

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

Leonardo Ferreira Sabbadim

**ESTUDO DA ECOEFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
PELA REFORMA DO BIOGÁS A PARTIR DA ANÁLISE
ENVOLTÓRIA DE DADOS**

Rio de Janeiro

2022

Leonardo Ferreira Sabbadim

**ESTUDO DA ECOEFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
PELA REFORMA DO BIOGÁS A PARTIR DA ANÁLISE
ENVOLTÓRIA DE DADOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador(a): Hector Napoleão Cozendey da Silva

Rio de Janeiro

2022

Ficha Catalográfica

Cutter (n. do autor)	Sabbadim, Leonardo Ferreira Estudo da ecoeficiência da produção de hidrogênio pela reforma do biogás a partir da análise envoltória de dados/ Leonardo Ferreira Sabbadim. -- 2022. nº. 60. Orientador: Hector Napoleão Cozendey da Silva Trabalho de Conclusão de Curso (bacharel em engenharia química) – Senai CETIQT, Rio de Janeiro, 2022. 1. Assunto. 2. Assunto. 3. Assunto. 4. Assunto. 5. Assunto. I. Título. <table border="1"><tr><td>Número de classificação do assunto</td><td>→ CDD</td></tr></table>	Número de classificação do assunto	→ CDD
Número de classificação do assunto	→ CDD		

Leonardo Ferreira Sabbadim

Estudo da ecoeficiência da produção de hidrogênio pela reforma do biogás a partir da análise envoltória de dados

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Aprovada em:

Aprovado por:

Orientador: Hector Napoleão Cozendey da Silva, D.SC.

Banca Examinadora:

Gilliani Peixoto Miranda, M.SC., SENAI CETIQT

Lisiane Veiga Mattos, D.SC., UFF

Michelle Reich, M.SC., SENAI CETIQT

Rio de Janeiro

2022

A memória da minha madrinha Lília, que dedicou sua vida a educação, a família, e sempre incentivou todos ao seu redor a investir nos estudos, acreditando que a mudança vem pela educação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus familiares, por todo apoio que sempre me deram, em especial aos meus tios José Carlos e Ana Maria. À minha mãe, que além de todo o incentivo, ajuda e carinho, tornou essa etapa da minha vida possível. À Carolina, Armando e Irene, pelo suporte durante esses últimos anos.

Agradeço ao meu orientador, Hector, por todos os ensinamentos e que sempre acreditou e me incentivou, não medindo esforços para fazer essa orientação, obrigado pela relação de amizade que criamos e espero tê-la por muito tempo.

Ao corpo docente do curso de Engenharia Química da Faculdade Senai Cetiq, por sempre confiarem e enxergarem potencial em mim me incluindo em projetos, iniciações científicas e monitorias. Agradeço em especial aos professores, Luciano de Andrade, Geneci Sousa, Cláudia de Abreu, Letícia Quinello, André Luiz Carneiro, Michelle Reich, Alberto Vieira e Gilliani Miranda.

Agradeço também aos meus amigos, Raytsa do Prado, Daniel Voltaire, Karina Ximenes, André Luiz Moreira, Dalci Machado, Matheus Tenório, Camila Paes, Felipe Melazzi, David Pio, Iago Gallo e Iliar Machay, por todos os bons momentos descontraídos e divertidos, que permitem o equilíbrio para manter a saúde mental.

A todos os colegas e amigos que adquiri durante a vida acadêmica, Jefferson Pina, Marina Leite, Nikole Klotz, Julio Oliveira, Thiago Alves e Gabrielly Serrano, que tornaram essa jornada mais agradável e os momentos de estudo um grande espaço de debate e troca de conhecimentos.

Agradeço a Ana Beatriz Homem Pereira, que sempre foi uma das maiores fonte de apoio, carinho e incentivo, sendo paciente e compreensível comigo em todos os momentos de dificuldades e fraquezas.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os incentivadores e facilitadores da educação, entendendo que não deve existir barreiras para o conhecimento.

*“Nós poderíamos ser muito melhores se não
quiséssemos ser tão bons.”*

SIGMUND FREUD

RESUMO

O processo de produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do biogás é um possível substituto para reduzir os impactos ambientais da produção tradicional, porém, seu produto final nem sempre é compatível com o preço do mercado. Neste trabalho, foi realizado o estudo em uma proposta de produção de hidrogênio, utilizando biogás de aterro sanitário. Foram analisadas doze simulações de cenários de produção diferentes realizadas no *software* Unisim[®], variando a vazão e as razões molares de alimentação de CH₄, CO₂ e H₂O, para possibilitar o estudo do impacto dessa variação sobre o custo e a eficiência. Adicionalmente, foram calculados ecoindicadores da emissão de carbono, consumo de água e custo de produção, relacionando-os com a quantidade da produção do hidrogênio, seguindo a metodologia apresentada na literatura, associando uma variável ambiental por uma de produção. O uso desses ecoindicadores permitiu identificar a ecoeficiência do processo, utilizando a análise envoltória de dados para correlacionar os diversos indicadores sustentáveis normalizados, na criação de um único indicador final. A ecoeficiência foi gerada com o uso do *software* SIAD, sistema integrado de apoio a decisão, que indica os melhores resultados a partir da identificação de fronteiras de eficiência e ineficiência e a resultante composta pelas duas. Os doze cenários estudados foram tratados como Unidades Tomadoras de Decisão, e a análise resultou em um cenário de destaque comparado aos outros. A DMU 5, considerada mais eficaz, foi analisada também como o melhor ecoindicador de emissão de carbono e custo de produção. Além disso, essa mesma Unidade Tomadora de Decisão foi a mais impactante em outros fatores sociais e econômicos, como a quantidade de residências abastecidas pela energia e o melhor retorno financeiro. Com o cenário destacado, foi possível observar os impactos dos fatores operacionais, sendo a vazão de alimentação, o principal fator para a quantidade de produção. A variação das razões molares de CH₄, CO₂ e H₂O mostrou-se pouco impactante nesse aspecto, contudo, todos os casos com a menor quantidade de água obtiveram melhores resultados nos ecoindicadores, em especial ao ecoindicador do consumo de água.

Palavras-chave: Ecoindicadores, Ecoeficiência, Análise Envoltória de Dados, SIAD, Reforma de Biogás.

ABSTRACT

The hydrogen production process from the steam reforming of biogas is a possible substitute to reduce the environmental impacts of traditional production, however, its final product is not always compatible with the market price. In this work, a study was carried out on a proposal for the production of hydrogen, using landfill biogas. Twelve simulations of different production scenarios carried out in the Unisim© software were analyzed, varying the flow rate and molar ratios of CH₄, CO₂ and H₂O feed, to enable the study of the impact of this variation on cost and efficiency. Additionally, eco-indicators of carbon emissions, water consumption and production costs were calculated, relating them to the amount of hydrogen production, following the methodology presented in the literature, associating one environmental variable with one of production. The use of these eco-indicators allowed identifying the eco-efficiency of the process, using data envelopment analysis to correlate the different normalized sustainable indicators, creating a single final indicator. The eco-efficiency was generated using the SIAD software, an integrated decision support system, which indicates the best results from the identification of efficiency and inefficiency frontiers and the resulting composite of both. The twelve scenarios studied were treated as Decision-Making Units, and the analysis resulted in a scenario that stood out compared to the others. DMU 5, considered the most effective, was also analyzed as the best eco-indicator of carbon emissions and production cost. In addition, this same Decision-Making Unit was the most impactful in other social and economic factors, such as the number of homes supplied by energy and the best financial return. With the scenario highlighted, it was possible to observe the impacts of operational factors, with the feed flow being the main factor for the amount of production. The variation in the molar ratios of CH₄, CO₂ and H₂O had little impact in this regard, however, all cases with the lowest amount of water obtained better results in the ecoindicators, in particular the ecoindicator of water consumption.

Keywords: Ecoindicators, Eco-efficiency, Data Envelopment Analysis, SIAD, Biogas Reforming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Processo simplificado da tecnologia tradicional de produção de H ₂	21
Figura 2 -	Fluxograma de produtos a partir do biogás.....	21
Figura 3 -	Reformador com chamas laterais.....	23
Figura 4 -	Fluxograma simplificado de um sistema de PSA.....	26
Figura 5 -	Layout do software SIAD.....	31
Figura 6 -	Retornos Crescentes, Constantes e Decrescentes de Escala.....	32
Figura 7 -	Fluxograma metodológico.....	33
Figura 8 -	Comparação dos ecoindicadores de CO ₂ normalizados.....	43
Figura 9 -	Comparação ecoindicadores de H ₂ O normalizados.....	44
Figura 10 -	Comparação dos ecoindicadores de custo de produção normalizados.....	46
Figura 11 -	Comparativo das 12 DMUs (a) e os 3 melhores resultados (b).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados na alimentação do reformador dos 12 casos estudados.....	31
Tabela 2 -	Dados da produção de H ₂ obtidos no <i>Unisim</i>	32
Tabela 3 -	Cálculo de CO ₂ total emitido.....	39
Tabela 4 -	Ecoindicador do CO ₂ total emitido.....	41
Tabela 5 -	Ecoindicador do consumo de água.....	43
Tabela 6 -	Ecoindicador de custo de produção.....	45
Tabela 7 -	Normalização dos Ecoindicadores.....	47
Tabela 8 -	Resultados das eficiências aplicadas ao SIAD.....	48
Tabela 9 -	Resultados de indicadores financeiros e sociais.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
CETIQT	Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil
SIAD	Sistema Integrado de Apoio a Decisão
DEA	<i>Data Envelopment Analysis</i>
DMU	<i>Decision Making Units</i>
CCR	Charnes, Cooper e Rhodes
BBC	Banker, Charnes e Cooper
CRS	Constant Return to Scale
VRS	Variable Return to Scale
WGS	<i>Water Gas Shift</i>
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
VPL	Valor Presente líquido

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	15
1.1. INTRODUÇÃO	15
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. OBJETIVO GERAL	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.3. JUSTIFICATIVA	18
1.4. DELIMITAÇÃO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. O USO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	19
2.2. ETAPAS CRÍTICAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	21
2.2.1. Reformador	21
2.2.2. <i>Water Gas Shift</i> (WGS)	22
2.2.3. <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA)	23
2.3. VIABILIDADE ECONÔMICA	24
2.4. ECOEFICIÊNCIA	24
2.4.1. Ecoindicadores	25
2.5. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS	26
2.5.1. Modelo DEA-CCR	28
2.5.2. Modelo DEA-BBC	28
3. CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	30
3.1.1. Reformador	30
3.1.2. <i>Water Gas Shift e Pressure Swing Adsorption</i>	31
3.1.3. Dados de saída do processo de produção de hidrogênio	32
3.2. ANÁLISE DEA	33
3.2.1. Modelo DEA	34
3.3. ECOINDICADORES	35

3.3.1. Ecoindicador de emissão de CO ₂	35
3.3.2. Ecoindicador de H ₂ O consumido	36
3.3.3. Ecoindicador de custo de produção.....	37
3.4. SISTEMA INTEGRADO DE APOIO A DECISÃO	37
4. CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1. DADOS DA PRODUÇÃO DE H ₂	39
4.2. ECOINDICADORES.....	40
4.2.1. Ecoindicador de emissão de CO ₂	40
4.2.2. Ecoindicador de consumo de H ₂ O	43
4.2.3. Ecoindicador de custo de produção.....	44
4.3. ANÁLISE DEA E A ECOEFICIÊNCIA	46
5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES FUTURAS	51
5.1. CONCLUSÃO	51
5.2. SUGESTÕES FUTURAS	52
REFERÊNCIAS	53
ANEXO A – Dados de resposta do siad	58

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

O uso de energias renováveis vem se destacando a cada ano como uma alternativa para reduzir o uso das energias de fontes fósseis e, conseqüentemente, diminuir as emissões de poluentes que intensificam o aquecimento global (González-García *et al.*, 2016). Segundo dados do relatório da *Renewables Now* (2021), em 2020, foi apresentado um crescimento do uso das energias renováveis, aumentando aproximadamente 30% (256 GW) em relação ao ano anterior (REN21, 2021).

Destaca-se no mesmo relatório, que uma parcela considerável desse aumento é destinada ao uso das energias eólica e solar, que tiveram, respectivamente, uma redução de 56% e 85% nos seus custos de produção nos últimos 10 anos (REN21, 2021). Contudo, essas energias renováveis são fontes intermitentes que possuem produção variável (COZENDEY DA SILVA, 2020). Então demonstra-se, que a transição para energias renováveis, bem como a aplicação de ferramentas para maximização de eficácia, não só é necessária, como é possível (BONITO, 2021).

Mesmo não sendo o maior contribuinte, o uso de biocombustíveis (biogás e bioetanol), possuem grande interesse de estudo e produção devido ao fornecimento de energia com alta disponibilidade e previsibilidade (HAHN *et al.*, 2014). Em especial no Brasil, o interesse nessa produção aumenta devido à forte participação da agricultura, que produz extratos e bagaços utilizados como matéria-prima, no mercado e, da presença de aterros sanitários, com biogás (gás de aterro) (COZENDEY DA SILVA *et al.*, 2018a).

A produção de biogás possui diversas aplicações, dentre elas a produção de vapor e calor, por meio do processo de combustão. Entretanto, diversas outras tecnologias apresentam características promissoras, como a produção de hidrogênio pela reforma do biogás (COZENDEY DA SILVA *et al.*, 2018b).

Contudo, a produção do hidrogênio (H₂) possui desafios, pois, a operação tende ao acúmulo de carbono, levando à perda de atividade do catalisador no reformador (ROSTRUP-NIELSEN; HANSEN, 1993). Ainda mais, a reação reversa de *shift* reduz a formação do H₂, causando uma perda da eficiência do processo (FARIA *et al.*, 2014). Sendo assim, para viabilização técnica e econômica desse processo faz-se necessário a determinação de condições

de operação, que levem a uma maior eficiência e condições em que esse processo seja mais sustentável.

Uma das técnicas utilizadas para análise de processos, em termos de eficiência, é a Análise Envoltória de Dados (DEA – da sigla em inglês *Data Envelopment Analysis*). O DEA é uma metodologia de programação matemática que busca a quantificação empírica da eficiência a partir de múltiplas entidades semelhantes denominadas Unidades Tomadoras de Decisão (DMU – da sigla em inglês *Decision Making Units*), que é responsável pela conversão dos inputs e outputs (COOPER *et al.*, 2007). As metodologias de aplicação do modelo diferem de acordo com a necessidade do processo, existindo uma pluralidade de modelos variando em função da orientação aplicada (orientado a entrada e/ou saída), métricas de modelo (radial ou não-radial), exibição do conjunto de possibilidades e características técnicas (MARTÍN-GAMBOA; IRIBARREN, 2021).

Os modelos tradicionais, CCR (Charnes, Cooper e Rhodes) e BCC (Banker, Charnes e Cooper), são classificadas segundo o retorno da escala, sendo o CCR constante (*Constant Return to Scale* - CRS) (CHARNES *et al.*, 1978) e o BCC variável (*Variable Return to Scale* – VRS) (BANKER *et al.*, 1984). Ambos permitindo uma orientação para maximização da saída (*output*) ou a minimização da entrada (*input*) (CHARNES *et al.*, 1997).

Os dados utilizados para a aplicação do DEA nesse trabalho foram obtidos a partir do trabalho de de Cozendey da Silva (2020), que realizou uma avaliação técnico-econômica do processo de energia a partir de células a combustível, usando como fonte de hidrogênio o biogás gerado no Aterro Jardim Gramacho /RJ. Neste trabalho foi realizado um estudo sobre produção de hidrogênio a partir de duas diferentes tecnologias (Tecnologia tradicional para reforma a vapor do biogás e reformador de membrana), usando diferentes condições de operação. É importante ressaltar ainda que não foram encontrados estudos na literatura sobre esse processo, aplicando a DEA, que atende aos parâmetros socioambientais, podendo realizar a análise em função da redução do gasto energético, do consumo de água, emissão de gases e matéria-prima consumida. (COZENDEY DA SILVA *et al.*, 2018b; ZHANG; LI, 2020).

Dessa forma, o presente estudo buscou a aplicação do DEA para calcular ecoindicadores a partir das condições de operação da produção de hidrogênio, permitindo a tomada de decisão sobre quais dados de entrada (condições operacionais) acarretam em um processo mais ecoeficiente (NRTEE, 2001; HUPPES, G.; ISHIKAWA, 2005a)

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo avaliar a ecoeficiência do processo de geração de energia renovável partir do hidrogênio obtidos pela reforma do biogás, utilizando DEA e Ecoindicadores.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter os dados do balanço de massa e energia pela simulação do processo de produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do biogás;
- Obter o valor presente líquido, taxa interna de retorno, *breakeven* e *payback*, avaliando a sustentabilidade econômica do processo a partir dos dados da literatura;
- Calcular os ecoindicadores a partir das variáveis ambientais e financeiras;
- Interpretar as DMUs como ecoindicadores;
- Aplicar o DEA para analisar o desempenho do processo;
- Avaliar a Ecoeficiência do processo a partir dos ecoindicadores.

1.3. JUSTIFICATIVA

O tripé da sustentabilidade abrange os pilares ambiental, social e econômico, dessa forma, busca-se uma inclusão do tema do trabalho para minimizar os impactos ocasionados pela produção de hidrogênio nos três âmbitos para gerar impactos positivos nesses pilares sustentáveis (COZENDEY DA SILVA *et al.*, 2018a). No campo ambiental, em específico, faz-se necessário um estudo sustentável devido ao preocupante uso de energia de fontes não renováveis que possuem uma grande parcela de participação na emissão dos gases de efeito estufa.

Ainda debatendo o tripé sustentável de forma direta, com relação a produção de hidrogênio, tem-se a proveniente do carvão, rota mais poluidora, que atinge cerca de 80% da produção mundial devido ao seu menor custo (REN21, 2021). Diante dos problemas ambientais causados por essa produção de energia a partir de combustíveis fósseis, o uso de fontes renováveis (como o biogás) e processos energeticamente mais eficientes (como a geração de energia a partir do hidrogênio) iriam contribuir para o desenvolvimento de uma economia mais sustentável. Com a aplicação de ferramentas de análise de eficiência, consegue-se encontrar indicadores de melhores cenários produtivos, para que essas rotas menos poluentes se tornem mais compatíveis com o mercado.

1.4. DELIMITAÇÃO

Devido a abrangência do assunto, delimita-se esse trabalho à produção do hidrogênio pela reforma do biogás e a aplicação dos modelos clássicos da análise envoltória de dados CCR e BBC orientados ao *input*, devido a eficiência do processo estudado ser medida em função da minimização das entradas (ecoindicadores). A descrição do processo produtivo limita-se as partes denominadas como críticas (Reformador, WGS e PSA). A metodologia para a criação de ecoindicadores foi a proposta pelos autores Hupples e Ishikawa (2005b), e a de análise foi conforme Kuosmanen e Kortelainen (2004).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O USO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa composta por metano (CH₄), nitrogênio (N₂), gás carbônico (CO₂), oxigênio (O₂) e outros gases, com produção similar ao gás natural, mas com maior teor de CO₂ na composição (YANG *et al.*, 2014). Devido a sua composição, o biogás é um intensificador do aquecimento global, entretanto por ser advindo de fontes renováveis, torna-se um interessante substituinte para o gás natural (combustível (COZENDEY DA SILVA, 2020).

Uma das principais aplicações do biogás é para gerar energia, sendo injetado em linhas de gás natural após o processo de purificação ou utilizado como combustível mediante a adição da etapa de compressão ou liquefação (YANG *et al.*, 2014). Entretanto, como combustível, possui um menor valor energético em relação a outros gases devido ao alto teor de gás carbônico. (COZENDEY DA SILVA, 2020).

A partir da reforma do biogás, obtém-se o gás de síntese, que pode ser utilizado para a produção de combustíveis líquidos (síntese de Fisher-Tropsch) (YANG *et al.*, 2014); para a produção de hidrogênio (Figura 1) (COZENDEY DA SILVA, 2020); e para outras linhas de produção, conforme demonstrado na Figura 2. Na produção dos combustíveis líquidos, ainda são gerados, como produtos secundário, compostos oxigenado que possuem alto valor agregado (metanol e álcool de cadeia longa) (YANG *et al.*, 2014). Cozendey da Silva (2020) explica uma abordagem para a produção do H₂ a partir do biogás:

O biogás é convertido em gás de síntese (H₂ + CO) em um reformador pela reforma de CO₂ e de CH₄ (reforma seca) e reforma a vapor do CH₄ (Eq. (2.1) e Eq. (2.2)), respectivamente, seguidas pelas etapas de purificação de H₂ (COZENDEY DASILVA, 2020, p. 26).

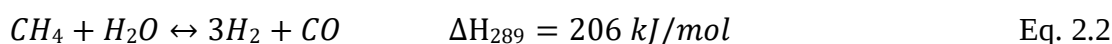
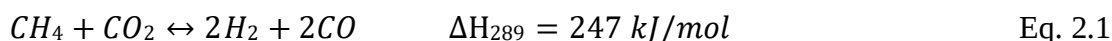
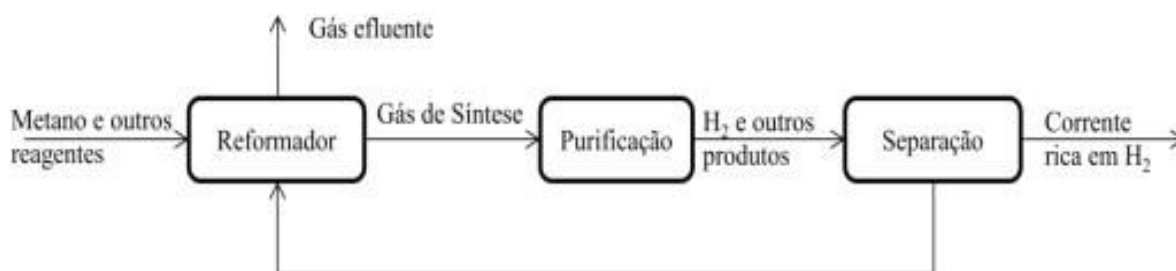
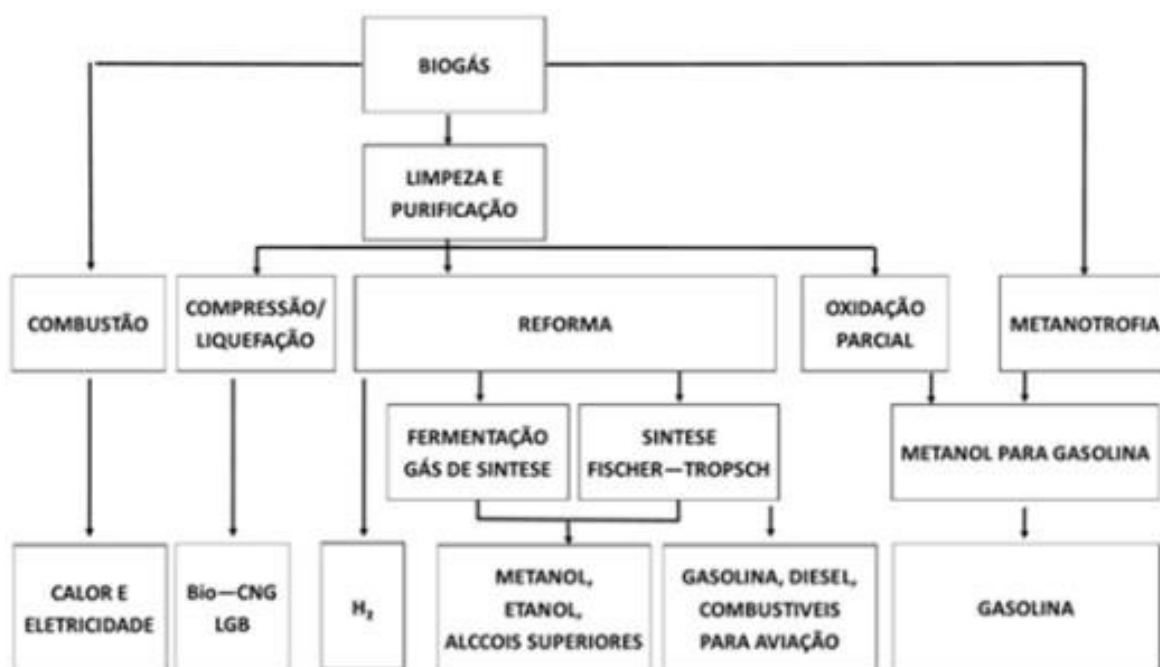


Figura 1 - Processo simplificado da tecnologia tradicional de produção de H_2 .



Fonte: COZENDEY DA SILVA, 2020.

Figura 2 – Fluxograma de produtos a partir do biogás.



Fonte: Adaptado de YANG *et al.*, 2014.

A maior parte do hidrogênio produzido nos processos industriais atuais é proveniente da reforma a vapor do gás natural, que é uma fonte não renovável. Como uma alternativa para reduzir o impacto ambiental da produção a partir do gás natural, o biogás pode ser utilizado seguindo uma proporção molar de duas ou três vezes maior de vapor d'água em relação ao metano ao entrar no reformador (COZENDEY DA SILVA, 2020).

No caso de produção de correntes ricas em hidrogênio, deve-se adicionar excesso de vapor d'água. Maiores quantidades de água também inibem a desativação do catalisador por depósito de coque. No entanto, aumentam os custos do processo e não contribuem para a

sustentabilidade. Portanto, deve-se otimizar as condições de operação de forma a obter a maior eficiência possível, usando-se menores quantidades de água (CHOUDHARY e MONDAL, 2006; COZENDEY DA SILVA, 2020).

2.2. ETAPAS CRÍTICAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

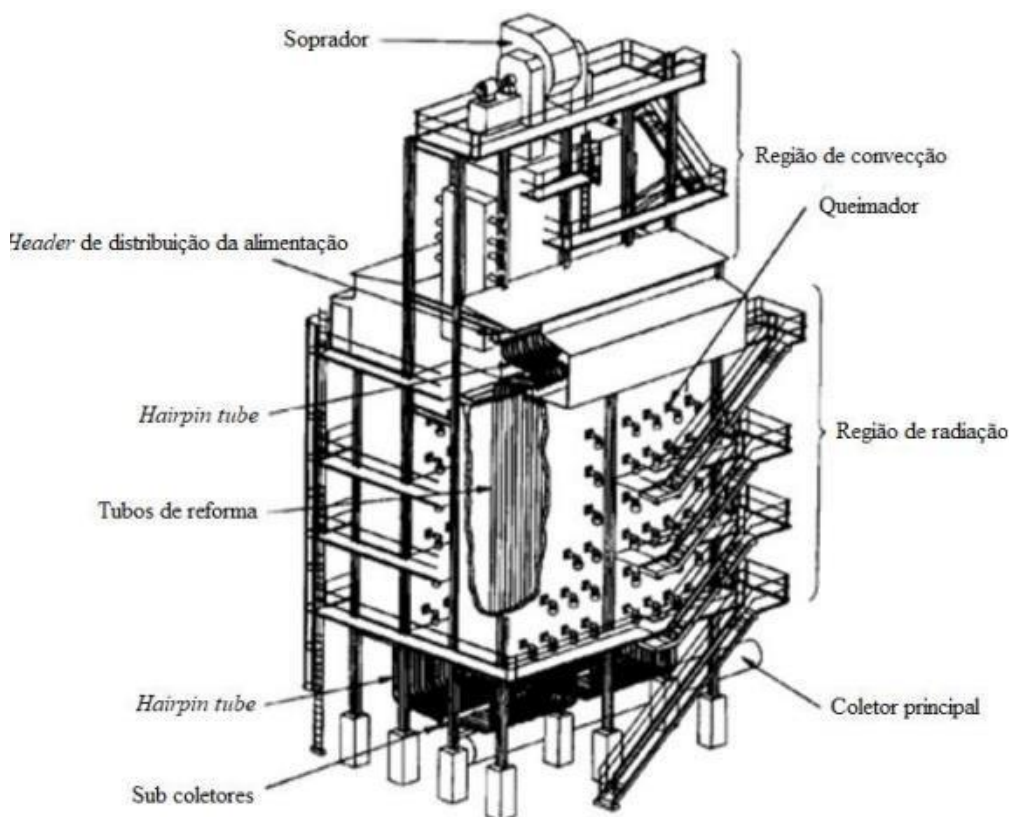
O processo estudado nesse trabalho é o da produção de hidrogênio através da reforma a vapor do biogás originado em aterro sanitário (aterro de Gramacho), com a tecnologia tradicional abrangendo a unidade reformadora e as unidades purificadoras, WGS (*Water Gas Shift*) e PSA (*Pressure Swing Adsorption*), respectivamente.

Com base na metodologia descrita por Cozendey da Silva (2020), o processo se inicia com a alimentação do biogás dividida em três correntes, sendo uma delas com combustível pra caldeira, outra com combustível para o queimador do reformador e a terceira sendo a corrente de alimentação para o reformador.

2.2.1. Reformador

O reformador é um dos principais equipamentos do processo de produção de hidrogênio. O gás de síntese, atualmente, é produzido pela reforma a vapor do metano neste equipamento, em que, a mistura dos reagentes é pré-aquecida e direcionada para a zona de radiação, atingindo temperaturas elevadas (Figura 3) (COZENDEY DA SILVA, 2020). Esse processo é favorecido em altas temperaturas (700°C a 1000°C) por ser uma reação endotérmica. (CHAUBEY *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2014).

Figura 3 – Reformador com chamas laterais



Fonte: Adaptado de TOPSOE (2019).

2.2.2. Water Gas Shift (WGS)

Em geral, a etapa de WGS ocorre em dois estágios, *High-Temperature Shift* (HTS) e *Low-Temperature Shift* (LTS). A necessidade das duas etapas é em função do favorecimento termodinâmico para a conversão do CO em baixas temperaturas enquanto cineticamente, a reação é favorecida em temperaturas altas (RATNASAMY; WAGNER, 2009). Para reduzir os custos de investimento e produção, um reator de um único estágio (*Shift*) cuja temperatura operacional é intermediária (MTS) pode ser adicionado (AZZAM *et al.*, 2007).

O principal objetivo da reação de WGS é reduzir a concentração de monóxido de carbono, convertendo-o em gás carbônico, com o uso do vapor d'água não reagido no reformador, produzindo assim, o hidrogênio (COZENDEY DA SILVA, 2020).

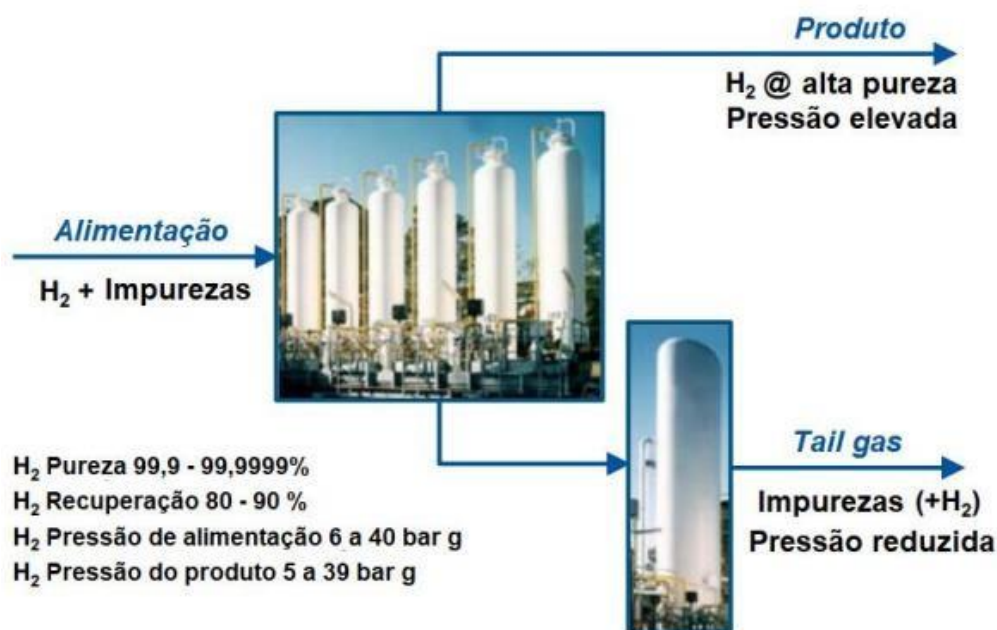
2.2.3. Pressure Swing Adsorption (PSA)

O *Pressure Swing Adsorption* (PSA) é baseado na associação de moléculas do gás com materiais adsorventes e comumente aplicado para a purificação de gases industriais, em especial o H_2 (COZENDEY DA SILVA, 2020). De acordo com Tobias (2016), o PSA pode ser utilizado para capturar CO_2 e gerar gases de O_2 e de N_2 de forma econômica, comparado a criogenia, processo geralmente aplicado.

As forças moleculares que atuam entre o gás e o material adsorvente, na tecnologia PSA, estão relacionadas a uma série de características, tais como: composição do gás; tipo de material adsorvente; pressão parcial da composição do gás; temperatura de operação (COZENDEY DA SILVA, 2020).

De acordo com Cozendey da Silva (2020), industrialmente, a PSA é composta por vasos adsorvedores, tambor de *tail gas*, válvulas *skid* com tubulação de interconexão, válvulas de controle e instrumentação, bem como um sistema de controle para controle da unidade. A Figura 4 demonstra um modelo de fluxograma simplificado para melhor entendimento do sistema PSA.

Figura 4 – Fluxograma simplificado de um sistema de PSA.



Fonte: HONEYWELL, 2019.

2.3. VIABILIDADE ECONÔMICA

Os autores Bordeaux-Rêgo *et al.* (2013) destacaram que existem conceitos essenciais para a análise de viabilidade financeira do investimento em projetos, que são: custo de produção; taxa de desconto; juros; fluxo de caixa; amortização; valor presente líquido (VPL); taxa interna de retorno (TIR); ponto de equilíbrio (*breakeven*); período de retorno (*payback*).

Muradov *et al.* (2008) realizaram a análise técnica e econômica da produção de H₂ a partir da reforma catalítica do gás de aterro. Utilizando o catalisador à base de níquel, uma mistura rica em metano e uma unidade piloto com capacidade de geração de 5 kWh/h, encontraram custos de entre US\$3,00 e US\$7,00 à cada 1kg de produção de H₂ líquido, variáveis em funções da capacidade da planta e da quantidade de calor fornecido na entrada do processo.

Braga *et al.* (2013) encontraram nos estudos um custo de produção de hidrogênio de US\$ 0,27 para cada 1kWh, com um *payback* de 8 anos. O estudo foi realizado para a produção do H₂ para células a combustível pela reforma a vapor do biogás, utilizando um reformador tradicional e o biogás não era de proveniente de aterro. Além disso, demais parâmetros essenciais não foram determinados.

Di Marcoberardino *et al.* (2019) avaliaram da produção do H₂ a partir do gás proveniente de aterro em um reator de membrana. Os resultados econômicos apontaram um custo de produção médio de 4 euros para cada kg de hidrogênio, porém, assim como o trabalho Muradov *et al.* (2008), apresenta apenas o custo de produção e não a viabilidade econômica.

Cozendey da Silva (2020) demonstrou estudos de casos para a produção do H₂ a partir do biogás e do bioetanol, considerando reatores, taxas de atratividade, valor de catalisadores, dentre outros diversos parâmetros, aplicando os conceitos essenciais para a análise, e encontrando o valor de venda de R\$ 0,864 / kWh, como o caso de maior atratividade financeira.

2.4. ECOEFICIÊNCIA

A ecoeficiência é a aplicação de um modelo de gestão de negócios que integre, dentro de seus interesses, o desenvolvimento sustentável, acompanhando os demais pilares integrantes desse modelo (SCHMIDHEINY, 1992). Os autores Fet e Michelsen (2002) indicaram que a

ecoefficiência é alcançada quando os serviços e produtos são ofertados de maneira a satisfazer a necessidade humana, reduzindo os impactos ecológicos e possuindo preços competitivos com o mercado.

O tema de ecoeficiência possui variadas definições, praticamente em todos os casos, essas definições acabam por serem similares ou complementares umas às outras, considerando apenas as especificidades de suas aplicações. (SUBTIL, 2015). De acordo com Huppés e Ishikawa (2005a), a ecoeficiência é uma ferramenta para analisar a sustentabilidade, relacionando o impacto ambiental empiricamente aos custos ou valor agregado, ou seja, otimizar o pilar ecológico sem desprezar os fatores econômicos (VERCALSTEREN; SPIRINCKX; GEERKEN, 2010).

Para medir o quanto as empresas estão atribuindo a ecoeficiência aos seus processos, serviços e produtos, são realizadas as Avaliações de Ecoeficiência (AEE), onde a WBCSD (do inglês *World Business Council for Sustainable Development*) foi uma das pioneiras ao publicar um guia de obtenção de indicadores no início dos anos 2000 (VERFAILLIE; BIDWELL, 2000). Outros autores e órgãos publicaram avaliações de ecoindicadores reconhecidos e utilizados, tais como a NTRTEE (2001) (do inglês *National Round Table on the Environment and the Economy*), BASF (SALING *et al.*, 2002) e a Bayer (KURUNSAARI; ROEVEKAMP; OKANO, 2003).

2.4.1. Ecoindicadores

Os indicadores de ecoeficiência ou ecoindicadores, são aferições que relacionam a performance financeira (produção e/ou econômica) com a ambiental (emissões, consumos e gastos) a partir de variáveis específicas de cada processo, produto ou serviço que serão aplicadas (UNCTAD, 2004; ESCAP, 2009).

A UNCTAD (2004) caracteriza os ecoindicadores a partir de três principais objetivos: realizar a correlação do desempenho ambiental e o financeiro de uma empresa; otimizar a tomada de decisões, permitindo a avaliação dos impactos das decisões; e projetar os impactos dos problemas ambientais atuais e futuros em função do crescimento financeiro.

De acordo com os autores Huppés e Ishikawa (2005b), os indicadores de ecoeficiência possuem diferentes formas de relacionar as dimensões ambientais e econômicas diversificando de acordo com o interesse primário e o ramo de atuação, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Metodologia de cálculo dos ecoindicadores relacionando as dimensões ambientais e econômicas

Dimensões	Impacto de Produção Primário	Melhoria Ambiental Primária
$\frac{\text{Ambiental}}{\text{Econômica}}$	$\frac{\text{Impacto ambiental}}{\text{valor de produção}}$	$\frac{\text{Melhoria ambiental}}{\text{custo ou eficácia}}$
$\frac{\text{Econômica}}{\text{Ambiental}}$	$\frac{\text{Valor de produção}}{\text{impacto ambiental}}$	$\frac{\text{custo ou eficácia}}{\text{Melhoria ambiental}}$

Fonte: Adaptado de HUPPES; ISHIKAWA (2005b).

Uma das maiores dificuldades na análise dos ecoindicadores está na sua variedade, dificultando a afirmativa sobre a eficiência de um processo ao se comparar diversos indicadores de forma individual (KUOSMANEM; KORTELAINEEN, 2004). Objetivando suprir essa dificuldade, utiliza-se a análise envoltória de dados, permitindo realizar uma análise comparativa entre diversos dados (indicadores) (KUOSMANEM; KORTELAINEEN, 2005).

2.5. ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

A análise envoltória de dados é um método não-paramétrico, popularizado na década de setenta, aplicado para o cálculo de eficiência relativa das DMUs, a partir de variáveis divididas entre entradas ou insumos (*inputs*) e saídas ou produtos (*outputs*), (SENRA, 2007).

Para o desenvolvimento da DEA, utiliza-se a programação linear a partir dos dados observados (variáveis) para compor uma única medida de eficiência. Um dos grandes pontos de destaque é a possibilidade de comparação das DMUs com diversas variáveis quantitativas (FELIX DA SILVEIRA, 2010), permitindo sua aplicabilidade aos mais variados processos e variáveis, além da produção física (SOARES DE MELLO *et al.*, 2008).

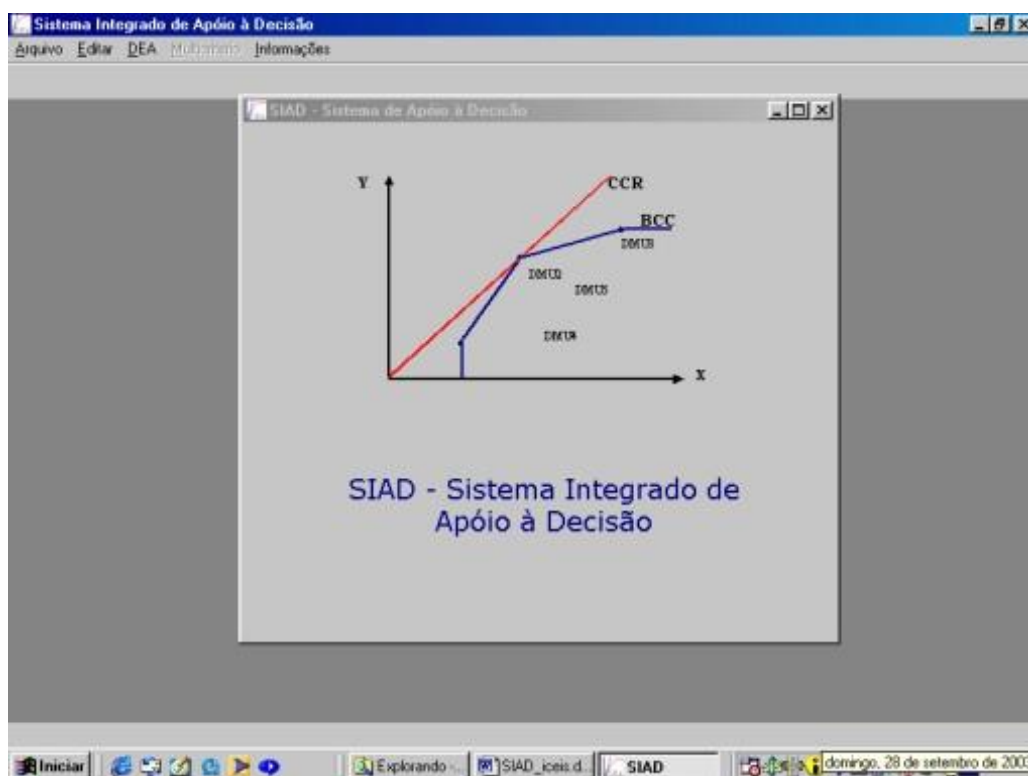
De acordo com Gomes *et al.* (2001), um dos principais objetivos do DEA é fazer um comparativo das DMUs com atribuições similares, mas que possuam quantidades diferentes de *inputs* consumidas e *outputs* produzidas. Ainda de acordo com os autores, o DEA permite

identificar quais são as DMUs eficientes e a origem das ineficiências relativas, analisando-as em qualquer dimensão, nas entradas e/ou saídas.

A principal fragilidade da DEA é a restrição do número de variáveis aplicadas ao modelo para evitar uma baixa capacidade de ordenar as DMUs, visto que muitas tendem a fronteira (máxima eficiência) (SENRA, 2007). Ainda mais, a identificação da melhor eficiência é dada pela comparação da DMU estudada com as demais DMUs do conjunto, não significando que a mesma opera em ótimas ideais, mas é a melhor condição entre as demais analisadas (FELIX DA SILVEIRA, 2010).

Para a aplicação do DEA é recomendado a utilização de um software para auxílio dos cálculos de eficiência (SOARES DE MELLO *et al.*, 2008). Para esse trabalho, será utilizado o software SIAD (Sistema Integrado de Apoio À Decisão), desenvolvido por um grupo de pesquisa da Universidade Federal Fluminense (UFF), orientado pela professora e pesquisadora Lidia Angulo Meza, que utiliza do algoritmo Simplex para evitar problemas de degeneração, apresentando múltiplas soluções a partir de um layout de simples visualização (Figura 5) (ANGULO MEZA, *et al.*, 2005).

Figura 5 - Layout do software SIAD.



Fonte: ANGULO MEZA, *et al.*, 2005.

2.5.1. Modelo DEA-CCR

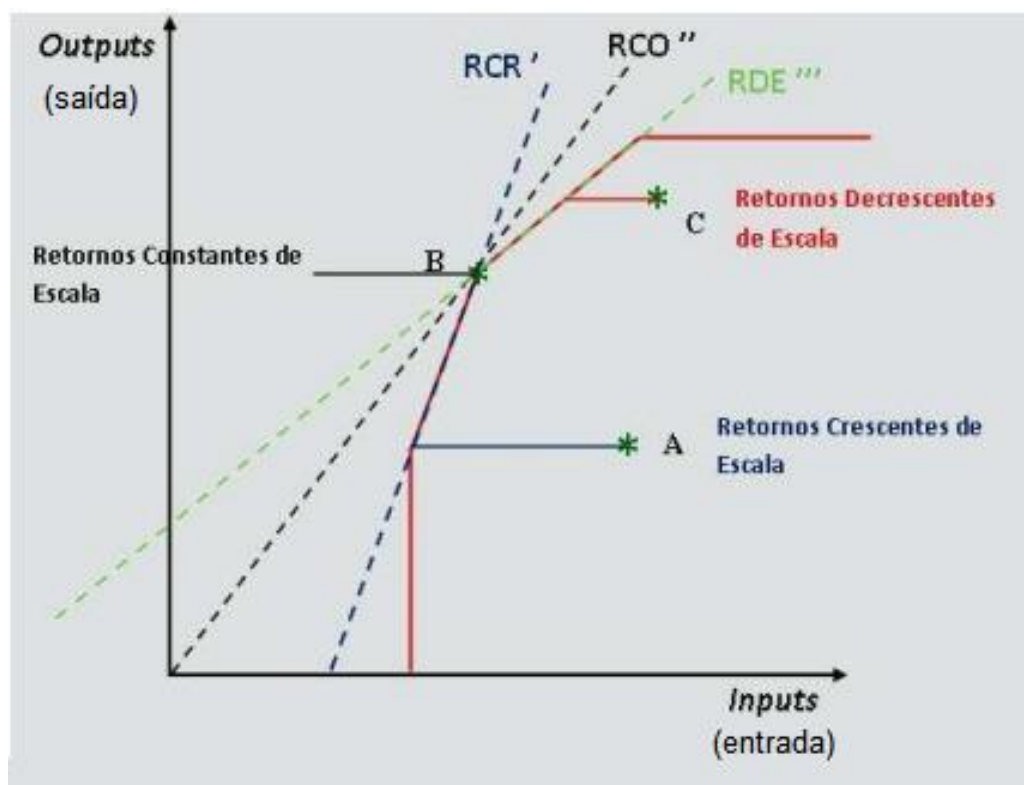
O Modelo DEA-CCR, conhecido como CRS (*Constant Returns to Scale*), trabalha com múltiplos recursos (*inputs*) e produtos (*outputs*) (multidimensional), construindo a superfície linear, não paramétrica e com retorno constante de escalas (SENRA *et al.*, 2007; SOARES DE MELLO *et al.*, 2005). O modelo visa garantir que toda variação nas entradas produza uma variação proporcional na saída (CHARNES *et al.*, 1978).

A orientação aos *inputs* do modelo DEA-CCR é dada pela inalteração da quantidade de saídas (produtos) e medindo a eficiência pela menor quantidade de entradas (recursos) (SOARES DE MELLO *et al.*, 2005). O modelo matemático do CCR é construído pelo Modelo dos Multiplicadores e/ou Modelo de Envelope (FELIX DA SILVEIRA, 2010). A orientação aos *outputs* utiliza as mesmas variáveis de decisão, porém fixa-se os valores das entradas, buscando maximizar as saídas (FELIX DA SILVEIRA, 2010).

2.5.2. Modelo DEA-BBC

O Modelo DEA-BBC admite a possibilidade de retornos constantes e variáveis, crescentes e decrescentes (Figura 6), de diferentes escalas e em diferentes segmentos da superfície construída com as DMUs (FELIX DA SILVEIRA, 2010). De acordo com Belloni (2000), o BCC admite a máxima produtividade, variando em função da escala de produção (saída).

Figura 6 – Representação gráfica dos modelos DEA CCR e BBC com Retornos Crescentes, Constantes e Decrescentes de Escala



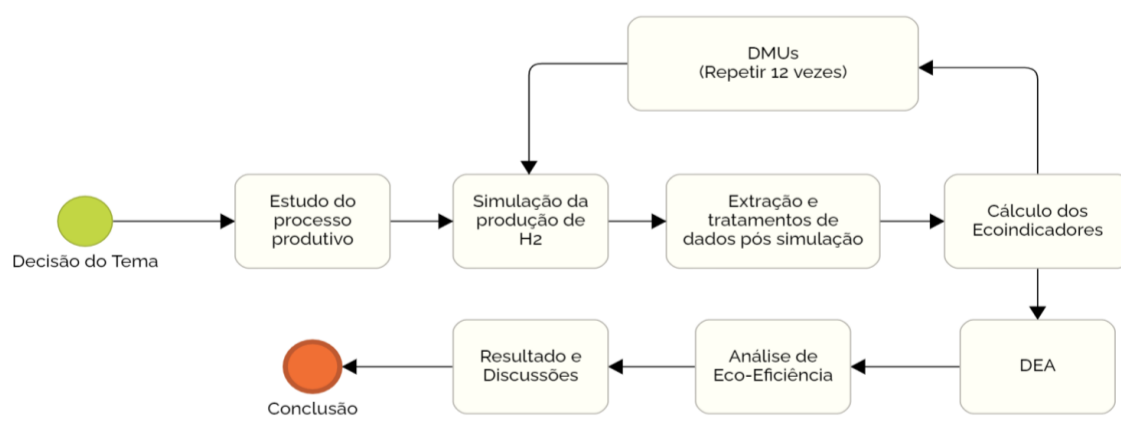
Fonte: Adaptado de FELIX DA SILVEIRA, 2010.

O conceito das orientações aos *inputs* e *outputs* é similar aos DEA-CCR, divergindo apenas no acréscimo da condição de convexidade durante as aplicações matemáticas, que possui também os Modelos dos Multiplicadores e Envelope (FELIX DA SILVEIRA, 2010; SOARES DE MELLO *et al.*, 2005).

3. CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Nesse capítulo será descrita a metodologia aplicada para o desenvolvimento deste trabalho, bem como as condições operacionais e premissas utilizadas para a simulação, para a análise econômica e para a análise DEA. Uma visão simplificada da metodologia é exposta a partir do fluxograma apresentado na Figura 7:

Figura 7 – Fluxograma metodológico



Fonte: Própria

3.1. ETAPAS CRÍTICAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

3.1.1. Reformador

Para a alimentação do biogás foram considerados as vazões de 8000 m³/h (GÁS VERDE SA, 2019) e 2000 m³/h (PETROBRAS, 2019). A composição da carga de alimentação foi variada entre a razão molar de CO₂/CH₄ de 0,67 à 1,0 e a razão molar H₂O/CH₄ de 2,0 à 3,0. As escolhas da razão molar de H₂O/CH₄ foram feitas para preservar o desempenho do catalisador, evitando a deposição de carbono (BARTHOLOMEW; FARRAUTO, 2006).

As razões molares foram consideradas a partir do estudo de Tchobangluos (1994), que mostra que a razão molar CO₂ /CH₄ presente nos aterros sanitários varia entre 0,89 e 1,0. Por outro lado, o estudo Brito Filho (2005) mostra que essa mesma razão molar nos aterros sanitários do Brasil, explicando que essa mesma razão molar nos aterros sanitários no país varia entre 0,67

e 0,82. Na Tabela 1 são apresentados os valores referentes as alimentações dos 12 casos estudados.

Tabela 1 – Dados na alimentação do reformador dos 12 casos estudados

Casos	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Razão molar CO ₂ /CH ₄ /H ₂ O	Vazão de biogás (m ³ /h)
CASO 01	12,0	750	1,0/1,0/2,0	8.000
CASO 02	12,0	750	1,0/1,0/2,0	8.000
CASO 03	12,0	750	0,82/1,0/2,0	8.000
CASO 04	12,0	750	0,82/1,0/3,0	8.000
CASO 05	12,0	750	0,67/1,0/2,0	8.000
CASO 06	12,0	750	0,67/1,0/3,0	8.000
CASO 07	12,0	750	1,0/1,0/2,0	2.000
CASO 08	12,0	750	1,0/1,0/3,0	2.000
CASO 09	12,0	750	0,82/1,0/2,0	2.000
CASO 10	12,0	750	0,82/1,0/3,0	2.000
CASO 11	12,0	750	0,67/1,0/2,0	2.000
CASO 12	12,0	750	0,67/1,0/3,0	2.000

Fonte: Adaptado de COZENDEY DA SILVA (2020).

O reformador é uma das etapas críticas do processo e foi simulado considerando-o como um reator de Gibbs, à temperatura de 750 °C, pressão de 12 bar e velocidade espacial (GHSV) igual a 2.000 h⁻¹. Foram realizadas as conversões termodinâmicas de equilíbrio do CO₂ e CH₄ (Tabela 1) (COZENDEY DA SILVA, 2020). Devido a consideração da razão de H₂O/CH₄ ser entre 2 e 3 em todos os casos, não foi considerada a reação de deposição de carbono, uma vez que o oxigênio presente é suficiente para oxidar todo o carbono formado (OZKARA-AYDINOGLU, 2010).

3.1.2. Water Gas Shift e Pressure Swing Adsorption

Na simulação realizada por Cozendey da Silva (2020), o reator de WGS, alimentado pela corrente de saída do reformador, foi modelado como um reator Gibbs e a área de troca de calor

e a carga de catalisador foram determinadas considerando a temperatura de 350°C, a pressão de 12 bar e 3000 h⁻¹ GHSV (SPATH, 2015).

A unidade de PSA foi simulada recebendo a corrente de saída do WGS, após seu resfriamento à 38°C, mantendo a pressão de 12 bar (LOPEZ; MONOUSIOUTHKIS, 2011). De acordo com Honeywell (2019), o H₂ separado e purificado é considerado de alta pureza, chegando até 99,99%, além da sua recuperação ser entre 80 e 90%.

3.1.3. Dados de saída do processo de produção de hidrogênio

Os dados resultantes da produção de hidrogênio foram extraídos a partir da simulação no software *Unisim*® para a realização facilitada do balanço de massa e energia, e toda a análise econômica realizada no Excel, sendo obtidos os valores da Tabela 2.

Tabela 2 – Dados da produção de H₂ obtidos no *Unisim*

DMUs	CO ₂ emitido direto (t/h)	Energia Consumida (kWh)	H ₂ O consumido (m ³ /h)	Custo de Produção (\$/t)	H ₂ produzido (t/h)
DMU 1	14,1887	770,175	3,794	2780,1	0,569
DMU 2	14,1887	665,179	4,474	2894,8	0,560
DMU 3	14,1007	809,436	4,939	2696,2	0,646
DMU 4	14,1007	686,787	5,746	2838,2	0,624
DMU 5	14,1711	814,694	5,124	2667,4	0,697
DMU 6	14,1711	692,421	6,059	2781,5	0,682
DMU 7	3,6255	194,315	1,149	3633,2	0,144
DMU 8	3,6255	163,882	1,324	3776,3	0,138
DMU 9	3,6154	204,201	1,038	3469,1	0,163
DMU 10	3,6154	170,87	1,198	3627,6	0,156
DMU 11	3,6119	194,929	1,177	3453,4	0,165
DMU 12	3,6119	163,172	1,427	3576,8	0,161

Fonte: Adaptado de COZENDEY DA SILVA (2020)

3.2. ANÁLISE DEA

Para medir a eficiência da unidade produtora de hidrogênio com diferentes parâmetros operacionais, foi utilizada a análise DEA a partir do *software* SIAD (Sistema Integrado de Apoio À Decisão), que permite determinar a eficiência de aspectos socioambientais (SOARES DE MELLO *et al.*, 2003).

Conforme descrito na Tabela 1, foram analisados 12 casos (DMUs), sendo esses estudos realizados com as seguintes variações nas condições operacionais:

- Quantidade de vapor: casos ímpares com a razão molar de H_2O/CH_4 de 2/1, e os casos pares com 3/1;
- Capacidade da unidade (vazão de biogás): alta para os seis primeiros casos (8000 m³/h) e baixa para os seis últimos (2000 m³/h) e
- Razão molar CO_2/CH_4 igual a; (i) 1,0, nos casos 1, 2, 7 e 8; (ii) 0,82, nos casos 3, 4, 9 e 10; (iii) 0,67, nos casos 5, 6, 11.

Com a análise de características socioambientais (ecoindicadores) consiste em um dos objetivos desse trabalho, foram consideradas algumas outras variáveis como entradas (input) ou saídas (output) para que seja possível a realização da análise DEA, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 – Variáveis socioambientais utilizadas para a análise DEA

Variável	Status
Emissão de CO_2	Input
Custo de Produção	Input
Água consumida	Input
Energia produzida	Output

Fonte: Própria

Os dados inseridos como *input* são os dados tratados de forma a reduzir o seu valor, seja minimizando sua emissão ou consumo, já os dados como *output* são dados cujo interesse é maximiza-los, conseguindo encontrar o caso onde seu valor seja o maior possível para as entradas minimizadas (COZENDEY DA SILVA *et al.*, 2018b). Conforme apontado no Quadro 2, as

variáveis consideradas no processo para cálculo da análise DEA buscando indicar Ecoeficiência foram consideradas de entradas ou saídas para que fosse possível o uso do modelo CCR (COZENDEY DA SILVA *et al.*, 2018a).

3.2.1. Modelo DEA

Dentre os modelos clássicos trabalhados foi optado pelo uso do modelo CCR orientando ao *input*, uma vez que o entendimento de maior eficiência está diretamente relacionado a situação onde tenha a maior quantidade de energia produzida em função da menor quantidade de recursos consumidos.

O modelo escolhido generaliza a definição de Farrel (1957) determinando a eficiência a partir da divisão entre uma soma ponderada de saídas e uma soma ponderada de entradas. Esse modelo permite que cada DMU tenha pesos aplicados para cada variável da forma mais favorável, permitindo seja definida a eficiência (SOARES DE MELLO *et al.*, 2005).

Contudo, a análise DEA utiliza de programação linear, portanto, deve ser considerada a função objetivo como constante e as variáveis de decisão sendo os pesos v_i e u_j . (SOARES DE MELLO *et al.*, 2005), conforme apresentado na Equação Eq 3.1.

$$Max\ Ef\ f_0 = \sum_{j=1}^s u_j y_{j0} \quad Eq. 3.1$$

Considerando:

$$\sum_{j=1}^s u_j y_{j0} - \sum_{i=1}^r v_i x_{i0} \leq 0, \forall k$$

$$\sum_{i=1}^r v_i x_{i0} = 1$$

$$u_j, v_i \geq 0, \forall i, j$$

Onde Eff_0 é a eficiência da DMU analisada, v_i e u_j são os pesos de *input* ($i = 1, \dots, r$) e *output* ($j = 1, \dots, s$), x_{i0} e y_{j0} são, respectivamente, *inputs* e *outputs* da DMU 0 (SOARES DE MELLO *et al.*, 2005).

3.3. ECOINDICADORES

Considerando as aplicações do trabalho e o método de análise empregado, buscou-se um ecoindicador que relacione o desempenho ambiental do processo ao valor (custo) do processo. Sendo assim, foi identificado como a melhor aplicação o método proposto por Kuosmanen e Kortelein (2005), onde permite a obtenção de um indicador com um único eco-desempenho, utilizando o DEA para agrupamento de indicadores.

O método descrito pelos autores Kuosmanen e Kortelein (2005), apesar de não especificar as limitações de uso, define a ecoeficiência como a produção de bens com o mínimo impacto ambiental, relacionando para a construção do indicador o índice de valor agregado com o impacto ambiental.

Os autores Huppel e Ishikawa (2005) explicam sobre o cálculo para criar os ecoindicadores, onde, ao aplicar o indicador econômico no denominador e o indicador ambiental no numerador, o resultado mais eficiente será o que mais se aproximar de zero, apontando o menor impacto ambiental com uma maior produção, conforme demonstrado no Quadro 1 (pagina 26) e na Equação Eq. 3.2.

$$Ecoindicador = \frac{\text{Impacto ambiental}}{\text{valor de produção}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

3.3.1. Ecoindicador de emissão de CO₂

Para o cálculo da emissão de carbono são consideradas as fontes primárias de emissão (emissão direta), definido pelo balanço de massa (LOPES; MANOUSIOUTHAKIS, 2011), e as fontes secundárias de emissão (emissão indireta), calculado a partir do consumo de energia do processo e seus equipamentos (MANGILI *et al.*, 2019).

A equação para a definição do indicador é adaptada do modelo de Huppel e Ishikawa (2005b) como um reforço à metodologia de Kuosmanen e Kortelein (2005), conforme apresentado na Equação (Eq. 3.3).

$$ECOI_{CO_2} = \frac{\text{emissão de } CO_2 (th^{-1})}{\text{massa de produto } (th^{-1})} = \frac{E_{pri} + E_{sec} \varepsilon_{sec}}{\text{massa de produto } (th^{-1})} \quad Eq. 3.3$$

O cálculo apresentado acima é composto pela razão entre o total de emissões de CO₂ em toneladas por hora pela taxa de produção em toneladas por hora. A emissão total de CO₂ é definida como a soma das emissões diretas e indiretas, sendo E_{pri} a emissão direta, calculada direto no processo pelo balanço de massa e a E_{sec} a emissão indireta, definida pela energia consumida nos equipamentos multiplicado pelo fator de emissão indireta (ε_{sec}).

O fator de conversão de emissão indireta deve ser incluído na equação uma vez que o consumo de energia do processo possui alguma relevância para o total de emissão dos gases. O valor desse fator varia de acordo com a região e também com o período, no mês de setembro de 2022 o valor médio no Brasil foi estipulado em 0,0491 t_{CO2}/MWh (MCTIC, 2022). Além disso, demais emissões, como as emissões fugitivas, não são consideradas para o presente estudo, uma vez que o mesmo busca entender o funcionamento da planta operando em condições padrões.

3.3.2. Ecoindicador de H₂O consumido

O cálculo do ecoindicador do consumo de água é realizado considerando o somatório de todas as vazões, alimentação e *make-up*, divididos pela taxa de produção, seguindo a metodologia do ecoindicador ser a divisão de uma variável ambiental por uma econômica, conforme apresentado na equação abaixo (Eq. 3.4):

$$ECOI_{H_2O} = \frac{\text{Vazão de água consumida } (m^3 h^{-1})}{\text{massa de produto } (th^{-1})} \quad Eq. 3.4$$

3.3.3. Ecoindicador de custo de produção

Para gerar o indicador ecológico sobre os custos de produção, etapas e materiais devem ser consideradas, tais como compra de equipamentos, custo de operação dos equipamentos, compra de insumos e catalisadores, efluentes, combustíveis, energia elétrica (COZENDEY DA SILVA, 2020).

Conforme a metodologia de Huppés e Ishikawa (2005b) e Kuosmanen e Kortelein (2005), a equação para o cálculo do ecoindicador será o custo de produção dividido pela quantidade dessa produção, conforme apresentado na equação Eq. 3.5.

$$ECOI_{FIN} = \frac{\text{Custo de produção (U\$ h}^{-1}\text{)}}{\text{massa de produto (t h}^{-1}\text{)}} \quad \text{Eq. 3.5}$$

3.4. SISTEMA INTEGRADO DE APOIO A DECISÃO

O SIAD é um software desenvolvido em Delphi 7.0, disponível para o sistema Windows, permitindo trabalhar com até 100 DMUs e 20 variáveis diferentes distribuídas entre *inputs* e *outputs* (ANGULO MEZA *et al.*, 2004). Para o trabalho foram utilizados 12 DMUs e 4 variáveis, sendo três delas como *input* e 1 como *output*.

As variáveis de entrada e saída foram descritas no Quadro 2 (página 33) e as inserções das DMUs foram dadas após a normalização dos indicadores, gerando os dados com 3 eixos x, sendo eles, emissão de CO₂, Consumo de H₂O e Custo de Produção, e um eixo y, a Quantidade de Produção.

O uso dessas 4 variáveis aplicadas ao SIAD permite uma análise resultando em um único indicador para cada DMU e uma comparação entre todos esses resultados, identificando, a partir dos cálculos da eficiência normalizada, invertida, composta e composta normalizada, qual DMU é a mais eficaz e o quanto as demais precisam melhorar para atingir a mesma eficácia que a escolhida.

A eficiência composta é incluída na Equação Eq. 3.6 para realizar um melhor filtro das DMUs que possuem uma eficiência maior que outras, mesmo que seus valores sejam próximos

(LINS *et al.*, 2005). O cálculo da eficiência composta é realizado pela diferença da eficiência padrão com a eficiência invertida, essa que por sua vez é encontrada ao serem invertidos os *inputs* e *outputs*, conforme a Equação Eq. 3.6 (LETA *et al.*, 2005). Por fim, a eficiência composta normalizada é calculada pela diferença entre a DMU estudada e a menor DMU divididas pela diferença entre a maior e a menor DMU do conjunto, permitindo que seja encontrado a melhor DMU dentre as demais, a partir do seu valor de 1 ou 100%, conforme Equação Eq. 3.7.

$$Eficiência\ Composta = \frac{1 + eficiência\ padrão - eficiência\ invertida}{2} \quad Eq. 3.6$$

$$Eficiência\ Composta\ Normalizada = \frac{DMU - DMU_{mínima}}{DMU_{máxima} - DMU_{mínima}} \quad Eq. 3.7$$

4. CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os dados de entrada para os cálculos dos indicadores sustentáveis dos 12 processos estudados. Dados foram fornecidos pelo autor COZENDEY DA SILVA (2020). Além disso, será realizada a discussão dos ecoindicadores encontrados, e sobre seus impactos, destacando a DMU com melhor resultado após a análise e expondo os gráficos e tabelas gerados para a construção desses resultados.

4.1. DADOS DA PRODUÇÃO DE H₂

Conforme descrito na Eq. 3.3, a energia total consumida pelo processo, mesmo com o reaproveitamento energético integrado na simulação, possui impacto no valor total da emissão de carbono. Com isso, utiliza-se o valor do fator de conversão disponibilizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações para o cálculo do total de carbono emitido pelo processo, ou seja, o somatório da emissão primária e secundária (Tabela 3).

Tabela 3 – Cálculo de CO₂ total emitido

DMUs	Energia Consumida (kWh)	Fator de Conversão	CO ₂ emitido de forma indireta (t/h)	CO ₂ emitido de forma direta (t/h)	CO ₂ total emitido (t/h)
DMU 1	770,175	0,0000491	0,0378	14,1887	14,22652
DMU 2	665,179	0,0000491	0,0327	14,1887	14,22136
DMU 3	809,436	0,0000491	0,0397	14,1007	14,14044
DMU 4	686,787	0,0000491	0,0337	14,1007	14,13442
DMU 5	814,694	0,0000491	0,0400	14,1711	14,21110
DMU 6	692,421	0,0000491	0,0340	14,1711	14,20510
DMU 7	194,315	0,0000491	0,0095	3,6255	3,63504
DMU 8	163,882	0,0000491	0,0080	3,6255	3,63355
DMU 9	204,201	0,0000491	0,0100	3,6154	3,62543
DMU 10	170,87	0,0000491	0,0084	3,6154	3,62379
DMU 11	194,929	0,0000491	0,0096	3,6119	3,62147
DMU 12	163,172	0,0000491	0,0080	3,6119	3,61991

Fonte: Própria.

Conforme os resultados da Tabela 3, nota-se que a maior quantidade de CO₂ emitida é proveniente da emissão direta, essa que por sua vez, procede da queima do combustível no maquinário da planta de produção. A variação de quantidade de CO₂ emitida nos seis primeiros casos (DMUs 1 a 6) em comparação aos seis últimos casos (DMUs 7 a 12) é explicada pela vazão de alimentação, uma vez que as simulações foram feitas com 8000 m³/h para seis primeiros e 2000 m³/h para os casos 7 a 12, conforme demonstrado na Tabela 1 (página 31).

4.2. ECOINDICADORES

Para uma melhor análise dos resultados serão apresentados e discutidos individualmente cada ecoindicador, entendendo que a ecoeficiência será encontrada a partir de múltiplos ecoindicadores, considerando assim todos os impactos ambientais e a variável financeira (KUOSMANEN; KORTELEIN, 2005).

4.2.1. Ecoindicador de emissão de CO₂

Conforme apresentado na Tabela 3, tem-se os dados da emissão total de carbono no processo, considerando as emissões diretas e indiretas. Aplicando esses valores a metodologia de Huppes e Ishkawa (2005b), é possível encontrar os ecoindicadores para os 12 casos, de forma individual (Tabela 4).

Tabela 4 – Ecoindicador do CO₂ total emitido

DMUs	CO ₂ total emitido (t/h)	H ₂ produzido (t/h)	ECOI CO ₂	Normalização
DMU 1	14,22652	0,569	25,006	0,778
DMU 2	14,22136	0,560	25,385	0,842
DMU 3	14,14044	0,646	21,905	0,256
DMU 4	14,13442	0,624	22,646	0,381
DMU 5	14,21110	0,697	20,383	0,000
DMU 6	14,20510	0,682	20,820	0,074
DMU 7	3,63504	0,144	25,329	0,832
DMU 8	3,63355	0,138	26,326	1,000
DMU 9	3,62543	0,163	22,267	0,317
DMU 10	3,62379	0,156	23,202	0,474
DMU 11	3,62147	0,165	21,900	0,255
DMU 12	3,61991	0,161	22,509	0,358

Fonte: Própria.

A Tabela 4 apresenta os valores do ecoindicador de emissão de CO₂ (ECOI CO₂), no qual, com base na metodologia utilizada, os menores valores desses indicadores equivalem a melhores resultados. Essa visualização se torna melhor ao estudar a normalização dos dados, no qual o melhor cenário apresenta resultado igual a 0, enquanto o pior, apresenta resultado 1. Observa-se assim a DMU 5 como o melhor resultado para esse ecoindicador.

Percebe-se ainda que o resultado da DMU 6 possui grande proximidade a 5, devido a ambos serem processos com condições muito similares, variando apenas a proporção de água na alimentação, onde a DMU 6 possui razão molar H₂O/CH₄ de 3/1, enquanto a DMU 5 possui essa mesma razão molar H₂O/CH₄ de 2/1. Essa variação faz com que exista uma maior produção de H₂ (0,015 t/h) na DMU 2.

Quando comparadas as DMU 5 e 11, que possuem condições de operações iguais, divergindo somente na vazão da corrente de alimentação de 8000 m³/h para 2000 m³/h, nota-se que os valores do ecoindicador não destoam muito, porém, levam ao entendimento que mesmo

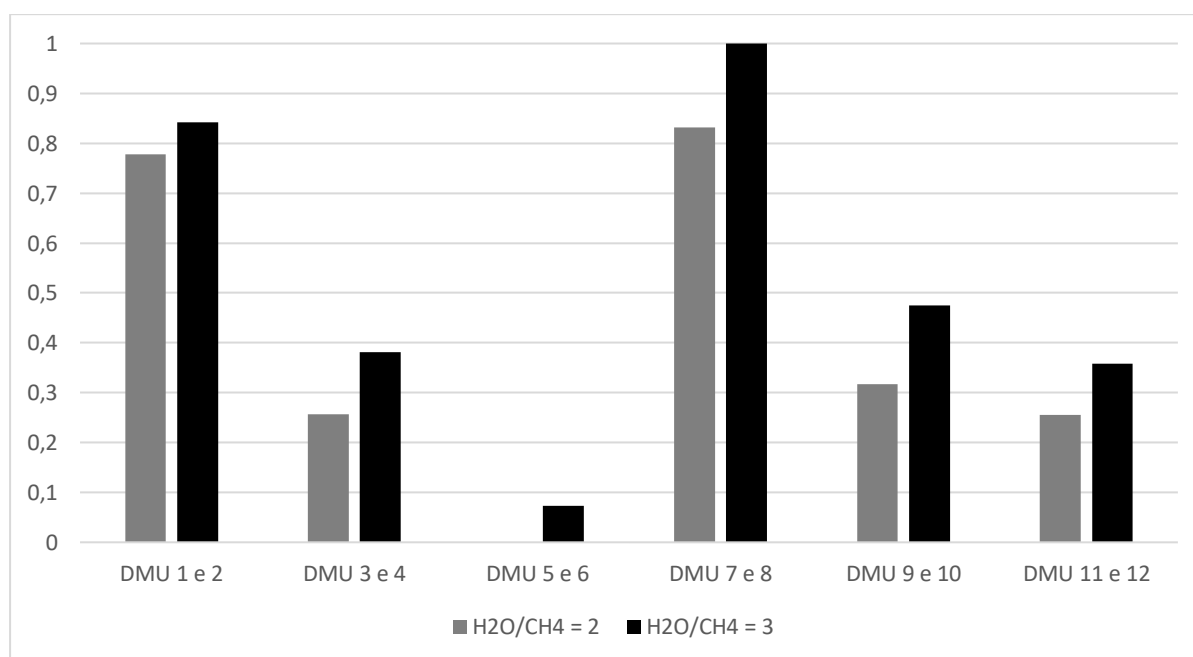
que exista uma emissão de CO₂ menor, devido à baixa produção de hidrogênio, perde-se a eficácia a níveis de impacto ambiental x econômico.

As demais DMUs estudadas possuem valores diferentes da DMU 5, seja em alimentação (DMUs 7 a 12) ou proporções de H₂O, CO₂ e CH₄ (todas DMUs exceto a 11). E, ao compará-los, percebe-se que a soma desses fatores possui interferência direta nos valores de carbono emitido e também da quantidade produzida, o que os torna menos eficazes ao relacionar essas duas variáveis.

Outro fator que pode ser observado é quanto a composição molar da carga dos processos, onde os casos foram divididos em pares para a análise. Os casos 1, 2, 7 e 8 tiveram a razão molar CO₂/CH₄ de 1/1; os casos 3, 4, 9 e 10, tiveram essas mesmas razões molares de 0,82/1; e os demais casos (5, 6, 11 e 12), tiveram 0,67/1. Essas razões, mostram uma maior produção de H₂ nos casos ímpares, comparados aos seus pares (Figura 8).

Além disso, pode ser estudado o impacto dessas razões molares, onde quanto menor for a quantidade de CO₂ adicionado ao processo, menor será o seu ecoindicador de emissão de carbono, identificando o melhor cenário nas DMUs 5, 6, 11 e 12, ao compará-las com as demais. Esse resultado é proveniente da baixa quantidade de CO₂ na alimentação de biogás, que ocasiona uma diminuição da formação de CO e um aumento da razão molar de H₂/CO.

Figura 8 – Comparação dos ecoindicadores de CO₂ normalizados



Fonte: Própria

4.2.2. Ecoindicador de consumo de H₂O

O consumo de água no processo atinge todo o tripé sustentável, aumentando o custo do processo, gastando um recurso limitado e impedindo de ser fornecida a residências e sociedade (CONZEDEY DA SILVA, 2020; KUOSMANEN; KORTELEIN, 2005). No processo em questão, seu principal consumo foi como fluido refrigerante e fluido de processo, gerando vapor para a reforma.

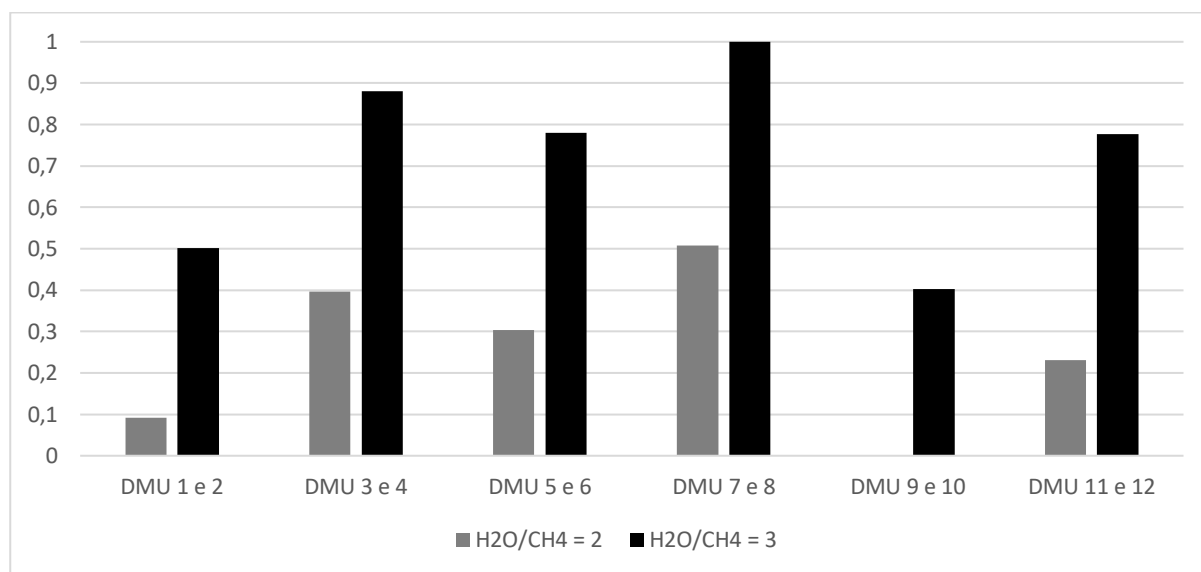
A Tabela 2 (página 32) mostra os dados desse consumo de água no processo e percebe-se a existência da divergência de valores nos casos iniciais para os finais, devido à variação da corrente de alimentação. Além disso, a análise dos pares (1,2; 3,4; 5,6; 7,8; 9,10; 11,12) apresenta os resultados de aumento nos casos pares, provenientes do aumento da razão molar de água de 2 para 3 (Figura 9). A metodologia para o ecoindicador de consumo de água traz a relação desse gasto com a produção de hidrogênio em cada DMU, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Ecoindicador do consumo de água

DMUs	H ₂ O consumida (m ³ /h)	H ₂ produzido (t/h)	ECOI H ₂ O	Normalização
DMU 1	3,794	0,569	6,668	0,091
DMU 2	4,474	0,560	7,986	0,501
DMU 3	4,939	0,646	7,651	0,397
DMU 4	5,746	0,624	9,207	0,881
DMU 5	5,124	0,697	7,350	0,303
DMU 6	6,059	0,682	8,881	0,779
DMU 7	1,149	0,144	8,009	0,508
DMU 8	1,324	0,138	9,590	1,000
DMU 9	1,038	0,163	6,375	0,000
DMU 10	1,198	0,156	7,668	0,402
DMU 11	1,177	0,165	7,115	0,230
DMU 12	1,427	0,161	8,872	0,777

Fonte: Própria.

Figura 9 – Comparação dos ecoindicadores de H₂O normalizados



Fonte: Própria.

O melhor resultado apontado nos ecoindicadores de consumo de água foi a DMU 9. essa Apresentando o menor consumo de água (1,038 m³/h), e, mesmo não possuindo a maior produção de hidrogênio (0,163 t/h), ao relacionar essas duas variáveis, o custo-benefício se mostra mais vantajoso. Já a DMU 8, considerada como pior cenário, traz resultados de um consumo maior de água (1,324 m³/h) para uma baixa produção de hidrogênio (0,138 t/h).

4.2.3. Ecoindicador de custo de produção

O custo de produção, mesmo não sendo necessariamente uma variável ambiental, agrega ao tripé sustentável, pois é uma variável que afeta o pilar econômico e o social (KUOSMANEN; KORTELEIN, 2005). Conforme apresentado na Tabela 6, o ecoindicador relaciona o custo com a quantidade produzida, pontuando novamente a DMU 5 como a melhor (Normalização = 0,00) em comparação com as demais.

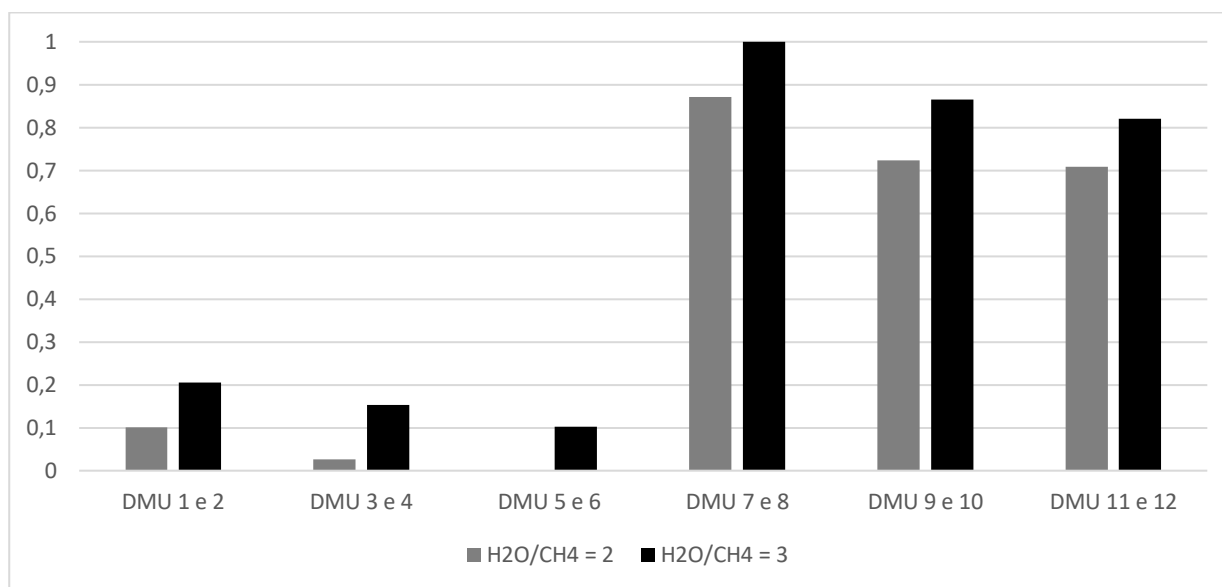
Tabela 6 – Ecoindicador de custo de produção

DMUs	Custo de Produção (\$/t)	H ₂ produzido (t/h)	ECOI Custo de Produção	Normalização
DMU 1	2780,1	0,569	2780,100	0,102
DMU 2	2894,8	0,560	2894,800	0,205
DMU 3	2696,2	0,646	2696,200	0,026
DMU 4	2838,2	0,624	2838,200	0,154
DMU 5	2667,4	0,697	2667,400	0,000
DMU 6	2781,5	0,682	2781,500	0,103
DMU 7	3633,2	0,144	3633,200	0,871
DMU 8	3776,3	0,138	3776,300	1,000
DMU 9	3469,1	0,163	3469,100	0,723
DMU 10	3627,6	0,156	3627,600	0,866
DMU 11	3453,4	0,165	3453,400	0,709
DMU 12	3576,8	0,161	3576,800	0,820

Fonte: Própria.

A partir da Tabela 6, é possível visualizar o efeito pronunciado que a vazão de biogás tem sobre o custo, onde os seis primeiros casos são os que possuem maior vazão da corrente de alimentação (8000 m³/h) e menor custo de produção, enquanto as seis últimas a menor alimentação (2000 m³/h) e maior custo de produção. Essa diferença é melhor visualizada a partir da Figura 10.

Figura 10 – Comparação dos ecoindicadores de custo de produção normalizados



Fonte: Própria.

Ademais, outro aspecto visualizado na Tabela 6 e na Figura 10 é o impacto da quantidade de H₂O alimentada no processo: todos os casos com a menor razão molar H₂O/CH₄ (DMUs ímpares) obtiveram melhores resultados comparados aos seus pares (DMUs pares). Esse ocorrido é devido ao aumento da produção de H₂ nos casos ímpares (Tabela 6) somados a redução do custo proveniente da menor alimentação. Nos casos com as menores correntes de alimentação (DMUs 7 a 12), observa-se o mesmo efeito descrito, porém com piores ecoindicadores, causados pela baixa alimentação e tornando os processos com piores resultados comparados aos outros.

4.3. ANÁLISE DEA E A ECOEFICIÊNCIA

Os ecoindicadores calculados no tópico anterior, traduzem quais cenários (DMUs) são considerados mais eficientes ao serem comparados entre si, trazendo a DMU 5 como a melhor nos indicadores de emissão de carbono e custo de produção, enquanto a DMU 9 no consumo de água. Porém, tais análises, enquanto individuais, não permitem que seja tomada uma decisão de forma confiável, sendo necessário utilizar de recursos que comparem as DMUs considerando todos os indicadores juntos (KUOSMANEN; KORTELEIN, 2005).

Para o cálculo da ecoeficiência foi considerado a normalização de cada indicador, sendo três deles utilizados na análise de dados de entrada e um como saída, conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Normalização dos Ecoindicadores

DMUs	<i>Inputs</i>			<i>Output</i>
	Emissão de CO ₂	Consumo de H ₂ O	Custo de Produção	Produção de H ₂
DMU 1	0,778	0,091	0,102	0,771
DMU 2	0,842	0,501	0,205	0,755
DMU 3	0,256	0,397	0,026	0,908
DMU 4	0,381	0,881	0,154	0,869
DMU 5	0,000	0,303	0,000	1,000
DMU 6	0,074	0,779	0,103	0,973
DMU 7	0,832	0,508	0,871	0,010
DMU 8	1,000	1,000	1,000	0,000
DMU 9	0,317	0,000	0,723	0,044
DMU 10	0,474	0,402	0,866	0,032
DMU 11	0,255	0,230	0,709	0,049
DMU 12	0,358	0,777	0,820	0,041

Fonte: Própria.

Analisando os resultados da Tabela 7, percebe-se que a DMU 5 possui a coluna de *output* (Produção de H₂) igual a 1, ao contrário do que os demais indicadores normalizados resultam. Os indicadores de saída possuem significados invertidos das entradas, ou seja, quanto maior o resultado do *output*, melhor será a DMU. Essa consideração é relacionada à análise aplicada ser para a minimização das entradas (orientado ao *input*). A DMU 8, por outro lado, possui o pior indicador em todas as situações, com o máximo valor dos *inputs* e o menor valor de *output*. O que sugere que seu uso não é o mais recomendado perante os demais, devido a suas condições de operação.

A inserção dos dados no *software* SIAD traz como resultado as eficiências padrão, invertida, composta e composta normalizada (composta*), onde, em todos os casos, os maiores valores traduzem um melhor resultado, podendo ser interpretados como 1 ou 100% (SOARES DE MELLO, 2005). Os valores obtidos a partir da Tabela 7 no SIAD são expostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados das eficiências padrão, invertida, composta e composta normalizadas após aplicação no SIAD

DMU	Padrão	Invertida	Composta	Composta*
DMU 1	1,000000	0,000010	0,999995	0,999996
DMU 2	0,349077	0,000011	0,674533	0,674534
DMU 3	0,634899	0,000004	0,817447	0,817449
DMU 4	0,276922	0,000010	0,638456	0,638457
DMU 5	1,000000	0,000003	0,999998	1,000000
DMU 6	0,371983	0,000008	0,685988	0,685989
DMU 7	0,004587	0,000871	0,501858	0,501859
DMU 8	0,000003	1,000000	0,000001	0,000001
DMU 9	1,000000	0,000164	0,999918	0,999919
DMU 10	0,019833	0,000271	0,509781	0,509782
DMU 11	0,053649	0,000145	0,526752	0,526753
DMU 12	0,014743	0,000200	0,507272	0,507272

Fonte: Própria.

A eficiência Padrão das DMUs apresentada na Tabela 8 indica a aproximação dos valores para a fronteira de eficiência. Nota-se que os casos 1, 5 e 9 possuem o valor máximo de 1, encontrados com o uso da Eq. 3.1, indicando que as mesmas estão sob a fronteira de eficiência, enquanto a DMU 8, possui o menor valor dentre as demais, por estar mais distante dessa fronteira.

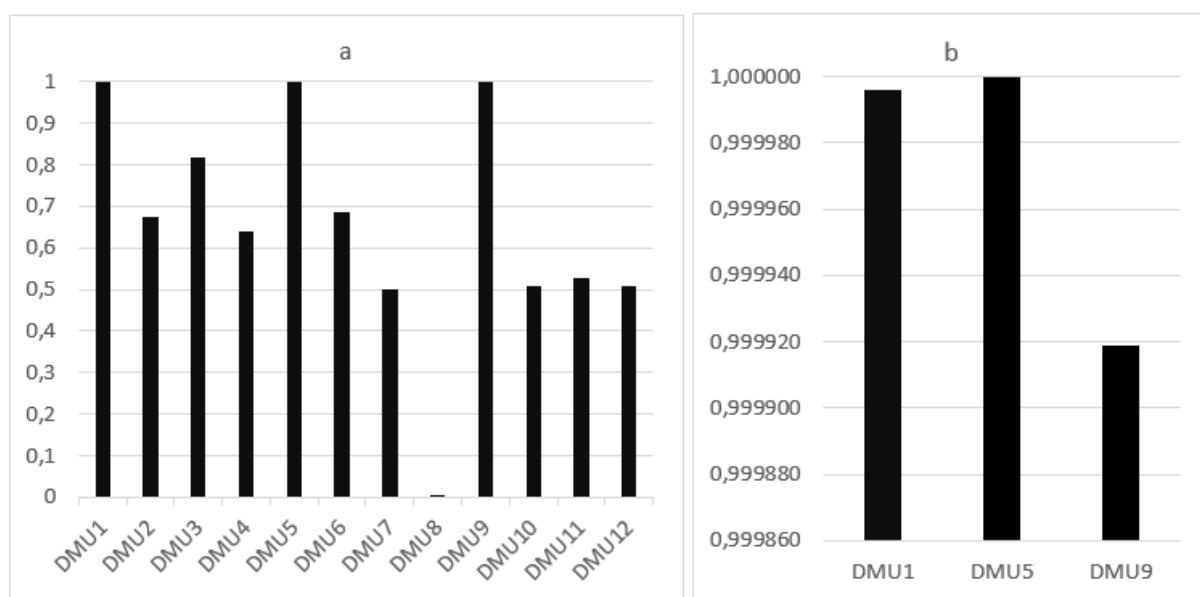
Entende-se que, na Tabela apresentada com o cálculo dos indicadores normalizados (Tabela 7) as situações 1, 5 e 9 não possuíram o melhor resultado em todas as colunas (0,000), porém, ao serem convertidas em um único indicador, passam a ter a máxima condição de eficiência, devido ao seu baixo grau de discriminação para múltiplas variáveis (BARBOSA E FUCHIGAMI, 2018).

Sendo assim, analisa-se a fronteira de ineficiência, ou a inversa dessa eficiência, identificando o quanto a DMU se afasta da fronteira de eficiência. Reforçando a visualização da DMU 8 como o pior cenário e trazendo valores diferentes para os casos 1 (0,000010), 5 (0,000003) e 9 (0,000164). Apontando a DMU 5 ainda como o melhor cenário.

Com as eficiências padrões e invertidas, aplica-se a equação Eq. 3.6. obtendo a eficiência composta, que indica o quanto uma DMU realmente se aproxima da fronteira de eficiência, representando os resultados reais de ecoeficiência. Por fim, normaliza-se para melhor visualização, encontrando a eficiência composta normalizada (Composta*).

A Composta* apresenta a DMU 5 como a mais eficiente ao compará-la com os outros casos, apresentando o grau máximo (1) atribuído a ela (Figura 11 a). As DMUs 1 e 9 apresentam respectivamente as segundas e terceiras melhores DMUs (Figura 11 b). Entretanto, a DMU 8 continuou a apresentar o pior cenário (0,000001).

Figura 11 – Comparativo da composta normalizada das 12 DMUs (a) e dos 3 melhores resultados (b)



Fonte: Própria.

Comparando os casos 5 e 6, que possuem condições similares, variando somente a quantidade de água de 2 para 3 (razão molar H_2O/CH_4), respectivamente, a DMU 6 possui uma ecoeficiência de 0,685989 ou aproximadamente 68,60%, sendo assim, necessário uma melhoria de 31,4% para alcançar a sua máxima eficiência. Tal resultado reforça o impacto dessa adição da água ao processo sobre o custo, consumo e produção, conforme exposto na Tabela 2 (página 32).

Analisando os dados da DMU 5 (1,000000), com a segunda melhor, DMU 1 (0,999996), percebe-se que a quantidade da emissão direta de CO_2 das duas possui similaridade, porém a DMU 5 tem um consumo de energia maior, de aproximadamente 44,519 kWh. Além disso, a DMU 5 também possui um consumo de água maior de 1,33 m^3/h . Porém, mesmo apresentando

valores maiores, o custo de produção do caso 5 diminui em 122,7 \$/t e a produção aumenta em 0,128 t/h, justificando sua maior ecoeficiência.

COZENDEY DA SILVA (2020) indicou nos resultados também a quantidade de casas abastecidas pela energia gerada, além do valor presente líquido e *payback* em anos para os 12 casos estudados (Tabela 9). Tais resultados indicam a DMU 5 como o melhor cenário em todo o tripé sustentável, abartercer mais casas (36.022), obter o maior VPL (\$17.418.685,44) em menor tempo de *payback* (5 anos) e o melhor indicador da ecoeficiência (Tabela 8).

Tabela 9 – Resultados de indicadores financeiros (valor presente líquido e *payback*) e sociais (residências abastecidas) para as 12 DMUs

DMU	Residências Abastecidas	VPL	<i>Payback</i> (anos)
DMU 1	28971	\$10.167.366,04	6
DMU 2	28902	\$ 7.365.242,20	8
DMU 3	33131	\$14.154.751,59	6
DMU 4	32432	\$10.190.471,85	7
DMU 5	36022	\$17.418.685,44	5
DMU 6	35670	\$13.979.891,10	6
DMU 7	7308	\$ -5.480.603,72	+14
DMU 8	7120	\$ -6.028.475,15	+14
DMU 9	8356	\$ -4.676.807,71	+14
DMU 10	8115	\$ -5.503.759,98	+14
DMU 11	8537	\$ -3.921.803,22	+14
DMU 12	8408	\$ -4.581.176,61	+14

Fonte: Adaptado de COZENDEY DA SILVA (2020).

5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES FUTURAS

5.1. CONCLUSÃO

Os dados obtidos a partir da simulação apresentaram 12 cenários da produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor do biogás, sendo diferenciados pela razão molar de H_2O , CO_2 e a vazão da alimentação (8000 m^3/h e 2000 m^3/h). A vazão de alimentação mostrou-se como o parâmetro mais relevante para determinar a quantidade de H_2 produzida e o melhor lucro da produção (VPL e *payback*).

Por outro lado, o aumento da razão molar de H_2O causou um pior resultado em todos os ecoindicadores, principalmente no indicador referente ao consumo de água, visto que o aumento dessa razão molar aumenta diretamente no consumo do processo. Enquanto isso os demais indicadores foram impactados pelo aumento de água ao terem a produção resultante menor.

O cálculo dos ecoindicadores possibilitou uma visualização dos resultados individuais das 12 DMUs e o uso do *software* SIAD permitiu uma análise conjunta, utilizando multicritérios para encontrar um único indicador resultante, que define a ecoeficiência do processo.

Estudando os ecoindicadores, encontrou-se a DMU 5 como a mais eficiente quanto a emissão de carbono e produção, a DMU 9 como a mais eficiente com um menor consumo de água, enquanto a DMU 8 foi o pior cenário possível em todas as análises. Essa melhor eficiência é interpretada com o menor resultado, ou o 0 após a normalização, pois a análise realizada para foi em função da minimização dos *inputs* do processo.

Considerando todos os parâmetros ambientais, sociais e econômicos e calculando a eficiência composta normalizada para evitar o favorecimento do modelo matemático aos melhores desempenhos por não ter sido realizado a atribuições de pesos, aponta-se a DMU 5 como o melhor cenário com a eficiência de 100% comparada as demais.

Tal cenário resulta na alimentação de 8000 m^3/h , razão molar de $CO_2/CH_4/H_2O$ em 0.67/1.0 /2.0 e 0,697 toneladas por hora de produção de H_2 . Ainda além, para os parâmetros econômicos e sociais, a mesma apresentou melhores resultados, com um retorno mais rápido, um número maior de residências atendidas e os ecoindicadores mais eficiente.

Conclui-se, por fim, que a Análise Envoltória de Dados se mostra como um método eficaz para avaliar a ecoeficiência a partir de múltiplos ecoindicadores, permitindo utilizar um número suficiente de variáveis para abranger todas as dimensões da sustentabilidade. Para o caso em questão, a análise DEA a partir do SIAD possibilitou a escolha das melhores condições de operação, que favoreceram a redução dos impactos ambientais, porém, não desconsiderando os impactos financeiros a produtora.

5.2.SUGESTÕES FUTURAS

Para futuros trabalhos, recomenda-se o estudo na linha de análise de ecoeficiência, entendendo seus impactos e importâncias, aplicando a análise apresentada nesse trabalho em outros processos produtivos industriais. Indica-se também ampliar o número de ecoindicadores, principalmente os referentes ao impacto social e ambientais, tais como quantidade de trabalhadores locais empregados, residências atingidas, espaço ocupado para implementação da planta, geração de efluentes, consumo de matéria-prima e os impactos financeiro, como o lucro da produção.

Propõe-se para seguimento de estudo do tema realizar análises aprofundadas do tema, com o cálculo *benchmarks* tais como a lógica *fuzzy* e outras metodologias para o cálculo de ecoeficiência e criação dos ecoindicadores. Vale ressaltar que a criação de softwares que realizem todos os cálculos e gerem os indicadores de forma automatizada facilitaria a implementação e o interesse de estudo sobre o tema.

REFERÊNCIAS

- ANGULO MEZA, L.; BIONDI NETO, L.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; GOMES, E.G.; COELHO, P.H.G. **Free software for decision analysis: a software package for data envelopment models**. In: 7th International Conference on Enterprise Information Systems – ICEIS, v. 2, p. 207-212. 2005.
- ANGULO MEZA, L.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GOMES, E. G.; FERNANDES, A. J. S. Seleção de Variáveis em DEA aplicada a uma análise do mercado de energia elétrica. **Investigação Operacional**, n. 27; p. 21-36. 2007.
- AZZAM, K. G., BABICH, I. V., SESHAN, K., LEFFERTS, L. Bifunctional catalysts for single-stage water–gas shift reaction in fuel cell applications: Part 1. Effect of the support on the reaction sequence. **J. Catal.**, v. 251, p. 153, 2007.
- BANKER, R. D., CHARNES, A. COOPER, W.W. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. **Management Science**, 30(9): 1078-1092. 1984.
- BARBOSA, F. C.; FUCHIGAMI, H. Y. **Análise Envoltória de Dados: Teória e aplicações**. 1ª ed. Ulbra. 2018.
- BARTHOLOMEW, C.H.; FARRAUTO, R.J. **Fundamentals of Industrial Catalytic Processes**. 2. Ed. New Jersey, 200640,75
- BELLONI, I. **Uma metodologia de avaliação da eficiência produtiva de universidades federais brasileiras**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- BONITO, José. **Relatório global sobre energias renováveis mostra uma lacuna alarmante entre metas e ações**. 2021. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/06/16/relatorio-global-sobre-energias-renovaveis-mostra-uma-lacuna-alarante-entre-metas-e-acoes/>. Acesso em: 16 abr. 2022.
- BORDEAUX-RÊGO, R. et al. **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. Rio de Janeiro: FGV editora. 4a ed., 2013.
- BRAGA, L. B. *et al.* Hydrogen production by biogas steam reforming: A technical, economic and ecological analysis. **Renovar**. Sust. Energ. Rev., v. 28, p. 166–173, 2013.
- BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 2005.218f. Dissertação (Mestrado Ciências em Engenharia Civil) -Universidade federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005
- CÂMARA, Eduardo Arruda. **Um estudo comparativo da eficiência das usinas hidrelétricas do Brasil, utilizando a análise por envoltória de dados – DEA**. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, CCSA, 2008.
- CHARNES, A. *et al.* Data Envelopment Analysis Theory, Methodology and

Applications. **Journal of the Operational Research Society**, v. 48, n. 3, p. 332–333, mar. 1997.

CHARNES, A., COOPER, W.W., RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**. 2, 429–444. doi:10.1016/0377-2217(78)90138-8. 1978.

CHAUBEY, R. *et al.* A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. **Renovar. Sust. Energ. Rev.**, v. 23, p. 443–462, 2013.

CHOUDHARY, V. R.; MONDAL, K. C. CO₂ reforming of methane combined with steam reforming or partial oxidation of methane to syngas over NdCoO₃ perovskite-type mixed metal-oxide catalyst. **Applied Energy**, v. 83, p. 1024–1032, 2006.

COOPER, W.W., SEIFORD, L.M., TONE, K., 2007. **Data Envelopment Analysis: A Comprehensive text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software**. Springer, New York.

COZENDEY DA SILVA, Héctor Napoleão, *et al.* A techno-economic evaluation of the energy generation by proton exchange membrane fuel cell using biogas. **J. Clean. Prod.**, v. 200, p. 598-608, 2018a.

COZENDEY DA SILVA, Héctor Napoleão, *et al.* **Uma modelagem DEA aplicada ao estudo de produção de hidrogênio pela reforma do biogás**. In: I Simpósio brasileiro de pesquisa operacional, 2018, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2018b. Disponível em: <https://proceedings.science/sbpo/papers/uma-modelagem-dea-aplicada-ao-estudo-de-producao-de-hidrogenio-pela-reforma-do-biogas?lang=en>. Acesso em: 16 abr. 2022.

COZENDEY DA SILVA, Héctor Napoleão. **Modelagem tecnoeconômica de processos de conversão de biogás e etanol em hidrogênio para produção de energia renovável**. 2020. Tese (Doutorado em Sistema de Gestão Sustentável) – Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2020.

DI MARCOBERARDINO, G.; XUN, L.; ARNAUD, D.; MARCO, B.; GIAMPAOLO, M. Life cycle assessment and economic analysis of an innovative biogas membrane reformer for hydrogen production. **Processes**, v. 7, 2019.

FARIA, E. C., NETO, R. C. R., COLMAN, R. C., NORONHA, F. B. Hydrogen production through CO₂ reforming of methane over Ni/CeZrO₂/Al₂O₃ catalysts. **Catalysis Today**, 228, 138 – 144. 2014.

FARREL, M. J. The measurement of productive efficiency. **Journal of the Royal Statistical Society, Series A** 120(3): 253–281, 1957

FELIX DA SILVEIRA, V. L. **Dea e fdh como técnicas de apoio no processo de liberalização dos mercados de gás natural**. 2010. Tese (Mestrado em Sistemas, Apoio à Decisão e Logística) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2010.

FET, A. M.; MICHELSEN, O. **Industrial Ecology and Eco-Efficiency – Na introduction to the concepts**. In: NATO/CCMS Pilot Study on Cleaner Products and Processes, Vilnius, Lithuania, 12-16th, 2002.

GÁS VERDE S.A. **O empreendimento, Referência mundial em geração de biogás**. Disponível em: www.gasverde.com.br/empreendimento-gas-verde.php Acesso em: 12 out. 2022.

GOMES, E.G. *et al.* **Avaliação de eficiência de companhias aéreas brasileiras: uma abordagem por Análise de Envoltória de Dados**. IN: SETTI, J.R.A.; LIMA.

HAHN, H.; KRAUTKREMER, B.; HARTMANN, K.; WACHENDORF, M. Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. *Renew. and Sustain. Energy Reviews*, 2014, 29, 383-393.

HAHN, T. *et al.* Opportunity cost based analysis of corporate eco-efficiency: A methodology and its application to the CO₂-efficiency of German 100 companies. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 10, p. 1997-2007, 2010.

HUPPES, G.; ISHIKAWA, M. A framework for quantified eco-efficiency analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 17. 2005a.

HUPPES, G.; ISHIKAWA, M. Eco-efficiency and its terminology. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 4. 2005b.

KUOSMANEN, T.; KORTELAJINEN, M. Measuring eco-efficiency of production with data envelopment analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 9, n. 4, p. 59- 72, 2005.

KURUNSAARI, H.; ROEVEKAMP, F.; OKANO, H. **The eco-check in relation to target costing in ecodesigning - The resource-based view**. 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing - Ecodesign 03, 2003.

LETA, F.R.; SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; GOMES, E.G.; ANGULO MEZA, L. **Métodos de melhora de ordenação em DEA aplicados à avaliação estática de tornos mecânicos**. *Investigação Operacional*, v. 25. 2005.

LINS, M.P.E.; NOVAES, L.F.L.; Legey, L.F.L. Real estate valueassessment: a double perspective data envelopment analysis. **Annals of Operations Research**. 2005.

LOPEZ, J. A. P.; MANOUSIOUTHAKIS, V. I. Natural gas based hydrogen production with zero carbon dioxide emissions. **Int. J. Hydrogen Energy** 36, 12853-12868. 2011.

MANGILI, P. V.; JUNQUEIRA, P. G.; SANTOS, L. S.; PRATA, D. M. **Eco-efciency and techno-economic analysis for maleic anhydride manufacturing processes**. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 21, p. 1073-1090, 2019.

MARTÍN-GAMBOA, M.; IRIBARREN, D. Chapter 16 - Coupled life cycle thinking and data envelopment analysis for quantitative sustainability improvement. **Methods in Sustainability Science**. Elsevier, 2021, p 295-320. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823987-2.00003-9>.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES – MCTIC. **Fator médio – Inventários corporativos**. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao> . Acesso em: 02 nov. 2022.

MURADOV, N.; SMITH, F.; T-RAISSI, A. Hydrogen production by catalytic processing of renewable methane-rich gases. **Int J Hydrogen Energ**, v. 33, p. 2023-2035, 2008. PETROBRAS. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/refinaria-geraenergia-com-biogas-do-aterro-de-gramacho.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

NRTEE – NATIONAL ROUND TABLE ON THE ENVIRONMENT AND THE ECONOMY. **Eco-efficiency indicators – Calculating Eco-efficiency Indicators: A Workbook for Industry**. 2001. p. 60.

ÖZKARA-AYDINOGLU, S. Thermodynamic equilibrium analysis of combined carbon dioxide reforming with steam reforming of methane to synthesis gas. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, p. 12821–12828, 2010.

RATNASAMY, C.; WAGNER, J.P. Water gas shift catalysis. *Catalysis Reviews*, v. 51, p. 325-440, 2009.

REN21. **Renewables 2021 Global status report**. 2021. Disponível em: ren21.net/. Acesso em: 16 abr. 2022.

TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H. VIGIL, S.A. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principle and Management Issue. **McGraw Hill Inc.**, New York. 1994.

REBOLLEDO, R.; ANGULO MEZA, L.; IRIARTE GARCÍA, A.; GONZÁLEZ ARAYA, M. Joint carbon footprint assessment and data envelopmen analysis for the reduction of greenhouse gas emissions in agriculture production. **Science of the Total Environment**, p. 593 - 594, p. 36 - 46. 2017.

ROSTRUP-NIELSEN, J. R.; HANSEN, J-H. B. CO₂-Reforming of methane over transition metals. *J. Catalysis*, 144, 38 – 49. 1993.

SALING, P. *et al.* Eco-efficiency analysis by BASF: the method. International. **Journal of Life Cycle Assessment**. v. 7, n. 4, p. 16. 2002.

SCHMIDHEINY, S. Changing Course: **A Global Business Perspective on Development and the Environment**. Londres, UK: MIT, p. 488. 1992.

SENRA, L. F. A. C.; NANJI, L. C.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; ANGULO MEZA, L. Estudo sobre métodos de seleção de variáveis em dea. **Pesquisa Operacional**, v.27, n.2,p.191-207, 2007.

SOARES DE MELLO, J.C.C.B.; ÂNGULO MEZA, L.; GOMES, E.G.; NETO, L.B. **Curso de Análise de Envoltória de Dados**. In: XXXVII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Gramado, 2005

SUBTIL, Joana de Oliveira Ferraz. **ANÁLISE DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE ECO EFICIÊNCIA**. Dissertação (Título de Mestre em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo. 2015.

TOBIAS, K. PSA Technology: Beyond Hydrogen Purification. **Linde Engineering & Goutam Shahani**, Shure-Line Construction, 2016.

VAN BERKEL, R. Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996-2004. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 8-9, p. 741-755, 2007.

VERCALSTEREN, A. SPIRINCKX, GEERKEN, T. Life cycle assessment and ecoefficiency analysis of drinking cups used at public events. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 15, n. 2, p. 221-230, 2010.

VERFAILLIE, H. A.; BIDWELL, R. **Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance**. World Business Council for Sustainable Development – WBCSD, Geneva, Switzerland. p. 39.2000.

WEILAND, P. Biogas production: Current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, v. 85, p. 849–860, 2010.

YANG, L. et al. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. **Renew. Sust. Energ. Rev.**, v. 40, p. 1133–1152, 2014.

ZHANG, Zhihua; LI, Jianping. Chapter 10 - Big-data-driven low-carbon management. **Big Data Mining for Climate Change, Elsevier**, 2020, p 287-299. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818703-6.00015-5>. -C-04-102, Intermediate report of the EU Project MIGREYD NNE5-2001-670, 2004.

ANEXO A – DADOS DE RESPOSTA DO SIAD

Resultados utilizando o modelo CCR, orientação input

Eficiências

DMU	Padrão Invertida	Composta	Composta*	
DMU_1	1,000000	0,000010	0,999995	0,999996
DMU_2	0,349077	0,000011	0,674533	0,674534
DMU_3	0,634899	0,000004	0,817447	0,817449
DMU_4	0,276922	0,000010	0,638456	0,638457
DMU_5	1,000000	0,000003	0,999998	1,000000
DMU_6	0,371983	0,000008	0,685988	0,685989
DMU_7	0,004587	0,000871	0,501858	0,501859
DMU_8	0,000003	1,000000	0,000001	0,000001
DMU_9	1,000000	0,000164	0,999918	0,999919
DMU_10	0,019833	0,000271	0,509781	0,509782
DMU_11	0,053649	0,000145	0,526752	0,526753
DMU_12	0,014743	0,000200	0,507272	0,507272

*Eficiência normalizada

Pesos das Variáveis

DMU	Peso Input_1	Peso Input_2	Peso Input_3	Peso Output_1
DMU_1	0,78466483	4,28055780	0,00000000	1,29701690
DMU_2	0,27971325	1,52591110	0,00000000	0,46235385
DMU_3	0,00000000	2,30757650	3,22662040	0,69922794
DMU_4	0,19278624	1,05170080	0,00000000	0,31866728
DMU_5	0,60497659	3,30031010	0,00000000	1,00000000
DMU_6	0,23128582	1,26172640	0,00000000	0,38230541
DMU_7	0,27752518	1,51397450	0,00000000	0,45873705
DMU_8	0,15491221	0,84508779	0,00000000	0,25606315
DMU_9	3,14934910	165,63224000	0,00000000	22,72727300
DMU_10	0,37495058	2,04545630	0,00000000	0,61977700
DMU_11	0,66237804	3,61345040	0,00000000	1,09488210
DMU_12	0,21754528	1,18676810	0,00000000	0,35959290

Alvos

DMU_1 (eficiência:1,000000)				
Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,778000	0,778000	0,000000	0,778000
Input_2	0,091000	0,091000	0,000000	0,091000
Input_3	0,102000	0,102000	0,000000	0,102000
Output_1	0,771000	0,771000	0,000000	0,771000

DMU_2 (eficiência:0,349077)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,842000	0,293923	0,000000	0,293923
Input_2	0,501000	0,174888	0,000000	0,174888
Input_3	0,205000	0,071561	0,033022	0,038539
Output_1	0,755000	0,755000	0,000000	0,755000

DMU_3 (eficiência:0,634899)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,256000	0,162534	0,036677	0,125857
Input_2	0,397000	0,252055	0,000000	0,252055
Input_3	0,026000	0,016507	0,000000	0,016507
Output_1	0,908000	0,908000	0,000000	0,908000

DMU_4 (eficiência:0,276922)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,381000	0,105507	0,000000	0,105507
Input_2	0,881000	0,243968	0,000000	0,243968
Input_3	0,154000	0,042646	0,028807	0,013839
Output_1	0,869000	0,869000	0,000000	0,869000

DMU_5 (eficiência:1,000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,000010	0,000010	0,000000	0,000010
Input_2	0,303000	0,303000	0,000000	0,303000
Input_3	0,000010	0,000010	0,000000	0,000010
Output_1	1,000000	1,000000	0,000000	1,000000

DMU_6 (eficiência:0,371983)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,074000	0,027527	0,000000	0,027527
Input_2	0,779000	0,289775	0,000000	0,289775
Input_3	0,103000	0,038314	0,034697	0,003617
Output_1	0,973000	0,973000	0,000000	0,973000

DMU_7 (eficiência:0,004587)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,832000	0,003817	0,000000	0,003817
Input_2	0,508000	0,002330	0,000000	0,002330
Input_3	0,871000	0,003996	0,003495	0,000500
Output_1	0,010000	0,010000	0,000000	0,010000

DMU_8 (eficiência:0,000003)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	1,000000	0,000003	0,000000	0,000003
Input_2	1,000000	0,000003	0,000000	0,000003
Input_3	1,000000	0,000003	0,000002	0,000000
Output_1	0,000010	0,000010	0,000000	0,000010

DMU_9 (eficiência:1,000000)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,317000	0,317000	0,000000	0,317000
Input_2	0,000010	0,000010	0,000000	0,000010
Input_3	0,723000	0,723000	0,000000	0,723000
Output_1	0,044000	0,044000	0,000000	0,044000

DMU_10 (eficiência:0,019833)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,474000	0,009401	0,000000	0,009401
Input_2	0,402000	0,007973	0,000000	0,007973
Input_3	0,866000	0,017175	0,015943	0,001233
Output_1	0,032000	0,032000	0,000000	0,032000

DMU_11 (eficiência:0,053649)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,255000	0,013681	0,000000	0,013681
Input_2	0,230000	0,012339	0,000000	0,012339
Input_3	0,709000	0,038037	0,036243	0,001794
Output_1	0,049000	0,049000	0,000000	0,049000

DMU_12 (eficiência:0,014743)

Variável	Atual	Radial	Folga	Alvo
Input_1	0,358000	0,005278	0,000000	0,005278
Input_2	0,777000	0,011456	0,000000	0,011456
Input_3	0,820000	0,012090	0,011397	0,000692
Output_1	0,041000	0,041000	0,000000	0,041000

Benchmarks

DMU	DMU_1	DMU_5	DMU_9
DMU_1	1,00000000	0,00000000	0,00000000
DMU_2	0,37778705	0,46372618	0,00000000
DMU_3	0,16176020	0,78328289	0,00000000
DMU_4	0,13560358	0,76444964	0,00000000
DMU_5	0,00000000	1,00000000	0,00000000
DMU_6	0,03536928	0,94573029	0,00000000
DMU_7	0,00490569	0,00621771	0,00000000
DMU_8	0,00000329	0,00000746	0,00000000
DMU_9	0,00000000	0,00000000	1,00000000
DMU_10	0,01208297	0,02268403	0,00000000
DMU_11	0,01758380	0,03544289	0,00000000
DMU_12	0,00678374	0,03576974	0,00000000



Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)
Certificado de assinatura gerado em 07/12/2022 às 03:23:58 (GMT -3:00)

ESTUDO DA ECOEFICIÊNCIA DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO PELA REFORMA DO BIOGÁS A PARTIR DA ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS - FINAL

 ID única do documento: #73c639b1-9726-4321-b269-f9d38877b680

Hash do documento original (SHA256): aafe6706acc36ee61881e5fd47dde99bfacfd66bfa4a4dd9c7fc3bb39440c86f

Este Log é exclusivo ao documento número #73c639b1-9726-4321-b269-f9d38877b680 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

Assinaturas (4)

- ✓ **Hector Napoleão Cozendey da Silva (Participante)**
Assinou em 07/12/2022 às 22:47:36 (GMT -3:00)
- ✓ **Lisiane Veiga Mattos (Participante)**
Assinou em 07/12/2022 às 08:30:24 (GMT -3:00)
- ✓ **Gilliani Peixoto Miranda (Participante)**
Assinou em 07/12/2022 às 08:51:11 (GMT -3:00)
- ✓ **Michelle Reich (Participante)**
Assinou em 07/12/2022 às 18:52:52 (GMT -3:00)

Histórico completo

Data e hora

07/12/2022 às 11:51:11
(GMT -3:00)

Evento

Gilliani Peixoto Miranda (Autenticação: e-mail gpmiranda@cetiqt.senai.br; IP: 177.38.98.94) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10º, §2.



Data e hora

08/12/2022 às 01:47:36
(GMT -3:00)

Evento

Hector Napoleão Cozendey da Silva (Autenticação: e-mail hnsilva@cetiqt.senai.br; IP: 45.7.197.34) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

07/12/2022 às 03:23:58
(GMT -3:00)

Leonardo Sabbadim solicitou as assinaturas.

07/12/2022 às 21:52:52
(GMT -3:00)

Michelle Reich (Autenticação: e-mail mreich@cetiqt.senai.br; IP: 177.38.98.94) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

07/12/2022 às 11:30:24
(GMT -3:00)

Lisiane Veiga Mattos (Autenticação: e-mail lisianemattos@id.uff.br; IP: 200.156.93.137) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.