

PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE POR PIRÓLISE

Amaro Olímpio Pereira Junior

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Silvio Carlos Anibal de Almeida

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Matheus Dias da Rocha

DNV Classificação Certificação e Consultoria

ABSTRACT: Hydrogen plays an important role in transitioning to a low-carbon economy as an alternative to fossil fuels. However, to become competitive, hydrogen must overcome technical and economic barriers: production, storage, transportation costs, and large-scale production from renewable sources. Steam methane reforming is the most used route for hydrogen generation due to its low cost. However, besides not reducing the dependence on fossil fuels, the process presents the inconvenience of greenhouse gas (GHG) emissions. This study evaluates the economic feasibility and emissions of different hydrogen production routes from methane, which can be obtained from biogas, a renewable fuel. Three routes for hydrogen production were compared: steam reforming, catalytic pyrolysis, and

plasma pyrolysis. The results analyzed CO₂ emissions and hydrogen production costs. Steam reforming showed hydrogen production costs ranging from 20.08 to 22.70 R\$/kgH₂ and pyrolysis from 34.18 to 36.74 R\$/kgH₂. However, considering the commercialization of carbon black, a byproduct of pyrolysis, the hydrogen production cost can be reduced to a range of 25.26 to 27.72 R\$/kgH₂. Regarding emissions, the values for steam reforming vary from 1.39 to 6.75 kg CO₂/kgH₂, considering CCS technologies, and for pyrolysis, they range from 0.18 to 1.19 kg CO₂/kgH₂.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio, Pirólise, Reforma a vapor, Metano, Descarbonização.

INTRODUÇÃO

A transição para uma economia de baixo carbono é um dos maiores desafios do nosso tempo, e o hidrogênio aparece como uma solução promissora para os desafios energéticos do século XXI. No entanto, a implantação de uma economia baseada em hidrogênio enfrenta um obstáculo significativo: o alto custo desse com-

bustível. Existem diferentes rotas para a produção de hidrogênio. O processo de reforma a vapor (SMR- *Steam Methane Reforming*) do gás natural é responsável pela maior parte da produção de hidrogênio no mundo (IEA, 2023a). Apesar de sua elevada eficiência, o SMR apresenta elevadas taxas emissões de CO₂, sendo necessário o uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para mitigá-las. Outra rota de produção de hidrogênio é a pirólise, que apresenta elevada eficiência e menor impacto ambiental comparativamente ao SMR (VARGAS; 2022).

Apenas 4% da produção global de hidrogênio provém de fontes renováveis, e o método mais utilizado é a eletrólise com eletricidade gerada por fontes solares e eólicas (YOUNAS, 2022). O custo da eletricidade gerada por fontes renováveis é elevado, o que acarreta uma elevação no custo final do hidrogênio verde (H₂V). O biogás, por outro lado, sendo uma fonte renovável e com um custo semelhante ao do gás natural, pode contribuir para minimizar o custo do H₂V. A composição do biogás varia bastante dependendo da fonte de matéria orgânica e das condições do processo, mas contém aproximadamente de 50 a 75% de metano (SELVARAJ, 2017).

O presente trabalho faz uma análise da produção de hidrogênio a partir do metano, que é o principal componente do biogás, nas diferentes rotas de pirólise comparando os resultados com a rota de SMR. Os resultados obtidos permitem comparar custo de produção do hidrogênio (LCOH), a eficiência dos processos e as emissões de CO₂ em cada uma das rotas.

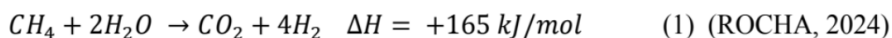
METODOLOGIA

O método mais amplamente utilizado para a produção de hidrogênio é a reforma a vapor do metano proveniente do gás natural (SMR). Esta técnica destaca-se pela sua maturidade tecnológica, eficiência e custo relativamente baixo (SRIDEVI, 2024). Por outro lado, a rota da pirólise de metano, embora tenha um custo mais elevado, tem sido intensamente estudada devido à sua elevada eficiência de conversão e menores emissões de CO₂. Existem vários tipos de pirólise, entre elas se podem citar: pirólise térmica, catalítica ou por plasma (ROCHA, 2024).

A metodologia neste estudo para o cálculo do consumo energético e emissões baseia-se nos trabalhos de Ingale (2022) e Howarth & Jacobson (2021)2021. Estes autores utilizam balanços de massa e energia para permitir uma comparação direta entre os processos. Os resultados obtidos neste trabalho também utilizam a mesma metodologia conforme indicado no item 3. As hipóteses adotadas para os cálculos estão indicadas no item 2.3. Através do balanço de massa e energia de cada processo (ver item 3) foi possível calcular as emissões, o consumo de metano e de eletricidade e os custos de produção de hidrogênio para 6 rotas: Reforma com sem CCS, Reforma com CCS Duplo, Pirólise Catalítica com e sem CCS, Pirólise por Plasma.

Reforma a Vapor (SMR)

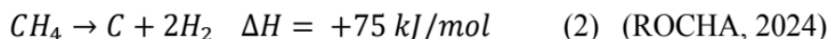
A reforma a vapor do metano é reconhecida como a técnica mais comum para a produção de hidrogênio, representando cerca de 62% da produção global de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023b). Neste processo, o metano (CH_4) reage com vapor d'água em altas temperaturas (entre 750°C e 900°C), resultando em dióxido de carbono e hidrogênio.



O calor necessário para este processo é fornecido pela combustão do gás natural, o que contribui para elevar ainda mais as emissões de CO_2 . A implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) tem sido explorada para mitigar essas emissões, transformando o hidrogênio cinza no comercialmente conhecido “hidrogênio azul”.

PIRÓLISE

A pirólise do metano é um processo promissor para a produção de hidrogênio, destacando-se pela ausência de emissões diretas de CO_2 . Nesse método, o metano (CH_4) é decomposto em hidrogênio (H_2) e carbono sólido (C) por meio de altas temperaturas, na ausência de oxigênio (VARGAS; 2022). A reação é representada pela equação:



O processo de decomposição pode ser feito por pirólise térmica, catalítica ou por plasma. A pirólise térmica utiliza calor para promover a quebra da molécula de metano, enquanto a pirólise catalítica se beneficia de catalisadores, como metais de transição, para reduzir a temperatura necessária ao processo. Já a pirólise por plasma emprega descargas elétricas de alta energia para dissociar o metano, apresentando grande potencial para integração com fontes de energia renovável (DERMÜHL, 2023) namely alkaline electrolysis (AEL. Apesar de evitar em evitar as emissões de CO_2 e elevada eficiência, a pirólise enfrenta desafios relacionados ao custo energético elevado, especialmente na pirólise por plasma (INGALE., 2022).

Hipóteses adotadas

Para padronizar as comparações, adotou-se a produção teórica de 1 kg de hidrogênio (495 mols), utilizando essa quantidade como unidade base para todos os cenários analisados (DERMÜHL, 2023; HOWART, 2021; INGALE., 2022) namely alkaline electrolysis (AEL.

Com base nas reações químicas, descritas pelas equações (1) e (2), foram estimados o consumo de reagentes e a energia necessária para a produção de hidrogênio. Na produção de 1 mol de H_2 , a pirólise consome teoricamente 0,5 mol de CH_4 e 37,5 kJ de energia, enquanto a reforma a vapor consome 0,25 mol de CH_4 e 41,25 kJ. No entanto, esses valores são influenciados pela eficiência de conversão do metano. A Tabela 1 resume as eficiências adotadas, bem como o consumo energético de uma das rotas estudadas.

Método	Consumo teórico (kJ/mol)	Eficiência	Consumo energético (kJ/mol)
Reforma a vapor (SMR)	41,25	80%	51,56
Pirólise catalítica	37,5	80%	46,88
Pirólise por plasma	37,5	90%	41,67

Tabela 1 – Eficiência e consumo energético da conversão de metano

Fontes (GEISSLER, 2016, COTTET, 2014) ;CASTRO, 2023)

Para a análise dos impactos ambientais considerou-se a queima do metano e a eletricidade como as principais fontes energéticas, tanto para a produção de hidrogênio, quanto nas tecnologias de CCS. O fator médio de emissão de dióxido de carbono (CO_2) associado à geração de eletricidade foi calculado com base nos dados divulgados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2024), e correspondente a 32 g de CO_2 por kWh produzido, no período de janeiro a junho de 2024. Este valor reflete a matriz elétrica brasileira durante o intervalo analisado, sendo utilizado para estimar as emissões indiretas relacionadas ao consumo de energia elétrica nos processos avaliados.

A integração das tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) foi avaliada para mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas à produção de hidrogênio. A eficiência de captura adotada na análise baseou-se em dados industriais, considerando uma média de 85% do CO_2 gerado diretamente pelo processo e 65% das emissões provenientes dos gases de exaustão necessários para o fornecimento de energia (DERMÜHL, 2023; HOWART, 2021; INGALE., 2022)namely alkaline electrolysis (AEL. Além disso, as emissões adicionais relacionadas ao consumo de energia para operar as tecnologias de CCS foram incluídas no cálculo. Um relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas indica que o aumento no consumo de energia devido à CCS varia entre 11% e 40% em termoeletricas, dependendo do tipo de planta, enquanto novas instalações para produção de hidrogênio podem apresentar aumentos de 4% a 22% (IPCC, 2005). Para esta análise, foi adotado o valor intermediário de 25%, permitindo estimar de forma equilibrada o impacto energético adicional associado à captura de carbono. Na Tabela 2 constam as principais propriedades dos compostos presentes neste estudo:

Compostos	Peso Molecular (g/mol)	Massa específica (kg/Nm³)	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
CH ₄	16,04	0,66	53,6
C	12,01	2267	32,8
H ₂	2,02	0,085	141,87
CO ₂	44,01	1,87	-

Tabela 2 – O peso molecular, massa específica e poder calorífico dos compostos

Fonte: Ingale (2022 pg 22)

RESULTADOS

Reforma sem captura

O primeiro caso a ser avaliado é a produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do metano sem a presença de tecnologias de captura. Conforme ilustrado pela figura abaixo, o fornecimento de energia para a reação se dá pela combustão de metano.

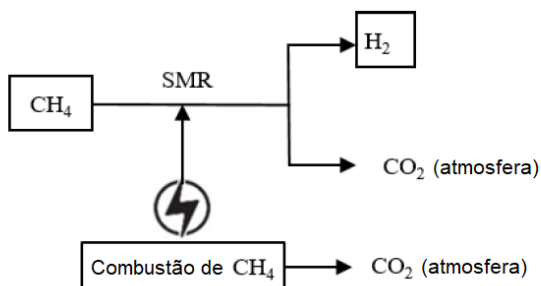


Figura 1 – Diagrama de processo da reforma sem CCS, adaptado de Ingale et al. (2022)

Conforme visto na Tabela 1, para a formação de 1 mol de hidrogênio, são consumidos 51,56 kJ/molH₂. Com isso, é possível calcular a quantidade de CH₄ a ser queimado para fornecimento de energia para a formação de 1kg (495 moles) de H₂, utilizando seu poder calorífico, presente na Tabela 2. Além disso, é possível calcular as emissões advindas dessa combustão:

$$(0,0516 \text{ MJ/molH}_2) \times (495 \text{ molH}_2) \div (53,6/1000 \text{ MJ/gCH}_4) = 476 \text{ gCH}_4/\text{kgH}_2 \quad (3)$$

$$(476 \text{ g CH}_4) \div (16,04 \text{ g/mol CH}_4) = 29,7 \text{ molCH}_4 \quad (4)$$

$$(29,7 \text{ molCH}_4) \times (1 \text{ molCO}_2/1 \text{ molCH}_4) \times (44,01 \text{ g/molCO}_2) = 1307 \text{ gCO}_2/\text{kgH}_2 \quad (5)$$

Além disso, é necessário calcular a quantidade de metano convertido em hidrogênio, bem como a quantidade de CO₂ produzido pelo processo, conforme equação 3.

$$(495 \text{ molH}_2) \times (1 \text{ molCH}_4/4 \text{ molH}_2) \times (16,04 \text{ g/molCH}_4) \times (1/0,80) = 2481 \text{ gCH}_4/\text{kgH}_2 \quad (6)$$

$$(495 \text{ molH}_2) \times 1 \text{ molCO}_2/4 \text{ mol H}_2 \times (44,01 \text{ g/molCO}_2) = 5447 \text{ gCO}_2/\text{kgH}_2 \quad (7)$$

Assim, o total de CO₂ emitido eo total de metano consumido é calculado pelas equações 8 e 9:

$$(1307 \text{ g } CO_2) + (5447 \text{ g } CO_2) = 6753 \text{ g } CO_2 \approx 6,75 \text{ kg } CO_2 / \text{kg } H_2 \quad (8)$$

$$(476 \text{ g } CH_4) + (2481 \text{ g } CH_4) = 2958 \text{ g } CH_4 \approx 2,96 \text{ kg } CH_4 / \text{kg } H_2 \quad (9)$$

Reforma com captura simples

O segundo caso a ser avaliado é a produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do metano com a presença de tecnologia de captura apenas do CO_2 advindo da reação principal, conforme ilustrado pela Figura 2.

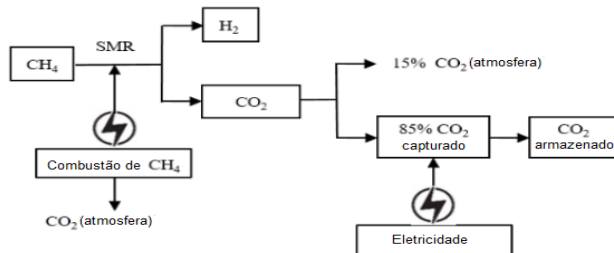


Figura 2 – Diagrama de processo da reforma com CCS simples, adaptado de Ingale et al. (2022)

Para este caso, as equações 3, 4, 5, 6 e 9 ainda são válidas. Considerando uma taxa de 85% do CO_2 gerado pela reação de reforma, é possível calcular a quantidade de emissões diretas pela reforma:

$$15\% \times (495 \text{ mol } H_2) \times 1 \text{ mol } CO_2 / 4 \text{ mol } H_2 \times (44,01 \text{ g } / \text{mol } CO_2) = 817 \text{ g } CO_2 / \text{kg } H_2 \quad (10)$$

A demanda energética para se operar a tecnologia de CCS, e sua consequente emissão são calculadas pelas equações 11 e 12:

$$25\% \times (0,052 \text{ MJ } / \text{mol } H_2) \times (495 \text{ mol } H_2) \div (3,6 \text{ MJ } / \text{KWh}) = 1,77 \text{ KWh } / \text{kg } H_2 \quad (11)$$

$$(1,77 \text{ kWh}) \times (32 \text{ g } CO_2 \text{eq } / \text{kWh}) = 57 \text{ g } CO_2 \text{eq } / \text{kg } H_2 \quad (12)$$

Assim, a emissão total do processo é:

$$(1307 \text{ g } CO_2) + (817 \text{ g } CO_2) + (57 \text{ g } CO_2) = 2180 \text{ g } CO_2 \approx 2,18 \text{ kg } CO_2 / \text{kg } H_2 \quad (13)$$

Reforma com captura dupla

O próximo caso a ser avaliado é a produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do metano com a presença de tecnologia de captura tanto do CO_2 advindo da reação principal, quanto da saída de gases provenientes da exaustão da combustão. A figura 3 ilustra o processo.

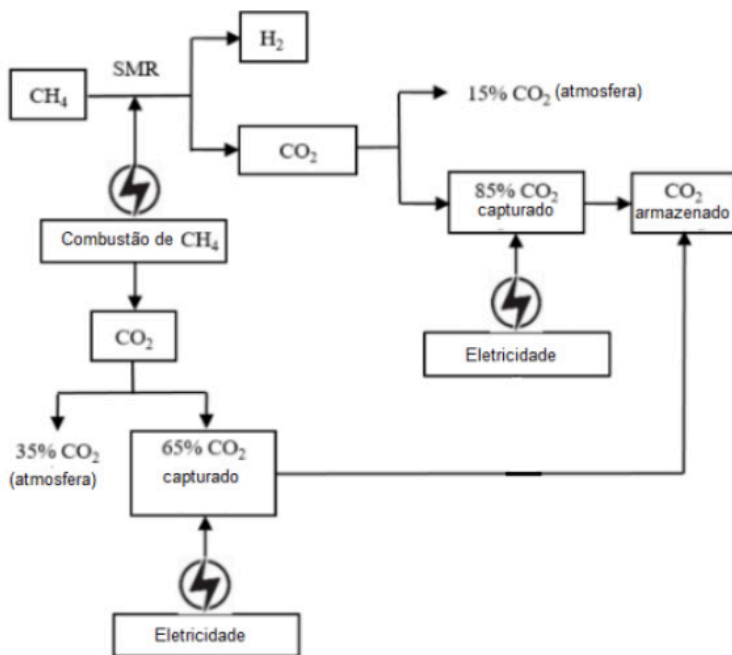


Figura 3 – Diagrama de processo da reforma com CCS dupla, adaptado de Ingale et al. (2022)

Neste caso, as equações 3, 4, 6, 9, 10, 11 e 12 permanecem inalteradas. Considerando uma taxa de 65% do CO_2 gerado pela combustão, é possível calcular as emissões geradas pelo fornecimento de energia:

$$35\% \times (29,7 \text{ molCH}_4) \times (1 \text{ molCO}_2/1 \text{ molCH}_4) \times (44,01 \text{ g/molCO}_2) = 457 \text{ gCO}_2/\text{kgH}_2 \quad (14)$$

Admitiu-se a hipótese de que o consumo de eletricidade é igual para ambas as tecnologias de captura de carbono, resultando na mesma quantidade de CO_2 emitido. Assim, as emissões totais são:

$$(457 \text{ g CO}_2) + (817 \text{ g CO}_2) + 2 \times (57 \text{ g CO}_2) = 1388 \text{ g CO}_2 \approx 1,39 \text{ kg CO}_2 / \text{kg H}_2 \quad (15)$$

Pirólise catalítica sem captura

O próximo caso a ser avaliado é a pirólise catalítica do metano sem a presença de tecnologia de captura de carbono, conforme mostrado na Figura 4.

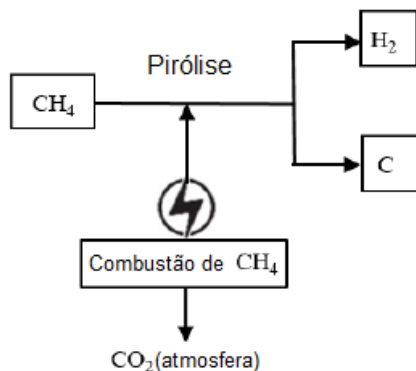


Figura 4 – Diagrama de processo de pirólise catalítica sem CCS, adaptado de Ingale et al. (2022)

É necessária a queima de CH_4 para fornecer calor ao processo, o que também ocasiona emissão de CO_2 . A Tabela 1 apresenta o consumo energético de 46,88 kJ/mol H_2 para a formação de 1 mol de hidrogênio, a partir da pirólise catalítica do metano. Com base nesse valor, é possível calcular a quantidade de CH_4 que deve ser queimado para fornecer a energia necessária à produção de 1 kg (495 moles) de H_2 , utilizando o seu poder calorífico indicado na Tabela 2. Além disso, podem ser calculadas as emissões resultantes dessa combustão pelas equações abaixo:

$$(0,0469 \text{ MJ/molH}_2) \times (495 \text{ molH}_2) \div (53,6/1000 \text{ MJ/gCH}_4) = 433 \text{ gCH}_4/\text{kgH}_2 \quad (16)$$

$$(433 \text{ g CH}_4) \div (16,04 \text{ g/mol CH}_4) = 27 \text{ molCH}_4 \quad (17)$$

$$(27 \text{ molCH}_4) \times (1 \text{ molCO}_2/1 \text{ molCH}_4) \times (44,01 \text{ g/molCO}_2) = 1188 \text{ gCO}_2/\text{kgH}_2 \quad (18)$$

Além disso, é necessário calcular a quantidade de metano convertido em hidrogênio, bem como a quantidade de carbono sólido produzido pelo processo, conforme equação 4.

$$(495 \text{ molH}_2) \times (1 \text{ molCH}_4/2 \text{ molH}_2) \times (16,04 \text{ g/molCH}_4) \times (1/0,80) = 4963 \text{ gCH}_4/\text{kgH}_2 \quad (19)$$

$$(495 \text{ molH}_2) \times 1 \text{ molC}/2 \text{ mol H}_2 \times (12,01 \text{ g/molC}) = 2973 \text{ gC/kgH}_2 \quad (20)$$

Assim, o total de metano consumido será:

$$(433 \text{ g CH}_4) + (4963 \text{ g CH}_4) = 5396 \text{ g CH}_4 \approx 5,40 \text{ kg CH}_4 / \text{kg H}_2 \quad (21)$$

Pirólise catalítica com captura

O próximo caso a ser avaliado é a pirólise catalítica do metano com a presença de tecnologia de captura de carbono, conforme Figura 5.

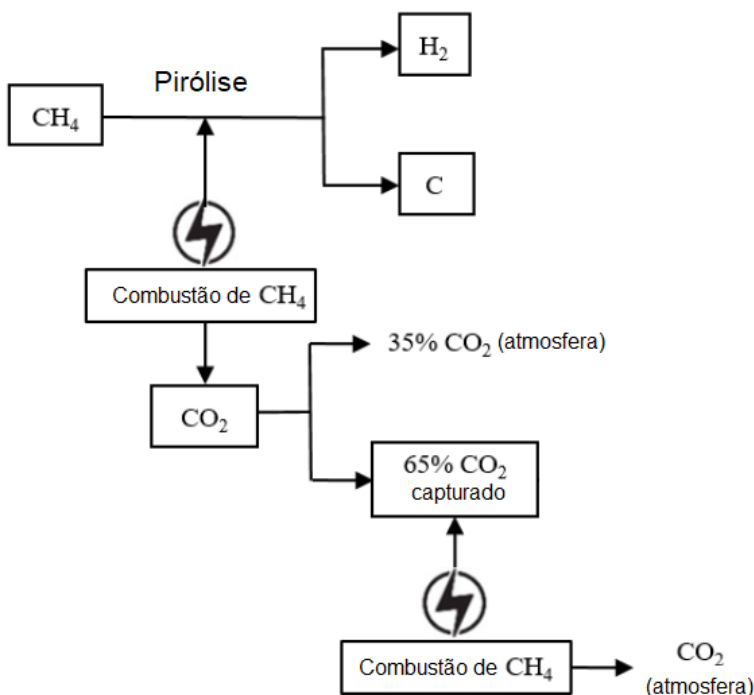


Figura 5 – Diagrama de processo de pirólise catalítica com CCS, adaptado de Ingale et al. (2022)

Para este caso, as equações 16, 17, 19, 20 e 21 ainda são válidas. Considerando uma taxa de 65% do CO_2 gerado pela reação de reforma, é possível calcular a quantidade de emissões diretas pela reforma:

$$35\% \times (27 \text{ molCH}_4) \times (1 \text{ molCO}_2/1 \text{ molCH}_4) \times (44,01 \text{ g/molCO}_2) = 416 \text{ gCO}_2/\text{kgH}_2 \quad (22)$$

A eletricidade necessária para a captura foi considerada como 25% da energia do processo e sua consequente emissão é expressa abaixo:

$$25\% \times (0,0469 \text{ MJ/mol H}_2) \times (495 \text{ mol H}_2) \div (3,6 \text{ MJ/KWh}) = 1,61 \text{ KWh/kg H}_2 \quad (23)$$

$$(1,61 \text{ kWh}) \times (32 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}) = 52 \text{ g CO}_2\text{eq/kg H}_2 \quad (24)$$

Assim, a emissão total do processo é dada por:

$$(416 \text{ g CO}_2) + (52 \text{ g CO}_2) = 467 \text{ g CO}_2 \approx 0,47 \text{ kg CO}_2 / \text{kg H}_2 \quad (25)$$

Pirólise por plasma

O último caso a ser avaliado é a pirólise por plasma, descrita na Figura 6.

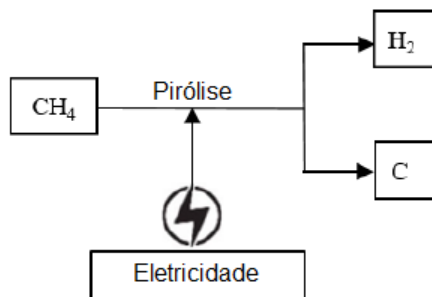


Figura 6 – Diagrama de processo de pirólise por plasma, adaptado de Ingale et al. (2022)

Conforme ilustrado na Tabela 1, para a formação de 1 mol de hidrogênio pelo processo de pirólise por plasma do metano, o consumo energético é 41,67 kJ/mol H₂. Com base nesse valor, é possível calcular a quantidade de eletricidade necessária à produção de 1 kg (495 moles) de H₂. Além disso, podem ser calculadas as emissões resultantes desse consumo:

$$(0,0417 \text{ MJ/molH}_2) \times (495 \text{ molH}_2) \div (3,6 \text{ MJ/KWh}) = 5,73 \text{ KWh/kgH}_2 \quad (26)$$

$$(5,73 \text{ kWh}) \times (32 \text{ g CO}_2\text{eq/kWh}) = 183 \text{ g CO}_2\text{eq/kg H}_2 \quad (27)$$

Além disso, é necessário calcular a quantidade de metano convertido em hidrogênio, bem como a quantidade de carbono sólido produzido pelo processo, conforme Equação 4.

$$(495 \text{ molH}_2) \times (1 \text{ molCH}_4/2 \text{ molH}_2) \times (16,04 \text{ g/molCH}_4) \times (1/0,90) = 4411 \text{ gCH}_4/\text{kgH}_2 \quad (28)$$

$$(495 \text{ molH}_2) \times 1 \text{ molC}/2 \text{ mol H}_2) \times (12,01 \text{ g/molC}) = 2973 \text{ gC/kgH}_2 \quad (29)$$

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das emissões, do consumo de metano e de eletricidade calculados no item 3, com as hipóteses adotadas no item 2.3., foram resumidos na Tabela 3.

Método	Emissões (kg CO ₂ /kg H ₂)	Metano Consumido (kg CH ₄ /kg H ₂)	Eletricidade Consumida (kWh/kg H ₂)
Reforma sem CCS	6,75	2,96	-
Reforma com CCS Simples	2,18	2,96	1,77
Reforma com CCS Duplo	1,39	2,96	3,55
Pirólise Catalítica sem CCS	1,19	5,40	-
Pirólise Catalítica com CCS	0,47	5,40	1,61
Pirólise por Plasma	0,18	4,41	5,73

Tabela 3 – Resumo das emissões, consumo de metano e de eletricidade

Fonte: Dados do autor

Conhecendo o consumo de metano e eletricidade, foi possível estimar o custo de produção de hidrogênio em cada rota estudada, conforme apresentado na Tabela 4. Os resultados foram calculados considerando-se o preço médio do metano de R\$ 6,79/kg (Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2024)), e da eletricidade de R\$ 0,738/KWh (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2024)).

Método	Custo do Metano (R\$/kg H ₂)	Custo da Eletricidade (R\$/kg H ₂)	Custo Total (R\$/kg H ₂)
Reforma sem CCS	20,08	-	20,08
Reforma com CCS Simples	20,08	1,31	21,39
Reforma com CCS Duplo	20,08	2,62	22,70
Pirólise Catalítica sem CCS	36,64	-	36,64
Pirólise Catalítica com CCS	36,64	1,19	37,83
Pirólise por Plasma	29,95	4,23	34,18

Tabela 4 – Custo estimado do hidrogênio

Fonte: Dados do autor

Contudo, os custos de produção do hidrogênio podem ser abatidos pelas receitas geradas pela comercialização do carbono sólido formado pela pirólise. Levando-se em consideração o potencial econômico desse produto, considerando o valor de R\$ 6,00/kg de negro de fumo (valor fornecido pela empresa DelQuímica), o custo abatido do hidrogênio com a produção de 2,97 kg de C é calculado na Tabela 5. Os resultados do LCOH abatido (Tabela 5) estão razoavelmente próximos dos custos da Reforma e com a vantagem de menores emissões ou emissões zero (pirólise por plasma).

Método	Custos de produção (R\$/kg H ₂)	Receita negro de fumo (R\$/kg H ₂)	Custo Abatido (R\$/kg H ₂)
Pirólise Catalítica sem CCS	36,64	8,92	27,72
Pirólise Catalítica com CCS	37,83	8,92	28,91
Pirólise por Plasma	34,18	8,92	25,26

Tabela 5 – LCOH abatido

Fonte: Dados do autor

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram que os processos de reforma a vapor (SMR) e pirólise possuem características complementares no contexto da produção de hidrogênio, sendo fundamentais para a transição energética e a descarbonização. Cada rota apresenta vantagens e desafios que devem ser considerados em diferentes cenários técnicos, econômicos e ambientais.

A reforma a vapor se consolidou como o método dominante em escala industrial devido à sua maturidade tecnológica, eficiência energética e menores custos operacionais. No entanto, suas emissões elevadas de dióxido de carbono ($6,75 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$) representam um desafio significativo para a sustentabilidade. A implementação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) mostrou-se eficaz na mitigação dessas emissões, com reduções para até $1,39 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$ no cenário com captura dupla. Contudo, a CCS aumenta o consumo energético do processo em até $3,55 \text{ kWh/kg H}_2$, o que exige maior investimento em infraestrutura e fontes de energia limpa.

A pirólise, por sua vez, surge como uma alternativa inovadora e com grande potencial de sustentabilidade. Sua capacidade de produzir hidrogênio sem emissões diretas de CO_2 confere uma vantagem ambiental significativa. A pirólise por plasma, em particular, apresentou os menores valores de emissões totais ($0,18 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$), embora ainda enfrente desafios relacionados ao alto consumo energético ($5,73 \text{ kWh/kg H}_2$) e aos custos associados. A pirólise catalítica, por outro lado, oferece um consumo energético mais equilibrado, com emissões de $0,47\text{--}1,19 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$, mantendo-se como uma opção intermediária promissora.

Do ponto de vista econômico, a reforma a vapor permanece como a rota mais competitiva, com custos entre $20,08$ e $22,70 \text{ R\$/kg H}_2$, mesmo com a aplicação de CCS. Em contrapartida, os custos iniciais mais elevados da pirólise ($34,18$ a $37,83 \text{ R\$/kg H}_2$) podem ser significativamente reduzidos pela comercialização do carbono sólido (negro de fumo), um subproduto de alto valor agregado, resultando em custos finais entre $25,26$ e $27,72 \text{ R\$/kg H}_2$. Esse fator torna a pirólise economicamente mais atraente em cenários que valorizam produtos derivados e priorizam a sustentabilidade.

Para o contexto brasileiro, a pirólise apresenta oportunidades estratégicas adicionais, especialmente devido ao potencial de utilização de biogás como alternativa ao metano fóssil, o que pode transformar a pirólise em uma rota de produção de hidrogênio verdadeiramente sustentável, alinhada às metas de descarbonização do país e ao compromisso com o Acordo de Paris.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrJoiZjZhZDIiMTYtOWYtZi00OGY5LWJkYzltOTQ1MzFjZGMzMMDNkliwidCI6IjQ0OTImNGZmLTl0YTtytNGl0Mi1iN2VmLTExNGFmY2FkYzkyMyJ9>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

CASTRO, N. DE. **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro, RJ: Editora E-papers, 2023.

COTTET, L. et al. Produção de Hidrogênio e Negro de Carbono a partir da Degradação de Metano por Plasma Térmico. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 35, n. 1, p. 103–114, 5 maio 2014.

DERMÜHL, S.; RIEDEL, U. A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies. **Fuel**, v. 340, p. 127478, 15 maio 2023.

GEISLER, T. et al. Hydrogen production via methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor with a packed bed. **Chemical Engineering Journal**, v. 299, p. 192–200, 1 set. 2016.

HOWARTH, R. W.; JACOBSON, M. Z. **How green is blue hydrogen?** *Energy Science & Engineering*, v. 9, n. 10, p. 1676–1687, 2021.

IEA. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>>. Acesso em: 23 dez. 2024a.

IEA. **Global Hydrogen Review 2023**. , 2023b.

INGALE, G. U. et al. **Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming**. *Energies*, v. 15, n. 22, p. 8679, jan. 2022.

IPCC,. **Carbon Dioxide Capture and Storage**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>>. Acesso em: 23 dez. 2024.

ROCHA, M. D. DA. **Rotas De Produção de Hidrogênio a Partir do Metano**. Projeto de Graduação, ,2024. Disponível em: <<https://monografias.poli.ufrj.br/rep-download.php?farquivo=projpoli10044538.pdf&fcodigo=6643>>. Acesso em: 4 mar. 2025

SELVARAJ, R. et al. **Monitoring of CO₂ and CH₄ composition in a biogas matrix from different biomass structures**. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 249, p. 378–385, 1 out. 2017.

SRIDEVI, V. et al. **Challenges and opportunities in the production of sustainable hydrogen from lignocellulosic biomass using microwave-assisted pyrolysis: A review**. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 52, p. 507–531, 2 jan. 2024.

VARGAS, C.; KANDERIAN, Z.; GANNOUM, E. **Hidrogênio Turquesa: Produção a partir da pirólise do gás natural**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-663/Nota%20Tecnica%20Hidrogenio%20Turquesa_12.04.22.pdf>.

YOUNAS, M. et al. **An Overview of Hydrogen Production: Current Status, Potential, and Challenges**. *Fuel*, v. 316, p. 123317, 15 maio 2022.