

## **PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR GASEIFICAÇÃO DE EUCALIPTO: ANÁLISE TECNO-ECONÔMICA E DE CICLO DE VIDA EM MINAS GERAIS**

Halima Khalid <sup>1</sup>

Samuel Alberto Ouana <sup>2</sup>

Adriano Viana Ensinas <sup>3</sup>

Marcio Montagnana Vicente Leme <sup>4</sup>

Energias renováveis e possibilidades de aplicação incluindo mudanças climáticas e uso de tecnologias para monitoramento ambiental

### **Resumo**

Este estudo analisa a viabilidade da produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto em Minas Gerais, abordando tanto a dimensão tecno-econômica quanto a avaliação do ciclo de vida (ACV). O método Recipe Midpoint H foi usado para avaliar 8 categorias de impacto. A categoria de aquecimento global (GW) é considerada a mais relevante segundo a normalização, ressaltando a importância da mitigação de emissões de gases de efeito estufa. A análise tecno-econômica revelou que o custo predominante é a matéria-prima, estimado em 1,14 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, seguido pelo transporte, que representa 0,71 Mil\$/ton H<sub>2</sub> e um investimento de 0,62 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>. A rentabilidade do projeto foi diretamente impactada pela receita de venda do hidrogênio. A receita de 5 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, com um payback de 2,4 anos, demonstrou maior viabilidade financeira, com retorno do investimento em um período curto. No entanto, com uma receita de 3 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, o payback se estende para 6,8 anos, comprometendo a atratividade do projeto. A ACV revelou que a produção de hidrogênio por gaseificação emite 804 kg CO<sub>2</sub> eq/ton.H<sub>2</sub>, devido ao uso de biomassa renovável, que absorve o carbono da atmosfera durante seu crescimento, contrabalançando as emissões geradas pelo hidrogênio cinza que são superiores a 10400 kg de CO<sub>2</sub> eq/ton.H<sub>2</sub>. Em relação a outras categorias de impactos, como a toxicidade não cancerígena humana, ecotoxicidade terrestre e consumo de água (HNCT, Tec e WC), apresentaram maiores emissões nas etapas de cultivo e consumo de eletricidade, indicando a necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis e alternativas menos tóxicas para insumos e catalisadores. No entanto, é essencial continuar investindo na otimização do processo, com foco na diminuição do uso de insumos tóxicos e no aprimoramento das práticas de manejo sustentável. Esses achados evidenciam o potencial do hidrogênio renovável como uma solução para redução de gases de efeito estufa, contribuindo para a transição energética sustentável.

**Palavras-chave:** Energia renovável, sustentabilidade, emissões e viabilidade econômica.

<sup>1</sup>Halima Khalid, Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia Ambiental (DAM), halima.khalid@estudante.ufla.br

<sup>2</sup>Samuel Alberto Ouana, Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia Ambiental (DAM), samuel.ouana@estudante.ufla.br

<sup>3</sup>Adriano Viana Ensinas, Universidade Federal de Lavras – Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Escola de Engenharia, adriano.ensinas@ufla.br

<sup>4</sup>Marcio Montagnana Vicente Leme, Universidade Federal de Lavras – Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), Escola de Engenharia, marcio.leme@ufla.br.

## INTRODUÇÃO

A produção de hidrogênio tem se destacado como uma alternativa promissora para a transição energética, especialmente em um cenário global que busca reduzir emissões de carbono e adotar fontes de energia mais sustentáveis. No Brasil, em particular, a gaseificação de biomassa surge como uma alternativa viável para a geração de hidrogênio renovável, especialmente em regiões como Minas Gerais, que conta com vastas plantações de eucalipto. O eucalipto, uma das principais culturas florestais do estado e possui alto potencial energético, tornando-se uma matéria-prima atrativa para processos de gaseificação. Neste contexto, o presente estudo visa realizar uma análise técnico econômica e de ciclo de vida da produção de hidrogênio a partir da biomassa de eucalipto. A pesquisa avalia não apenas os custos e a eficiência do processo, mas também os impactos ambientais, fornecendo subsídios para a tomada de decisão sobre a inserção do hidrogênio renovável na matriz energética de Minas Gerais, contribuindo para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono.

## METODOLOGIA

O estudo utilizou a metodologia de análise econômica baseada em programação linear inteira mista (MILP), regida pela função objetivo (Equação 1), implementada no software LINGO 20®, com o Excel® como interface para entrada e saída de dados. Para avaliação do ciclo de vida foi utilizado o software Simapro 9.5.0.0®, desenvolvido pela PhD com Share & Collect ©Pre Sustainability 1990-2023, para calcular os impactos seguindo as fases prescritas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044.

$$MIN = ann. Inv + RMC + TC - P. Rev \quad Eq. (1)$$

Onde: Ann. Inv – Investimento anualizado; RMC – Custo de matéria prima; TC – Custo de transporte e P.Rev – receita de venda do produto

### a) *Análise técnico econômica*

Modelos físicos, econômicos e logísticos foram desenvolvidos para otimizar rotas de produção de hidrogênio. O modelo físico considera os fluxos mássicos de entrada e saída para otimizar a produção destinada ao refino de petróleo, sem detalhar processos intermediários. O modelo econômico aborda a compra e venda de matérias-primas (água, energia, hidrogênio, biomassa), custos de transporte e investimento, visando minimizar os custos. Já o modelo logístico otimiza rotas de distribuição, considerando demanda, disponibilidade e locais de produção, buscando eficiência e redução de custos. Para a análise dos dados da gaseificação de resíduos lenhosos, o estudo foi desenvolvido com base nas

informações obtidas de (SALKUYEH; SAVILLE; MACLEAN, 2018). O estudo foi realizado no estado de Minas Gerais, nas 66 microrregiões. A demanda de hidrogênio foi estimada com base na quantidade utilizada pela Refinaria Gabriel Passos em seus processos de refino de petróleo, totalizando 57751,76 ton/ano (ESTEVES et al., 2022). Através dos cálculos de payback, fluxo de caixa e investimento total (Tabela 1), será possível avaliar a rentabilidade do projeto e a velocidade de recuperação do investimento, considerando todos os custos associados.

O payback será calculado com base na Equação (2).

Eq. (2)

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento total}}{\text{Fluxo de caixa}}$$

O fluxo de caixa será calculado com base a Equação (3).

Eq. (3)

$$\text{Fluxo de caixa} = R.\text{venda} - C.\text{transporte} - C.MP - C.\text{operacional}$$

O custo operacional será calculado pela Equação (4)

Eq. (4)

$$C.\text{operacional} = C.\text{manutenção} + O.\text{custos}$$

Sendo que: C. transporte – custo de transporte; C.manutenção - custo de manutenção; O.custos - outros custos; C.transporte – Custo de transporte; R.venda – Receita de venda; C.MP – Custo de Matéria Prima; C. operacional – Custo operacional.

O custo de manutenção corresponde a 6% do investimento, enquanto que os outros custos, como mão de obra e despesas operacionais, representam 8,6% do investimento total.

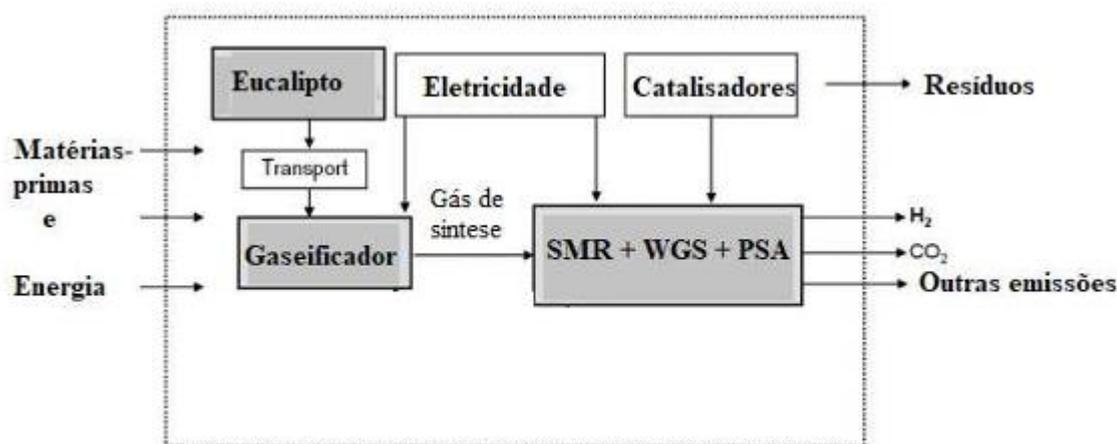
O cálculo do investimento total foi baseado em uma referência de custo de (SALKUYEH; SAVILLE; MACLEAN, 2018), posteriormente ajustada para uma escala otimizada utilizando um fator de escala de 0,6. O uso desse fator de escala reflete a economia de escala, sendo que à medida que o tamanho da planta aumenta, os custos totais não cresceram proporcionalmente, resultando em uma redução do investimento por unidade de produção, otimizando o dimensionamento da planta, garantindo que o projeto se mantenha economicamente viável à medida que a capacidade de produção aumenta.

O custo de transporte da biomassa lenhosa foi calculado com base a um caminhão com capacidade de 40m<sup>3</sup> (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013), e o custo do transporte de hidrogênio foi calculado com base a um caminhão de capacidade de 39,6m<sup>3</sup> á 200 bar (HUNT; SALGADO, 2023), considerando uma distância de 100 km e um consumo médio de diesel de 3 litros/km (PIMENTA, 2022). Com esses parâmetros, chegou-se a um custo de 32,9 \$/ton.100km para a biomassa lenhosa e 480,7 \$/ton.100km, para o transporte do hidrogênio gasoso. Este cálculo reflete os custos de combustível diretamente

associados ao transporte, mas não contempla outros fatores como manutenção do veículo, pedágios ou despesas com mão de obra, que podem variar conforme as condições logísticas.

### **b) Análise ambiental**

Esta análise tem como objetivo estimar os potenciais impactos ambientais envolvidos na tecnologia de produção de hidrogênio via gaseificação de eucalipto nas condições do estado de Minas Gerais. A unidade funcional (UF) foi definida para 1 ton de hidrogênio produzido, utilizando um limite de sistema do berço ao túmulo. Isso inclui todas as entradas, como matérias-primas, energia e água, e saídas, como emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos, ao longo do ciclo de vida do produto. O cenário florestal considera o cultivo de eucalipto por um período de 6 a 7 anos, abrangendo todas as etapas do ciclo de produção, desde a formação das mudas até a colheita. O manejo agroflorestal requer maquinário que consome combustível durante todo o processo. Além disso, são contabilizadas a produção e o transporte de mudas, bem como o uso de agroquímicos, como herbicidas, inseticidas e fungicidas. A Figura 1 mostra os limites do sistema para a produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto, que inclui a produção do eucalipto, além do transporte da madeira até a usina. O sistema de gaseificação apresenta um consumo otimizado de energia de 2,13 MWh/ton.H<sub>2</sub>, o que contribui para a eficiência do processo e a redução da dependência de recursos fósseis. A fase de utilização pelo consumidor foi excluída da análise, pois tem um impacto insignificante. Essa abordagem permite uma avaliação mais precisa dos impactos ambientais associados à gaseificação do eucalipto.



**Figura 1.** Limites do sistema para a produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto

As categorias foram analisadas pelo método ReCiPe midpoint (H), seguindo a metodologia utilizada por Weidner, Tulus and Guillén-Gosálbez, (2023), a abordagem de normalização foi considerada para as categorias com maior impacto, que incluem o aquecimento global (GW), formação de ozônio, ecossistemas terrestres (OFTE), formação de ozônio, saúde humana (OFHH), ecotoxicidade da água doce

(Fec), ecotoxicidade marinha (Mec), ecotoxicidade terrestre (Tec), toxicidade não cancerígena humana (HNCT) e consumo de água (WC).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

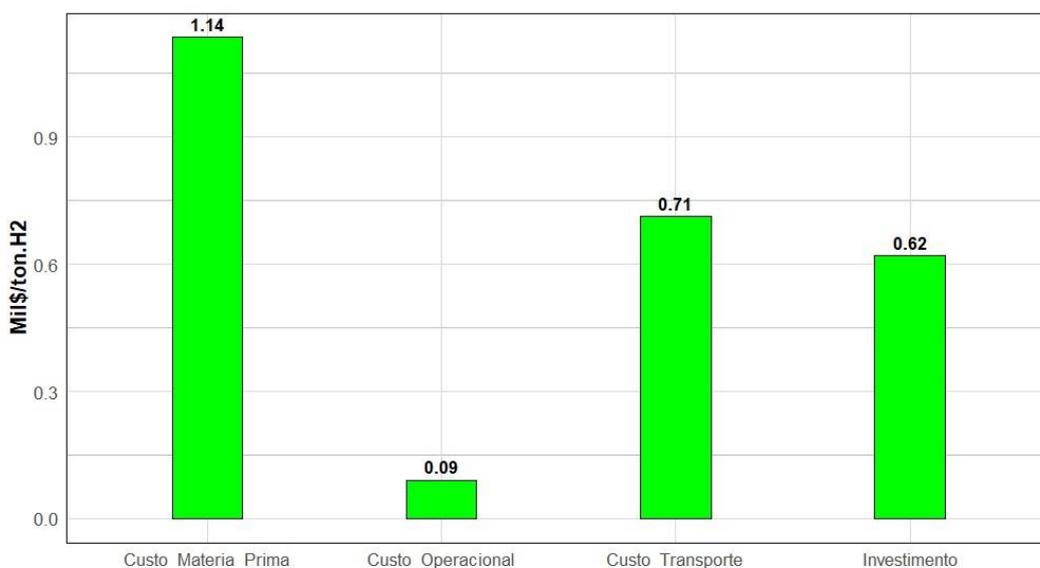
### a) *Análise tecno-econômica*

Com base nos dados definidos na metodologia, o modelo de otimização identificou a rota de produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto como viável, alcançando uma solução ótima. Belo Horizonte foi escolhida como centro de produção de hidrogênio a partir de resíduos de madeira, com uma produção de 57751,76 ton, atendendo à demanda preestabelecida. Para atender à demanda, foram utilizadas 941353,7 ton/ano de biomassa de eucalipto, de um total disponível de 18696411,43 ton/ano nas 66 microrregiões de Minas Gerais, representando apenas 5% do consumo total de biomassa. Deste volume, 20% do peso da árvore é classificado como resíduo (PÉREZ et al., 2006).

Mesmo com o uso de biomassa para a produção de hidrogênio, o impacto sobre a exploração e o consumo de eucalipto foi mínimo, assegurando que a produção não exerceu pressão considerável sobre os recursos florestais disponíveis. Além disso, a demanda de hidrogênio pode ser plenamente atendida utilizando-se apenas os resíduos da biomassa de eucalipto. Embora a biomassa seja uma fonte renovável, sua extração em larga escala deve ser cuidadosamente gerenciada para evitar impactos negativos como desmatamento, degradação do solo e perda de biodiversidade. A centralização na produção de hidrogênio busca otimizar a logística e reduzir a complexidade no transporte e distribuição. O custo de matéria prima é o que tem maior impacto com 1,14 Mil\$/ton.H<sub>2</sub> (Figura 2). A biomassa lenhosa, apesar de ser uma fonte renovável, pode apresentar desafios em termos de logística, influenciando diretamente o custo de produção.

O custo de transporte foi de 0,71 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, devido a logística necessária para o transporte da biomassa das 21 microrregiões até Belo Horizonte, além do transporte do hidrogênio de Curvelo para a cidade consumidora (Belo Horizonte). O transporte de biomassa lenhosa, ao contrário do hidrogênio, para a maioria das microrregiões até o centro produtor e consumidor, foi otimizado e se mostrou mais vantajoso, principalmente devido às dificuldades logísticas e aos altos custos associados ao transporte de hidrogênio. A distância entre as regiões de origem da biomassa e dos centros de produção e consumo, junto com a infraestrutura rodoviária disponível, afeta diretamente esses custos. Embora o transporte de longas distâncias aumente as despesas, a centralização da produção em Belo Horizonte otimiza a operação, reduzindo custos indiretos, como a necessidade de múltiplas unidades de processamento menores, tornando o processo mais econômico e eficiente.

O investimento foi de 0,71 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, sendo necessário para a instalação de tecnologias adequadas para a produção de hidrogênio por gaseificação, mostrando a alta exigência de capital inicial para a viabilização do processo. O investimento em infraestrutura eficiente é crucial para garantir a competitividade do projeto a longo prazo. O custo operacional de 0,09 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, apresenta o menor custo em comparação aos outros custos analisados, influenciando na eficiência do processo produtivo, refletindo-se nos gastos necessários para manter as operações diárias, como energia, manutenção e mão de obra que são menores em comparação com outros custos. Isso é importante, pois o custo operacional é recorrente e tem impacto direto sobre a viabilidade econômica de longo prazo do projeto.



**Figura 2.** Custos da gaseificação de biomassa para obter de hidrogênio (Fonte: Autores, 2024)

A receita de venda do hidrogênio, influencia bastante no fluxo de caixa e o payback, impactando na rentabilidade e na viabilidade econômica do projeto (Tabela 1). Com a receita de venda de 5 Mil\$/ton.H<sub>2</sub> e um fluxo de caixa de 177M\$, o payback de 2,4 anos, demonstra rentabilidade do projeto, significando que o capital inicial é recuperado em menos tempo, reduzindo risco financeiro, o que é altamente desejável em projetos de hidrogênio, que geralmente requerem grandes investimentos iniciais. Entretanto com uma receita de 4 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, o fluxo de caixa diminui para 119 M\$, resultando em um aumento do payback para 3,5 anos. O aumento no tempo de retorno do investimento impacta na rentabilidade do projeto, uma vez que o fluxo de caixa gerado pela venda de hidrogênio é menor. No entanto, esse payback pode ser considerado aceitável dependendo das condições de mercado e das expectativas a longo prazo, especialmente em um contexto de políticas favoráveis à descarbonização e incentivos para energias renováveis. Já para uma receita de venda de 3 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, o fluxo de caixa é

significativamente reduzido para 61 M\$, o que aumenta o payback para 6,8 anos, comprometendo a capacidade de sustentar operações a longo prazo. Esse longo período de retorno influencia na rentabilidade do projeto. Um payback superior a 5 anos dificulta a atratividade para investidores, especialmente em setores com alta incerteza tecnológica e regulatória, como o de hidrogênio renovável. Para garantir a viabilidade econômica, é fundamental contar com incentivos governamentais, políticas climáticas favoráveis e acompanhar a evolução dos custos de tecnologias alternativas, que podem ajudar a mitigar os impactos financeiros e melhorar a competitividade do projeto.

**Tabela 1.** Análise financeira da tecnologia de gaseificação (Fonte: Autores, 2024).

Venda de H <sub>2</sub> Mil\$/ton	Inv.Total (M\$)	F.C (M\$)	Payback(anos)
5	416,03	177	2,4
4	-	119	3,5
3	-	61	6,8

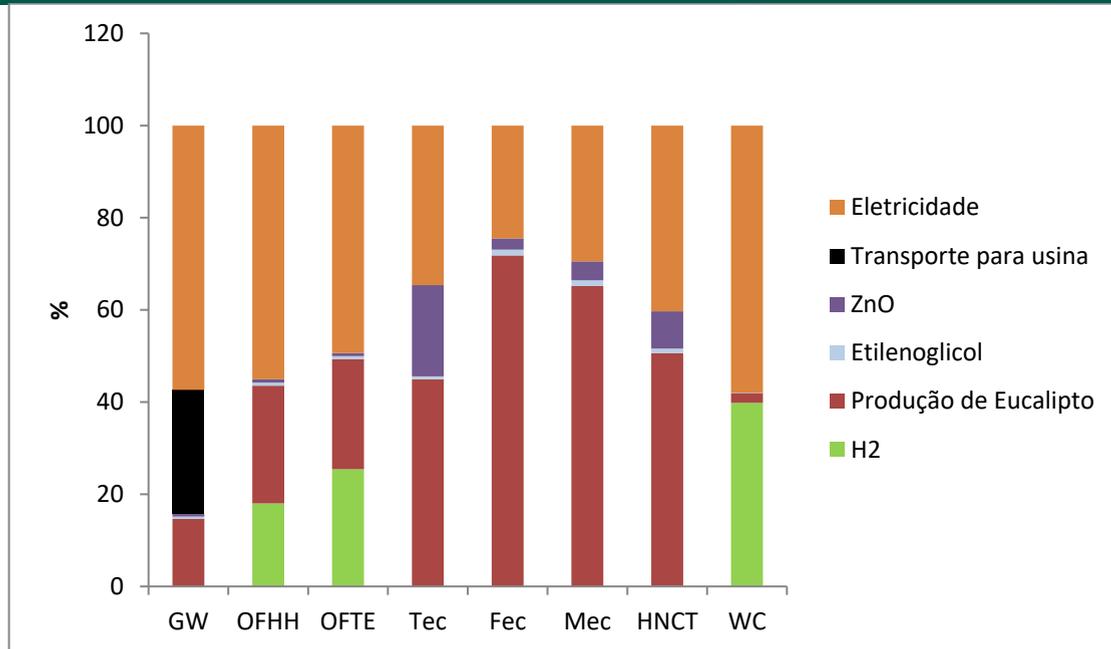
O custo unitário de produção de hidrogênio por gaseificação de biomassa lenhosa, estimado neste estudo em 2,558 \$/kg.H<sub>2</sub>, está próximo do limite superior do hidrogênio cinza produzido a partir de gás natural, que varia entre 0,98 e 2,93 \$/kg (CASARIN, 2023).

Embora o custo seja competitivo, o diferencial da gaseificação de biomassa reside nos benefícios ambientais significativos, como as baixas emissões de CO<sub>2</sub>. Esse aspecto torna o processo mais atraente, especialmente com políticas climáticas cada vez mais rigorosas e da valorização dos créditos de carbono. Esses benefícios ambientais, aliados à possibilidade de obter incentivos fiscais e créditos de carbono, podem compensar os custos de produção relativamente elevados, viabilizando o projeto economicamente e tornando-o competitivo com outras tecnologias de produção de hidrogênio.

### **b) Análise do ciclo de vida (ACV)**

Os resultados caracterizados são apresentados na Figura 3, onde cada categoria ambiental é plotada com sua porcentagem de contribuição para 1 ton de hidrogênio produzido.

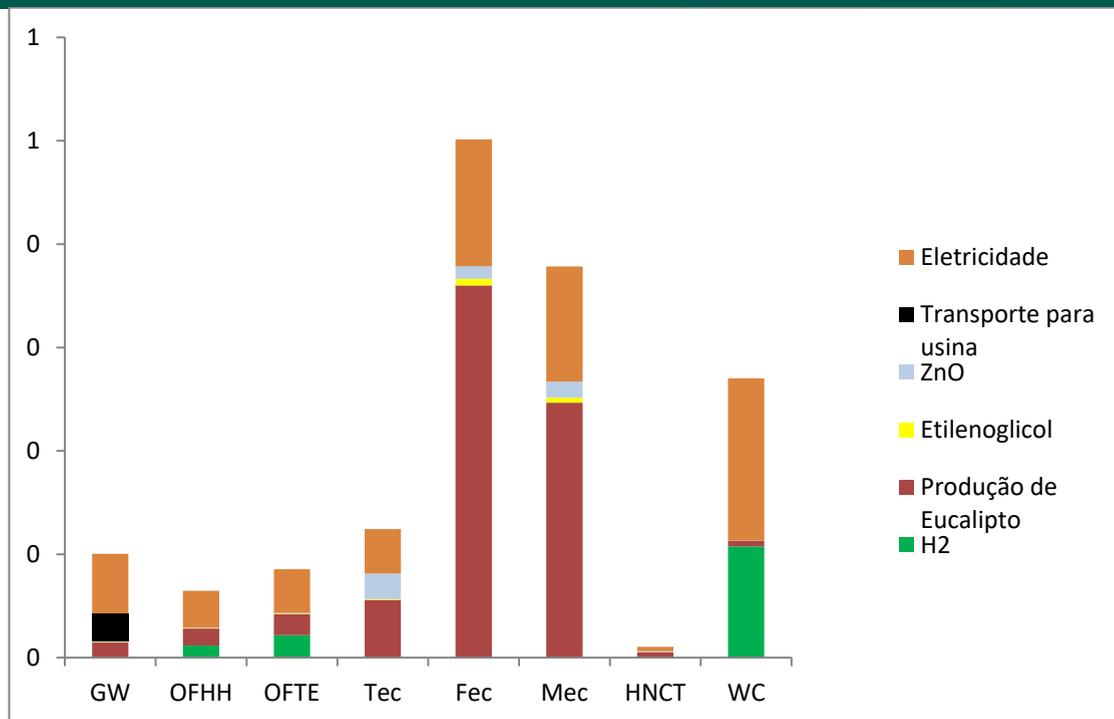
O processo de produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto gera emissões diretas com menor impacto, mas as etapas associadas ao cultivo eucalipto, pré-tratamento de biomassa e a eletricidade, contribui significativamente nas categorias de Tec, HNCT, Mec e Fec com cerca de 45% a 72%, pelo fato dessa estar associada ao uso de agroquímicos, degradação do solo causada pelo cultivo e combustíveis fósseis.



**Figura 3.** AICV para a produção 1 ton de hidrogênio da gaseificação de eucalipto:  
Caracterização

A eletricidade contribui significativamente, com 49% a 58% para os impactos de OFTE, OFHH, GW e WC, pois é necessária para operações como resfriamento, controle de temperatura e processos auxiliares que demandam água. Além disso, a geração de eletricidade envolve o uso de água em suas próprias operações, aumentando assim a pegada hídrica do processo. Isso sugere que a fase de geração de eletricidade é um ponto crítico que merece atenção, uma vez que depende de fontes não renováveis podendo acentuar esses impactos. Portanto, é crucial explorar alternativas energéticas renováveis para mitigar esses efeitos e promover uma produção de hidrogênio mais sustentável.

Os catalisadores etilenoglicol e ZnO tem um menor impacto em todas as categorias variando de 0,07% a 1,25% e 0,02% a 19,8% pelo fato desses terem um papel específico no processo da gaseificação.



**Figura 4.** AICV para a produção 1 ton de hidrogênio da gaseificação de eucalipto:  
 Normalização

Os resultados normalizados apresentados na Figura 4, em termos globais a categoria com maior impacto é a ecotoxicidade da água doce, devido as emissões geradas pelo uso de agroquímicos no cultivo, pré-tratamento de eucalipto e emissões geradas a partir de fontes não renováveis.

Conforme ilustra a Tabela 2, o processo de produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto apresenta emissões de 804 CO<sub>2</sub> eq/ton.H<sub>2</sub> na categoria GW, evidenciando menor impacto em relação aos métodos tradicionais de produção de hidrogênio, como reforma de gás natural (hidrogênio cinza) que de acordo com os autores Borole e Greig, (2019) e Patel et al., (2024) emitem 10400 e 13900 CO<sub>2</sub> eq/ton.H<sub>2</sub>. Essa redução nas emissões é notável, pois, durante o crescimento do eucalipto, ocorre a captura de CO<sub>2</sub> por meio da fotossíntese. Portanto, os resultados ressaltam o potencial do eucalipto para uma matriz energética mais limpa, alinhando-se com as metas de sustentabilidade.

**Tabela 2.** Caracterização dos impactos por etapa da gaseificação de eucalipto.

Cat.	Unit	H <sub>2</sub>	Eucalipto	Etilenoglicol	ZnO	Transporte	Eletricidade	Total
GW	Kg CO <sub>2</sub> eq.	1,16	117	4,22	4,62	216	461	804
OFHH	Kg Nox	0,24	0,340	0,00866	0,01	-	0,733	1,33

	eq							
OFTE	Kg Nox	0,386	0,363	0,00915	0,0105	-	0,749	1,52
	eq							
Fec	Kg 1,4-	0,0004	9,07	0,158	0,305	-	3,09	12,6
	DCB							
Mec	Kg 1,4-	0,0001	10,7	0,206	0,676	-	4,85	16,5
	DCB							
HNCT	Kg 1,4-	0,412	165	3,25	26,4	-	132	328
	DCB							
Tec	Kg 1,4-	0,386	849	11,5	374	-	654	1890
	DCB							
WC	m <sup>3</sup>	28,7	1,51	0,0521	0,0187	-	41,8	72

A categoria de impacto Tec apresentou maior emissão, totalizando 1890 Kg 1,4-DCB. O processo de produção de eucalipto (849 Kg 1,4-DCB), fornecimento de eletricidade (654 Kg 1,4-DCB) e ZnO (374 Kg 1,4-DCB) contribuíram significativamente. Estes três maiores contribuintes, representando 95% do impacto total nessa categoria. Esses resultados ressaltam a necessidade de otimizar esses processos para reduzir a dependência de recursos fósseis e desenvolver estratégias que tornem o sistema de gaseificação mais sustentável e eficiente.

A produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto consome uma quantidade considerável de água (28,7 m<sup>3</sup>), contribuindo para o aumento do WC total (72m<sup>3</sup>). Esse consumo está intimamente ligado à geração de efluentes que, se não tratados adequadamente, podem contribuir para a HNCT (328 Kg 1,4-DCB). A gestão eficiente da água e o tratamento rigoroso dos efluentes são essenciais para reduzir tanto o consumo de água quanto o impacto tóxico associado. A integração de tecnologias de reuso de água e tratamento avançado de efluentes, bem como a otimização do uso de eletricidade, agroquímicos e biocatalizadores pode levar a uma produção de hidrogênio mais sustentável e menos prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente.

Além disso, outras categorias de impacto também apresentaram reduções significativas nas emissões, como OFHH, OFTE, Mec e Fec, com valores de 1,33 Kg Nox eq., 1,52 Kg Nox eq., 12,6 kg de 1,4-DCB e 16,5 Kg de 1,4-DCB, respectivamente. A maior contribuição dessas categorias de impacto é da eletricidade, seguido pelo eucalipto, associado à sua colheita e processamento, havendo necessidade de adotar estratégias de manejo sustentáveis e otimização do uso de energia para reduzir esse impacto.

## CONCLUSÕES OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi realizado a análise tecno-econômica e ACV para determinar o custo e o impacto ambiental no processo de produção de hidrogênio via a gaseificação do eucalipto. A centralização da produção permitiu otimizar a logística, reduzindo a complexidade no transporte e distribuição, e melhorando a eficiência do processo. No entanto, o custo de matéria-prima, de 1,14 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, foi identificado como o componente de maior impacto, influenciado principalmente pelos desafios logísticos associados à biomassa lenhosa, ainda que seja uma fonte renovável, tendo um investimento inicial de 0,71 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>. A análise dos custos mostrou que, embora o transporte represente um desafio com 0,71 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, sua centralização na produção contribui para a redução de custos indiretos, tornando o projeto mais eficiente. A rentabilidade do projeto foi diretamente impactada pela receita de venda do hidrogênio. A receita de 5 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, com um payback de 2,4 anos e um fluxo de caixa de 177 M\$, demonstrou maior viabilidade financeira, com retorno do investimento em um período relativamente curto. No entanto, com uma receita de 3 Mil\$/ton.H<sub>2</sub>, o payback se estende para 6,8 anos, comprometendo a atratividade do projeto. Apesar disso, os benefícios ambientais, como as baixas emissões de CO<sub>2</sub>, tornam a gaseificação de biomassa uma opção atrativa em um cenário de políticas climáticas mais rígidas e valorização dos créditos de carbono. Esses fatores, juntamente com incentivos fiscais, podem compensar os altos custos de produção, tornando o projeto competitivo a longo prazo, especialmente em mercados que priorizam a sustentabilidade e a transição para uma economia de baixo carbono.

Os resultados da ACV evidenciam os potenciais impactos ambientais, destacando a categoria de Aquecimento Global (GW), onde a produção de hidrogênio por gaseificação de eucalipto emite 804 CO<sub>2</sub> eq/ton.H<sub>2</sub>, por tonelada de hidrogênio produzido. Comparativamente, métodos tradicionais, como a reforma de gás natural, emitem entre 10.400 e 13.900 kg CO<sub>2</sub> eq/ton.H<sub>2</sub>, mostrando que a gaseificação de eucalipto reduz significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, em grande parte devido à captura de carbono durante o crescimento da biomassa.

Em termos de outros potenciais impactos como a Toxicidade Não Cancerígena Humana, ecotoxicidade terrestre e consumo de água (HNCT, Tec e WC) destacaram-se com maiores emissões nas etapas de cultivo e consumo de eletricidade, havendo necessidade de práticas agrícolas mais sustentáveis e buscando alternativas menos tóxicas para insumos e catalisadores. Outras categorias, como Formação de Ozônio (OFHH e OFTE), ecotoxicidade da Água Doce (Fec) e marinha (Mec), apresentaram valores relativamente baixos, destacando o potencial do eucalipto em reduzir impactos ambientais em comparação com métodos convencionais. No entanto, é fundamental continuar investindo na otimização do processo,

focando na redução do uso de insumos tóxicos e no aprimoramento das práticas de manejo sustentável. A integração de estudos tecno-econômicos e de ACV fornece uma quantificação do desempenho econômico e ambiental, permitindo a melhoria dos sistemas de produção de hidrogênio renovável. É crucial, portanto, investir em pesquisas que promovam a inovação tecnológica e o desenvolvimento de alternativas menos impactantes, priorizando práticas agrícolas sustentáveis e insumos menos tóxicos. Ao integrar eficiência produtiva com a redução de impactos ambientais, será possível otimizar a cadeia produtiva da gaseificação de eucalipto. Um compromisso conjunto entre produtores, pesquisadores e formuladores de políticas é essencial para garantir que essa transição não apenas reduza emissões, mas também contribua para a saúde econômica e ambiental das comunidades envolvidas.

## AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos especiais ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Lavras – UFLA. À FAPEMIG pelo apoio financeiro da bolsa de pós-graduação.

## REFERÊNCIAS

- Borole, A.P. and Greig, A.L. (2019) ‘Life-Cycle Assessment and Systems Analysis of Hydrogen Production’, Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biohydrogen, Second Edition, pp. 485–512. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64203-5.00020-4>
- CASARIN, R. **Hidrogênio verde será mais barato que o produzido com gás natural até 2030** | Portal Solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/armazenamento/hidrogenio-verde-sera-mais-barato-que-o-produzido-com-gas-natural-ate-2030> . Acesso em: 23 set. 2024.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE PELLETS DE MADEIRA**. 2013.
- ESTEVES, H. B. B. et al. **Produção e consumo de hidrogênio em refinarias no Brasil**. Brasil: 2022. Disponível em: <http://www.epe.gov.br> .
- HUNT, J. D.; SALGADO, B. **Aspectos sobre o armazenamento e transporte de hidrogênio**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/378078577> .
- Patel, G.H. et al. (2024) ‘Climate change performance of hydrogen production based on life cycle assessment’, Green Chemistry, 26(2), pp. 992–1006. Available at: <https://doi.org/10.1039/d3gc02410e>.
- PÉREZ, S. et al. Energy evaluation of the Eucalyptus globulus and the Eucalyptus nitens in the north of Spain (Cantabria). *Thermochimica Acta*, v. 451, n. 1–2, p. 57–64, 1 dez. 2006.
- PIMENTA, É. **Quanto custa encher o tanque de um caminhão no Brasil?** Disponível em: <https://autopapo.com.br/noticia/quanto-custa-encher-o-tanque-de-um-caminhao-brasil/> . Acesso em: 16 set. 2024.
- SALKUYEH, Y. K.; SAVILLE, B. A.; MACLEAN, H. L. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from different biomass gasification processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 20, p. 9514–9528, 17 maio 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.024>
- WEIDNER, T.; TULUS, V.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. Environmental sustainability assessment of large-scale hydrogen production using prospective life cycle analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 48, n. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.044>