

# CAPTURA E UTILIZAÇÃO DE CARBONO NA FERMENTAÇÃO DE ETANOL DE CANA: SIMULAÇÃO DO PROCESSO E AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Palavras-Chave: captura de carbono, bioenergia, ACV

Autores(as):

GABRIELA AMADIO, FEQ – UNICAMP

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. GLAUCIA MENDES SOUZA, IQ – USP

Prof. Dr. JEAN FELIPE LEAL SILVA (co-orientador), FEQ – UNICAMP

Prof. Dr. RUBENS MACIEL FILHO (orientador), FEQ – UNICAMP

---

## INTRODUÇÃO:

As mudanças climáticas acontecendo ao longo do globo atualmente vêm preocupando cada dia mais a sociedade, pois os malefícios causados por elas são sentidos frequentemente e impactam na vida humana e no meio-ambiente. Dentre suas causas, destaca-se a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, como o gás carbônico, responsável por intensificar fenômenos como aquecimento global e acidificação dos oceanos.

Assim, no que se diz respeito a bioenergia e bioprocessos, uma das mais consideráveis fontes de emissão de carbono ocorre durante a fermentação de açúcares para produção de etanol, sobretudo em usinas de cana-de-açúcar. Neste caso, a fermentação do açúcar presente no caldo de cana-de-açúcar produz como produto principal o etanol de primeira geração, mas há também produção de gás carbônico de alta pureza e qualidade como produto secundário, segundo a reação simplificada abaixo (Equação 1). Ressalta-se, dessa forma, que esse tipo de fonte de CO<sub>2</sub> se classifica como biogênica, isto é, não é proveniente de fontes de combustíveis fósseis, mas sim da absorção de CO<sub>2</sub> da atmosfera durante o crescimento de biomassa.



É indispensável a busca pela minimização das mudanças climáticas no planeta. Desse modo, a captura de carbono é uma alternativa para alcançar tal objetivo, uma vez que é responsável por diminuir as emissões líquidas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, minimizando assim os fenômenos supracitados decorrentes das mudanças climáticas.

Além disso, a busca das indústrias pela captura de carbono também fomenta a indústria sustentável, visto que os altos custos envolvidos no processo de captura de CO<sub>2</sub> instigam indústrias a procurarem por demais alternativas, como as fontes limpas e renováveis. Dessa forma, as legislações e

metas envolvendo a captura de carbono possibilitam e incentivam a transição energética, em razão da procura pela gestão das emissões de carbono de fontes tradicionais, que incentiva a transição para as energias renováveis.

Já com relação a captura de carbono em processos que envolvem bioenergia, como a fermentação de açúcares para produção de etanol, em razão de haver produção de CO<sub>2</sub> altamente concentrado, tem-se um gás carbônico apropriado e de grande potencial para processos de captura e armazenamento (CCS) ou até mesmo utilização (CCU) em outros processos.

Além disso, um importante tópico acerca de processos de bioenergia envolve os limites do que é considerado como emissão de gases de efeito estufa. Isso porque, em processos biogênicos, têm-se emissões biogênicas de gás carbônico, ou seja, aquelas consideradas como parte do ciclo de vida natural do carbono, diferentemente das emissões a partir da queima de combustíveis fósseis, que são emissões ocasionadas por atividade humana, conforme ilustrado na Figura 1.

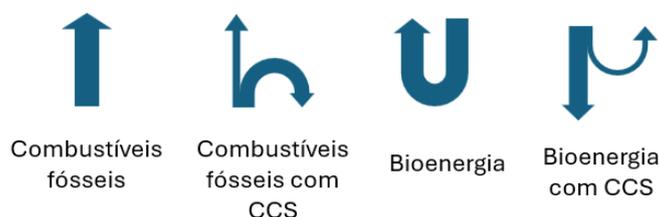


Figura 1 – Comparação de emissão e captura de CO<sub>2</sub> de acordo com vários tipos de tecnologias utilizadas.

Os BECCUS (Bioenergia com captura, utilização e armazenamento de carbono) surgem, então, como uma das tecnologias mais importantes e promissoras na tentativa de atingir as metas de emissões líquidas neutras de carbono na atmosfera, pois partem do princípio de que as emissões são biogênicas e ao capturar o carbono do processo, podem ser capazes de atingir emissões negativas desse gás. Neste sentido, o presente trabalho objetiva realizar simulações de diversos processos de captura e utilização de carbono gerado durante a fermentação de etanol de cana-de-açúcar, - como o processo convencional, CCS, CCU e CCUS - analisando índices e parâmetros econômicos de cada um deles, além de efetuar a avaliação do ciclo de vida de tais tecnologias estudadas, verificando dados de emissão e captura de carbono em cada caso.

## METODOLOGIA:

Os estudos realizados neste trabalho baseiam-se em simulações de biorrefinaria realizadas no programa *Aspen Plus*, versão 8.6, e seguem quatro diferentes cenários, representados no diagrama de blocos apresentado na Figura 2, onde os blocos em verde se referem aos processos convencionais referentes às usinas de cana-de-açúcar e os blocos em azul são aqueles necessários para a fermentação do CO<sub>2</sub> gerado no próprio processo, a partir de reação com H<sub>2</sub> produzido por eletrolisadores que usam a eletricidade a partir da queima do bagaço de cana na usina. Além disso, o processo de captura e armazenamento de carbono, também considerado, está representado pelo bloco laranja.

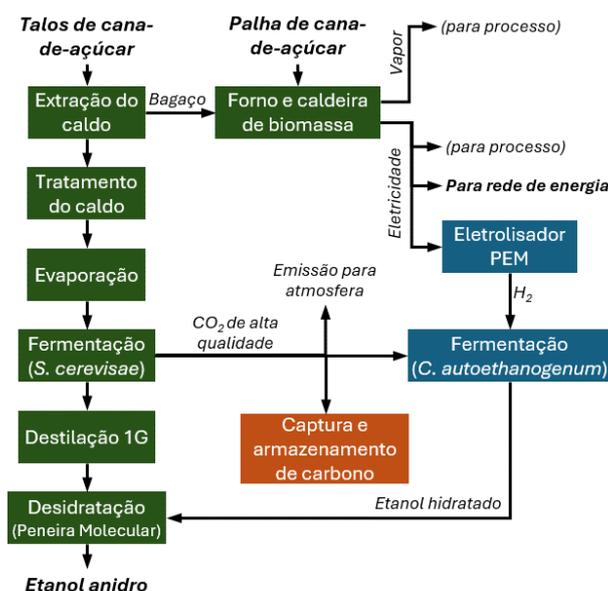


Figura 2 - Diagrama de blocos dos processos que compõem os cenários de biorrefinaria considerados no presente trabalho.

Para análise do cenário que envolve utilização do gás carbônico gerado no processo convencional na fermentação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  em presença do microrganismo *C. autoethanogenum*, foi considerado o conjunto de reações bioquímicas referentes à rota metabólica de Wood-Ljungdahl, conforme descrito na Figura 3. Esta rota demanda uma razão de  $\text{H}_2$  para  $\text{CO}_2$  de 3 para alimentar o processo de produção de etanol através da fermentação de gases. Desta forma, tem-se uma rota para produção de etanol a partir do próprio gás carbônico gerado no processo principal.

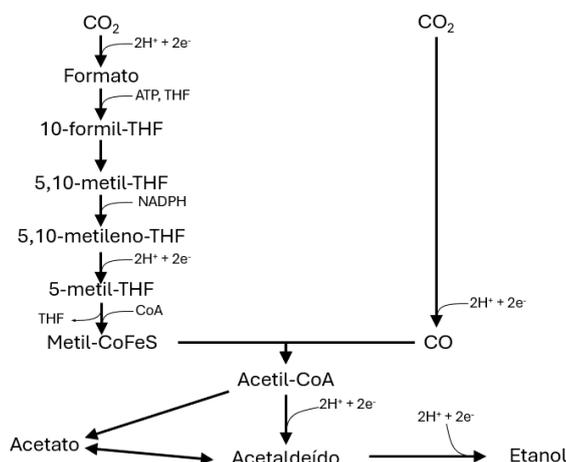


Figura 3 – Reações bioquímicas via Wood-Ljungdahl.

Os quatro cenários de destinação do  $\text{CO}_2$  produzido na fermentação do caldo de cana avaliados nas simulações realizadas são:

- **1G-BAU:** “business as usual”, considera venda de eletricidade e de etanol 1G, sem tecnologia de captura de carbono, ou seja, todo o carbono biogênico produzido é lançado para a atmosfera;

- **1G+CCS:** todo CO<sub>2</sub> produzido durante a fermentação de açúcares passa pelo processo de captura e armazenamento de carbono em reservatórios subterrâneos (bloco laranja na Figura 2);
- **1G+CCU:** adiciona-se ao processo convencional a captura e utilização de parte do carbono (blocos azuis na Figura 2) – este cenário é limitado pelo fornecimento de energia elétrica ao eletrolisador. O restante de carbono é descartado para a atmosfera;
- **1G+CCUS:** adiciona-se concomitantemente o processo de armazenamento e utilização do carbono capturado ao processo convencional.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os principais resultados obtidos a partir dos balanços de massa e energia realizados nas simulações das biorrefinarias de cana-de-açúcar avaliadas encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do balanço de massa e energia dos quatro cenários de biorrefinaria avaliados.

	1G-BAU	1G+CCS	1G+CCU	1G+CCUS
Capacidade de cana (Mton/ano)	4,0	4,0	4,0	4,0
Produção de etanol 1G (kton/ano)	270	270	270	270
Produção de etanol 2G (kton/ano)	0	0	56	56
Venda de eletricidade (milhões kWh/ano)	743	709	0	0
CO <sub>2</sub> capturado (kton/ano)	0	269	0	161
Produção de O <sub>2</sub> (kton/ano)	0	0	237	237

Um ponto importante a ser ressaltado é que, se feita a consideração de que somente a eletricidade gerada no processo através da queima de bagaço é utilizada para a produção de hidrogênio no eletrolisador PEM (*Proton Exchange Membrane*), o processo é limitado pela disponibilidade de H<sub>2</sub> e não é possível utilizar todo o CO<sub>2</sub> na fermentação com H<sub>2</sub>, sendo então necessária a combinação deste processo (CCU) com o armazenamento de carbono (CCS) ou emissão do restante não reagido para a atmosfera. Ademais, a partir dos balanços de massa e energia, tem-se os resultados da análise técnico-econômica (TEA) e avaliação de ciclo de vida (LCA) de cada cenário, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da análise técnico-econômica e avaliação do ciclo de vida. Valores em dólares americanos.

	1G-BAU	1G+CCS	1G+CCU	1G+CCUS
CAPEX (milhões \$)	456,1	470,1	530,3	537,3
Taxa interna de retorno	14,9%	15,3%	13,8%	14,1%
Valor presente líquido (milhões \$)	217,5	243,3	190,0	211,4
Receitas líquidas anuais (milhões \$)	220,2	228,1	236,7	242,3
Custos anuais (milhões \$)	105,6	106,3	115,7	116,0
GWP (gCO <sub>2</sub> eq/MJ)	25,4	-8,5	22,4	4,6

Para um crédito de carbono de \$35/tCO<sub>2</sub>, verifica-se pela Tabela 2 que o cenário 1G+CCS alcança o menor GWP (potencial de aquecimento global) dentre todos, sendo possível obter emissões

líquidas negativas de gás carbônico. Neste cenário, temos também o melhor desempenho econômico, com maiores valores de taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL). O uso de fermentação de CO<sub>2</sub> com H<sub>2</sub> aumenta o rendimento de etanol em 21%, mas o elevado custo de produção de hidrogênio via eletrólise da água torna essa opção menos atrativa. Como neste trabalho considera-se somente o uso de H<sub>2</sub> produzido através da eletrólise da água usando somente a eletricidade excedente disponível na usina, a quantidade de eletricidade é um fator limitante, de forma que acaba por não ser tão reduzido o GWP do cenário 1G+CCU em comparação com o convencional (1G+BAU).

## CONCLUSÕES:

Dentre as principais conclusões do projeto realizado, evidencia-se que a utilização de CO<sub>2</sub> na fermentação de CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> a partir da eletrólise da água não é financeiramente competitiva. Porém, demais métodos de produção de H<sub>2</sub> verde, como a gaseificação de biomassa, precisam ser avaliados, uma vez que eles têm custo mais competitivo. Ademais, o etanol de primeira geração combinado com o processo de CCS tem potencial para produzir etanol com emissão de carbono negativa. Observou também que os créditos de carbono aumentam a viabilidade dos processos de BECCUS na biorrefinaria.

---

## AGRADECIMENTOS:

Os autores gostariam de agradecer ao apoio da FAPESP (2018/16098-3, 2022/07946-6, 2022/14692-0 e 2023/16634-0) e à IEA Bioenergy Technology Collaboration Program (Task 39).

## BIBLIOGRAFIA:

DIAS, M. O. S; JUNQUEIRA, T. L; SAMPAIO, I. L. M; CHAGAS, M. F; WATANABE, M. D. B; MORAIS, E. R; et al. **Use of the VSB to Assess Biorefinery Strategies**. Springer, Cham; p. 189–256, 2016.

SHIVA KUMAR, S; HIMABINDU, V. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. **Materials Science for Energy Technologies**; v. 2, p. 442–454, 2019.

RIVERA-TINOCO, R; FARRAN, M; BOUALLOU, C; AUPRÊTRE, F; VALENTIN, S; MILLET, P; et al. Investigation of power-to-methanol processes coupling electrolytic hydrogen production and catalytic CO<sub>2</sub> reduction. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 4546–4559, 2016.

RAHBARI, A; HARTKAMP, R; MOULTOS, O. A; BOS, A; VAN DEN BROEKE, L. J. P; RAMDIN, M; et al. Electro-osmotic Drag and Thermodynamic Properties of Water in Hydrated Nafion Membranes from Molecular Dynamics. **The Journal of Physical Chemistry C**; v. 126, p. 8121-8133, 2022.

MEDINA, P; SANTARELLI, M. Analysis of water transport in a high pressure PEM electrolyzer. **International Journal of Hydrogen Energy**; v. 35, p. 5173–5186, 2010.