



ANÁLISE COMPARATIVA DE PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE HIDROGÊNIO E SEUS IMPACTOS

Palavras-Chave: HIDROGÊNIO, SIMULAÇÃO, ANÁLISE PARAMÉTRICA

Autores(as):

GABRIELLY VITÓRIA BENEVENUTO PIMENTA – E. E. PROF. BERNARDO CARO

SYNLEY SONOR ALPHONSE – E. E. PROF. HITON FEDERICI

VINICIUS LUTERO TEODORO GENESIO – E. E. PROF. FRANCISCO ALVARES

HELOÍSA SOUTO NOGUEIRA, FEQ-UNICAMP

NUNO GUEDES SOARES PEREIRA, FEQ-UNICAMP

VITOR HUGO SALVÁTICO POLATO, FEQ-UNICAMP

PROF. DR. JOSÉ VICENTE HALLAK DANIELO (ORIENTADOR), FEQ-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O hidrogênio tem sido considerado o combustível mais importante e promissor devido à sua capacidade de reduzir os impactos ambientais causados pela queima de combustíveis fósseis. O uso crescente do hidrogênio como fonte de energia limpa está causando uma transformação no setor de gás industrial, colocando à prova a resiliência das cadeias de suprimento, desafiando a dinâmica de produção de gás do passado e despertando a necessidade de novos níveis de adaptação e colaboração para o futuro. Esse gás também é uma matéria-prima essencial para a produção de amônia, indispensável no processo de produção de fertilizantes, utilizados para produzir alimentos, que permitiram um crescimento da população global para mais de 8 bilhões de pessoas.

Os métodos tradicionais de produção e utilização do hidrogênio estão intrinsecamente ligados às emissões de carbono. A maior parte da produção passada e atual de hidrogênio baseia-se na reação de reforma a vapor do gás natural, que produz o denominado hidrogênio cinza, mas que gera uma grande quantidade de dióxido de carbono. Nos últimos anos, a produção do denominado hidrogênio verde, que utiliza eletrolisadores alimentados por energia renovável, proveniente de energia solar fotovoltaica, tornou-se mais importante devido à sua capacidade de produzir hidrogênio a partir da água sem emissões de carbono. Uma outra alternativa também bastante importante é a produção de hidrogênio azul a partir de biometano, por meio da reação de reforma do gás. A reação é a mesma que ocorre na produção de hidrogênio cinza, com a diferença que na produção do hidrogênio azul o dióxido de carbono gerado é capturado e armazenado, diminuindo assim a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para mitigar os impactos ambientais no planeta e o metano é proveniente de uma fonte renovável.

Conhecer as diferentes rotas de produção de hidrogênio, avaliando prós e contras de cada uma e buscar operar processos de forma cada vez mais eficientes, tanto em termos de produção como também em termos de impactos ambientais é fundamental para o futuro do planeta.

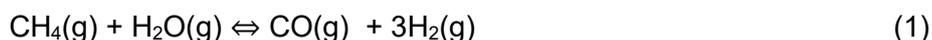
Este projeto de pesquisa em iniciação científica para Ensino Médio tem como principal objetivo realizar cálculos referentes aos processos de produção de hidrogênio cinza, azul e verde, por meio de planilhas eletrônicas e simuladores de processo, a fim de avaliar, por meio de uma análise paramétrica, a influência de algumas variáveis operacionais dos processos de produção de hidrogênio sobre sua eficiência e também os impactos ambientais gerados. Também é objetivo deste projeto despertar o interesse dos alunos para a importância do uso de fontes alternativas de energia, como é o caso do hidrogênio, que sejam mais eficientes e menos poluidores e também.

METODOLOGIA:

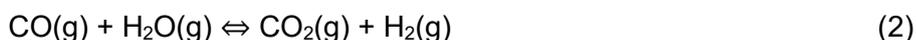
O projeto foi dividido em três etapas distintas. A primeira etapa consistiu de uma revisão de conceitos de matemática básica (equações de primeiro grau, cálculos de porcentagem, regras de três e conversão de unidades) e de química (estequiometria e entalpia de reação) para proporcionar um nivelamento de conhecimentos dos alunos e permitir uma melhor compreensão dos conceitos que seriam necessários para a realização do projeto. Também foram abordados conceitos termodinâmicos como calor específico, entalpia (sensível e latente), calorimetria, pycnometria e manometria, além da Primeira Lei da Termodinâmica. Além de conceitos teóricos, foram realizados alguns experimentos práticos no Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) para maior fixação desses conceitos.

A segunda etapa consistiu de uma revisão bibliográfica sobre os processos de produção dos diferentes tipos de hidrogênio. Foram discutidos os prós e contras de cada processo de produção dos diferentes tipos de hidrogênio e foram realizadas apresentações orais sobre esses processos pelos alunos, não só para reforçar os conceitos envolvidos, mas também para treinar como fazer uma apresentação oral. Nessa etapa também foram realizadas apresentações pelos monitores do projeto, que são alunos do Grupo PET-EQ Unicamp.

O hidrogênio cinza é o mais produzido atualmente, seu processo de obtenção se dá por meio da reação de reforma a vapor do gás natural representado Equação (1).



Essa reação é geralmente acompanhada da reação de deslocamento de gás, Equação (2), para eliminar o monóxido de carbono e produzir mais hidrogênio, porém isso resulta na geração de dióxido de carbono, que tem alto impacto ambiental por ser um gás poluente e responsável pelo agravamento do efeito estufa (CAMPOS *et al.*, 2021).



O hidrogênio azul, é obtido também a partir da reação de reforma do gás natural, porém, após a reação, os gases poluentes emitidos são capturados, armazenados e injetados em locais seguros. Apesar disso, o investimento necessário em tecnologias para a captura do carbono é alto e a utilização de combustível fóssil torna o processo ainda prejudicial ao ambiente.

Contrariamente aos outros processos, o hidrogênio verde é a forma de obtenção do hidrogênio que é menos prejudicial ao meio ambiente por utilizar fontes de energia renováveis para sua produção, como por exemplo por meio da eletrólise da água, na qual a energia utilizada são de fontes renováveis como energia solar e eólica, neste método não há geração de dióxido de carbono (WWF BRASIL, 2025). Apesar de suas vantagens apresentadas, o seu alto custo, por conta da necessidade de grandes quantidades de energia elétrica e água para o processo, representa um desafio para sua implementação (IBERDROLA, 2025).

A terceira e última etapa do processo consistiu na análise paramétrica da influência de algumas variáveis do processo de produção do hidrogênio cinza, considerando tanto a Equação (1), como a Equação (2). As variáveis analisadas foram: temperatura de equilíbrio, pressão de operação do reator e composição da carga de reagentes nos reatores, mais especificamente, a proporção molar metano/água. Essa análise paramétrica foi feita primeiramente utilizando uma planilha eletrônica, para que os alunos pudessem implementar as equações de balanço de massa considerando as reações e também realizar os cálculos de equilíbrio químico, aplicando o princípio de Le Chatelier, sendo que no reator foi considerada válida a hipótese de que o equilíbrio era atingido na temperatura de saída do reator.

Depois de realizar a análise pela planilha eletrônica, foi feito o mesmo estudo utilizando um simulador de processos (Aspen Hysys® v. 2.2) pois esta ferramenta permite uma análise rápida e mais completa da influência dessas variáveis operacionais. Nas simulações realizadas foi utilizado como pacote termodinâmico a equação de estado de Peng-Robinson (1976). O Aspen Hysys® é um software de simulação de processos utilizado na indústria química para análise de processos químicos, otimização de produção, treinamento de operadores e análise de riscos (KAMARUDDIN, 2013).

Por fim, foi realizado um experimento com um carrinho movido a hidrogênio, que utiliza uma célula combustível e uma célula fotovoltaica para fazer a hidrólise da água e gerar hidrogênio, no caso, o hidrogênio verde, uma vez que nesse processo foram utilizadas apenas fontes renováveis de energia. A Figura 1 apresenta uma foto do carrinho movido a hidrogênio que foi utilizado nesse trabalho.



Figura 1 – Carrinho movido a hidrogênio usado no projeto para produção de hidrogênio verde.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Neste resumo, devido à restrição do número de páginas, serão apresentados somente os resultados da análise paramétrica para o processo de produção do hidrogênio cinza, realizada utilizando-se o simulador de processos.

A Figura 2 apresenta a tela do simulador Aspen Hysys® v. 2.2 contendo a simulação do reator de reforma e do reator de deslocamento, operando em série. A partir da simulação implementada foram feitas diversas análises para avaliar a influência das variáveis operacionais sobre a conversão de metano no processo, buscando assim determinar as melhores condições de operação para uma maior conversão do metano e monóxido de carbono e conseqüentemente maior produção de hidrogênio, pois quando a conversão desses componentes aumenta, aumenta a quantidade de hidrogênio produzido.

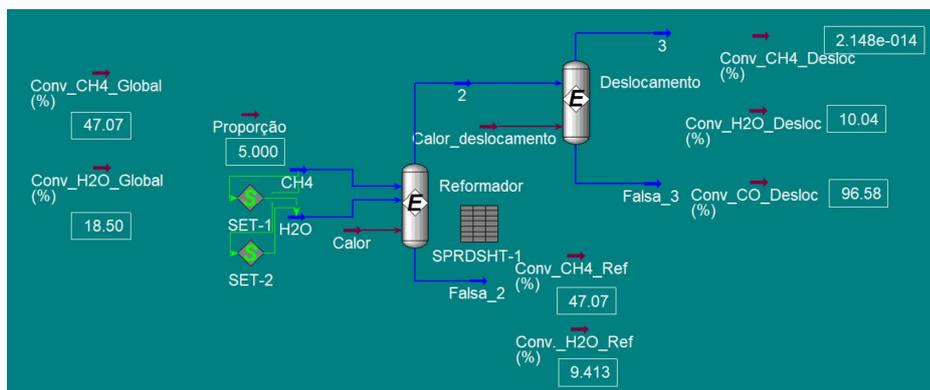


Figura 2 – Tela do simulador Aspen HYSYS® com os reatores em série para a reação de reforma a vapor do metano e reação de deslocamento (autoria própria).

A Figura 3 apresenta os resultados da análise paramétrica das variáveis operacionais do processo, mostrando sua influência sobre a conversão do metano na reação de reforma e conversão do monóxido de carbono na reação de deslocamento.

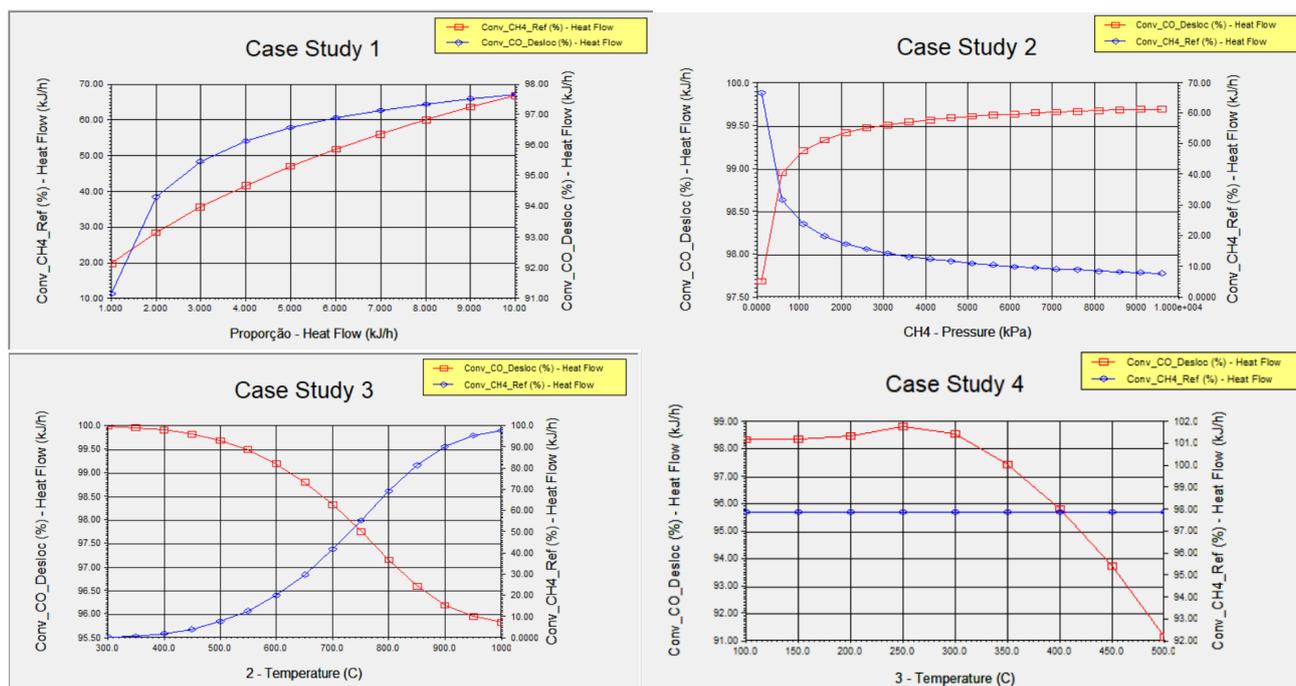


Figura 3 – Análise paramétrica das influência das variáveis operacionais sobre a conversão.

Com base no princípio de Le Chatelier, é possível perceber que, conforme aumentamos a proporção molar na entrada do reformador, observamos uma maior conversão dos reagentes e deslocamento da reação para a formação de produtos, já que estamos alimentando mais reagentes. Com relação a pressão, a conversão do CO é menos sensível que a do CH₄ uma vez que na reação de reforma, há produção de 4 mol de produtos para cada 2 mol de reagentes, portanto, reações a altas pressões no reator de reforma não favorecem a conversão do metano.

Além disso, foi possível notar que o aumento da temperatura da corrente age de diferentes maneiras na conversão de CO e CH₄ pois a reação de reforma é endotérmica, enquanto que a reação de deslocamento é exotérmica. No reator de reforma, altas temperaturas favorecem a conversão de metano e no reator de deslocamento, a conversão do CO é favorecida a temperaturas mais baixas.

CONCLUSÕES:

Ao longo do projeto, foi possível perceber as diferenças entre os tipos de hidrogênio estudados (verde, azul e cinza), assim como as suas vantagens de desvantagens entre si. A princípio, tanto o hidrogênio verde, como o azul se destacam como opções mais amigáveis ao meio-ambiente, no entanto, suas viabilidades econômicas e a baixa eficiência que apresentam, ainda são um empecilho para a produção em larga-escala, quando comparados com o cinza.

Isso ficou mais evidente através da análise da reforma do metano por meio do simulador Aspen HYSYS®, onde foi possível perceber que a alteração de variáveis de forma simples, como a temperatura na qual ocorrerá a reação e fração molar dos reagentes, conseguem impactar a produção de hidrogênio de forma muito positiva e conseqüentemente, trazendo destaque a essa forma de produção do gás.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS, M.; LEÃO, C.; AMORIM, L. **O hidrogênio como fonte de energia: uma visão regulatória**. Acessado em 09/07/2025. Disponível em:

https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/08_campos_09.03.2021.pdf.

IBERDROLA. **O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta**. Acessado em 09/07/2025.

Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>.

KAMARUDDIN, A. H. M.; **Aspen Hysys: An Introduction to Chemical Engineering Simulation**, Lambert Academic Publishing, 2013. ISBN-13: 978-3659358791.

PENG, D.Y.; ROBINSON, D. B. **A New Two-Constant Equation of State**, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1976, 15 (1), 59–64. <https://doi.org/10.1021/i160057a011>.