



# AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DA CAPTURA DO CO<sub>2</sub> NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Palavras-Chave: ETANOL, BECCS, RENOVIABIO

**Autores:**

**JOÃO VITOR DE OLIVEIRA MARACCINI [FEM, UNICAMP]**

**PROF. DR. JOAQUIM EUGÊNIO ABEL SEABRA (orientador) [FEM, UNICAMP]**

---

## INTRODUÇÃO:

O aumento acelerado da temperatura da Terra, devido às emissões antropogênicas de gases do efeito estufa para a atmosfera, passou a afetar progressivamente os principais componentes do clima, o bem-estar do ser humano e a regulação dos ecossistemas já existentes. Neste sentido, foram elaborados cenários de mitigação das emissões de gases do efeito estufa que estabelecem metas para o final do século XXI, sendo o 2DS (*2°C Scenario*) aquele que limita o aumento máximo da temperatura média do planeta a 2°C. Em uma das análises da Agência Internacional de Energia, concluiu-se que, para consolidar o cenário de mitigação 2DS, deve haver uma transformação total do setor energético de modo que suas emissões líquidas de CO<sub>2</sub> devem ser reduzidas a 70% até 2060 e chegar o mais próximo de zero ao final do século. Assim, muitos modelos climáticos apresentados pelo 5º Relatório de Avaliação do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) apontam que as tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS - *Carbon Capture and Storage*), bioenergia e sua combinação com CCS (BECCS - *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*) aplicadas em larga escala são essenciais para que a maioria dos cenários da literatura, incluindo o 2DS, se concretize ao final do século.

Assim, o objetivo do projeto é avaliar o efeito da captura de CO<sub>2</sub> nas emissões de GEE no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar e estimar a remuneração do CO<sub>2</sub> necessária para tornar o projeto viável economicamente. Tendo em vista a potencial relevância do *RenovaBio* para o contexto nacional, será utilizada como ferramenta de análise a *RenovaCalc*. A partir dos resultados para as Notas de Eficiência Energético-Ambiental serão estimados os preços necessários para o CBIO para tornar os projetos de captura economicamente viáveis.

## METODOLOGIA:

### Avaliação técnica

A avaliação técnica da captura de CO<sub>2</sub> no setor sucroalcooleiro foi realizada em três etapas: modelagem e simulação de uma destilaria autônoma de referência, modelagem e simulação da compressão do CO<sub>2</sub> e realização do balanço energético dos três cenários – sistema convencional, sistema BECCS com captura de CO<sub>2</sub> da fermentação e sistema BECCS com captura da fermentação e pós-combustão.

A etapa de modelagem e simulação da destilaria foi realizada em três fases: modelo de ciclo de cogeração básico – ciclo de potência a vapor contando com um desaerador –, modelo de ciclo de cogeração com aquecedores fechados – adicionando-se dois aquecedores de água de alimentação fechados – e modelo final (Figura 1), que inclui a modelagem da combustão do bagaço de cana-de-açúcar. Os principais parâmetros da usina de referência estão apresentados na Tabela 1 e os softwares utilizados foram o *Cycle-Tempo* e *EES (Engineering Equation Solver)*.

Na segunda etapa, a modelagem e simulação da compressão do CO<sub>2</sub> foram desenvolvidas a parte no *EES* com base na tecnologia de compressão estagiada com inter-resfriamento e bombeamento seguindo parâmetros da literatura. No caso da fermentação, a captura consiste, basicamente, em comprimir a corrente de CO<sub>2</sub> pura produzida no processo, que foi calculada com base na produção de etanol na proporção mássica

aproximada de 1:1. Já no caso da captura pós-combustão, foi necessário estimar o vapor disponível no ciclo para realização do tratamento dos gases – que também demanda energia elétrica – através de um processo iterativo no modelo final; a partir deste valor, foi calculada a vazão do CO<sub>2</sub> a ser comprimido.

No balanço energético, foram compilados os valores de potência elétrica – produzida, consumida e líquida – e calculada a geração de eletricidade da usina e a eletricidade excedente para exportação (descontado o consumo específico de energia elétrica do processo industrial) para os três cenários. Foi calculada também a porcentagem de CO<sub>2</sub> capturado em cada cenário e a porcentagem da penalidade energética devido à captura.

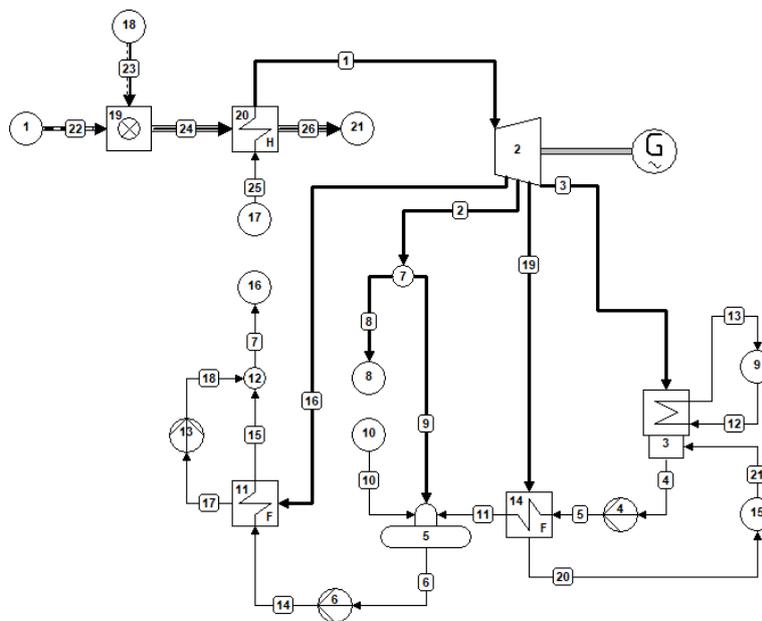


Figura 1. Modelo final

Tabela 1. Principais parâmetros da usina de referência

Parâmetro	Valor
Capacidade de processamento de cana por safra (4000 horas) [Mt]	4
<u>Consumos específicos de energia</u>	
Consumo de vapor (processo industrial) (saturado a 2,5 bar) [kg/tc]	500
Consumo de energia elétrica [kWh/tc]	30
Consumo de bagaço [kg/tc]	280
<u>Sistema de cogeração</u>	
Pressão de vapor na saída da caldeira [bar]	68
Temperatura de vapor na saída da caldeira [°C]	480

### Avaliação ambiental

Para avaliar o impacto da captura de CO<sub>2</sub> sobre as emissões de GEE no ciclo de vida do etanol – neste caso, considerado 100% de etanol hidratado – da usina de referência, foi realizada a estimativa da Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA) e Intensidade de Carbono do etanol em cada cenário utilizando-se a ferramenta RenovaCalc do programa RenovaBio. Para isto, foram compilados e implementados na ferramenta parâmetros dos modelos, resultados das simulações e parâmetros do estágio de produção agrícola da cana-de-açúcar disponíveis na literatura, incluindo corretivos, fertilizantes, combustíveis, eletricidade, entre outros.

Como a versão atual da RenovaCalc não considera as tecnologias de captura de CO<sub>2</sub> avaliadas, foi necessário acrescentar a contribuição do processo de captura à NEEA calculada. Além disso, foi avaliado se a contribuição da captura é maior que a Intensidade de Carbono do etanol, isto é, se há emissões negativas; em caso positivo, o programa ainda RenovaBio prevê um bônus de 20% à NEEA do combustível.

### Avaliação econômica

A avaliação econômica da implantação dos sistemas de captura de CO<sub>2</sub> consistiu em confrontar os custos adicionais necessários para captura e o preço do CBIO a partir do qual o investimento se tornaria atrativo. Para cada cenário, foram estimados os custos de investimento e de operação e manutenção da unidade de compressão e da unidade CCS – captura pós-combustão – e o custo de oportunidade referente à venda de energia elétrica excedente à rede.

Assim, os custos do investimento inicial foram anualizados em uma série uniforme de 25 anos, de acordo com a vida útil aproximada dos sistemas, considerando-se uma taxa de desconto de 10% ao ano. Então, o custo equivalente anual do investimento foi somado aos custos de O&M e de oportunidade, resultando no custo equivalente anual total.

Para estimar o preço do CBIO que arca com o custo equivalente anual total, calculou-se, primeiramente, a quantidade de CBIOs emitida anualmente. Este valor é obtido através do volume de etanol produzido e do fator para emissão de CBIOs, que é calculado em um formulário do RenovaBio. Dividindo-se o CEAT pela diferença entre os CBIOs emitidos pelo sistema com captura e o pelo sistema convencional, obteve-se o preço do CBIO.

Neste trabalho, os valores de referência encontrados na literatura para cálculo dos custos de investimento e O&M dos sistemas de compressão e captura encontram-se em Euro com base em 2014, logo os valores em Real – neste caso, apenas do custo de venda da energia elétrica – foram convertidos para Euro através da taxa de 3,23 R\$/ € com base no final de 2014.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

### Avaliação técnica

Os resultados do balanço de energia elétrica são apresentados na Tabela 2 e os resultados de captura de CO<sub>2</sub> na Tabela 3. Diante dos mesmos, observa-se que o impacto da implementação da captura de CO<sub>2</sub> da fermentação na geração de eletricidade excedente é baixo e compreende a captura de 22,2% do CO<sub>2</sub> produzido na usina. Já a captura de CO<sub>2</sub> da fermentação e pós-combustão reduz em 34,8% a geração de eletricidade excedente, com captura de 52,0% do CO<sub>2</sub>.

Tabela 2. Resultados do balanço energético

Parâmetros	Convencional	CCS (Fermentação)	CCS (Fermentação e Pós-Combustão)
Potência elétrica (Gerador) [MW]	121	121	107,4
Consumo (Ciclo) [MW]	1,64	1,64	1,63
Compressão de CO <sub>2</sub> da Fermentação [MW]	-	6,03	6,03
Compressão de CO <sub>2</sub> Pós-Combustão [MW]	-	-	8,10
Tratamento dos gases de combustão [MW]	-	-	3,50
Potência elétrica líquida [MW]	110	105	88,1
Geração de eletricidade [kWh/tc]	119	113	88,1
Geração de eletricidade excedente [kWh/tc]	89,1	83,0	58,1

Tabela 3. Resultados de captura de CO<sub>2</sub>

Parâmetros	Convencional	CCS (Fermentação)	CCS (Fermentação e Pós-Combustão)
Captura de CO <sub>2</sub> da fermentação [kg/s]	-	18,9	18,9
Captura de CO <sub>2</sub> da pós-combustão [kg/s]	-	-	25,4
Emissão de CO <sub>2</sub> para a chaminé [kg/s]	85,3	66,4	40,9
Total de CO <sub>2</sub> capturado [kg/s]	-	18,9	44,3
Percentual de CO <sub>2</sub> capturado	-	22,2%	52,0%

### Avaliação ambiental

Os resultados obtidos a partir da avaliação realizada utilizando-se a ferramenta RenovaCalc estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que em ambos os cenários de captura, geram-se emissões negativas de GEE, e que, conforme previsto no programa RenovaBio, ambos são passíveis de receber o bônus de 20% sobre a NEEA do etanol.

Tabela 4. Resultados da avaliação ambiental

Parâmetros	Convencional	CCS (Fermentação)	CCS (Fermentação e Pós-Combustão)	CCS (Fermentação) + Bônus de 20%	CCS (Fermentação e Pós-Combustão) + Bônus de 20%
NEEA [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]	70,2	70,0	69,4	70,0	69,4
Intensidade de Carbono [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]	17,3	17,4	18,0	17,4	18,0
CO <sub>2</sub> capturado [g CO <sub>2</sub> /MJ]	-	35,3	82,8	35,3	82,8
NEEA c/ Captura [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]	-	105	152	126	183
Fator para emissão de CBIO [t CO <sub>2</sub> eq/L]	1,50E-03	2,25E-03	3,25E-03	2,70E-03	3,90E-03
CBIO [tCO <sub>2</sub> eq/ano]	5,17E+05	7,76E+05	1,12E+06	9,31E+05	1,35E+06

### Avaliação econômica

Os resultados da avaliação econômica estão apresentados na Tabela 5. Diante destes resultados e em comparação com aqueles observados na literatura, que são de 21 €/tCO<sub>2</sub>eq para o sistema com captura da fermentação e de 59 a 66 €/tCO<sub>2</sub>eq para o sistema com captura da fermentação e pós-combustão, verifica-se neste trabalho, além de um cenário economicamente mais favorável no caso da captura da fermentação, a grande relevância do bônus concedido pelo RenovaBio a produtores que geram emissões negativas de GEE, que resulta em preços de CBIO iguais a 16,9 €/tCO<sub>2</sub>eq, no caso da captura da fermentação, e 48,3 €/tCO<sub>2</sub>eq, no caso da captura da fermentação e pós-combustão.

Tabela 5. Resultados da avaliação econômica

Parâmetros	CCS (Fermentação)	CCS (Fermentação e Pós-Combustão)	CCS (Fermentação) + Bônus de 20%	CCS (Fermentação e Pós-Combustão) + Bônus de 20%
Investimento inicial [M€]	19	195	18,5	195
Custo equivalente anual (CEA) [M€/ano]	2,04	21,5	2,04	21,5
Custo O&M [M€/ano]	0,853	10,9	0,853	10,9
Custo oportunidade [M€/ano]	1,49	7,66	1,49	7,66

Custo equivalente anual total (GEAT) [M€/ano]	4,39	40,07	4,39	40,07
CBIO (delta) [tCO <sub>2</sub> eq/ano]	2,59E+05	6,04E+05	4,15E+05	8,29E+05
Preço do CBIO [€/tCO <sub>2</sub> eq]	16,9	66,3	10,6	48,3

## CONCLUSÕES:

A captura de CO<sub>2</sub> no setor sucroalcooleiro apresenta-se como uma alternativa tecnicamente viável, principalmente no que diz respeito à captura no processo de fermentação, em que a corrente de emissões é pura e basta a implementação de uma unidade de compressão e armazenamento. Contudo, do ponto de vista econômico, o preço do CBIO no mercado brasileiro ainda é pouco atrativo, tendo apresentado uma média de R\$ 32 por crédito no primeiro trimestre de 2021.

## BIBLIOGRAFIA

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 20 Years of Carbon Capture and Storage20 Years of Carbon Capture and Storage, 2016.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change, 2014.

MÖLLERSTEN, K.; YAN, J.; MOREIRA, J. R. Potential market niches for biomass energy with CO<sub>2</sub> capture and storage - Opportunities for energy supply with negative CO<sub>2</sub> emissions. *Biomass and Bioenergy*, v. 25, n. 3, p. 273–285, 2003.

RESTREPO-VALENCIA, S. Avaliação da viabilidade técnica de sistemas BECCS na geração de eletricidade em usinas do setor sucroenergético, 2018. 93 f, Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. Techno-economic assessment of bio-energy with carbon capture and storage systems in a typical sugarcane mill in Brazil. *Energies* 2019, v. 12, n. 6, p. 1129, 2019.

RFA. Focus Forward: 2020 Ethanol Industry Outlook, 2020.

WITKOWSKI, A.; MAJKUT, M. The impact of CO<sub>2</sub> compression systems on the compressor power required for a pulverized coal-fired power plant in post-combustion carbon dioxide sequestration. *Archive of Mechanical Engineering*, v. 59, n. 3, p. 343–360, 2012.