



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

JOAQUIM PEDRO DA SILVA NETO

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ESGOTO SANITÁRIO COM
REATOR UASB

Rio Largo, AL

2026

JOAQUIM PEDRO DA SILVA NETO

**PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ESGOTO SANITÁRIO COM
REATOR UASB**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Julio Inacio Holanda Tavares Neto.

Rio Largo
2026

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Stefano João dos Santos

S586p Silva Neto, Joaquim Pedro da

Produção de hidrogênio a partir de esgoto sanitário com reator UASB/ Joaquim Pedro da Silva Neto. – Rio Largo - Al, 2026.

56 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energia) Universidade Federal de Alagoas, Campus Ceca – Rio largo, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Julio Inacio Holanda Tavares Neto.
Paes

1. hidrogênio; reator UASB; esgoto sanitário; fermentação acidogênica; modelagem matemática.

CDU: 621.352



Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias Secretaria
dos Cursos de Agroecologia, Engenharia de Agrimensura,
Engenharia de Energia e Engenharia Florestal.



Folha de Aprovação

JOAQUIM PEDRO DA SILVA NETO

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DE ESGOTO SANITÁRIO COM REATOR UASB

Rio Largo, 01 de junho de 2026

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIO INACIO HOLANDA TAVARES NETO
Data: 01/06/2026 10:03:41-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Orientador - Prof. Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto, UFAL – CECA

Documento assinado digitalmente
gov.br AMANDA SANTANA PEITER
Data: 01/06/2026 12:08:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

1º Avaliador - Prof. Dra. Amanda Santana Peiter, UFAL – CECA

Documento assinado digitalmente
gov.br TANIA MARIA GOMES VORONKOFF CARNAUBA
Data: 01/06/2026 19:40:26-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

2º Avaliador - Prof. Dra. Tânia Maria Gomes Voronkoff Carnaúba, UFAL – CECA

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha família: meu pai Silvestre, minha mãe Jeane e minha irmã Sofia, que estiveram sempre ao meu lado, apoiando-me e confortando nos momentos difíceis.

Aos meus amigos de faculdade que caminharam comigo ao longo do curso, auxiliando-me e apoiando-me ano após ano.

Aos meus amigos que me acompanham e me apoiam desde o ensino médio.

Aos meus amigos e orientadores da CASAL, que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e acadêmico.

Aos meus professores, que moldaram meu conhecimento acadêmico, em especial ao meu orientador, pelo suporte fundamental durante todo o processo de elaboração deste trabalho.

RESUMO

A produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis e residuais tem se consolidado como uma alternativa estratégica para a diversificação da matriz energética e a valorização de resíduos no contexto da economia circular. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e aplicar um modelo matemático fenomenológico para simular o comportamento de um reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) operado em regime acidogênico para a produção fermentativa de hidrogênio a partir de esgoto sanitário. O modelo foi implementado computacionalmente em linguagem Python, considerando as dinâmicas de consumo de substrato (Demanda Química de Oxigênio – DQO), crescimento microbiano e produção acumulada de H_2 , com incorporação dos efeitos do pH e do tempo de detenção hidráulica (TDH) sobre a atividade fermentativa e a competição metanogênica. Foram simulados dois cenários operacionais: esgoto sanitário convencional (DQO de 731,5 mg/L) e esgoto com enriquecimento de carga orgânica (DQO de 1.045 mg/L), ambos com remoção de DQO mantida próxima de 30% para garantir o regime acidogênico. Os resultados indicaram que a faixa de pH entre 5,0 e 5,4 e TDH entre 3 e 4 horas proporcionou as melhores condições para produção de hidrogênio, com produtividades volumétricas da ordem de 10^{-4} mol/(L·h) ($5,04 \times 10^{-4}$ mol/(L·h) no cenário convencional e $5,67 \times 10^{-4}$ mol/(L·h) no cenário enriquecido) e produção acumulada total de hidrogênio de 2.456,36 mol no primeiro cenário e 4.167,95 mol no cenário com enriquecimento orgânico. O aumento da carga orgânica afluenta elevou significativamente a produção de hidrogênio, sem alterar a eficiência relativa de remoção de DQO, evidenciando a dependência do processo em relação à disponibilidade de substratos fermentáveis. Conclui-se que o reator UASB operado em regime acidogênico apresenta potencial como etapa de pré-tratamento energético em estações de tratamento de esgoto, desde que associado a estratégias de codigestão para viabilizar a produção fermentativa de hidrogênio, alinhando-se aos princípios da economia circular e da transição energética.

Palavras-chave: hidrogênio; reator UASB; esgoto sanitário; fermentação acidogênica; modelagem matemática.

ABSTRACT

The production of hydrogen from renewable and waste sources has become a strategic alternative for energy matrix diversification and waste valorization within the circular economy framework. This study aimed to develop and apply a phenomenological mathematical model to simulate the behavior of an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor operated under acidogenic conditions for fermentative hydrogen production from sanitary sewage. The model was computationally implemented in Python, considering the dynamics of substrate consumption (Chemical Oxygen Demand – COD), microbial growth, and accumulated H₂ production, incorporating the effects of pH and hydraulic retention time (HRT) on fermentative activity and methanogenic competition. Two operational scenarios were simulated: conventional sanitary sewage (COD of 731.5 mg/L) and sewage with enhanced organic load (COD of 1,045 mg/L), both with COD removal maintained close to 30% to ensure acidogenic conditions. Results indicated that the pH range between 5.0 and 5.4 and HRT between 3 and 4 hours provided the best conditions for hydrogen production, with volumetric productivities on the order of 10⁻⁴ mol/(L·h) (5.04 × 10⁻⁴ mol/(L·h) in the conventional scenario and 5.67 × 10⁻⁴ mol/(L·h) in the enriched scenario) and total accumulated hydrogen production of 2,456.36 mol in the first scenario and 4,167.95 mol in the organic enrichment scenario. Increasing the influent organic load significantly enhanced hydrogen production without altering the relative COD removal efficiency, highlighting the process dependence on the availability of fermentable substrates. It is concluded that the UASB reactor operated under acidogenic conditions has potential as an energy pretreatment stage in wastewater treatment plants, provided it is associated with co-digestion strategies to enable fermentative hydrogen production, aligning with circular economy and energy transition principles.

Keywords: hydrogen; UASB reactor; sanitary sewage; acidogenic fermentation; mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema das rotas de produção de hidrogênio de origem fóssil por cores.....	17
Figura 2 – Esquema das rotas de produção de hidrogênio de origem renovável por cores.....	18
Figura 3 – Rotas biológicas de produção de hidrogênio.	19
Figura 4 – Desenho esquemático de um reator UASB.....	21
Figura 5 – Vista área da ETE LABOREAUX, com identificação das principais unidades	26
Figura 6 – Fluxo do processo de produção de hidrogênio com reator UASB a partir de esgoto sanitário	27
Figura 7 – Evolução temporal das variáveis de estado para uma DQO 731,5 mg/L.....	44
Figura 8 – Evolução temporal das variáveis de estado para uma DQO 1045 mg/L.....	47
Figura 9 – Comparação da evolução temporal da concentração de hidrogênio para os dois cenários simulados.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros fixos e condições iniciais	38
Tabela 2 – Parâmetros cinéticos do modelo	39
Tabela 3 – Cenários operacionais com remoção de DQO próxima de 30%	45
Tabela 4 – Cenários operacionais com enriquecimento de carga orgânica e remoção de DQO próxima de 30%.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 O Hidrogênio como Vetor Energético e a Economia Circular	15
2.2 Produção Biológica de Hidrogênio.....	18
2.3 O reator UASB.....	20
2.4 O Reator UASB na Produção de Hidrogênio.....	22
2.4.1 Processo metabólico no reator UASB para a produção de hidrogênio.....	23
2.4.1.1 Hidrólise	23
2.4.1.2 Acidogênese	24
2.4.1.3 Acetogênese.....	25
2.4.1.4 Metanogênese	25
2.4.2 Parâmetros Operacionais para Produção de Hidrogênio em Reatores UASB.....	27
2.4.2.1 pH	28
2.4.2.2 Temperatura.....	28
2.4.2.3 Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)	28
2.4.2.4 Carga Orgânica Volumétrica	31
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 Desenvolvimento do modelo fenomenológico.....	33
3.2 Implementação computacional.....	36
3.3 Hipóteses do modelo	37
3.4 Condições de simulação.....	38
3.5 Parâmetros cinéticos e estequiométricos	40
3.6 Limitações do modelo.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Produção de hidrogênio no pré-tratamento de esgoto sanitário	44

4.2 Produção de hidrogênio sob enriquecimento de carga orgânica	46
4.3 Comparação entre os cenários simulados	49
4.4 Interpretação dos resultados e implicações operacionais	50
5 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é fortemente sustentada pelo uso intensivo de combustíveis fósseis. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), petróleo, carvão mineral e gás natural responderam por cerca de 82% do consumo global de energia primária em 2022. Apesar dos avanços tecnológicos, a participação de fontes renováveis na matriz energética mundial permanece em patamares reduzidos, atingindo apenas 14,3% em 2022. Esse cenário contribui diretamente para o agravamento das mudanças climáticas, uma vez que o setor energético global é responsável por 75,8% das emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE). Torna-se evidente, assim, a necessidade de uma transição energética urgente, baseada em fontes mais limpas, renováveis e sustentáveis.

No contexto brasileiro, observa-se uma configuração significativamente mais favorável quando comparada à média mundial. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025), a participação de fontes renováveis na matriz energética do Brasil atingiu o patamar histórico de 50,0%, marco alcançado pela primeira vez desde 1990. Essa característica posiciona o país de forma estratégica no processo de transição energética, especialmente ao considerar a matriz elétrica, que alcançou 88,2% de renovabilidade em 2024 (EPE, 2025). Entretanto, essa condição não elimina desafios estruturais, uma vez que o setor de transportes, apesar de ter elevado sua renovabilidade para 25,7% em 2024, impulsionado pelo aumento do uso de biodiesel e etanol, ainda apresenta elevada dependência de combustíveis fósseis (EPE, 2025). Tal cenário evidencia a necessidade de diversificação da matriz energética e da incorporação de novos vetores, como o hidrogênio, capazes de complementar as fontes renováveis já consolidadas.

Nesse cenário, o hidrogênio tem emergido como uma alternativa promissora, sendo amplamente reconhecido como um vetor energético capaz de armazenar, transportar e fornecer energia a partir de diferentes fontes primárias (TURNER, 2004; PEREIRA, 2024). Sua elevada densidade energética por unidade de massa e sua aplicabilidade em tecnologias como células a combustível tornam-no especialmente atrativo para setores de difícil eletrificação, como transporte pesado e indústria (DINCER; ACAR, 2018; IEA, 2023). No entanto, a sustentabilidade do hidrogênio está diretamente associada à sua rota de produção. Atualmente, a grande maioria do hidrogênio produzido no mundo ainda é obtido por processos baseados em combustíveis fósseis, como a reforma do gás natural, o que compromete seu potencial como solução de baixo carbono (DINCER; ACAR, 2018; IEA, 2023). Dessa forma, o

desenvolvimento de rotas alternativas, especialmente aquelas baseadas em processos biológicos e no aproveitamento de resíduos, torna-se essencial para consolidar o papel do hidrogênio na transição energética.

Entre as rotas emergentes, a produção biológica de hidrogênio a partir de resíduos orgânicos tem se destacado por sua capacidade de integrar recuperação energética e tratamento ambiental. Nesse contexto, a digestão anaeróbia apresenta-se como uma alternativa relevante, particularmente na fase acidogênica, na qual microrganismos fermentativos convertem matéria orgânica em compostos intermediários e gases, incluindo o hidrogênio. Essa abordagem permite não apenas a valorização energética de resíduos, mas também a redução da carga orgânica de efluentes, contribuindo para soluções mais sustentáveis e integradas.

O reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB) é uma das tecnologias mais difundidas para o tratamento de esgoto sanitário, especialmente em países em desenvolvimento, devido à sua simplicidade operacional, baixo custo e elevada eficiência na remoção de matéria orgânica. Tradicionalmente, esses sistemas são operados visando à maximização da produção de metano. No entanto, sob condições operacionais específicas, como pH levemente ácido e baixos tempos de detenção hidráulica, o processo pode ser direcionado para a produção de hidrogênio, favorecendo a atividade acidogênica e limitando a metanogênese.

A alteração do regime operacional de reatores UASB com esse objetivo implica uma mudança significativa nos critérios de desempenho do sistema. Diferentemente dos processos convencionais de tratamento, nos quais se busca a máxima remoção de matéria orgânica, a produção de hidrogênio exige um equilíbrio entre a conversão do substrato e a preservação do gás produzido, uma vez que o hidrogênio pode ser consumido por microrganismos metanogênicos em condições inadequadas. Dessa forma, variáveis operacionais como pH e tempo de detenção hidráulica (TDH) tornam-se determinantes para o direcionamento das rotas metabólicas e para o desempenho global do processo.

Diante da complexidade dos fenômenos envolvidos e das limitações associadas à experimentação em escala real, a modelagem matemática surge como uma ferramenta fundamental para a análise e compreensão do comportamento desses sistemas. Por meio de modelos fenomenológicos, é possível representar, de forma simplificada, as interações entre variáveis operacionais e processos biológicos, permitindo a realização de estudos paramétricos e a identificação de condições favoráveis à produção de hidrogênio.

Nesse contexto, o presente trabalho não se limita a uma análise teórica abstrata, mas busca aproximar o modelo de condições reais de operação. Para isso, foram utilizados dados representativos de esgoto sanitário provenientes de uma estação de tratamento localizada no estado de Alagoas, os quais foram incorporados ao modelo de forma confidencial. A partir dessas informações, foi possível simular o desempenho de um reator UASB operado em regime acidogênico, avaliando a influência conjunta do pH e da vazão de alimentação sobre a remoção de matéria orgânica e a produtividade de hidrogênio.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver e aplicar um modelo matemático capaz de simular o comportamento de um reator UASB operado em regime acidogênico para a produção de hidrogênio a partir de esgoto sanitário. Como objetivos específicos, busca-se: avaliar a influência conjunta do pH e da vazão de alimentação — e, consequentemente, do tempo de detenção hidráulica — sobre a remoção de matéria orgânica e a produtividade de hidrogênio; identificar faixas operacionais que representem um equilíbrio entre eficiência de tratamento e recuperação energética; e analisar, sob uma perspectiva operacional, as condições mais adequadas para a inserção dessa tecnologia em sistemas reais de tratamento de esgoto. Dessa forma, pretende-se contribuir para o avanço da aplicação de processos anaeróbios voltados à produção de hidrogênio, alinhando-se às demandas da transição energética e à busca por soluções mais sustentáveis para o setor de saneamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O reator *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), amplamente empregado no tratamento anaeróbio de esgotos sanitários, pode ser operado sob condições específicas que favorecem a produção de hidrogênio. Essa adaptação consiste no direcionamento do metabolismo microbiano para rotas fermentativas, em detrimento da metanogênese, tornando essencial a compreensão dos mecanismos bioquímicos envolvidos e dos parâmetros operacionais que controlam o processo.

2.1 O Hidrogênio como Vetor Energético e a Economia Circular

O hidrogênio (H_2) é classificado como um vetor energético, pois não constitui uma fonte primária de energia, mas sim um meio de armazenar e transportar energia proveniente de outras fontes. Segundo Turner (2004), diferentemente de recursos naturais como petróleo, gás natural ou energia solar, o hidrogênio não é encontrado em sua forma molecular livre em quantidades significativas na natureza. Por essa razão, é necessário produzi-lo a partir de compostos como água, biomassa ou hidrocarbonetos por meio de diferentes rotas tecnológicas, incluindo processos termoquímicos, eletroquímicos e biológicos (DINCER; ACAR, 2018).

A relevância do hidrogênio no cenário energético contemporâneo está diretamente associada à transição para sistemas de baixo carbono e à produção de energia limpa. Em setores como transporte pesado, siderurgia e armazenamento sazonal de energia, nos quais a eletrificação direta apresenta limitações técnicas ou econômicas, o hidrogênio surge como uma alternativa energética estratégica (EPE, 2025). Nesse contexto, Staffell *et al.* (2019) destacam que o hidrogênio pode atuar como um meio de armazenamento químico capaz de integrar fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, ao sistema energético, contribuindo para a descarbonização de setores industriais de difícil eletrificação.

Essa integração entre tratamento de resíduos e geração de energia contribui para a redução do impacto ambiental global dos sistemas de saneamento e energia, promovendo o reaproveitamento de matéria orgânica (ANGENENT *et al.*, 2004). Dessa forma, processos biológicos de produção de hidrogênio, como aqueles baseados em digestão anaeróbia, alinham-se diretamente aos princípios de sustentabilidade e eficiência de recursos.

Do ponto de vista físico-químico, o hidrogênio apresenta elevado Poder Calorífico Inferior (PCI), aproximadamente 121 MJ/kg, configurando a maior densidade energética por

unidade de massa entre os combustíveis convencionais, como descrito por Lide (2004). Esse valor é significativamente superior ao da gasolina (≈ 47 MJ/kg) e do gás natural (≈ 50 MJ/kg). Entretanto, sua baixa densidade volumétrica em condições ambientes representa um desafio tecnológico relevante. Conforme destacado pela IEA (2023), essa característica exige estratégias específicas de armazenamento e transporte, como compressão a altas pressões, liquefação criogênica ou armazenamento em materiais sólidos, incluindo hidretos metálicos. Adicionalmente, esses desafios impactam diretamente os custos logísticos da cadeia do hidrogênio, sendo um dos principais fatores limitantes para sua adoção em larga escala.

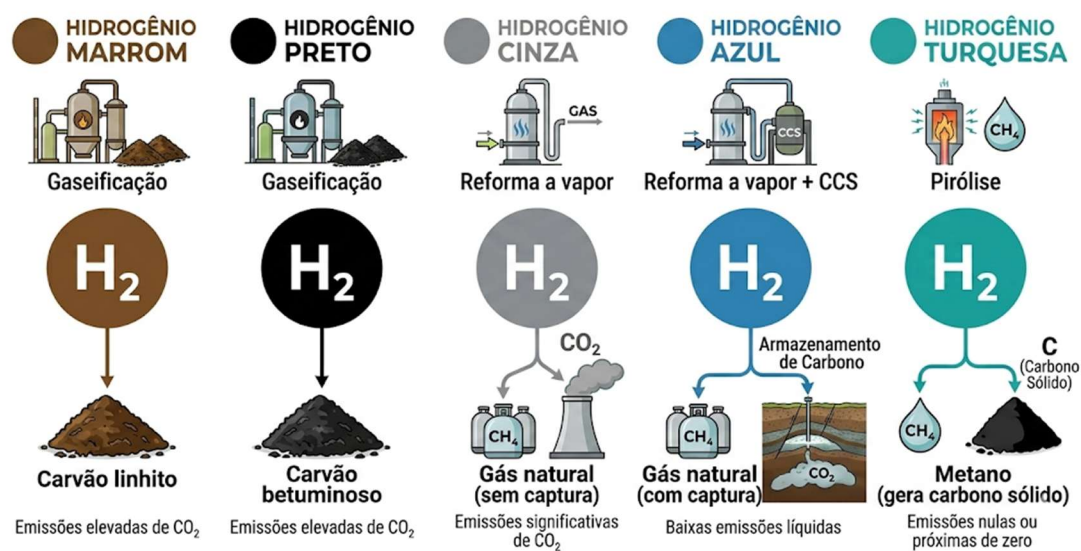
Em termos de aplicação energética, a conversão do hidrogênio pode ocorrer por combustão direta, produzindo energia térmica, ou de forma mais eficiente por meio de células a combustível. De acordo com Dicks e Rand (2018), nesses dispositivos a energia química do hidrogênio é convertida diretamente em eletricidade por meio de reações eletroquímicas, possibilitando eficiências superiores às obtidas em ciclos térmicos convencionais, sem a necessidade de etapas intermediárias de conversão térmica. Além disso, quando utilizado em células a combustível, o principal subproduto do processo é a água, eliminando a emissão direta de dióxido de carbono (CO_2) no ponto de uso (BRAGA, 2014). Esse aspecto reforça o potencial do hidrogênio como combustível limpo em sistemas energéticos futuros.

Sob a perspectiva ambiental, o impacto associado ao uso do hidrogênio depende fundamentalmente da rota tecnológica empregada em sua produção. Atualmente, a maior parte da produção mundial é realizada a partir de combustíveis fósseis, principalmente por meio da reforma a vapor do metano, processo amplamente difundido na indústria química, porém associado à emissão significativa de gases de efeito estufa (IEA, 2023). Em contrapartida, Dincer e Acar (2018) apontam que rotas alternativas, como a eletrólise da água alimentada por fontes renováveis e processos biológicos baseados na atividade metabólica de microrganismos, apresentam elevado potencial para a redução dessas emissões. Em especial, os processos biológicos se destacam por operarem em condições brandas de temperatura e pressão, podendo utilizar substratos orgânicos de baixo custo, como esgoto sanitário e resíduos agroindustriais.

Essa diversidade de rotas produtivas levou à consolidação de uma classificação amplamente utilizada na literatura, baseada em um sistema de "cores" que associa o hidrogênio à sua origem produtiva e à intensidade de carbono associada. As Figuras 1 e 2 apresentam uma síntese dessa classificação, organizando as diferentes rotas em dois grandes grupos.

A Figura 1 reúne as rotas de origem fóssil, que ainda respondem pela maior parte da produção mundial de hidrogênio. O hidrogênio marrom é obtido pela gaseificação de carvão mineral do tipo linhito, constituindo a rota de maior emissão de gases de efeito estufa. O hidrogênio preto apresenta princípio semelhante, porém utiliza carvão betuminoso como matéria-prima. O hidrogênio cinza é produzido por reforma a vapor do metano sem captura de carbono, sendo atualmente a rota mais difundida. O hidrogênio azul também é produzido a partir de combustíveis fósseis, mas incorpora sistemas de captura e armazenamento de carbono. Já o hidrogênio turquesa é obtido pela pirólise do metano, processo que produz hidrogênio e carbono sólido como subproduto.

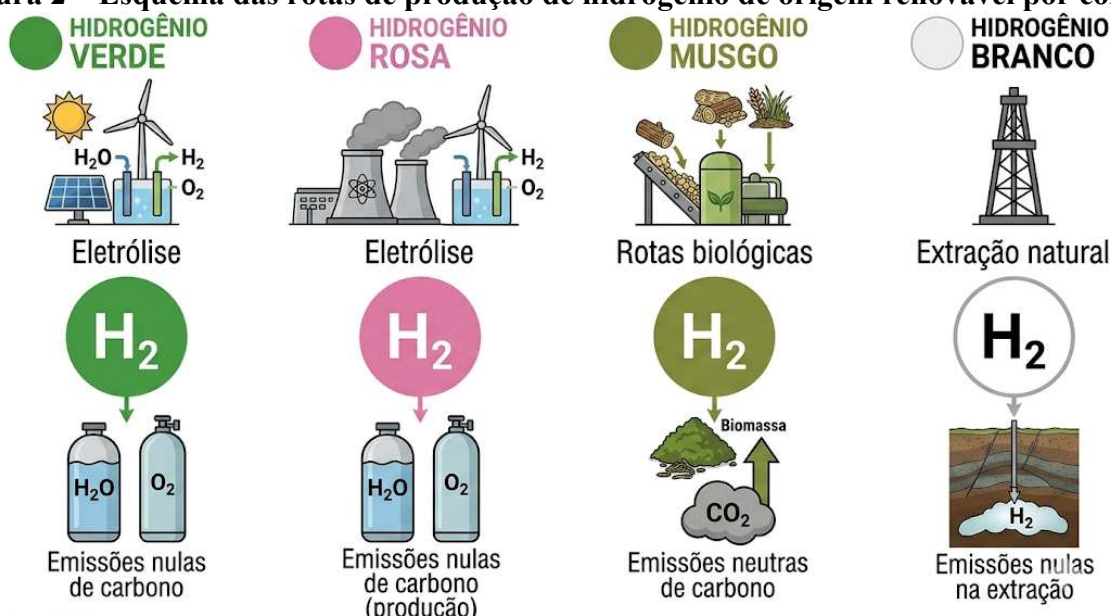
Figura 1 – Esquema das rotas de produção de hidrogênio de origem fóssil por cores



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando a inteligência artificial Gemini, da Google (2026)

Já a Figura 2 apresenta as rotas de origem renovável, nuclear e natural, que vêm ganhando destaque nas estratégias de transição energética. O hidrogênio verde é produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente exclusivamente de fontes renováveis, como energia solar, eólica e hidráulica, sendo amplamente reconhecido como a rota de menor impacto ambiental. O hidrogênio rosa, também denominado hidrogênio púrpura, é obtido pelo mesmo processo de eletrólise, porém utilizando energia nuclear como fonte de eletricidade, o que também resulta em baixas emissões de carbono. O hidrogênio musgo é produzido por rotas biológicas, como a fermentação escura e a fotofermentação, nas quais microrganismos convertem biomassa ou resíduos orgânicos em hidrogênio. Por sua vez, o hidrogênio branco corresponde ao hidrogênio de ocorrência natural presente em reservatórios geológicos subterrâneos, constituindo uma alternativa ainda em fase de prospecção e pesquisa.

Figura 2 – Esquema das rotas de produção de hidrogênio de origem renovável por cores



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando a inteligência artificial Gemini, da Google (2026)

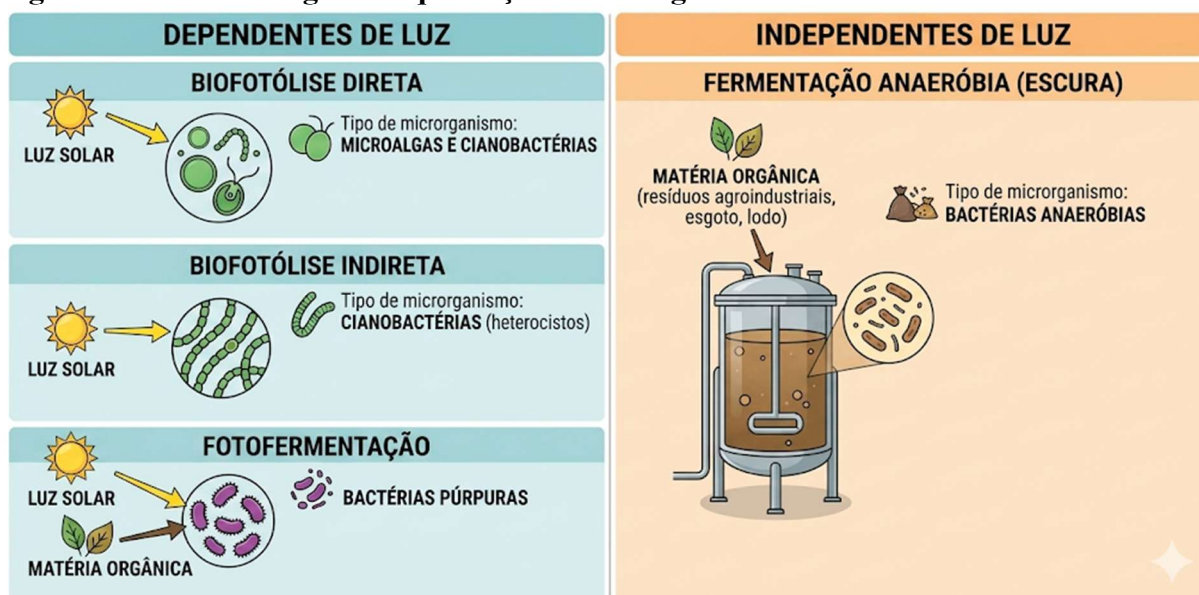
Essa classificação facilita a comparação entre as diferentes rotas de produção quanto às emissões de gases de efeito estufa, ao impacto ambiental e ao grau de maturidade tecnológica. Nesse contexto, rotas de menor intensidade de carbono, como o hidrogênio verde e o biológico, têm recebido destaque nas estratégias de transição energética (STAFFELL *et al.*, 2019).

2.2 Produção Biológica de Hidrogênio

A produção biológica de hidrogênio tem se consolidado como uma alternativa promissora às rotas convencionais de produção, principalmente por operar sob condições moderadas de temperatura e pressão e por possibilitar o aproveitamento de resíduos orgânicos como matéria-prima. Diferentemente de processos termoquímicos ou eletroquímicos, a via biológica baseia-se na atividade metabólica de microrganismos capazes de converter compostos orgânicos em H_2 por meio de reações enzimáticas específicas (PAUDEL *et al.*, 2015). Nesse contexto, o uso de substratos orgânicos provenientes de resíduos e efluentes torna essa abordagem especialmente relevante para estratégias de valorização de resíduos e economia circular.

Diversas rotas biotecnológicas têm sido investigadas para a produção de hidrogênio, as quais podem ser divididas em dois grandes grupos: processos dependentes de luz (fotofermentação, biofotólise direta e indireta) e processos independentes de luz (fermentação anaeróbia). A Figura 3 apresenta uma síntese dessas quatro rotas principais.

Figura 3 – Rotas biológicas de produção de hidrogênio



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando a inteligência artificial Gemini, da Google (2026)

Entre os processos dependentes de luz, a biofotólise direta ocorre quando microalgas ou cianobactérias utilizam a energia solar para promover a quebra da molécula de água, produzindo hidrogênio e oxigênio. Já a biofotólise indireta envolve etapas metabólicas distintas, nas quais os microrganismos inicialmente sintetizam compostos intermediários por meio da fotossíntese, que posteriormente são convertidos em hidrogênio. A fotofermentação, por sua vez, é realizada por bactérias fotossintéticas capazes de utilizar a energia luminosa para converter compostos orgânicos em hidrogênio.

Em contraste, a fermentação anaeróbia é um processo independente de luz, no qual bactérias degradam matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando hidrogênio como um dos produtos metabólicos da fermentação.

Entre essas rotas, os processos fermentativos têm se destacado devido à sua capacidade de utilizar substratos orgânicos complexos, incluindo resíduos agroindustriais e águas residuárias. Nesse contexto, processos como a fermentação escura possibilitam a conversão da matéria orgânica presente em efluentes em hidrogênio e outros subprodutos energéticos, conforme discutido por Das e Zeigler (2001).

Além da utilização de resíduos orgânicos, a fermentação anaeróbia apresenta vantagens operacionais importantes quando comparada às rotas fotobiológicas. Processos como a fotofermentação e a biofotólise dependem da disponibilidade de luz e, em muitos casos, requerem sistemas mais complexos de controle operacional. Em contrapartida, a fermentação

anaeróbia pode ser realizada em reatores fechados e já amplamente utilizados em estações de tratamento de esgoto, o que favorece sua aplicação em escala real.

Outro aspecto relevante é a compatibilidade dessa rota com a infraestrutura existente de saneamento. Reatores anaeróbios empregados no tratamento de águas residuárias já dispõem de condições adequadas para o desenvolvimento de comunidades microbianas fermentativas, permitindo que adaptações operacionais sejam utilizadas para direcionar o metabolismo para a produção de hidrogênio. Dessa forma, a fermentação anaeróbia tem sido considerada uma das alternativas mais promissoras para integrar recuperação energética e tratamento de efluentes em um mesmo sistema.

Considerando que as águas residuárias apresentam elevada carga de matéria orgânica e ampla diversidade microbiana, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) surgem como ambientes potencialmente favoráveis para a implementação da produção biológica de hidrogênio. No contexto deste trabalho, essa potencialidade é analisada a partir de dados representativos de esgoto sanitário real, permitindo avaliar a aplicabilidade dessas rotas em condições próximas à operação de uma estação de tratamento.

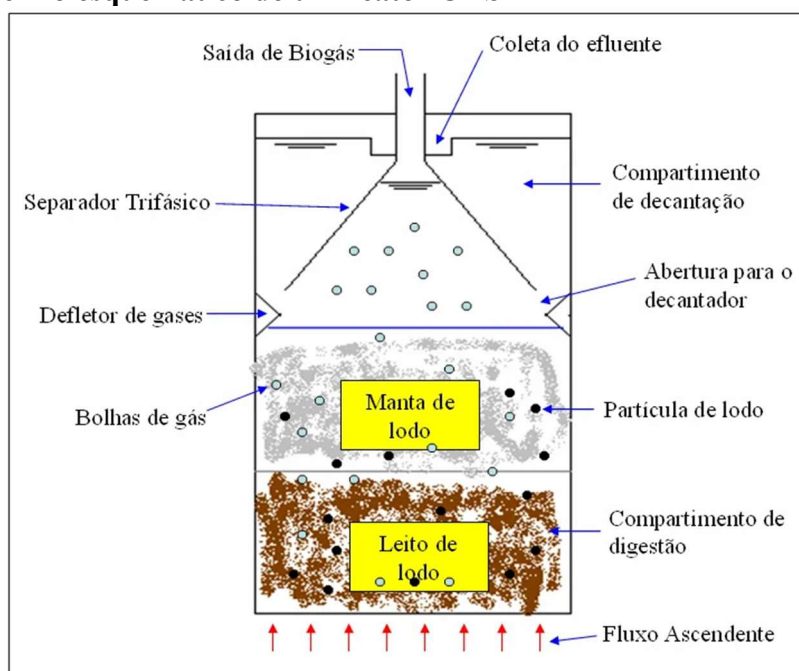
Dessa forma, sistemas de tratamento de águas residuárias podem assumir um papel estratégico na recuperação energética de resíduos, aproximando-se do conceito de biorrefinarias e economia circular (AZEVEDO, 2025; MAHATA *et al.*, 2023)

2.3 O reator UASB

Sistema anaeróbio amplamente utilizado no tratamento de esgotos sanitários e efluentes industriais, destacando-se pela elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e pelos baixos custos operacionais. Desenvolvido a partir dos estudos pioneiros de Lettinga *et al.* (1980), é atualmente uma das tecnologias mais consolidadas para o tratamento biológico de águas residuárias.

A Figura 4 apresenta um esquema representativo do reator UASB, no qual são ilustrados o fluxo ascendente do afluente, as zonas de lodo e os principais fluxos de saída do sistema.

Figura 4 – Desenho esquemático de um reator UASB



Fonte: Mota, Costa Jr. e Costa (2007)

Seu funcionamento baseia-se no escoamento ascendente do afluente através de um leito de lodo denso e com alta atividade microbológica. Ao ser introduzido na base do reator, o esgoto atravessa a biomassa, promovendo a degradação da matéria orgânica por meio de reações de oxirredução. Como resultado, os compostos orgânicos são convertidos em biogás — composto majoritariamente por metano e dióxido de carbono — e em um efluente líquido tratado (CHERNICHARO, 2007).

Ao longo do reator, estabelece-se um perfil de sólidos característico, no qual a concentração e a densidade da biomassa variam com a altura. Na região inferior encontra-se o leito de lodo, formado por grânulos mais densos e com elevada capacidade de sedimentação, enquanto na região superior predomina a manta de lodo, composta por partículas mais leves e dispersas (MOTA; COSTA JR.; COSTA, 2007).

Na parte superior, o reator dispõe de um sistema de separação trifásica, responsável pela separação das fases sólida, líquida e gasosa. O biogás é coletado, enquanto o efluente segue para a zona de decantação, onde partículas de lodo eventualmente arrastadas retornam à zona de reação. Esse mecanismo permite a manutenção de elevados tempos de retenção de sólidos, mesmo sob baixos tempos de detenção hidráulica (LETTINGA; HULSHOFF POL, 1991; MOTA; COSTA JR.; COSTA, 2007).

No contexto brasileiro, o reator UASB é amplamente utilizado no tratamento de esgoto doméstico em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) de diferentes portes. Sua ampla utilização está relacionada à sua robustez operacional, simplicidade construtiva, baixa produção de lodo e ao potencial de recuperação energética por meio do biogás gerado. Além disso, sua capacidade de operar com baixos custos de energia torna essa tecnologia especialmente adequada à realidade dos sistemas de saneamento no Brasil (CHERNICHARO, 2007). Essa adequação é particularmente relevante para o presente estudo, uma vez que o modelo desenvolvido considera condições típicas de operação de ETEs brasileiras.

Além de sua aplicação convencional no tratamento de efluentes com produção de biogás, o reator UASB apresenta características operacionais que permitem diferentes estratégias de aproveitamento energético, dentre as quais se destaca sua operação em regime acidogênico para a produção de hidrogênio.

2.4 O Reator UASB na Produção de Hidrogênio

A produção de hidrogênio em reatores UASB ocorre por meio do ajuste das condições operacionais, de forma a favorecer rotas fermentativas em detrimento da digestão anaeróbia convencional. Essa estratégia permite direcionar o metabolismo microbiano para a formação de hidrogênio, possibilitando que o sistema atue não apenas no tratamento de efluentes, mas também na recuperação energética.

A adaptação do reator para esse fim depende do controle de variáveis que influenciam diretamente a atividade microbiana e o direcionamento das rotas metabólicas. Nessas condições, o processo passa a operar predominantemente em regime acidogênico, no qual a matéria orgânica é parcialmente convertida em hidrogênio e outros metabólitos intermediários.

Como consequência, o gás gerado no processo não é composto exclusivamente por hidrogênio, sendo formado também por dióxido de carbono, além de pequenas frações de outros compostos gasosos. Essa característica está diretamente associada à natureza fermentativa do processo e às múltiplas rotas metabólicas envolvidas na degradação da matéria orgânica.

Dessa forma, o hidrogênio produzido por via fermentativa em reatores UASB não é obtido em elevada pureza, estando associado a outros gases, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), vapor d'água e traços de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Assim, para aplicações energéticas mais exigentes, torna-se necessária a adoção de etapas posteriores de separação e

purificação do gás. Esse aspecto evidencia que a produção de hidrogênio em sistemas anaeróbios deve ser compreendida de forma integrada, envolvendo não apenas o reator biológico, mas também etapas complementares de processamento do gás.

A compreensão desses aspectos é fundamental para a modelagem do sistema proposta neste trabalho, que busca representar o comportamento de um reator UASB operado em regime acidogênico.

2.4.1 Processo metabólico no reator UASB para a produção de hidrogênio

Para compreender a formação do hidrogênio no reator UASB, é necessário analisar os processos metabólicos envolvidos na digestão anaeróbia. No interior do reator, a matéria orgânica presente no esgoto sanitário é degradada por um consórcio de microrganismos anaeróbios, resultando na formação de produtos gasosos e líquidos (BRAGA, 2014).

A digestão anaeróbia pode ser dividida em quatro etapas metabólicas principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (AZEVEDO, 2025; MOTA; COSTA JR.; COSTA, 2007). Entretanto, quando o reator UASB é operado com o objetivo de produzir hidrogênio, o interesse concentra-se nas fases iniciais do processo, especialmente na acidogênese, etapa na qual ocorre a formação de hidrogênio como subproduto da fermentação anaeróbia (PAUDEL *et al.*, 2015).

2.4.1.1 Hidrólise

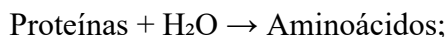
Representa a etapa inicial da digestão anaeróbia e consiste na degradação de compostos orgânicos complexos presentes no esgoto sanitário — como proteínas, lipídios e carboidratos — em moléculas menores e solúveis, por meio da ação de enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas. Em sistemas que utilizam esgoto sanitário como substrato, essa etapa possui grande relevância, uma vez que parcela significativa da matéria orgânica se encontra inicialmente em forma particulada ou complexa, exigindo sua prévia solubilização para que possa ser assimilada pelos microrganismos fermentativos nas etapas seguintes (BRAGA, 2014);

De forma simplificada, a hidrólise pode ser representada pelas seguintes reações:

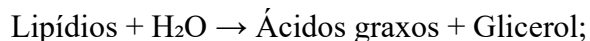
Hidrólise de carboidratos (polissacarídeos):



Hidrólise de proteínas:



Hidrólise de lipídios:



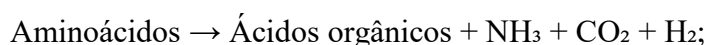
2.4.1.2 Acidogênese

Durante a acidogênese, os produtos da hidrólise são convertidos por bactérias fermentativas em ácidos orgânicos voláteis, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono. Diferentes rotas metabólicas podem ocorrer, dependendo do substrato disponível:

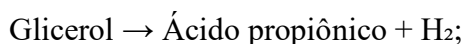
A partir de glicose:



A partir de aminoácidos:



A partir de glicerol:



A equação de conversão da glicose representa uma das possíveis vias metabólicas realizadas por bactérias fermentativas, como as do gênero *Clostridium*. Em sistemas reais, diversas rotas ocorrem simultaneamente, resultando na formação de diferentes produtos — como acetato, butirato, propionato, etanol e lactato — dependendo das condições operacionais do reator (PAUDEL *et al.*, 2015). Entre esses possíveis produtos, o hidrogênio ocupa uma posição especial, pois sua formação não é apenas um subproduto qualquer, mas uma peça-chave no metabolismo energético da célula.

Isso ocorre porque a formação de hidrogênio nessas rotas fermentativas está diretamente associada ao equilíbrio redox intracelular dos microrganismos. Durante o metabolismo, cofatores como o NAD^+ atuam como aceptores de elétrons em reações catabólicas, sendo reduzidos a NADH. Para que o metabolismo celular seja mantido, é essencial que esse NADH seja reoxidado a NAD^+ , permitindo a continuidade das reações bioquímicas. Nesse contexto, uma das principais vias de regeneração do NAD^+ ocorre por meio da ação de enzimas

hidrogenases, que transferem elétrons do NADH para prótons (H^+), resultando na formação de hidrogênio molecular (H_2).

Dessa forma, a produção de hidrogênio não deve ser compreendida apenas como um subproduto do metabolismo, mas como um mecanismo essencial para a manutenção do balanço redox celular. Entretanto, o acúmulo de hidrogênio dissolvido no meio pode dificultar essa reoxidação, tornando o processo termodinamicamente desfavorável e levando ao redirecionamento do metabolismo para outras rotas fermentativas, como a formação de compostos mais reduzidos, o que impacta diretamente o rendimento de produção de hidrogênio;

2.4.1.3 Acetogênese

Parte dos compostos formados durante a acidogênese é convertida em intermediários mais simples, principalmente acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. Esse processo é conduzido por bactérias acetogênicas responsáveis pela transformação de ácidos orgânicos de cadeia mais longa e álcoois em compostos que, em sistemas anaeróbios convencionais, serviriam como substrato para as arqueias metanogênicas (BRAGA, 2014);

2.4.1.4 Metanogênese

A metanogênese constitui a etapa final da digestão anaeróbia e é realizada por arqueias metanogênicas que utilizam principalmente acetato, hidrogênio e dióxido de carbono para produzir metano. Em reatores UASB convencionais, essa etapa é responsável pela conversão final dos intermediários metabólicos em biogás;

Quando o objetivo é a produção de hidrogênio, torna-se necessário inibir o desenvolvimento das arqueias metanogênicas, uma vez que esses microrganismos consomem o hidrogênio produzido nas etapas anteriores. Dessa forma, a operação em regime acidogênico depende do controle de condições que favoreçam bactérias fermentativas e restrinjam o crescimento de microrganismos consumidores de hidrogênio.

Nessa condição operacional, o processo anaeróbio é interrompido antes da metanogênese. Do ponto de vista quantitativo, sistemas operados em regime acidogênico apresentam eficiências de remoção de DQO significativamente inferiores às observadas em sistemas metanogênicos. Estudos experimentais indicam que essas eficiências se situam tipicamente na faixa de 10% a 40%, podendo variar conforme as condições operacionais e o

tipo de substrato. Paudel *et al.* (2015) reportaram valores entre 26% e 30%, enquanto estudos com esgoto sanitário real indicam eficiências ainda menores, frequentemente inferiores a 20%.

Essa característica não deve ser interpretada como uma limitação, mas sim como uma consequência da interrupção do processo antes da completa mineralização da matéria orgânica. Nessa etapa, a matéria orgânica é convertida em hidrogênio e metabólitos intermediários solúveis — como ácidos graxos voláteis e álcoois — que permanecem no efluente contribuindo para a DQO residual. Sob essa perspectiva, a produção de hidrogênio pode ser compreendida como uma etapa de pré-tratamento associada à recuperação energética, na qual a conversão parcial do substrato é seguida por processos complementares responsáveis pela estabilização final do efluente. Estratégias como sistemas em duas etapas, combinando reatores acidogênicos e metanogênicos, ou a aplicação de processos aeróbios subsequentes, são amplamente discutidas na literatura como alternativas para otimizar o desempenho global do sistema.

Nesse contexto, o processo deve ser analisado de forma integrada, considerando não apenas o reator UASB operado em regime acidogênico, mas também as etapas anteriores e posteriores de tratamento. A Figura 5 apresenta uma vista aérea da ETE Laboreaux, localizada em Itabira (MG), uma estação de tratamento de esgoto em escala plena que utiliza reatores UASB.

Figura 5 – Vista aérea da ETE LABOREAUX, com identificação das principais unidades

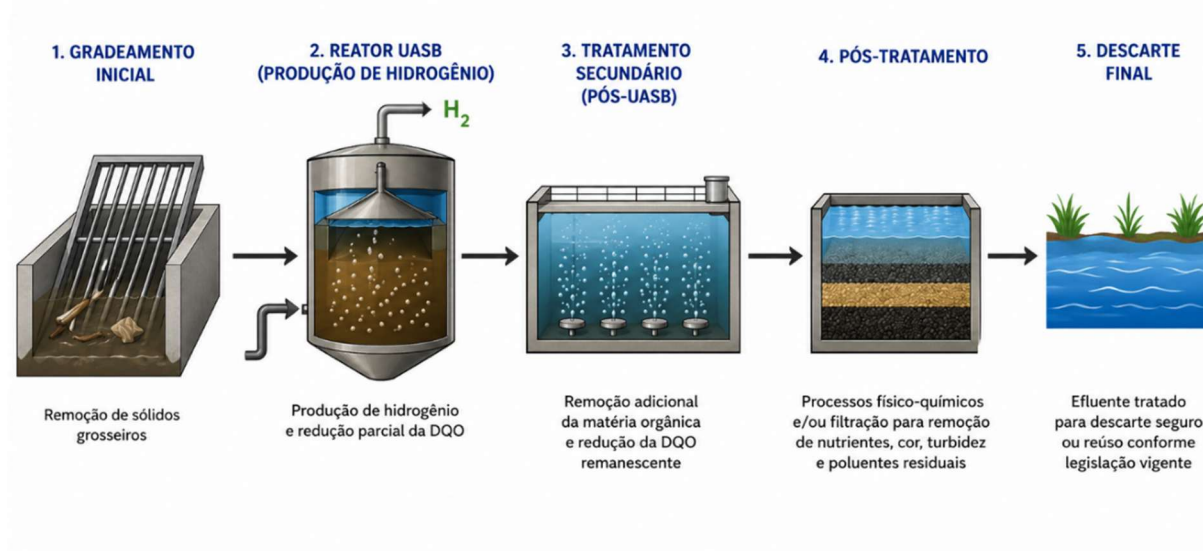


Fonte: Couto et al. (2009)

Com base nessa configuração real, a Figura 6 apresenta uma adaptação conceitual desse arranjo para a produção de hidrogênio. Nessa proposta, o reator UASB deixa de ser operado de forma convencional — voltado à remoção de matéria orgânica e geração de metano — e passa

a operar em regime acidogênico, favorecendo a formação de H_2 como produto principal. As demais etapas de tratamento são mantidas para assegurar a estabilização final do efluente e o atendimento aos padrões ambientais de lançamento.

Figura 6 – Fluxo do processo de produção de hidrogênio com reator UASB a partir de esgoto sanitário



Fonte: Elaborado pelo autor utilizando a inteligência artificial Chat GPT (2026)

Inicialmente, o esgoto bruto passa por uma etapa de pré-tratamento, como o gradeamento, com o objetivo de remover sólidos grosseiros e evitar interferências operacionais no reator. Em seguida, o efluente é direcionado ao reator UASB, onde ocorre a conversão parcial da matéria orgânica em hidrogênio por meio de processos fermentativos. Posteriormente, devido à elevada concentração de matéria orgânica residual, o efluente deve ser submetido a uma etapa adicional de tratamento biológico, responsável pela remoção complementar da DQO. Por fim, processos de pós-tratamento são aplicados para garantir a adequação do efluente às condições de descarte.

2.4.2 Parâmetros Operacionais para Produção de Hidrogênio em Reatores UASB

A produção de hidrogênio em reatores UASB depende do controle de variáveis operacionais que influenciam diretamente a atividade microbiana, a cinética das reações bioquímicas e o rendimento do processo, destacando-se o pH, a temperatura, o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a carga orgânica volumétrica (COV) (PAUDEL *et al.*, 2015).

2.4.2.1 pH

Constitui um dos parâmetros operacionais mais importantes no controle da produção de hidrogênio em reatores UASB, uma vez que influencia diretamente a atividade metabólica dos microrganismos e o direcionamento das rotas bioquímicas da digestão anaeróbia.

Estudos experimentais indicam que a produção de hidrogênio é favorecida em condições levemente ácidas, tipicamente na faixa de pH entre 5,0 e 5,5, nas quais ocorre o predomínio da atividade de bactérias fermentativas e a inibição de microrganismos metanogênicos (PAUDEL *et al.*, 2015).

Entretanto, em sistemas reais de tratamento de esgoto sanitário, o controle rigoroso do pH nessa faixa pode ser limitado, devido à baixa concentração de substratos facilmente fermentáveis e à capacidade tampão do meio. Nesses casos, o pH tende a permanecer em valores próximos à neutralidade, frequentemente entre 5,5 e 6,5, o que pode reduzir a eficiência da produção de hidrogênio, mas favorece maior estabilidade operacional do sistema.

Dessa forma, observa-se um compromisso entre condições ótimas de produção de hidrogênio e viabilidade operacional em escala real, sendo o ajuste do pH um dos principais desafios para aplicação prática do processo em estações de tratamento de esgoto;

2.4.2.2 Temperatura

Um dos parâmetros operacionais mais críticos na digestão anaeróbia é a temperatura, pois ela governa tanto a termodinâmica quanto a cinética das reações bioquímicas, além de determinar a estrutura e a diversidade do consórcio microbiano presente no reator UASB (BRAGA, 2014). No contexto da produção de biohidrogênio, a temperatura influencia diretamente a atividade das enzimas hidrogenases e a solubilidade dos gases no meio líquido, afetando a transferência de massa do H₂ produzido.

Tradicionalmente, os processos anaeróbios são classificados em três faixas térmicas: psicrófila, mesófila e termófila. A faixa psicrófila, caracterizada por temperaturas inferiores a 25 °C, apresenta taxas metabólicas reduzidas. Embora corresponda à temperatura natural de muitos efluentes, geralmente requer tempos de detenção hidráulica (TDH) elevados para compensar a baixa atividade biológica, o que pode inviabilizar a produção de hidrogênio em sistemas de alta taxa (PEIXOTO, 2011).

A faixa mesófila, compreendida entre 30 e 40 °C, é a mais amplamente utilizada em sistemas de tratamento de esgoto sanitário, por proporcionar um equilíbrio favorável entre estabilidade biológica e baixo custo energético. Segundo Paudel *et al.* (2015), essa faixa permite a manutenção de um consórcio microbiano acidogênico relativamente estável, possibilitando a produção de hidrogênio a partir de águas residuárias domésticas quando o pH é mantido em condições levemente ácidas. Em reatores UASB, a operação em condições mesofílicas também contribui para a estabilidade da manta de lodo granular, favorecendo a retenção de biomassa e a manutenção da integridade dos grânulos microbianos ao longo da operação. Além disso, temperaturas moderadas tendem a proporcionar maior estabilidade ao consórcio microbiano e ao processo anaeróbio, especialmente em sistemas que utilizam esgoto sanitário como substrato principal (AZEVEDO, 2025; PAUDEL *et al.*, 2015).

Por sua vez, a faixa termófila, situada entre 50 e 60 °C, está associada a maiores taxas metabólicas e, em alguns casos, a maiores taxas específicas de produção de hidrogênio. Braga (2014) destaca que o regime termofílico acelera etapas importantes da digestão anaeróbia, como a hidrólise e a acidogênese, além de favorecer a inibição natural de microrganismos competidores, como as arqueias metanogênicas, que tendem a ser mais sensíveis a temperaturas elevadas do que bactérias fermentativas formadoras de esporos pertencentes ao gênero *Clostridium*.

Apesar das vantagens associadas ao regime termofílico, sua aplicação no tratamento de esgoto sanitário apresenta limitações operacionais e energéticas. Paudel *et al.* (2015) observam que, devido à baixa carga orgânica característica do esgoto doméstico, o balanço energético do sistema pode se tornar desfavorável, uma vez que a energia necessária para aquecer o reator pode superar a energia potencialmente recuperada na forma de hidrogênio. Além disso, sistemas termofílicos tendem a apresentar menor estabilidade operacional e maior sensibilidade a choques de carga e variações ambientais quando comparados aos sistemas mesofílicos (PEIXOTO, 2011). Dessa forma, embora temperaturas mais elevadas possam favorecer determinadas rotas fermentativas e aumentar o potencial de produção de hidrogênio, a operação na faixa mesofílica é frequentemente considerada a alternativa mais viável para aplicações em escala real que utilizam esgoto sanitário como substrato.

2.4.2.3 Tempo de Detenção Hidráulica (TDH)

Funciona como um filtro cinético essencial, explorando as diferentes taxas de crescimento específico entre as bactérias fermentativas e as arqueias metanogênicas. Enquanto sistemas metanogênicos operam com TDHs elevados para permitir o estabelecimento de arqueias, que apresentam crescimento mais lento, a produção de hidrogênio exige o contrário: a aplicação de tempos reduzidos para promover o arraste seletivo (*washout*) dos microrganismos competidores.

A literatura indica que a faixa de TDH mais utilizada para produção fermentativa de hidrogênio em sistemas anaeróbios varia entre 2 e 8 horas, dependendo do equilíbrio desejado entre produtividade máxima e estabilidade operacional. Em geral, TDHs reduzidos favorecem a atividade acidogênica e a seleção de bactérias fermentativas, enquanto tempos mais elevados contribuem para maior estabilidade do sistema, especialmente em reatores alimentados com esgoto sanitário, que apresenta baixa concentração de carboidratos facilmente fermentáveis.

Conforme observado por Braga (2014), em experimentos com reator UASB termofílico operando com TDHs de 12, 6 e 2 horas, o menor TDH avaliado apresentou melhor desempenho para produção de hidrogênio a partir de sacarose. Resultados semelhantes também foram relatados por outros autores citados por Braga (2014), como Shida (2008) e Fernandes (2008), que identificaram bons rendimentos em sistemas operando com TDH próximo de 2 horas. Esse comportamento ocorre porque baixos tempos de detenção atuam como um mecanismo seletivo contra arqueias metanogênicas, favorecendo bactérias acidogênicas de crescimento rápido e aumentando a atividade fermentativa produtora de hidrogênio.

Além do efeito microbiológico, a redução do TDH também influencia a dinâmica hidráulica do reator. Tempos menores aumentam a velocidade ascensional do fluxo, favorecendo a transferência de massa e o desprendimento do hidrogênio dissolvido para a fase gasosa. Entretanto, velocidades excessivas podem provocar expansão exagerada do leito, desintegração de grânulos e perda de biomassa ativa por arraste, como observado por Carvalho (2006) em estudos com reatores UASB tratando esgoto sanitário.

Para efluentes complexos como o esgoto sanitário, TDHs muito reduzidos podem comprometer a estabilidade operacional do sistema. Peixoto (2011), ao investigar a produção de hidrogênio utilizando misturas de esgoto sanitário e vinhaça, observou que o TDH de 2 horas foi inadequado para manter a produção estável ao longo do tempo, devido principalmente ao

arraste excessivo de biomassa ativa. Em contrapartida, tempos mais elevados proporcionaram maior estabilidade operacional em reatores anaeróbios alimentados com esgoto.

Outro fator limitante está associado à própria composição do substrato. Diferentemente de águas residuais sintéticas ou suplementadas com sacarose, o esgoto sanitário apresenta baixa disponibilidade de carboidratos facilmente biodegradáveis. Dessa forma, embora TDHs baixos favoreçam a rota acidogênica, valores excessivamente reduzidos podem dificultar a manutenção da biomassa fermentativa ativa, especialmente em sistemas contínuos operando sem suplementação orgânica.

Além dos efeitos relacionados à seleção microbiana e à estabilidade hidráulica, o TDH também influencia o equilíbrio redox intracelular. Braga (2014) explica que o acúmulo de hidrogênio dissolvido no meio líquido pode tornar a oxidação do NADH em NAD^+ termodinamicamente desfavorável. Durante a fermentação, a reoxidação do NADH é necessária para que o metabolismo microbiano continue ocorrendo, sendo frequentemente realizada por meio da formação de hidrogênio. Quando o H_2 se acumula no meio, esse processo torna-se menos eficiente, favorecendo o redirecionamento metabólico para rotas fermentativas alternativas, como a formação de propionato, que consomem elétrons e reduzem o potencial de produção de hidrogênio.

Simulações matemáticas aplicadas a reatores UASB granulares também indicam que TDHs inferiores a 3 horas podem levar à falha operacional do sistema devido à perda excessiva de biomassa ativa. Dessa forma, embora TDHs próximos de 2 horas sejam frequentemente associados às maiores taxas de produção de hidrogênio, sua aplicação em sistemas reais deve considerar limitações operacionais relacionadas à estabilidade do leito biológico e à baixa concentração de substratos fermentáveis presentes no esgoto sanitário.

2.4.2.4 Carga Orgânica Volumétrica

Representa a quantidade de matéria orgânica aplicada ao reator — expressa em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO) — por unidade de volume e tempo. Esse parâmetro é geralmente mensurado em $\text{kg DQO/m}^3 \text{ d}$ e, no contexto da produção de biohidrogênio em reatores UASB, exerce papel fundamental, pois determina a disponibilidade de substrato para as bactérias fermentativas e influencia diretamente a intensidade das reações acidogênicas (PEIXOTO, 2011).

Entretanto, o esgoto sanitário apresenta uma limitação para a produção de hidrogênio devido à sua relativamente baixa concentração de matéria orgânica. Em águas residuárias domésticas, a DQO geralmente varia de menos de 400 até mais de 1500 mg/L, dependendo das características do esgoto e do nível de diluição (PAUDEL *et al.*, 2015). Essa característica pode resultar em cargas orgânicas aplicadas relativamente baixas, reduzindo a disponibilidade de substrato para as bactérias fermentativas.

Nesse contexto, a literatura aponta que a redução do TDH constitui uma estratégia operacional para elevar a COV em sistemas que tratam águas residuárias domésticas. A redução do TDH também contribui para o aumento da carga orgânica aplicada ao reator, favorecendo o metabolismo fermentativo e resultando em maior produção de hidrogênio em sistemas anaeróbios operados em regime acidogênico

Estudos indicam que, devido à baixa concentração de carboidratos facilmente biodegradáveis no esgoto sanitário, a produção de hidrogênio pode ser limitada quando esse efluente é utilizado como único substrato. Peixoto (2011) observou que a produção contínua de hidrogênio em sistemas anaeróbios tratando esgoto sanitário somente foi possível quando houve adição de fontes externas de carboidratos, evidenciando a importância da disponibilidade de substratos fermentáveis para a viabilidade do processo.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo matemático para simular o comportamento dinâmico da produção de hidrogênio, do consumo de substrato (expresso em termos de Demanda Química de Oxigênio – DQO) e do crescimento microbiano em um reator UASB, utilizando a linguagem Python. A abordagem adotada é quantitativa, baseada em modelagem fenomenológica, com o objetivo de descrever o comportamento do sistema por meio de equações diferenciais ordinárias.

3.1 Desenvolvimento do modelo fenomenológico

O modelo proposto tem como objetivo representar, de forma simplificada, a dinâmica do consumo de substrato, do crescimento microbiano e da produção de hidrogênio a partir da atividade microbiana em um reator contínuo.

As variáveis de estado que descrevem o comportamento dinâmico do sistema são três: a concentração de substrato (S), expressa em mg DQO/L; a concentração de biomassa ativa (X), expressa em mg SSV/L; e a concentração de hidrogênio produzido (H₂), expressa em mol/L. A evolução temporal dessas variáveis é governada pelo sistema de equações diferenciais ordinárias apresentado a seguir.

A construção do modelo inicia-se pela descrição da taxa de crescimento dos microrganismos, a qual foi representada por meio da cinética proposta por Jacques Monod, como pode ser visto na Equação (1), amplamente utilizada na modelagem de processos biológicos (MONOD, 1949; DORAN, 2013).

A taxa específica de crescimento microbiano é dada por:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{(K_S + S)} \quad (1)$$

em que μ representa a taxa específica de crescimento, μ_{max} taxa máxima de crescimento microbiano, S a concentração de substrato no reator e K_S a constante de meia-saturação. Conforme apresentado na Equação (1), a taxa de crescimento depende diretamente da disponibilidade de substrato, aumentando com sua concentração até atingir um regime de saturação, comportamento típico de processos biológicos limitados por substrato.

Além da dependência da concentração de substrato, a atividade microbiana em sistemas anaeróbios é fortemente influenciada por condições ambientais, em especial o pH. Dessa forma, a taxa de crescimento foi modificada por um fator corretivo, representando a influência do pH por meio de uma função gaussiana centrada em um valor ótimo, conforme a Equação (2):

$$f(pH) = \exp\left(-\frac{(pH - pH_{opt})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

em que pH_{opt} representa o valor ótimo de operação e σ está associado à sensibilidade do sistema às variações de pH. Essa abordagem permite representar a redução da atividade microbiana em condições fora da faixa ideal, refletindo o comportamento observado em sistemas acidogênicos.

Assim, considerando simultaneamente a limitação por substrato (Equação 1) e o efeito do pH (Equação 2), a taxa de crescimento microbiano passa a ser expressa na Equação (3) como:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S}{(K_S + S)} \cdot f(pH) \quad (3)$$

A partir da definição da taxa de crescimento microbiano apresentada na Equação (3), estabelece-se a dinâmica da biomassa no interior do reator. Considerando a operação em regime contínuo, a variação da concentração de microrganismos resulta do balanço entre crescimento celular, decaimento microbiano e remoção de biomassa pelo escoamento, sendo expressa pela Equação (4):

$$\frac{dX}{dt} = (\mu - b - D)X \quad (4)$$

em que X representa a concentração de biomassa, D a taxa de diluição do sistema e b o coeficiente de decaimento microbiano. A taxa de diluição, Equação (5), pode ser expressa como:

$$D = \frac{Q}{V} \quad (5)$$

em que Q representa a vazão de alimentação e V o volume do reator. O tempo de detenção hidráulica (TDH) é dado pela relação $TDH = V/Q$, sendo, portanto, o inverso da taxa de diluição

(TDH = 1/D), e tratado neste trabalho como uma variável dependente das condições operacionais do sistema.

Dessa forma, conforme a Equação (4), o crescimento da biomassa depende diretamente da taxa de crescimento microbiano (Equação 3) e das perdas associadas ao decaimento e ao arraste hidráulico.

Com base na definição da taxa de crescimento microbiano (Equação 3), pode-se descrever o comportamento do substrato no reator. A variação da concentração de substrato é determinada pela entrada de alimentação, pela saída do sistema e pelo consumo biológico associado ao crescimento microbiano, sendo expressa conforme a Equação (6) por:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_{in} - S) - \left(\frac{1}{Y_X}\right) \cdot \mu X \quad (6)$$

em que S_{in} representa a concentração de substrato na alimentação e Y_X o rendimento de conversão do substrato em biomassa. Conforme a Equação (6), observa-se a competição entre o termo de alimentação, $D(S_{in} - S)$, e o termo de consumo biológico, $\left(\frac{1}{Y_X}\right) \cdot \mu X$, sendo este último diretamente dependente da taxa de crescimento definida na Equação (3). O equilíbrio entre esses termos determina o comportamento dinâmico do substrato ao longo do tempo.

A produção de hidrogênio foi modelada como uma variável acumulativa associada à atividade microbiana, sendo proporcional à taxa de crescimento (Equação 3) e à concentração de biomassa.

Entretanto, em sistemas reais, parte do hidrogênio produzido pode ser consumida por microrganismos metanogênicos. Para representar esse efeito, foi incorporado ao modelo um termo de consumo proporcional à concentração de hidrogênio, a Equação (7), modulado por uma função sigmoïdal dependente do tempo de detenção hidráulica (TDH):

$$f(TDH) = \frac{1}{1 + e^{-k(TDH - TDH_{crit})}} \quad (7)$$

em que TDH_{crit} representa um valor crítico a partir do qual a atividade metanogênica se intensifica, e o parâmetro k está associado à inclinação da curva sigmoïdal e controla a rapidez com que ocorre a transição entre um regime de baixa e alta atividade metanogênica em função do TDH.

Esse termo permite representar o aumento da atividade de microrganismos consumidores de hidrogênio em condições de maior tempo de retenção, refletindo a competição metabólica entre bactérias fermentativas e arqueias metanogênicas.

Dessa forma, a taxa de variação do hidrogênio passa a ser expressa na Equação (8) como:

$$\frac{dH_2}{dt} = Y_{H_2} \left(\frac{1}{Y_X} \right) \cdot \mu X - k_m (1 + \alpha \cdot f(TDH)) H_2 \quad (8)$$

em que H_2 representa a concentração de hidrogênio no sistema, expressa em mol/L.

O primeiro termo representa a produção biológica de hidrogênio, sendo proporcional ao consumo de substrato e ao rendimento Y_{H_2} . O segundo termo representa o consumo de H_2 pela atividade metanogênica, modelado como uma cinética de primeira ordem. A expressão $(1 + \alpha \cdot f(TDH))$ atua como fator de intensificação: em TDHs baixos, $f(TDH) \approx 0$ e o consumo se aproxima da taxa base k_m ; em TDHs elevados, $f(TDH) \approx 1$ e o consumo é amplificado pelo fator $(1 + \alpha)$.

Dessa forma, as Equações (3), (4), (6) e (8) constituem um sistema de equações diferenciais ordinárias acopladas que descrevem a evolução temporal do substrato, da biomassa e do hidrogênio no reator UASB. O modelo apresenta caráter fenomenológico, pois descreve o sistema por meio de relações empíricas, sem detalhar explicitamente os mecanismos bioquímicos intermediários.

Embora existam modelos mais complexos para a descrição da digestão anaeróbia, como o *Anaerobic Digestion Model No 1* (ADM1) (BATSTONE *et al.*, 2002), sua aplicação requer um elevado número de parâmetros cinéticos e estequiométricos, frequentemente de difícil obtenção para sistemas reais de tratamento de esgoto sanitário. Assim, optou-se pela utilização de um modelo simplificado, capaz de representar os principais fenômenos envolvidos com menor complexidade matemática e computacional.

3.2 Implementação computacional

A resolução do sistema de equações diferenciais foi realizada por meio de simulação numérica utilizando a linguagem de programação Python. Para a implementação do modelo, foram utilizadas bibliotecas amplamente consolidadas na área de computação científica, como

NumPy, para manipulação de dados, e SciPy, para a resolução numérica das equações diferenciais.

A integração do sistema foi conduzida por meio da função *solve_ivp*, pertencente ao módulo *scipy.integrate*, que utiliza métodos numéricos adaptativos para a solução de problemas de valor inicial. Essa abordagem permite obter a evolução temporal das variáveis de estado com adequada precisão e estabilidade numérica.

Durante a simulação, o sistema de equações é resolvido ao longo do tempo, possibilitando a atualização contínua das variáveis de estado — concentração de substrato, concentração de biomassa e produção acumulada de hidrogênio — conforme as relações estabelecidas no modelo matemático.

3.3 Hipóteses do modelo

Para viabilizar a modelagem matemática, foram adotadas hipóteses simplificadoras com o objetivo de reduzir a complexidade do sistema, mantendo a representação dos principais fenômenos envolvidos.

Assumiu-se que o reator opera em regime contínuo e perfeitamente misturado, não havendo variações espaciais nas concentrações das variáveis de estado. Considerou-se também que a biomassa é representada por uma única população microbiana, desconsiderando a diversidade presente em sistemas anaeróbios reais.

A produção de hidrogênio foi considerada diretamente proporcional ao crescimento microbiano, não sendo explicitamente modeladas as etapas metabólicas intermediárias da digestão anaeróbia, como hidrólise, acidogênese e acetogênese. Dessa forma, o modelo representa o comportamento global do processo, sem detalhamento das rotas bioquímicas envolvidas.

Adicionalmente, foram desconsiderados efeitos de inibição, como aqueles associados ao acúmulo de hidrogênio dissolvido ou de metabólitos intermediários, bem como variações dinâmicas de temperatura, assumindo-se condições operacionais constantes ao longo da simulação.

A formação de metabólitos intermediários, como ácidos graxos voláteis, também não foi modelada explicitamente, sendo considerada implicitamente no comportamento global do sistema.

3.4 Condições de simulação

Diferentemente de uma simulação pontual, neste trabalho foi adotada uma abordagem paramétrica, na qual múltiplos cenários foram avaliados a partir da variação sistemática de parâmetros operacionais. Em particular, o pH e o tempo de detenção hidráulica (TDH) foram variados sistematicamente durante as simulações, permitindo avaliar a influência conjunta das condições ácido-base e do tempo de retenção sobre o desempenho do sistema.

Com o objetivo de investigar diferentes condições operacionais para produção fermentativa de hidrogênio em reatores UASB, foram definidos dois cenários distintos de alimentação do sistema, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros fixos e condições iniciais

Parâmetro	Símbolo	Cenário 1	Cenário 2	Unidade
Vazão de alimentação	Q	387.000,00	387.000,00	L/h
Concentração de entrada	S _{in}	731,50	1045,00	mg DQO/L
Biomassa inicial	X ₀	100,00	100,00	mg SSV/L
pH	pH	5,0–6,0	5,0–6,0	–
Tempo de detenção hidráulica	TDH	1–10	1–10	h

Fonte: O autor (2026)

No primeiro cenário, o sistema foi analisado como uma etapa simultânea de recuperação energética e pré-tratamento de esgoto sanitário. Nesse caso, a concentração de entrada foi fixada em 731,5 mg/L em termos de DQO, valor representativo de esgoto sanitário com elevada carga orgânica. O objetivo operacional consistiu em promover remoção parcial da matéria orgânica associada à produção de hidrogênio, mantendo o reator em regime predominantemente acidogênico. Assim, o efluente gerado após o UASB apresentaria menor carga orgânica e seguiria posteriormente para uma etapa complementar de tratamento destinada à estabilização final antes do descarte ambiental.

No segundo cenário, foram consideradas condições de maior disponibilidade de matéria orgânica afluente, representando um enriquecimento da carga orgânica de alimentação. Esse

enriquecimento simula uma condição de codigestão, na qual o esgoto sanitário é suplementado com uma fonte externa de matéria orgânica rica em carboidratos, como soro de leite, melão de cana-de-açúcar ou efluentes de fecularia, estratégia documentada na literatura como alternativa para viabilizar a produção fermentativa de hidrogênio em sistemas que, de outra forma, seriam limitados pela baixa carga de substratos prontamente fermentáveis presentes no esgoto doméstico (PAKARINEN; LUOSTARINEN; RINTALA, 2008). Para representar essa condição, a concentração de entrada foi fixada em 1045,0 mg/L em termos de DQO. Nessa configuração, o reator atua predominantemente como uma etapa de conversão energética, promovendo a redução parcial da carga orgânica até valores próximos aos característicos de esgoto sanitário convencional, permitindo posteriormente o encaminhamento do efluente para sistemas biológicos convencionais de tratamento.

De maneira complementar, os parâmetros cinéticos apresentados na Tabela 2 foram selecionados de modo a descrever adequadamente a dinâmica biológica do sistema e representar, de forma simplificada, os principais fenômenos envolvidos na produção fermentativa de hidrogênio em reatores anaeróbios. Esses parâmetros foram definidos com base em valores típicos reportados na literatura para processos biológicos anaeróbios, permitindo reproduzir o comportamento esperado do consumo de substrato, do crescimento microbiano e da produção de hidrogênio ao longo das simulações.

Tabela 2 – Parâmetros cinéticos do modelo

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Taxa máxima de crescimento	$\mu_{\max}$	0,20	h^{-1}
Constante de meia-saturação	K_s	200,00	mg DQO/L
Coefficiente de decaimento	b	0,05	h^{-1}
Rendimento de biomassa	Y_X	0,085	mg SSV/mg DQO
Rendimento de hidrogênio	Y_{H_2}	5×10^{-6}	mol H_2 /mg DQO
Sensibilidade ao pH	σ	0,80	—
Constante metanogênica	k_m	0,02	h^{-1}
TDH crítico	TDHcrit	5,00	h
Fator de intensificação metanogênica	α	2,00	—

Fonte: O autor (2026)

A partir da combinação desses parâmetros e da variação controlada de pH e TDH, foi possível gerar um conjunto abrangente de simulações, permitindo avaliar o desempenho do

sistema em diferentes cenários operacionais e identificar tendências associadas à produção fermentativa de hidrogênio. Para a análise comparativa dos resultados, foi adotada como referência uma faixa de remoção de DQO próxima de 30%. Essa escolha está alinhada com a literatura sobre sistemas anaeróbios acidogênicos, nos quais remoções moderadas de DQO estão associadas à predominância da atividade fermentativa em detrimento da metanogênese.

O desempenho do sistema foi avaliado a partir da eficiência de remoção de substrato, expressa em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO), calculada pela razão entre a diferença da concentração de substrato afluente e a concentração residual no reator em relação à concentração de entrada, conforme a Equação (9):

$$\eta = \frac{S_{in} - S}{S_{in}} \quad (9)$$

Além disso, a análise da recuperação energética foi realizada por meio da produtividade volumétrica de hidrogênio, definida como a razão entre a produção total de hidrogênio obtida ao final da simulação e o produto entre o volume do reator e o tempo de operação considerado, conforme apresentado na Equação (10):

$$P_{H_2} = \frac{H_{2,total}}{V \cdot t} \quad (10)$$

em que P_{H_2} representa a produtividade volumétrica de hidrogênio (mol H_2 /(L·h)), $H_{2,total}$ corresponde à quantidade total de hidrogênio produzida durante o período de simulação (mol), V é o volume do reator (L) e t representa o tempo de operação considerado (h).

Dessa forma, priorizaram-se condições operacionais compatíveis com o regime acidogênico, evitando cenários de elevada remoção de matéria orgânica normalmente relacionados ao predomínio de arqueias metanogênicas. Os indicadores foram avaliados a partir dos valores obtidos ao final do período de simulação adotado para cada cenário operacional.

3.5 Parâmetros cinéticos e estequiométricos

A modelagem de processos biológicos depende de um conjunto de parâmetros que, idealmente, deveriam ser obtidos por experimentos realizados em condições controladas. Como este estudo não dispôs de dados experimentais próprios para o esgoto sanitário investigado, os parâmetros cinéticos e estequiométricos utilizados nas simulações (Tabela 2) foram

selecionados e adaptados com base em pesquisas publicadas sobre produção fermentativa de hidrogênio com culturas mistas e reatores anaeróbios. O objetivo foi garantir que o modelo representasse um comportamento biologicamente coerente, mesmo diante das simplificações adotadas.

A taxa máxima de crescimento específico ($\mu_{\max}$) foi fixada em $0,20 \text{ h}^{-1}$ para representar uma biomassa acidogênica ativa sob condições favoráveis à produção de hidrogênio. Para fins de comparação, Mohammadi, Ibrahim e Annur (2017), utilizando efluente de óleo de palma como substrato, obtiveram $\mu_{\max}$ igual a $0,313 \text{ d}^{-1}$, equivalente a aproximadamente $0,013 \text{ h}^{-1}$. Essa diferença evidencia a influência da biodegradabilidade do substrato sobre a cinética microbiana. Dessa forma, o valor adotado neste trabalho deve ser interpretado como uma condição teórica favorável para análise do comportamento do reator, sendo esperado que aplicações reais apresentem taxas de crescimento inferiores em razão da maior complexidade da matéria orgânica presente no esgoto sanitário.

A constante de meia-saturação (K_s) indica a afinidade da biomassa pelo substrato; quanto menor o seu valor, maior a capacidade dos microrganismos de crescer em ambientes com baixa concentração de matéria orgânica. O valor de $K_s = 200 \text{ mgDQO/L}$ adotado sugere boa afinidade por substratos solúveis, o que é coerente com a fração biodegradável do esgoto sanitário. Para contextualização, Mohammadi, Ibrahim e Annur (2017) reportaram um valor de K_s igual a $9,04 \text{ g DQO/L}$ (9.040 mg DQO/L) para efluente de óleo de palma, um substrato significativamente mais concentrado e de maior complexidade. O valor utilizado neste estudo representa, de forma simplificada, apenas a parcela do esgoto facilmente fermentável, responsável pela maior parte da produção de hidrogênio nas etapas iniciais da digestão anaeróbia.

O rendimento de biomassa (Y_x) adotado foi de $0,085 \text{ mg SSV/mg DQO}$. Em processos anaeróbios, a maior parte da energia contida no substrato é convertida em produtos metabólicos, como ácidos orgânicos, hidrogênio e metano, e não em novas células. Por esse motivo, os rendimentos celulares costumam ser relativamente baixos. A literatura reporta valores próximos, como $0,10 \text{ g SSV/g DQO}$ ($100 \text{ mg SSV/mg DQO}$) para bactérias hidrogenotróficas (METCALF; EDDY, 2014). A pequena redução aplicada neste trabalho busca representar as condições acidogênicas, nas quais o pH levemente ácido e a competição metabólica tendem a limitar ainda mais o crescimento celular.

O rendimento de produção de hidrogênio (Y_{H_2}) foi fixado em 5×10^{-6} mol H_2 /mg DQO, valor intencionalmente conservador para refletir o limitado potencial do esgoto sanitário bruto para a produção fermentativa de hidrogênio. Pakarinen, Luostarinen e Rintala (2008) demonstraram que a utilização exclusiva de água negra como substrato em reatores UASB operando a 20 °C não resultou em produção detectável de hidrogênio. A produção somente foi observada após a adição de resíduos de cozinha como cosubstrato. Assim, o valor adotado não representa uma limitação do modelo, mas uma escolha deliberada para evitar a superestimação do potencial energético do esgoto doméstico in natura.

Os parâmetros relacionados à atividade metanogênica foram utilizados para representar, de forma simplificada, a competição entre arqueias metanogênicas e bactérias fermentativas, uma vez que o modelo não descreve explicitamente a dinâmica das arqueias. Considerando que a metanogênese é favorecida por maiores tempos de detenção hidráulica, foi definido um tempo de detenção hidráulica crítico (TDH_{crit}) de 5 horas como limite a partir do qual o consumo de hidrogênio se intensifica. Esse valor é compatível com a operação de reatores UASB metanogênicos, que normalmente trabalham com tempos de detenção hidráulica dessa ordem de grandeza ou superiores (CHERNICHARO, 2007). Já a constante de consumo metanogênico (k_m) e o fator de intensificação da atividade metanogênica (α) foram empregados como parâmetros de ajuste, destinados a controlar a transição entre os regimes acidogênico e metanogênico, sem interpretação bioquímica direta.

Os parâmetros relacionados ao efeito do pH também foram definidos com base na literatura. O pH ótimo ($pH_{ótimo}$) de 5,5 está de acordo com os valores considerados ideais para bactérias fermentativas produtoras de hidrogênio, correspondendo a uma faixa levemente ácida que contribui para a inibição das arqueias metanogênicas (PAUDEL *et al.*, 2015). O parâmetro σ , responsável por controlar a sensibilidade do sistema às variações de pH, foi fixado em 0,80. Esse valor proporciona uma tolerância moderada, permitindo a manutenção de atividade biológica significativa em uma faixa aproximada entre pH 4,5 e 6,5, condição compatível com a realidade operacional de reatores acidogênicos alimentados com esgoto sanitário.

Por fim, o coeficiente de decaimento (b) representa a perda natural de biomassa ativa decorrente da morte celular e da lise microbiana. Neste estudo, foi adotado o valor de $b = 0,05$ h^{-1} , característico de sistemas anaeróbios operando em condições mesofílicas, nos quais as taxas de decaimento tendem a ser relativamente baixas quando comparadas às observadas em sistemas aeróbios (BATSTONE *et al.*, 2002). Esse parâmetro descreve a velocidade de redução

da biomassa ativa ao longo do tempo e contribui para representar de forma mais realista a dinâmica microbiana em reatores UASB, sendo compatível com condições operacionais estáveis.

3.6 Limitações do modelo

Embora o modelo proposto permita analisar tendências operacionais da produção fermentativa de hidrogênio em reatores UASB, algumas simplificações limitam sua capacidade de representar integralmente sistemas reais. A biomassa foi representada como uma única população microbiana, não contemplando explicitamente as interações entre bactérias fermentativas e arqueias metanogênicas, nem fenômenos de competição metabólica e adaptação microbiana.

Além disso, as formulações adotadas para a cinética microbiana, influência do pH e atividade metanogênica fornecem apenas uma representação simplificada da transição entre os regimes acidogênico e metanogênico. O modelo também desconsidera fenômenos de transferência de massa, como a distribuição do hidrogênio entre as fases líquida e gasosa e possíveis efeitos de inibição causados pelo acúmulo de hidrogênio dissolvido.

Adicionalmente, foram assumidas condições operacionais constantes e regime de mistura completa, desconsiderando variações de vazão, temperatura, carga orgânica e gradientes espaciais presentes em reatores reais. Por fim, não foram consideradas incertezas associadas aos parâmetros cinéticos e à variabilidade inerente aos processos biológicos. Assim, os resultados devem ser interpretados como uma representação idealizada do sistema, adequada para análise de tendências e avaliação qualitativa do comportamento da produção fermentativa de hidrogênio.

Apesar das simplificações adotadas, as hipóteses consideradas são compatíveis com modelos fenomenológicos utilizados para a representação preliminar de processos biológicos complexos. Dessa forma, o modelo mantém sua aplicabilidade para a análise da influência de parâmetros operacionais, como pH e tempo de detenção hidráulica (TDH), sobre a produção fermentativa de hidrogênio.

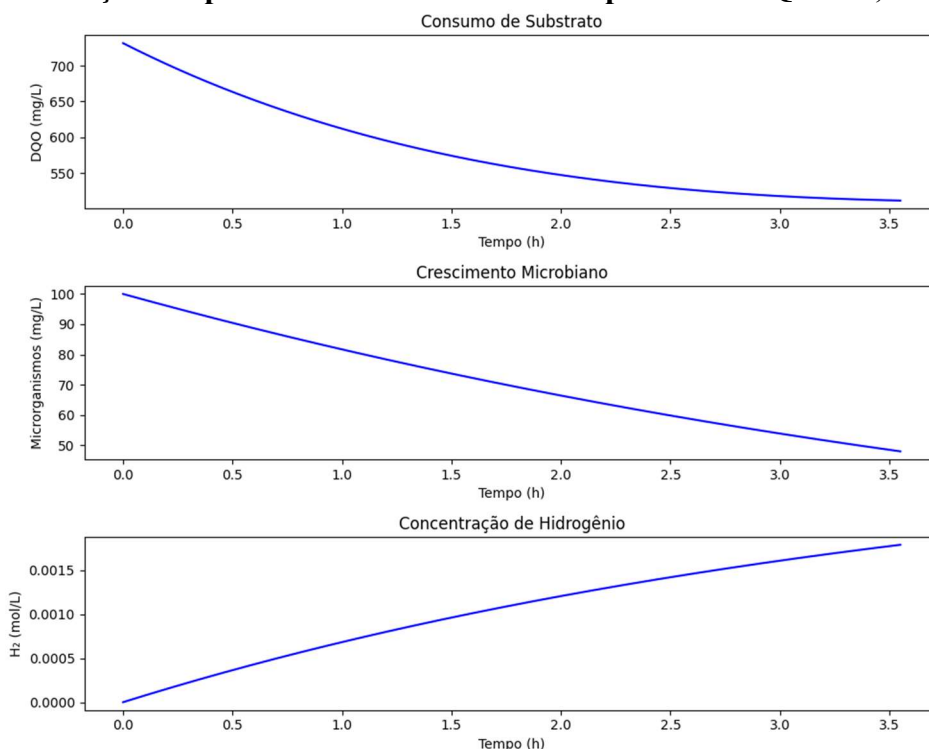
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da simulação do modelo matemático para produção fermentativa de hidrogênio em reator UASB. A análise foi estruturada em dois cenários operacionais. No primeiro, consideraram-se condições típicas de esgoto sanitário convencional, avaliando o potencial de integração do reator a sistemas de saneamento com recuperação energética. No segundo, analisaram-se condições de maior carga orgânica afluyente, investigando o efeito do aumento da disponibilidade de substrato sobre a dinâmica de produção de hidrogênio e o comportamento global do sistema.

4.1 Produção de hidrogênio no pré-tratamento de esgoto sanitário

O objetivo dessa etapa consistiu em avaliar o potencial do sistema para produção fermentativa de hidrogênio associada ao pré-tratamento do esgoto, promovendo remoção parcial da matéria orgânica sem descaracterizar o efluente para etapas posteriores de tratamento. A Figura 7 apresenta a evolução temporal das variáveis de estado para a condição operacional mais representativa ($\text{pH} = 5,03$; $\text{TDH} = 3,55$ h).

Figura 7 – Evolução temporal das variáveis de estado para uma DQO 731,5 mg/L



Fonte: O autor (2026)

Observa-se que a concentração de DQO apresentou decaimento exponencial ao longo do tempo, partindo de 731,5 mg/L e estabilizando-se em aproximadamente 511,5 mg/L,

correspondendo a uma remoção de 30,07%. A biomassa microbiana exibiu comportamento decrescente, caracterizando a tendência de *washout* hidráulico, na qual a taxa de diluição ($D = 1/TDH$) supera a taxa específica de crescimento líquida. A concentração de hidrogênio aumentou progressivamente ao longo da simulação, atingindo aproximadamente $1,79 \times 10^{-3}$ mol/L ao final do período analisado. Para essa condição operacional, a produção total de hidrogênio alcançou 2.456,36 mol, com produtividade volumétrica de $5,04 \times 10^{-4}$ mol/(L·h).

Além da condição apresentada na Figura 7, outras combinações de pH e TDH também permitiram ao sistema operar com remoção de DQO próxima de 30%, mantendo o regime acidogênico. A Tabela 3 consolida esses cenários, evidenciando a faixa operacional na qual o reator UASB pode ser utilizado como etapa de pré-tratamento com recuperação energética.

Tabela 3 – Cenários operacionais com remoção de DQO próxima de 30%

pH	TDH (h)	Q (L/h)	V (L)	Remoção de DQO (%)	Concentração Final de H ₂ (mol/L)	H ₂ Total (mol)	Produtividade de H ₂ (mol/L·h)
5,10	3,36	387.000	1.301.727	30,01	$1,788 \times 10^{-3}$	2.327,45	$5,32 \times 10^{-4}$
5,34	3,00	387.000	1.161.000	29,96	$1,791 \times 10^{-3}$	2.079,46	$5,97 \times 10^{-4}$
5,19	3,18	387.000	1.231.364	29,96	$1,788 \times 10^{-3}$	2.201,82	$5,62 \times 10^{-4}$
5,03	3,55	387.000	1.372.091	30,07	$1,786 \times 10^{-3}$	2.456,36	$5,04 \times 10^{-4}$
5,14	3,27	387.000	1.266.545	29,96	$1,786 \times 10^{-3}$	2.262,63	$5,46 \times 10^{-4}$

Fonte: O autor (2026)

Os resultados evidenciam que o sistema apresentou comportamento relativamente estável dentro da faixa acidogênica investigada, especialmente para valores de pH próximos de 5,0 a 5,3 e TDH entre aproximadamente 3 e 3,5 horas. Em todos os cenários analisados, a remoção de DQO permaneceu muito próxima de 30%, indicando que pequenas variações operacionais nessa faixa não provocam alterações significativas na conversão global da matéria orgânica.

Observa-se também que a produtividade volumétrica de hidrogênio apresentou variações discretas entre os cenários simulados, mantendo-se na ordem de 10^{-4} mol/(L·h). O maior valor de produtividade foi obtido para pH igual a 5,34 e TDH de 3,00 h, alcançando $5,97 \times 10^{-4}$ mol/(L·h), enquanto o menor valor ocorreu em pH 5,03 e TDH de 3,55 h, com produtividade de $5,04 \times 10^{-4}$ mol/(L·h). Esse comportamento sugere que menores tempos de detenção hidráulica e pH na faixa de 5,3 a 5,4 favorecem a preservação do hidrogênio produzido, possivelmente em função da redução do desenvolvimento de microrganismos consumidores de hidrogênio.

Apesar dessas diferenças na produtividade volumétrica, A concentração final de hidrogênio apresentou baixa variação entre os cenários, permanecendo entre $1,786 \times 10^{-3}$ e $1,791 \times 10^{-3}$ mol/L em todas as simulações. Esse resultado indica que, dentro da faixa operacional analisada, o sistema apresenta relativa robustez em relação às pequenas flutuações de pH e TDH, mantendo comportamento global semelhante para a produção fermentativa de hidrogênio.

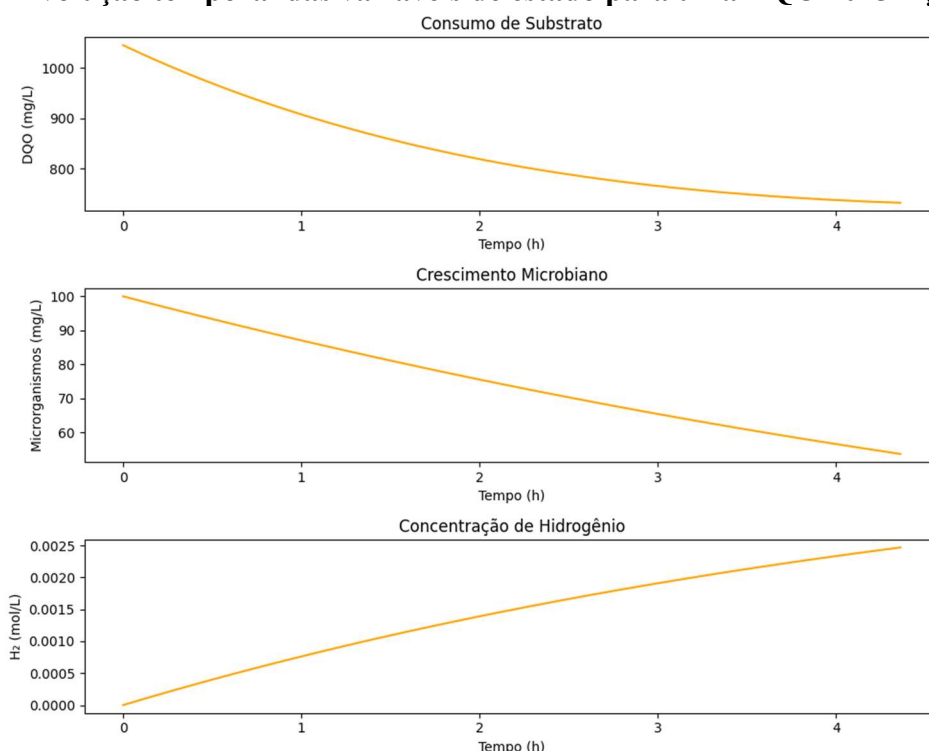
Na condição representativa apresentada na Figura 7 (pH = 5,03; TDH = 3,55 h), a concentração residual de DQO no efluente foi reduzida para aproximadamente 511,5 mg/L, evidenciando a capacidade do sistema em promover conversão parcial da matéria orgânica sem descaracterizar o efluente para etapas posteriores de tratamento biológico. Esse equilíbrio entre remoção parcial da matéria orgânica e manutenção do regime acidogênico permite simultaneamente a recuperação energética e a geração de um efluente com menor carga orgânica para tratamento posterior.

De forma geral, os resultados demonstram que o reator UASB pode atuar como uma etapa inicial de recuperação energética integrada ao tratamento de esgoto sanitário, operando sob condições que favorecem a produção de hidrogênio sem exigir elevadas remoções de matéria orgânica. Isso reforça a proposta de utilização do sistema como unidade acidogênica preliminar em configurações de tratamento em múltiplos estágios.

4.2 Produção de hidrogênio sob enriquecimento de carga orgânica

No segundo cenário, foram avaliadas condições de maior disponibilidade de matéria orgânica afluente, utilizando concentração de entrada igual a 1.045 mg/L em termos de DQO. O objetivo dessa etapa foi investigar a influência do aumento da concentração de substrato sobre a dinâmica fermentativa e sobre o potencial de produção de hidrogênio do reator UASB, mantendo o sistema operando em regime predominantemente acidogênico. A Figura 8 apresenta a evolução temporal das variáveis de estado para uma condição operacional representativa do cenário com enriquecimento de carga orgânica (pH = 5,04; TDH = 4,36 h), correspondente a uma remoção de DQO próxima de 30%.

Figura 8 – Evolução temporal das variáveis de estado para uma DQO 1045 mg/L



Fonte: O autor (2026)

Observa-se que a concentração de DQO apresentou decaimento exponencial ao longo do tempo, partindo de 1.045 mg/L e estabilizando-se em aproximadamente 731,7 mg/L, valor correspondente à concentração característica de esgoto sanitário convencional. A remoção de DQO alcançou 29,98%, confirmando a manutenção do regime acidogênico. A biomassa microbiana novamente exibiu comportamento decrescente, reforçando a condição de washout hidráulico como característica operacional do sistema. A concentração de hidrogênio aumentou continuamente ao longo da simulação, atingindo aproximadamente $2,47 \times 10^{-3}$ mol/L ao final do período analisado. Para essa condição operacional, a produção total de hidrogênio alcançou 4.167,95 mol, com produtividade volumétrica de $5,67 \times 10^{-4}$ mol/(L·h).

Além da condição apresentada na Figura 8, outras combinações de pH e TDH também permitiram ao sistema operar com remoção de DQO próxima de 30%, mantendo o regime acidogênico sob maior carga orgânica. A Tabela 4 consolida esses cenários, evidenciando a faixa operacional na qual o reator UASB pode ser utilizado para recuperação energética associada ao pré-tratamento de esgoto enriquecido com fontes externas de carbono.

Tabela 4 – Cenários operacionais com maior carga orgânica e remoção de DQO próxima de 30%

pH	TDH (h)	Q (L/h)	V (L)	Remoção de DQO (%)	Concentração Final de H ₂ (mol/L)	H ₂ Total (mol)	Produtividade de H ₂ (mol/L·h)
5,21	3,91	387.000	1.512.818	30,00	$2,503 \times 10^{-3}$	3.787,14	$6,40 \times 10^{-4}$
5,13	4,09	387.000	1.583.182	30,01	$2,495 \times 10^{-3}$	3.949,67	$6,10 \times 10^{-4}$
5,04	4,36	387.000	1.687.320	29,98	$2,470 \times 10^{-3}$	4.167,95	$5,67 \times 10^{-4}$
5,33	3,73	387.000	1.442.455	29,97	$2,508 \times 10^{-3}$	3.617,36	$6,73 \times 10^{-4}$
5,26	3,82	387.000	1.477.636	29,96	$2,504 \times 10^{-3}$	3.700,39	$6,56 \times 10^{-4}$

Fonte: O autor (2026)

Os resultados demonstram que o aumento da concentração de matéria orgânica afluenta promoveu elevação significativa na produção de hidrogênio em comparação ao primeiro cenário. A quantidade total produzida variou entre 3.617,36 e 4.167,95 mol, representando aumento expressivo em relação aos valores observados para o esgoto sanitário sem enriquecimento.

De maneira semelhante ao observado no primeiro cenário, o sistema apresentou elevada estabilidade operacional, com remoções de DQO variando entre 29,96% e 30,02%. Isso indica que o aumento da carga orgânica não alterou significativamente a eficiência relativa de conversão da matéria orgânica, mantendo o sistema operando em regime predominantemente acidogênico.

A produtividade volumétrica de hidrogênio variou entre $5,67 \times 10^{-4}$ e $6,73 \times 10^{-4}$ mol/(L·h), valores superiores aos obtidos no cenário anterior. O maior valor foi observado para pH igual a 5,33 e TDH de 3,73 h, enquanto o menor ocorreu para pH 5,04 e TDH de 4,36 h. Esses resultados indicam que tempos de detenção hidráulica mais elevados tendem a reduzir a produtividade do processo, possivelmente em função do aumento da atividade de microrganismos consumidores de hidrogênio prevista pelo modelo.

A concentração final de hidrogênio apresentou baixa dispersão entre os cenários, permanecendo entre $2,473 \times 10^{-3}$ e $2,508 \times 10^{-3}$ mol/L. Comparativamente ao primeiro cenário, observa-se aumento aproximado de 40% na concentração final de H₂ e incremento superior a 60% na produção total acumulada, evidenciando o efeito positivo da maior disponibilidade de substrato fermentável.

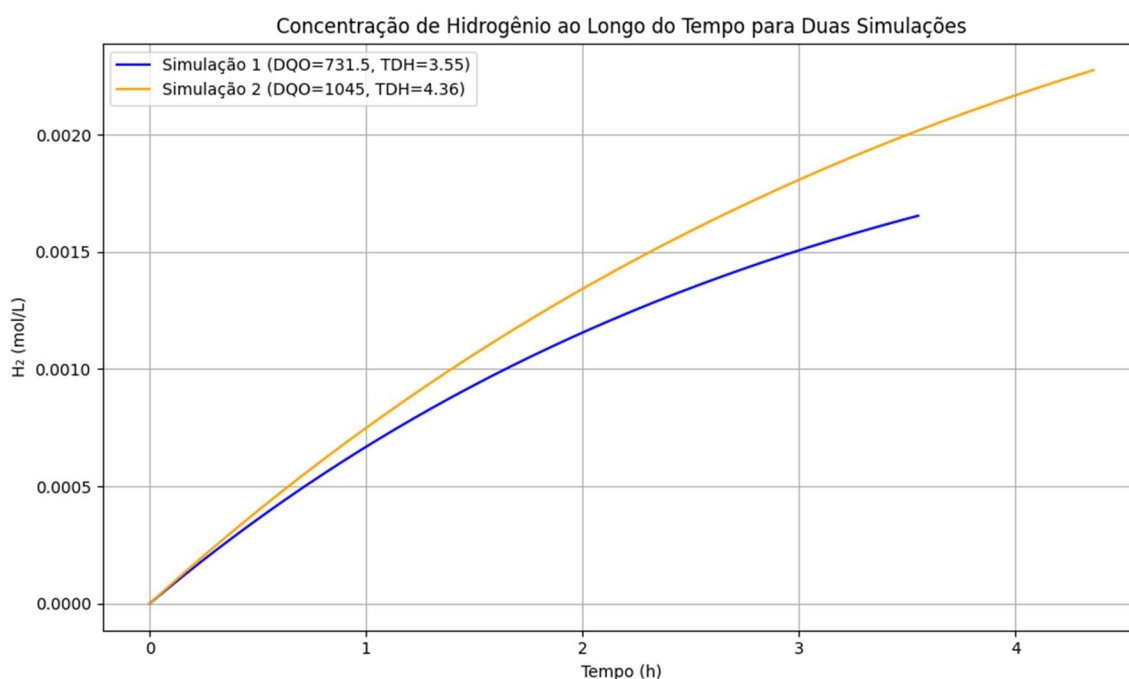
Na condição representativa apresentada na Figura 8 (pH = 5,04; TDH = 4,36 h), a concentração residual de DQO no efluente foi reduzida para aproximadamente 731,7 mg/L, valor próximo à concentração característica de esgoto sanitário convencional. Esse cenário

evidencia que o enriquecimento da carga orgânica possibilita aumento da recuperação energética sem comprometer a manutenção do regime acidogênico adotado como referência neste estudo.

4.3 Comparação entre os cenários simulados

Com o objetivo de avaliar o impacto do enriquecimento da carga orgânica sobre a produção fermentativa de hidrogênio, foi realizada uma comparação entre as condições representativas dos dois cenários estudados. A Figura 9 apresenta a evolução temporal da concentração de hidrogênio para os casos correspondentes a DQO de entrada de 731,5 mg/L e 1.045 mg/L.

Figura 9 – Comparação da evolução temporal da concentração de hidrogênio para os dois cenários simulados



Fonte: O autor (2026)

Observa-se que ambos os cenários apresentaram comportamento semelhante, caracterizado por aumento progressivo da concentração de hidrogênio ao longo do tempo de operação. Entretanto, o cenário com maior concentração de matéria orgânica afluente apresentou concentrações de hidrogênio superiores durante todo o período analisado.

O aumento da DQO afluente de 731,5 mg/L para 1.045 mg/L corresponde a um acréscimo de aproximadamente 42,9% na carga orgânica de entrada. Como resposta a esse enriquecimento do substrato, a concentração de hidrogênio ao final da simulação aumentou de

aproximadamente $1,79 \times 10^{-3}$ mol/L para $2,47 \times 10^{-3}$ mol/L, representando um incremento de cerca de 38,0% na concentração final de hidrogênio. Esse resultado evidencia a influência positiva da disponibilidade de matéria orgânica sobre a atividade fermentativa e a geração de hidrogênio.

Além disso, considerando os resultados das condições representativas apresentadas nas Figuras 7 e 8, a produção total de hidrogênio aumentou de 2.456,36 mol para 4.167,95 mol, correspondendo a um incremento de aproximadamente 69,7% entre os cenários. Da mesma forma, a produtividade volumétrica elevou-se de $5,04 \times 10^{-4}$ mol/(L·h) para $5,67 \times 10^{-4}$ mol/(L·h), resultando em um aumento de aproximadamente 12,5%.

Os resultados indicam que o aumento da carga orgânica favorece a produção de hidrogênio sem alterar significativamente o comportamento dinâmico do sistema, uma vez que ambas as curvas mantêm o perfil de crescimento ao longo do tempo. Dessa forma, o enriquecimento da alimentação mostrou-se uma estratégia eficaz para ampliar a recuperação energética do reator UASB operando em regime acidogênico.

4.4 Interpretação dos resultados e implicações operacionais

A análise conjunta dos dois cenários simulados permitiu compreender a influência das condições operacionais sobre a produção fermentativa de hidrogênio em reatores UASB operando em regime acidogênico. Em ambos os casos, observou-se comportamento relativamente estável do sistema dentro da faixa de pH investigada, com valores de remoção de DQO próximos de 30% para diferentes combinações de pH e tempo de detenção hidráulica (TDH).

Os resultados demonstraram que o pH exerceu influência significativa sobre o desempenho do sistema, sendo os melhores resultados obtidos para valores entre aproximadamente 5,0 e 5,3. Essa faixa favoreceu a atividade fermentativa e limitou o desenvolvimento da atividade metanogênica, permitindo maior preservação do hidrogênio produzido. Assim, os resultados obtidos reforçam a importância do controle do pH como variável operacional em sistemas voltados à produção fermentativa de hidrogênio.

O TDH também apresentou influência relevante sobre o comportamento do processo. Observou-se que valores moderados, entre aproximadamente 3 e 4 horas, favoreceram simultaneamente a conversão parcial da matéria orgânica e a produção de hidrogênio. Em

contrapartida, TDHs mais elevados tenderam a reduzir discretamente a produtividade volumétrica de H_2 , comportamento compatível com a intensificação da atividade metanogênica em TDHs mais longos, conforme discutido na literatura.

A comparação entre os dois cenários evidenciou ainda o impacto da disponibilidade de substrato sobre o desempenho energético do sistema. No primeiro cenário, utilizando DQO de entrada de 731,5 mg/L, a concentração final de hidrogênio atingiu aproximadamente $1,79 \times 10^{-3}$ mol/L. Já no segundo cenário, com concentração afluente de 1.045 mg/L, a concentração final alcançou aproximadamente $2,47 \times 10^{-3}$ mol/L. Esse comportamento indica que maiores disponibilidades de carbono biodegradável favorecem diretamente a atividade fermentativa e aumentam o potencial de recuperação energética do reator. Apesar desse aumento, os valores percentuais de remoção de DQO permaneceram próximos nos dois casos, sugerindo que a carga orgânica adicional influenciou principalmente a quantidade absoluta de matéria orgânica convertida, sem alterar o comportamento relativo do sistema.

As produtividades obtidas neste estudo, entre $5,04 \times 10^{-4}$ e $6,73 \times 10^{-4}$ mol H_2 /(L·h), foram inferiores às reportadas na literatura experimental. Azevedo (2025), por exemplo, obteve aproximadamente 0,011 mol H_2 /(L·h) em reator acidogênico alimentado com substrato suplementado, valor cerca de 16 a 22 vezes superior aos observados neste trabalho. De forma semelhante, Paudel *et al.* (2015) reportaram rendimentos entre 1,0 e 1,1 mol H_2 /mol glicose em águas residuárias sintéticas. Essa diferença pode ser atribuída principalmente à natureza do substrato utilizado, uma vez que os estudos experimentais empregaram fontes ricas em carboidratos, enquanto o presente modelo foi desenvolvido para representar esgoto sanitário bruto e condições de enriquecimento moderado. Ainda assim, os resultados reproduzem a tendência observada na literatura de aumento da produção de hidrogênio com a disponibilidade de matéria orgânica, reforçando a importância do enriquecimento da carga orgânica para ampliar o potencial energético do processo.

Do ponto de vista operacional, a remoção parcial de DQO observada em ambos os cenários — aproximadamente 30% — não deve ser interpretada como limitação do processo, mas como uma característica inerente ao regime acidogênico, cujo objetivo principal não é a remoção máxima de matéria orgânica, e sim a conversão parcial do substrato em energia química. Como a vazão hidráulica permanece essencialmente constante após o reator, a redução prévia da carga orgânica permite que as unidades de tratamento subsequentes operem sob

menor carga poluente, com potencial de ampliação da capacidade operacional do sistema sem necessidade proporcional de expansão hidráulica.

Adicionalmente, a produção de hidrogênio a partir de esgoto sanitário apresenta potencial de valorização econômica para estações de tratamento, contribuindo para redução de custos operacionais e diversificação energética, em alinhamento com os princípios da economia circular.

Apesar das limitações quantitativas discutidas, o modelo demonstrou utilidade como ferramenta de triagem paramétrica, permitindo identificar faixas operacionais promissoras — pH entre 5,0 e 5,4 e TDH entre 3 e 4 horas — que podem orientar estudos experimentais futuros, reduzindo a necessidade de exploração empírica exaustiva.

Deve-se considerar, entretanto, que as tendências observadas estão diretamente associadas às simplificações adotadas no modelo matemático proposto. A representação da biomassa microbiana de forma agregada, a ausência de modelagem explícita das etapas intermediárias da digestão anaeróbia e a não consideração de fenômenos de transferência de massa e competição metabólica detalhada limitam a capacidade do modelo em reproduzir integralmente o comportamento de sistemas reais. Dessa forma, os resultados obtidos devem ser interpretados principalmente sob uma perspectiva qualitativa, sendo úteis para identificação de tendências operacionais, compreensão do comportamento global do processo e direcionamento de futuras investigações experimentais e computacionais envolvendo produção fermentativa de hidrogênio em reatores anaeróbios.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um modelo matemático fenomenológico simplificado para análise da produção fermentativa de hidrogênio em reatores UASB operando em regime acidogênico a partir de esgoto sanitário. A modelagem foi implementada computacionalmente em Python, permitindo simular o comportamento dinâmico do sistema e investigar a influência do pH e do tempo de detenção hidráulica (TDH) sobre a conversão da matéria orgânica e a produção de hidrogênio.

Os resultados demonstraram que o modelo reproduziu tendências coerentes com o comportamento esperado de sistemas acidogênicos descritos na literatura. A faixa de pH entre aproximadamente 5,0 e 5,5 favoreceu a atividade fermentativa e a preservação do hidrogênio produzido, enquanto o TDH apresentou influência relevante sobre o desempenho do processo. Tempos de detenção hidráulica mais reduzidos favoreceram a produtividade de H_2 ao limitarem a atividade metanogênica prevista pelo modelo, enquanto tempos mais elevados aumentaram a conversão da matéria orgânica, porém com redução da produtividade fermentativa.

A análise quantitativa revelou produtividades na ordem de 10^{-4} mol H_2 /(L·h), cerca de 16 a 22 vezes inferiores às reportadas na literatura para substratos enriquecidos. Essa diferença não constitui uma falha do modelo, mas reflete as características do esgoto sanitário utilizado como substrato, cuja fração prontamente fermentável é inferior à observada em resíduos ricos em carboidratos. Dessa forma, os resultados reforçam a importância do enriquecimento da carga orgânica, por meio da codigestão com resíduos orgânicos adequados, como estratégia para ampliar a recuperação energética do processo.

A comparação entre os cenários simulados mostrou que o aumento da concentração de matéria orgânica afluenta favoreceu significativamente a produção de hidrogênio. O aumento da DQO de entrada de 731,5 mg/L para 1.045 mg/L, correspondente a um acréscimo de aproximadamente 43% na carga orgânica, resultou em incremento próximo de 70% na produção total de hidrogênio, evidenciando a forte dependência do processo em relação à disponibilidade de substrato fermentável.

A remoção parcial de DQO, em torno de 30%, não deve ser interpretada como limitação do sistema, mas como uma característica inerente ao regime acidogênico, cujo objetivo principal não é a remoção máxima da matéria orgânica, e sim sua conversão parcial em energia química. Essa configuração apresenta vantagens operacionais, uma vez que reduz a carga

orgânica encaminhada às etapas subsequentes de tratamento, possibilitando maior eficiência global do sistema sem necessidade proporcional de ampliação da capacidade hidráulica. Além disso, a produção de hidrogênio a partir de esgoto sanitário apresenta potencial para contribuir com a valorização energética de estações de tratamento, em consonância com os princípios da economia circular.

As limitações do modelo — incluindo a representação simplificada da biomassa microbiana, a ausência de múltiplas populações microbianas e a não consideração explícita de fenômenos de transferência de massa — restringem sua aplicação a análises qualitativas e comparativas de tendências operacionais. Assim, o modelo não deve ser utilizado isoladamente para previsões quantitativas em escala real sem calibração e validação experimental. Apesar disso, demonstrou utilidade como ferramenta de triagem paramétrica, permitindo identificar faixas operacionais promissoras, com pH entre aproximadamente 5,0 e 5,4 e TDH entre 3 e 4,5 horas, que podem orientar estudos experimentais futuros.

Os resultados evidenciaram ainda que o reator UASB operado em regime acidogênico constitui uma plataforma flexível para a produção de bio-hidrogênio, uma vez que seu desempenho pode ser significativamente influenciado por ajustes de parâmetros operacionais, especialmente pH e TDH. Os cenários simulados reforçam que o enriquecimento da carga orgânica é um fator determinante para o aumento da produtividade e para a viabilização energética do processo. Nesse contexto, a integração entre tratamento de esgoto, recuperação de recursos e geração de combustíveis renováveis aponta para uma tendência de evolução das estações de tratamento de esgoto em direção ao conceito de biorrefinarias urbanas, contribuindo simultaneamente para a economia circular, a valorização de resíduos e a descarbonização do setor de saneamento.

Como perspectivas futuras, recomenda-se a incorporação de modelos microbiológicos mais detalhados, a inclusão de fenômenos de transferência de massa e a realização de validações experimentais em escala laboratorial e piloto. Por fim, conclui-se que, dentro das condições e hipóteses adotadas neste estudo, reatores UASB operados em regime acidogênico apresentam potencial promissor como tecnologia integrada de tratamento de esgoto e recuperação energética, alinhando-se aos princípios da economia circular e da transição para sistemas de saneamento mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ANGENENT, L. T.; KARIM, K.; AL-DAHMAN, M. H.; WRENN, B. A.; DOMÍGUEZ-ESPINOSA, R. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. **Trends in Biotechnology**, v. 22, n. 9, p. 477–485, 2004.
- AZEVEDO, F. P. F. **Produção de energia elétrica em célula combustível e de ácidos carboxílicos, a partir da degradação de água residuária de indústria sucroalcooleira em reator anaeróbio acidogênico, visando a produção de hidrogênio**. 2025. 88 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2025.
- BATSTONE, D. J.; KELLER, J.; ANGELIDAKI, I.; KALYUZHNYI, S. V.; PAVLOSTATHIS, S. G.; ROZZI, A.; SANDERS, W. T. M.; SIEGRIST, H.; VAVILIN, V. A. The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 65–73, 2002.
- BRAGA, A. F. M. **Produção de hidrogênio em reatores anaeróbios termofílicos**. 2014. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- CARVALHO, K. Q. **Resposta dinâmica de reator UASB em escala piloto submetido a cargas orgânicas e hidráulicas cíclicas: modelos matemáticos e resultados experimentais**. 2006. 244 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. v. 5.
- COUTO, T. C.; ALMEIDA, P. G. S.; LACERDA, Y. S.; OLIVEIRA, S. M. A. C.; CHERNICHARO, C. A. L. Experiência prática com a inoculação de reatores UASB em escala plena: estudo de caso da ETE Laboreaux em Itabira - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25., 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- DAS, D.; VEZIROGLU, T. N. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 26, n. 1, p. 13–28, 2001.
- DICKS, A. L.; RAND, D. A. J. **Fuel Cell Systems Explained**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2018.
- DINCER, I.; ACAR, C. Smart energy solutions with hydrogen options. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 34, p. 21122–21133, 2018.
- DORAN, P. M. **Bioprocess Engineering Principles**. 2. ed. London: Academic Press, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2025: relatório síntese: ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 2 jun. 2026.

IEA (International Energy Agency). **Global Hydrogen Review 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>. Acesso em: 4 jun. 2026.

LETTINGA, G.; VAN VELSEN, A. F. M.; HOBMA, S. W.; DE ZEEUW, W.; KLAPWIJK, A. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 22, n. 4, p. 699–734, 1980.

LETTINGA, G.; HULSHOFF POL, L. W. UASB-process design for various types of wastewaters. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 8, p. 87–107, 1991.

LIDE, D. R. (Ed.). **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. 85th ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

MAHATA, S.; EMISHA, L.; PRINCE, D.; VIJAY, S. J.; BHAGAVATHSINGH, J.; SOMU, P.; BASAVEGOWDA, N.; HALDAR, D. Technological advancements in biohydrogen production from organic waste frameworks: a review. **Bioresource Technology**, v. 374, p. 128740, 2023.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

MOHAMMADI, M.; IBRAHIM, S.; ANNUAR, M. M. Kinetic modeling of fermentative hydrogen production from palm oil mill effluent (POME). **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 2, p. 850–860, 2017.

MONOD, J. The growth of bacterial cultures. **Annual Review of Microbiology**, v. 3, n. 1, p. 371–394, 1949.

MOTA, V. R.; COSTA JR., E. F.; COSTA, A. O. S. Análise de modelos matemáticos aplicados a biorreatores UASB. **Principium Online: Iniciação Científica no Unileste-MG, Coronel Fabriciano**, v. 1, n. 3, p. 10–22, dez. 2007.

PAKARINEN, O.; LUOSTARINEN, S.; RINTALA, J. J. Hydrogen production from energy crops and agricultural residues by dark fermentation. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 13, p. 5803–5810, 2008.

PAUDEL, S.; KANG, Y.; YOO, Y. S.; SEO, G. T. Hydrogen production in the anaerobic treatment of domestic-grade synthetic wastewater. **Sustainability**, v. 7, n. 12, p. 16260–16272, 2015.

PEIXOTO, G. **Sistema fermentativo de duas fases para a produção de hidrogênio e metano a partir de esgoto sanitário combinado com águas residuárias industriais**. 2011. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PEREIRA, N. M. **Potencial de produção de hidrogênio utilizando reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETES operadas pela Companhia de Água e Esgoto do**

Ceará. 2024. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

SEGHEZZO, L. et al. The advanced anaerobic treatment of municipal wastewater in UASB reactors at low temperatures. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 185-192, 2002.

SHIDA, G. M. **Influência do tempo de detenção hidráulica na produção de hidrogênio em reator anaeróbio de leito fluidizado.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

STAFFELL, I.; SCAMMAN, Daniel; ABAD, A. V.; BALCOMBE, P.; DODDS, P. E.; EKINS, P.; SHAH, N.; WARD, K. R. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. **Energy & Environmental Science**, v. 12, n. 2, p. 463–491, 2019.

TURNER, J. A. Sustainable hydrogen production. **Science**, v. 305, n. 5686, p. 972–974, 2004.