

---

**Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani**

Trabalho de Graduação

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”**

**FACULDADE NILO DE STÉFANI DE JABOTICABAL - SP (Fatec-JB)**

**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS**

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA**

**KAREN CRISTINA ROCHA DE OLIVEIRA SILVA**

**PROFA ORIENTADORA: DRA. ROSE MARIA DUDA**

**JABOTICABAL, S.P.**

**2022**

**KAREN CRISTINA ROCHA DE OLIVEIRA SILVA**

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA**

Trabalho de graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda

**JABOTICABAL, S.P.**

**2022**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Silva, Karen C. R. de Oliveira

Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia. / Karen Cristina Rocha de Oliveira Silva. — Jaboticabal: Fatec Nilo de Stéfani, 2022.  
xvp.

Orientadora: Rose Maria Duda

Trabalho (graduação) – Apresentado ao Curso de Tecnologia em Biocombustíveis, Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani - Jaboticabal, 2022.

1. Bio-hidrogênio. 2. Bioenergia. 3 Resíduo. I. Duda, R. M. II. Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia.

**KAREN CRISTINA ROCHA DE OLIVEIRA SILVA**

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA**

Trabalho de Graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis.

**Orientadora: Profa. Dra. Rose Maria Duda**

**Data da apresentação e aprovação: 23/11/2022**

**MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA**

**Presidente e Orientador: Rose Maria Duda**

**Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)**

**Mariana Carina Frigeri Salaro**

**Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)**

**Camila Carla Guimarães**

**Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)**

**Local:** Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)

Jaboticabal – SP – Brasil

## PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA FERMENTAÇÃO ANAERÓBIA

Karen Cristina Rocha de Oliveira Silva<sup>I</sup>  
Rose Maria Duda<sup>II</sup>

### RESUMO

Com o aumento do consumo de energia, aliado ao esgotamento das fontes fósseis e seus problemas ambientais, a procura por fontes de energia renováveis tem aumentado rapidamente, levando ao desenvolvimento e exploração de novas tecnologias. Desenvolver e estudar fontes alternativas de energia, menos poluentes que as atuais, tem sido o grande desafio. Então surge uma alternativa bastante atraente, a produção de hidrogênio. Uma grande motivação é que a combustão do hidrogênio com o oxigênio produz somente vapor d'água. Porém, a matéria prima utilizada deve ser considerada ao se analisar os ganhos ambientais efetivos, já que podem ser utilizadas tanto fontes renováveis quanto não renováveis. Dentre os sistemas biológicos para produção de hidrogênio, a fermentação anaeróbia tem se destacado, em virtude principalmente à maior produção de hidrogênio, quando comparada aos outros processos biológicos e a possibilidade de utilização de diferentes materiais residuais como substrato. A matéria orgânica presente nas águas residuárias representa uma matéria prima de baixo custo para integrar o processo de digestão anaeróbia e gerar fontes de energia alternativas, como o hidrogênio.

**Palavras-chave:** Hidrogênio. Biocombustível. Bio-hidrogênio. Bioenergia. Resíduo.

### ABSTRACT

With the increase in energy consumption, combined with the depletion of fossil sources and their environmental problems, the demand for renewable energy sources has grown rapidly, leading us to the development and exploitation of new technologies. Developing and studying alternative sources of energy, less polluting than the current ones, has been the great challenge. Then comes a very attractive alternative: the production of hydrogen. A major motivation is that the combustion of hydrogen with oxygen produces only water vapor. However, the raw material used must be considered when analyzing the effective environmental gains, since both renewable and non-renewable sources can be used. Among the biological systems for hydrogen production, anaerobic fermentation has been highlighted, mainly due to the greater production of hydrogen when compared to other biological processes and the possibility of using different waste materials as a substrate. The organic matter present in wastewater represents a cheap raw material to integrate the anaerobic digestion process and generate alternative energy sources such as hydrogen.

**Keywords:** Hydrogen. Biofuel. Bio hydrogen. Bioenergy. Residue.

**Data de submissão:** [inserir a data de protocolo na secretaria](#)

**Data de aprovação:** [inserir a data de aprovação na banca examinadora](#)

---

<sup>I</sup> Estudante do curso superior de Tecnologia em Biocombustíveis da Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB) – São Paulo – Brasil. E-mail: karen.oliveira22@fatec.sp.gov.br

<sup>II</sup> Professora da Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (FATEC-JB) – São Paulo – Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

As necessidades energéticas mundiais aumentam anualmente. A utilização de combustíveis de origem fóssil tende a diminuir, visto que se trata de uma fonte não renovável, com risco de escassez e grande emissora de gases responsáveis pelo efeito estufa e das mudanças climáticas. O uso de biomassa como fonte de energia renovável está diretamente relacionado com o ciclo do carbono, pois reduz a emissão de gases do efeito estufa por meio do sequestro de carbono pelas culturas e da substituição dos combustíveis fósseis pelos biocombustíveis (FUESS e GARCIA, 2014). O decréscimo de energia induzidas, em virtude do clima extremo estão impactando cada vez mais as comunidades em todo o país, e existe a necessidade de um sistema de energia mais resiliente e confiável. No Brasil, a participação de fontes renováveis é elevada, visto que os recursos naturais renováveis são abundantes.

Neste sentido, a utilização do hidrogênio é considerada uma alternativa aos atuais combustíveis fósseis. O desenvolvimento de tecnologias para o uso energético do hidrogênio contribuirá para o uso dessas fontes energéticas. Uma das principais barreiras a respeito do uso do hidrogênio como alternativa de energia limpa é a forma como ele é produzido. Dentre os processos de obtenção de hidrogênio a partir de fontes primárias de energia destacam-se a eletrólise, os processos termoquímicos e radiolíticos e os processos biológicos (SÁ, 2011).

O bio-hidrogênio pode ser gerado por meio de processos fotossintéticos ou fermentativos, sendo este último mais vantajoso por ser um método simples de obtenção desse gás, podendo utilizar várias substâncias orgânicas como substratos e por ter um menor gasto calórico e custo para a implantação. A produção de hidrogênio por meio de processos fermentativos se configura em alternativa energética ainda mais vantajosa quando o substrato utilizado provém de fontes renováveis e baratas, como águas residuárias com quantidades consideráveis de fração orgânica biodegradável (WANG & WAN, 2008).

A grande parte das atividades agroindustriais desenvolvidas no Brasil e no mundo tem a geração de resíduos e de efluentes ligados negativamente à sua produção. Cada vez mais as organizações estão se preocupando com seus resíduos e a sua gestão é uma prática cada vez mais comum nas organizações sérias, que tem como objetivo minimizar seus impactos ambientais. O tratamento das águas residuárias, realizado com o objetivo de remover a matéria orgânica, nutrientes, patógenos e outras substâncias, é importante para evitar a poluição do solo e das águas subterrâneas e superficiais, danos aos ecossistemas e a dispersão de doenças (VON SPERLING, 2005). Neste cenário, a aplicação da digestão anaeróbia caracteriza-se como um processo de tratamento que permite a adequação desses resíduos aos parâmetros de lançamento em corpos d'água, reduzindo a sua carga poluidora. (FUESS, 2010).

Portanto o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão de literatura sobre a produção de hidrogênio utilizando a digestão anaeróbia.

## 2 PANORAMA ENERGÉTICO

O consumo global de energia se sustenta essencialmente em dois tipos de fontes de energia: os combustíveis fósseis e as energias renováveis. Mesmo com a crescente conscientização ambiental, a maior parte do consumo energético recai sobre os combustíveis fósseis. Porém, em virtude dos custos associados e a necessidade da diminuição dessa

dependência de utilização de fontes fósseis, tem-se contribuído para o desenvolvimento e aplicação de tecnologias de provenientes de fontes renováveis (LOURENÇO, 2012).

A revisão estatística da energia mundial revela que a pandemia do COVID-19 teve um impacto dramático nos mercados de energia, com a energia primária e as emissões de carbono diminuindo com as taxas mais rápidas desde a Segunda Guerra Mundial; e em 2020 o consumo de energia primária diminuiu (4,5%). O consumo de todos os combustíveis diminuiu, exceto renováveis (+9,7%) e hidrelétricos (+1,0%) (BP Statistical Review of World Energy, 2021).

As três fontes de energia provenientes dos combustíveis fósseis são o petróleo, o gás natural e o carvão. Em questões ambientais, a queima destes combustíveis promove a emissão de poluentes para a atmosfera, os quais por sua vez contribuem para intensificar o efeito de estufa, a produção de chuvas ácidas e a ocorrência de outros fenômenos que conduzem a alterações climáticas do planeta (LOURENÇO, 2012).

Em 2020, o consumo de petróleo decresceu pela primeira vez desde 2009, em 9,1 milhões de barril/dia. A produção mundial de petróleo também decresceu pela primeira vez desde 2009, em 6,6 milhões de barril/dia. Porém, o petróleo continua a deter a maior fatia do mix energético (31,2%), seguido pelo carvão, com 27,2% do consumo total de energia primária (BP Statistical Review of World Energy, 2021).

A energia renovável, também chamada de energia limpa, é toda aquela obtida a partir de uma fonte cuja origem é natural e ilimitada. As fontes disponíveis e mais amplamente estudadas são o sol, o vento, a água e a biomassa. Suas reservas são consideradas infinitas, mas dependentes de ciclos e variações temporais associados à sua origem. Para fins energéticos, a aplicação dessas fontes inclui vantagens como a contribuição para uma redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera, de se encontrarem em meios naturais locais e de melhorarem a qualidade ambiental (LOURENÇO, 2012).

A produção global de energia renovável varia de acordo com a proveniência das fontes correspondendo, em 2020, a um crescimento de 9,7% (BP Statistical Review of World Energy, 2021).

O hidrogênio é o elemento mais abundante, embora não seja encontrado livremente, pois deve ser extraído de outras fontes. Encontra-se, frequentemente, na forma gasosa compondo o gás  $H_2$ , o qual é incolor e inodoro, densidade (0 °C e 0,1013 MPa): 0,0899 kg/N m<sup>3</sup>, ponto de ebulição: -252,8 °C (na pressão de 0,1013 MPa), inflamável entre as concentrações 4% a 75% de  $H_2$  por volume, e 1 g de hidrogênio ocupa o espaço de aproximadamente 11 L sob pressão atmosférica (DA SILVA, 2016).

### 3 PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE HIDROGÊNIO

Entre as formas de se obter o hidrogênio estão a reforma de combustível, a eletrólise e a produção biológica, sendo a produção biológica uma opção vantajosa por ser uma tecnologia de menor custo e por demandar pouca energia no processo (quando comparada às outras formas de obtenção). Entre as formas de produção biológica do hidrogênio estão o meio fotossintético, utilizando-se de algas e o meio fermentativo, utilizando-se de bactérias fermentativas. O foco desse trabalho será a obtenção por meio fermentativo.

**Tabela 1** – Comparação entre os diferentes processos de obtenção de Bio-hidrogênio (Adaptado de Amorim 2009).

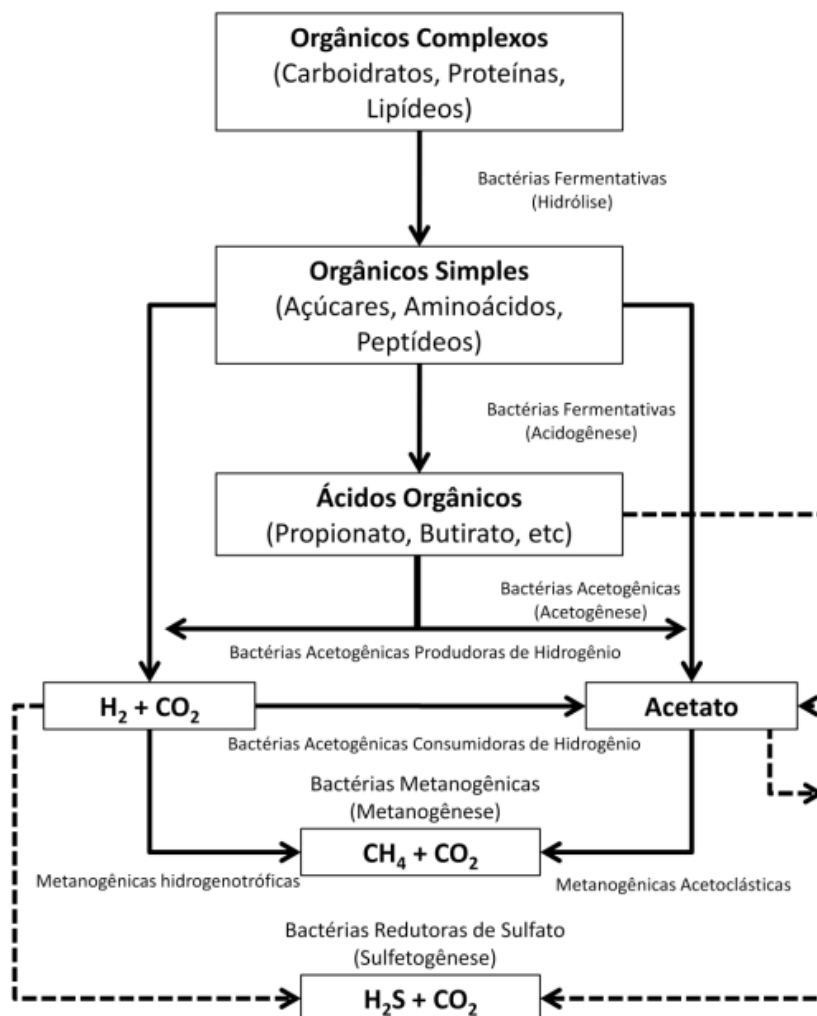
Processo	Tipo de microrganismo	Vantagens	Desvantagens
Biofotólise direta	Algas verdes	Capaz de produzir $H_2$ diretamente da água na presença de luz solar	Requer alta intensidade de luz; $O_2$ pode causar danos ao sistema
Biofotólise indireta	Cianobactérias	Pode produzir $H_2$ a partir da água, com capacidade de fixar $N_2$ da atmosfera	Baixa eficiência fotoquímica; $O_2$ tem efeito inibitório sobre a hidrogenase
Fotofermentação	Bactérias fotossintéticas	Utiliza diferentes substratos	Baixa eficiência de conversão; $O_2$ é inibidor da hidrogenase
Fermentação (sem luz)	Bactérias fermentativas	Pode produzir $H_2$ independente da luz; Utiliza diferentes substratos; Produz metabolitos de valor agregado como os ácidos acético, propionico e butirico	Baixo rendimento; Produto misturado com $CO_2$

A digestão anaeróbia é um processo biológico natural e consiste na atuação de uma comunidade de microrganismos que cooperam entre si para formar uma fermentação estável e auto reguladora.

No tratamento de águas residuárias, esse processo converte a matéria orgânica em uma mistura de gases de metano e dióxido de carbono, por uma complexa comunidade de microrganismos (MAGALHÃES, 2018).

A digestão anaeróbia possui quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, mas pode ser dividida em duas principais etapas, a fermentativa, conhecida como acidogênica, em que ocorre a produção de hidrogênio, gás carbônico e ácidos graxos voláteis de cadeia curta através da decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos acidogênicos, e a metanogênica, em que o hidrogênio será consumido para a produção de metano.





**Figura 1** Pontos de produção e consumo de hidrogênio dentro do processo anaeróbico. (CHERNICHARO, 1997).

O desequilíbrio entre as bactérias produtoras e as consumidoras de hidrogênio é uma estratégia de controle operacional que deve ser aplicada aos reatores para a produção de hidrogênio, que ocorre nas fases acidogênese e acetogênese (LEITE et al., 2008). Sendo assim, a produção de hidrogênio só é possível se a biodigestão anaeróbia for interrompida, pois o hidrogênio caracteriza-se como um intermediário do processo (PENTEADO, 2012).

#### 4 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO BIOLÓGICA DO HIDROGÊNIO

A produção de hidrogênio em reatores anaeróbios é muito complexa, sendo dependente de muitos fatores, tais como, o inoculo, temperatura, pH, tipo de reator, tipo de substrato, etc.

## 4.1 Temperatura

A temperatura é um dos fatores de grande importância na produção de hidrogênio, visto que se trata de um processo biológico. Ela está diretamente ligada às taxas de crescimento e atividades metabólicas dos microrganismos. Estudos com diferentes faixas de temperatura têm sido feitos em busca de temperaturas ideais para a produção de hidrogênio.

As reações de fermentação podem ser conduzidas em temperaturas mesofílicas (25-40 °C), termofílicas (40-65 °C), termofílicas extremas (65-80 °C) e hipertermofílicas (> 80 °C) (LEVIN et. al., 2004). Geralmente se utiliza a temperatura na faixa mesofílica, possivelmente pela inviabilidade do aquecimento de águas residuárias para tratamento e pela obtenção de boas taxas de produção de hidrogênio à temperatura ambiente.

De acordo com Guo et al. (2010), a temperatura ótima para cada processo vai depender do tipo e origem do inóculo, da quantidade de compostos realmente biodegradáveis e das condições operacionais do sistema.

Na tabela 2 estão relacionadas as temperaturas ótimas de operação de reatores em batelada produtores de hidrogênio.

**Tabela 2** – Influencia da temperatura na produção de hidrogênio. Fonte: Wang 2008

Inóculo	Substrato	Tipo de reator	Temperatura (°C)	
			Testada	Ótima
Lodo anaeróbico	Glicose	Batelada	25-55	40
Lodo anaeróbico	Glicose	Batelada	33-41	41
Lodo anaeróbico	Sacarose	Batelada	25-45	35,1
Lodo anaeróbico	Sacarose	Batelada	25-45	35,5
Lodo anaeróbico digerido	Água de cozimento de arroz	Batelada	37-55	37

## 4.2 pH

Assim como a temperatura, o pH tem um importante papel na eficiência da produção de hidrogênio por processos fermentativos, porém além desta função, o controle do pH é utilizado para a inibição da ação das bactérias metanogênicas que são responsáveis pelo consumo de parte do hidrogênio produzido no processo. Quando há a necessidade de inibir as atividades metanogênicas, geralmente se verifica estudos que controlam suas operações em condições de pH abaixo de 6. O acúmulo de ácidos orgânicos ocorre juntamente com a redução do pH, o que dificulta o crescimento metanogênico; sendo assim, o pH interfere na inibição de atividades metanogênicas, mas também nos teores de produção de hidrogênio e ácidos orgânicos (SÁ, 2011).

### 4.3 Inóculo

As bactérias produtoras de hidrogênio estão presentes em reatores anaeróbios, sendo assim, a iniciação para reatores produtores de hidrogênio pode ser dada através de inóculo presente nesses reatores. Porém, antes que esse lodo seja inoculado no reator, muitas vezes é necessário que estes sejam submetidos por um pré-tratamento visando à remoção das bactérias metanogênicas desse meio. Esse pré-tratamento pode ser realizado por meio de um choque de altas temperaturas, pelo abaixamento do pH, pela elevação do pH, pela aeração do meio, ou pela combinação destes. (REN et al, 2008 apud Inoue, 2011.).

O método de tratamento de inóculo por meio da temperatura é um dos mais utilizados pelos trabalhos atualmente, sendo obtidos bons rendimentos na produção de hidrogênio (Inoue, 2011).

#### 4.3.1 Cultura pura

As diferentes linhagens bacterianas têm sido utilizadas para produzir  $H_2$  a partir de diferentes substratos. As vantagens na utilização de culturas puras estão relacionadas à seletividade do substrato, a fácil manipulação do metabolismo através da alteração das condições de crescimento, aos elevados rendimentos de  $H_2$  e a redução de subprodutos. Por outro lado, culturas puras são sensíveis a contaminações, o que demanda, na maioria dos casos, o emprego de condições assépticas, o que implica no aumento do custo global do processo (NTAIKOU et al, 2010, apud SÁ, 2011).

Os micro-organismos do gênero *Clostridium* se destacam na utilização para produção de hidrogênio devido ao seu rápido metabolismo e sua capacidade de formar esporos frente a condições adversas. *Bacillus*, *Enterobacter* e *Thermoanaerobacterium* sp. também têm sido relatados como potenciais produtores de  $H_2$  (KRAEMER e BAGLEY, 2007, apud SÁ, 2011).

#### 4.3.2 Cultura mista

A utilização de culturas mistas para processos em grande escala é considerada favorável devido ao controle e à operação do processo ser facilitada pela utilização de meios não estéreis, reduzindo deste modo o custo global (NTAIKOU et al, 2010, apud SÁ, 2011).

A desvantagem na utilização de culturas mistas em termos da viabilidade econômica do processo de produção de  $H_2$  está relacionada à presença, sempre provável, de micro-organismos consumidores de  $H_2$ , tais como as arqueias metanogênicas, as bactérias homoacetogênicas e as bactérias sulfato e nitrato (NTAIKOU et al, 2010, apud SÁ, 2011). A estratégia para minimizar este efeito consiste no pré-tratamento do inóculo, que possui a finalidade de inibir e/ou eliminar os micro-organismos consumidores de  $H_2$ , bem como selecionar os micro-organismos produtores de  $H_2$ .

#### 4.4 Substrato

Para que se processe uma produção sustentável de hidrogênio, por meio de fermentação, o substrato empregado deve obedecer a alguns critérios. Este substrato deve conter principalmente carboidratos, ser produzido a partir de recursos renováveis, estar em concentração suficiente para que a fermentação e a recuperação da energia sejam energeticamente favoráveis e que, se algum tratamento prévio for necessário, este seja de baixo custo. Os carboidratos são os substratos preferidos para a produção de hidrogênio por fermentação. (LAMAISON, 2009)

Os carboidratos simples, como sacarose e glicose são facilmente biodegradáveis, por esse motivo, são utilizados como substratos modelo para produção do biohidrogênio. No entanto, fontes puras de carboidratos representam matérias-primas caras para produção de  $H_2$  em grande escala, sendo viáveis apenas quando baseadas em fontes renováveis e de baixo custo (NTAIKOU et al, 2010, apud SÁ, 2011). É neste contexto que se destaca a utilização de materiais residuais como potenciais substratos para produção de  $H_2$ . A biotransformação de resíduos em hidrogênio pode ser considerada bastante atraente do ponto de vista ambiental (energia renovável) e econômico (recuperação de recursos e gestão de resíduos com baixo custo total) (NTAIKOU et al, 2010, apud SÁ, 2011). Dois materiais residuais tipicamente brasileiros merecem destaque com relação ao grande potencial de produção de  $H_2$ . São eles, os resíduos lignocelulósicos obtidos do processo de obtenção de etanol e a glicerina obtida do processo de produção do biodiesel.

#### 4.5 Reator

Para a produção de hidrogênio os reatores anaeróbios (contínuos e batelada, entre outros) são os mais utilizados para desenvolver projetos e aperfeiçoar parâmetros, buscando novas alternativas para estabelecer um sistema otimizado, principalmente, para desenvolver configurações que ofereçam máximo desempenho operacional, segurança e custos acessíveis (SARTI et al., 2007).

A maioria dos estudos relacionados à produção de  $H_2$  por via fermentativa anaeróbia tem sido conduzida em batelada. Os reatores em batelada possuem a vantagem de serem simples, flexíveis e facilmente operados. No entanto, operações em grande escala requerem processos de produção contínuos por razões práticas de armazenamento de resíduos e por considerações econômicas (GUO et al., 2010; WANG e WAN, 2008).

### 5 ÁGUAS RESIDUÁRIAS AGROINDUSTRIAIS

O lançamento de águas residuárias nos mananciais pode comprometer gravemente a saúde pública e o meio ambiente. Para evitar esse dano têm-se realizado diversas manobras a fim de reutilizar/reciclar essas águas residuárias; que podem ser de esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratadas ou não. No aspecto econômico, as águas residuárias constituem matérias-primas que não envolvem custos na sua produção, sendo um processo biológico sustentável aplicado à produção de hidrogênio.

O reuso de água consiste na recuperação de efluentes de modo a utilizá-las em aplicações menos exigentes. Desta forma o ciclo hídrico tem sua escala diminuída em favor do balanço energético (METCALF; EDDY, 2003).

## 5.1 Vinhaça de Cana de Açúcar

A produção de açúcar e etanol necessita da recuperação e utilização de subprodutos para aprimorar a eficiência do processo. Devido as grandes quantidades de vinhaça gerada, tratamentos alternativos a fertirrigação devem ser propostos. As características da vinhaça variam dependendo do processo utilizado e durante a safra, devido às diferenças de composição da cana de açúcar a ser moída durante o ano. De forma geral, a vinhaça apresenta coloração escura e consiste de 93% de água e 7% de sólidos orgânicos e minerais. Neste contexto a aplicação da digestão anaeróbia torna-se atrativa possibilitando a conversão da matéria orgânica presente na vinhaça em energia. Além disso, o conteúdo inorgânico é mantido na vinhaça biodigerida, mantendo o seu potencial como fertilizante. (RAMOS, 2016).

Em operações de longa duração, o crescimento da biomassa no leito fixo pode reduzir a taxa de carregamento orgânico específica. Desta forma, mesmo em concentração inicial constante, a disponibilidade de substrato pode ser reduzida (RAMOS, 2016).

Ferraz Júnior, et al 2014, estudaram a influência em longo prazo (60 dias) da operação de reator anaeróbio de leito fixo em elevada taxa de carregamento orgânico na produção termofílica de hidrogênio usando vinhaça como substrato. O metano não foi observado na operação do reator e a fração média de hidrogênio no biogás foi de 38,7%. Durante a produção de hidrogênio os valores máximos de produtividade e de rendimento foram de 2284 mL  $H_2 \cdot d^{-1} \cdot L^{-1}$  e 3,7 mol  $H_2 \cdot mol \text{ carboidrato}^{-1}$ , respectivamente, na taxa de carregamento orgânico específica de 0,98g carboidratos totais.g  $SV^{-1} \cdot h^{-1}$ . Os principais metabólitos produzidos foram os ácidos acético, butírico e propiônico. Os organismos pertencentes a gêneros reconhecidos como produtores de hidrogênio (*Caloramator*, *Clostridium*, *Oxobacter*, *Thermoanaerobacterium*, *Thermohydrogenium* e *Megasphaera*) foram identificados em amostras coletadas no meio e no final da operação do reator (RAMOS, 2016).

Em estudo realizado por Ramos, 2016, no reator RALF alimentado com vinhaça de cana de açúcar, a redução do tempo de detenção hidráulico (TDH) auxiliou a produção de hidrogênio, com rendimento máximo de 5,51mmol  $H_2 \cdot g \text{ DQO}^{-1}$  no TDH de 4 h e com produtividade máxima de  $0,71 \pm 0,16 \text{ L } H_2 \cdot h^{-1} \cdot L^{-1}$  no TDH de 0,5 h. Entretanto, o aumento da temperatura reduziu a produção de hidrogênio devido à dificuldade de adaptação da comunidade, originalmente a 55°C, a temperaturas mais altas consumindo vinhaça como substrato.

Estes resultados indicam que o uso de lodo termofílico adaptado à vinhaça pode enriquecer a comunidade produtora de hidrogênio e inibir os consumidores de hidrogênio.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de hidrogênio utilizando a digestão anaeróbia é um processo em desenvolvimento, mas que se mostra promissor e poderá futuramente ser uma excelente alternativa para a produção de energias renováveis, visto que sua combustão com o oxigênio produz somente vapor d'água. Porém, diversos fatores influenciam em sua produção biológica. Portanto, trata-se de um processo realizado em condições muito bem controladas.

A utilização de águas residuárias representa uma matéria prima de baixo custo para integrar o processo de digestão anaeróbia, pois apresenta bons índices de rendimento na produção de hidrogênio além contribuindo para a gestão de resíduos.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, E. L. C., Efeito da concentração de glicose e da alcalinidade na produção de hidrogênio em reator anaeróbio de leito fluidificado. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 192p, 2009.

BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2021. Disponível em <https://www.bp.com/>. Acesso em 10/06/2022

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores Anaeróbios – Princípio do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Vol. 5, 2ª Ed. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1997.

DA SILVA, I. A., "Hidrogênio: Combustível do Futuro". Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, Vol. 20, núm.2, pp.122-126 ISSN: 1415-6938. 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=26046651010>. Acesso em 04 de julho de 2022.

FERRAZ JÚNIOR, A.D.; WENZEL, J.; ETCHEBEHERE, C.; ZAIAT, M. Effect of Organic Loading Rate on Hydrogen Production from Sugarcane Vinasse in Thermophilic Acidogenic Packed Bed Reactors, International Journal of Hydrogen Energy, 39, 16852-16862, 2014

FUESS, L. T., Avaliação da auto-suficiência energética em reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de resíduos da indústria de produção do etanol, 74 p - Rio Claro, 2010

FUESS, L.T., GARCIA, M.L. Implications of stillage land disposal: A critical review on the im-pacts of fertigation. Journal of Environmental Management, v. 145, p. 210-229, 2014.

GUO, X.M.; TRABLY, E.; LATRILLE, E.; CARRÈRE, H.; STEYER, J-P. Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. International Journal of Hydrogen Energy, v. 35, p. 10660-10673, 2010

INOUE, R. K. ; RODRIGUES, J. A. D; MENDIONDO, E. M. Produção de bio-hidrogênio por processos fermentativos no tratamento de águas residuárias - XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011

KRAMER, J.T.; BAGLEY, D.M. Improving the yield from fermentative hydrogen production. *Biotechnology Letters*, v. 29, p. 685-695, 2007.

LAMAISSON, F. C., Aplicação da água residuária do processamento da mandioca como substrato para a produção de hidrogênio por processo fermentativo. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LEITE, J.A.C.; FERNANDES, B.S.; POZZI, E.; BARBOZA, M.; ZAIAT, M. Application of an anaerobic packed-bed bioreactor for the production of hydrogen and organic acids. *International journal of hydrogen energy*, Oxford, n.33, p. 579-586. 2008.

LEVIN, D.B.; PITT, L.; LOVE, M. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 29, p. 173-185, 2004

LOURENÇO, R. D. F. Valorização de resíduos agro-industriais para a produção biológica de hidrogênio. Dissertação de Mestrado Universidade de Lisboa - Faculdade de ciências, departamento de engenharia geográfica, geofísica e energia. Lisboa, 2012.

METCALF; EDDY. Wastewater engineering treatment disposal reuse. 4. ed. Revised by G. Tchobanoglous, F. Burton e D. Stensel. New York: McGraw Hill Book, 2003.

MAGALHÃES, Geísa Vieira Vasconcelos. Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real. 2018. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

NTAIKOU, I.; ANTONOPOULOU, G.; LYBERATOS, G. Biohydrogen production from biomass and wastes via dark fermentation: A review. *Waste Biomass Valor*, v. 1, p. 21-316, 2010;

PENTEADO, E.D. Influência da origem e pré-tratamento do inóculo na produção de hidrogênio a partir de águas residuárias em biorreatores anaeróbicos. 2012. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.

RAMOS, L. R. Aplicação de biorreatores anaeróbios em diferentes temperaturas para produção de hidrogênio a partir de águas residuárias agroindustriais. 138 p. - UFSCar, São Carlos, 2016.

REN, N. Q.; GUO, W.Q.; WANG, X.J.; XIANG, W.S.; LIU, B.F.; WANG, X.Z.; DING, J.; CHEN, Z.B. (2008). Effects of different pretreatment methods on fermentation types and

dominant bacteria for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy, v. 33, n. 16, p. 4318-4324, Aug 2008.

SÁ, L. R. V. Produção biológica de hidrogênio por bactérias fermentativas utilizando diferentes carboidratos ou glicerina como substrato. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro 405 f. Rio de Janeiro, 2011.

SARTI, A.; GARCIA, M.L.; ZAIAT, M.; FORESTI, E., Domestic sewage treatment in a pilotscale anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR).Resources, Conservation and Recycling. v. 51. p.237–247. 2007.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA, Universidade Federal de Minas Gerais. v. 1, 3. ed, 2005.

WANG, J.; WAN, W. (2008). Effect of temperature on fermentative hydrogen production by mixed cultures. International Journal of Hydrogen Energy, v 33, n 6, p 5392-5397, Sep 2008.

## APÊNDICE A – TERMO DE ORIGINALIDADE

### TERMO DE ORIGINALIDADE

Eu, Karen Cristina Rocha de Oliveira Silva, [REDACTED] CPF [REDACTED], aluna regularmente matriculada no **Curso Superior de Tecnologia em Biocombustíveis**, da Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), declaro que meu trabalho de graduação intitulado **Produção de hidrogênio via fermentação anaeróbia é ORIGINAL**.

Declaro que recebi orientação sobre as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que tenho conhecimento sobre as Normas do Trabalho de Graduação da Fatec-JB e que fui orientado sobre a questão do plágio.

Portanto, estou ciente das consequências legais cabíveis em caso de detectado PLÁGIO (Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, que altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais, publicada no D.O.U. de 20 de fevereiro de 1998, Seção I, pág. 3) e assumo integralmente quaisquer tipos de consequências, em quaisquer âmbitos, oriundas de meu Trabalho de Graduação, objeto desse termo de originalidade.

Jaboticabal/SP, 23 de novembro de 2022.

Karen Cristina Rocha de Oliveira Silva



## AGRADECIMENTOS

Para concluir este trabalho de graduação, tive a colaboração de diversos professores, assim como a participação da família e dos amigos, que também contribuíram de maneira especial para que eu atingisse meus objetivos. Em especial quero agradecer a Deus: meu provedor, minha rocha, meu sustento; agradeço por me dar forças, saúde e determinação, guiando meu caminho para vencer mais uma etapa. À minha filha Natália, que mesmo tão pequena me dá tanta força e amor, sem você isso não seria possível minha princesa, essa conquista é tão minha quanto sua. Ao meu esposo Eduardo, por todo apoio e suporte que me deu ao longo dessa jornada, obrigada por ser meu grande incentivador. Aos meus pais, Eliene e Antonio, agradeço por toda segurança e amor que me transmitem e por todo incentivo quanto à minha educação e formação desde cedo. Às minhas irmãs, Kássia e Emanuely, obrigada por tornarem a minha vida mais leve e por serem meu porto seguro em qualquer momento. Às minhas amigas e irmãs de coração Sara e Jéssica pela tolerância e ensinamentos de vida, dignidade e amizade incondicional. À minha orientadora Rose Maria Duda pela orientação, ensinamentos e seriedade durante a realização deste trabalho. Aos professores e funcionários da Fatec Jaboticabal, por todo apoio, ensinamento e paciência que tiveram ao longo dessa jornada. Agradeço especialmente às professoras Camila Guimarães e Larissa Albunio por terem me levado para novos caminhos de conhecimento, o tema deste trabalho é fruto dos ensinamentos que vocês plantaram; e à professora Mariana Frigieri, minha coordenadora de estágio e grande incentivadora (desde a primeira etapa em 2009), obrigada por todo ensinamento, carinho, riso fácil e leveza que você traz. Finalmente agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão a cada um de vocês.