shibukawa, R. Terán-Hilares, S.S. da Silva, & Santos, J. C. (2024). Hydrodynamic cavitation-assisted acid pretreatment and fed-batch simultaneous saccharification and co-fermentation for ethanol production from sugarcane bagasse using immobilized cells of *Scheffersomyces parashehatae*. *Bioresource Technology*, 394, 130234–130234. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130234>
- [4] Xia, G., You, W., Manickam, S., Joon Yong Yoon, Xuan, X., & Sun, X. (2024). Numerical simulation of cavitation-vortex interaction mechanism in an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106849>
- [5] Islam, M. S., & Ranade, V. V. (2024). Enhancing BMP and digestibility of DAF sludge via hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 198, 109733. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2024.109733>
- [6] Manoharan, D., Radhakrishnan, M., & Tiwari, B. K. (2024). Cavitation technologies for extraction of high value ingredients from renewable biomass. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117682–117682. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117682>
- [7] Antunes, F. A. F., Prado, C. A., Fernandez, M. J. A., R.F. Grigório, Silva, A. S., Mera, A. E., M.J. Castro-Alonso, Rocha, T. M., S. Sanchez-Muñoz, Santos, J. C., & S.S. da Silva. (2024). Fed-batch fermentation of sugarcane biomass applied for biomolecules production in fluidized bed reactor. *Bioresource Technology Reports*, 101851–101851. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101851>
- [8] Hamidi, R., Damizia, M., Paolo De Filippis, Patrizi, D., Verdone, N., Vilaridi, G., & Benedetta de Caprariis. (2023). Recent developments and future outlooks of hydrodynamic cavitation as an intensification technology for renewable biofuels production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110819. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110819>
- [9] Zhu, X., Healy, L., Rahel Suchintita Das, M.L. Bhavya, Shanmugapriya Karuppusamy, Sun, D.-W., Colm O'Donnell, & Tiwari, B. K. (2023). Novel biorefinery process for extraction of laminarin, alginate and protein from brown seaweed using hydrodynamic cavitation. *Algal Research*, 74, 103243–103243. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103243>
- [10] Arya, S. S., More, P. R., Ladole, M. R., Pegu, K., & Pandit, A. B. (2023). Non-thermal, energy efficient hydrodynamic cavitation for food processing, process intensification and extraction of natural bioactives: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 98, 106504. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106504>
- [11] Terán Hilares, R., Kamoëi, D. V., Ahmed, M. A., da Silva, S. S., Han, J.-I., & Santos, J. C. dos. (2018). A new approach for bioethanol production from sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation assisted pretreatment and column reactors. *Ultrasonics Sonochemistry*, 43, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.01.016>
- [12] Terán Hilares, R., Santos, Muhammad Ajaz Ahmed, Seok Hwan Jeon, Silva, & Han, J.-I. (2016). Hydrodynamic cavitation-assisted alkaline pretreatment as a new approach for sugarcane bagasse biorefineries. *Bioresource Technology*, 214, 609–614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.004>
- [13] Terán Hilares, R., Ienny, J. V., Marcelino, P. F., Ahmed, M. A., Antunes, F. A. F., da Silva, S. S., & Santos, J. C. dos. (2017). Ethanol production in a simultaneous saccharification and fermentation process with interconnected reactors employing hydrodynamic cavitation-pretreated sugarcane bagasse as raw material. *Bioresource Technology*, 243, 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.159>
- [14] Terán Hilares, R., Ramos, L., Silva, Dragone, G., Mussatto, S. I., & Santos. (2017). Hydrodynamic cavitation as a strategy to enhance the efficiency of lignocellulosic biomass pretreatment. *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(4), 483–493. <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1369932>
- [15] Chan, L.-K., & Wu, M.-L. (2002). Quality function deployment: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 143(3), 463–497. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(02\)00178-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(02)00178-9)
- [16] Yazdani, M., Kahraman, C., Zarate, P., & Onar, S. C. (2019). A fuzzy multi attribute decision framework with integration of QFD and grey relational analysis. *Expert Systems with Applications*, 115, 474–485. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.017>
- [17] K. Dauplain, E. Trably, G. Santa-Catalina, & Carrere, H. (2024). Biomass acid pretreatment impacts on metabolic routes and bacterial composition of dark fermentation process. *Waste Management*, 181, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.03.035>
- [18] Liu, B., Liu, L., Deng, B., Huang, C., Zhu, J., Liu, L., He, X., Wei, Y., Qin, C., Liang, C., Liu, S., & Yao, S. (2022). Application and prospect of organic acid pretreatment in lignocellulosic biomass separation: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 222, 1400–1413. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.270>
- [19] Li, J., Liu, B., Liu, L., Luo, Y., Zeng, F., Qin, C., Liang, C., Huang, C., & Yao, S. (2023). Pretreatment of poplar with eco-friendly levulinic acid to achieve efficient utilization of biomass. *Bioresource Technology*, 376, 128855–128855. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128855>
- [20] Tan, L., Liu, Z., Zhang, T., Wang, Z., & Liu, T. (2020). Enhanced enzymatic digestibility of poplar wood by quick hydrothermal treatment. *Bioresource Technology*, 302, 122795–122795. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122795>
- [21] Niju, S., & Swathika, M. (2019). Delignification of sugarcane bagasse using pretreatment strategies for bioethanol production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101263. <https://doi.org/10.1016/j.cbab.2019.101263>
- [22] Rabelo, S. C., Amezquita Fonseca, N. A., Andrade, R. R., Maciel Filho, R., & Costa, A. C. (2011). Ethanol production from enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse pretreated with lime and alkaline hydrogen peroxide. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2600–2607. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.042>
- [23] Akanksha, K., Sukumaran, R. K., Pandey, A., Rao, S. S., & Binod, P. (2016). Material balance studies for the conversion of sorghum stover to bioethanol. *Biomass and Bioenergy*, 85, 48–52. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.027>
- [24] John, A. J., & Ethiraj Selvarajan. (2024). Ionic liquid-assisted pretreatment of lignocellulosic biomass using purified *Streptomyces MS2A* cellulase for bioethanol production. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132149–132149. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132149>
- [25] Achinivu, E. C., Blankenship, B. W., Nawa Raj Baral, Choudhary, H., Ramu Kakumanu, Mohan, M., Edward E.K. Baidoo, Scown, C. D., George, A., Simmons, B. A., & Gladden, J. (2024). Biomass pretreatment with distillable ionic liquids for an effective recycling and recovery approach. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147824–147824. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2023.147824>
- [26] Achinivu, E. C., Blankenship, B. W., Nawa Raj Baral, Choudhary, H., Ramu Kakumanu, Mohan, M., Edward E.K. Baidoo, Scown, C. D., George, A., Simmons, B. A., & Gladden, J. (2024). Biomass pretreatment with distillable ionic liquids for an effective recycling and recovery approach. *Chemical Engineering Journal*, 479, 147824–147824. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2023.147824>
- [27] Hoang, A. T., Nguyen, X. P., Duong, X. Q., Ağbulut, Ü., Len, C., Nguyen, P. Q. P., Kchaou, M., & Chen, W.-H. (2023). Steam explosion as sustainable biomass pretreatment technique for biofuel production: Characteristics and challenges. *Bioresource Technology*, 385, 129398. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129398>
- [28] Wu, K., Zhenting Zha, Yang, K., Wu, H., Chu, C., Li, M., Luo, B., Wang, S., & Zhang, H. (2024). Thermal behavior and production distributions of organosolv-phase oxidization pretreatment of biomass coupled with fast pyrolysis. *Energy*, 291, 130359–130359. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130359>
- [29] Sarkar, D., Santiago, I. J., & Vermaas, J. V. (2023). Atomistic Origins of Biomass Recalcitrance in Organosolv Pretreatment. *Chemical Engineering Science*, 118587. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118587>
- [30] Joy, S. P., & Krishnan, C. (2022). Modified organosolv pretreatment for improved cellulosic ethanol production from sorghum biomass. *Industrial Crops and Products*, 177, 114409. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114409>
- [31] Sun, X., Liu, S., Zhang, X., Tao, Y., Boczkaj, G., Yoon, J. Y., & Xuan, X. (2022). Recent advances in hydrodynamic cavitation-based pretreatments of lignocellulosic biomass for valorization. *Bioresource Technology*, 345, 126251. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126251>

- [32] Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 262, 310–318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>
- [33] Bimestre, T. A., Júnior, J. A. M., Botura, C. A., Canettieri, E., & Tuna, C. E. (2020). Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment. *Bioresource Technology*, 311, 123540. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123540>
- [34] Bimestre, T. A., Júnior, J. A. M., Canettieri, E. V., & Tuna, C. E. (2022). Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>
- [35] Sergio Luis Yupanqui-Mendoza, Carina Aline Prado, Cesar, & Arantes, V. (2023). Hydrodynamic cavitation as a promising pretreatment technology to enhance the efficiency of cellulose nanocrystal production via enzymatic hydrolysis. *Chemical Engineering Journal*, 472, 144821–144821. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144821>
- [36] Sun, X., Xia, G., You, W., Jia, X., Manickam, S., Tao, Y., Zhao, S., Joon Yong Yoon, & Xuan, X. (2023). Effect of the arrangement of cavitation generation unit on the performance of an advanced rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 99, 106544–106544. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106544>
- [37] Ganesan, M., Mathivani Vinayakamoorthy, R., Thankappan, S., Muniraj, I., & Uthandi, S. (2020). Thermotolerant glycosyl hydrolases-producing *Bacillus aerius* CMCP51 and its saccharification efficiency on HCR-laccase (LccH)-pretreated corncob biomass. *Biotechnology for Biofuels*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01764-2>
- [38] Thangavelu, K., Desikan, R., Taran, O. P., & Uthandi, S. (2018). Delignification of corncob via combined hydrodynamic cavitation and enzymatic pretreatment: process optimization by response surface methodology. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1204-y>
- [39] Madison, M. J., Coward-Kelly, G., Liang, C., Karim, M. N., Falls, M., & Holtzapple, M. T. (2017). Mechanical pretreatment of biomass – Part I: Acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biomass and Bioenergy*, 98, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.007>

## IX. BIOGRAFIAS



**Kauan Santos Lemes**, engenheiro mecânico, formado pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), campus de Guaratinguetá. Atualmente atua na indústria, área de qualidade e é membro do IEEE Student Branch - UNESP Guaratinguetá, atuando em projetos voltados ao bem-estar social, e também membro da IEEE Computer Society - UNESP de Guaratinguetá, atuando em projetos de programação, principalmente em linguagens como C, Java e Python.



**Celso Eduardo Tuna**, possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho na área de Transmissão e Conversão de Energia. Atualmente é Professor titular da Universidade Estadual Paulista - Júlio de Mesquita Filho (UNESP) Campus de Guaratinguetá.



**Nestor Proenza Pérez**, Engenheiro mecânico, nascido em 24 de maio de 1979 na província de Camagüey, Cuba. Mestre em Eficiência Energética e doutor na área de Transmissão e Conversão de Energia. Membro do Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE) e do Laboratório de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN) da UNESP. Atualmente é professor assistente no Departamento de

Química e Energia da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá UNESP. As suas áreas de investigação suas áreas de pesquisa incluem gaseificação, sistemas de leito fluidizado, biomassa biomassa e bioenergia, transferência de calor e massa, e mecânica dos fluidos.



**Gabriel Pena Vergara**, possui graduação em Engenharia Industrial Mecânica pela Universidad de la República (Uruguai), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas e doutorado em Engenharia da Energia pela Universidad de la República. Atualmente é Professor Adjunto na Faculdade de Engenharia da Universidad de la República.



**Thiago Averaldo Bimestre**, nascido em Guaratinguetá, estado de São Paulo, BR, em 12 de dezembro de 1986. Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica na área de transmissão e conversão de energia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Atualmente é professor assistente do departamento de química e energia da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá UNESP com pesquisas na área de conversão de biomassa, transmissão de calor e termodinâmica.