

ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE CARVÃO ATIVO A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Maria Júlia de Castro Silva ¹; Armando Zanone ²

¹ Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *Este estudo investigou o uso de biocarvão produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar como um material adsorvente para a captura de dióxido de carbono. Foram analisadas as etapas de secagem, carbonização, ativação e regeneração do biocarvão, com o objetivo de avaliar a eficiência energética do processo e a capacidade de adsorção do material. Obteve-se um rendimento médio de 22,21% na conversão de bagaço em carvão e a capacidade de adsorção do biocarvão foi de 2,61 mmol CO₂/g de carvão, valor dentro da média observada para carvões produzidos a partir de outras matérias orgânicas. A análise da relação entre a capacidade de adsorção e a energia consumida durante a produção revelou um desempenho de 10,69 g CO₂/kWh, valor consideravelmente inferior à média de emissões energéticas brasileiras. Assim, apesar do biocarvão apresentar boa eficiência inicial, o saldo energético atual não é favorável, uma vez que a quantidade de CO₂ adsorvida não compensa as emissões associadas ao consumo de energia. No entanto, a regeneração do biocarvão demonstrou potencial para melhorar a eficiência do processo. Conclui-se que, para viabilizar as tecnologias de CCS e CCUS, são necessárias otimizações, como o uso de fontes de energia renováveis e o aumento da capacidade de adsorção do biocarvão, garantindo maior sustentabilidade e eficiência.*

Introdução

As emissões de dióxido de carbono provenientes das indústrias têm sido uma preocupação significativa nas últimas décadas. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), as emissões globais de CO₂ relacionadas à energia alcançaram um nível recorde em 2023, representando 1,1% de aumento, o que equivale a 37,4 mil milhões de toneladas.

Por esta razão, muitos cientistas e pesquisadores tem buscado alternativas para remover ou reduzir os níveis de CO₂ por meio da captura e armazenamento, utilizando métodos como CCS (Captura para armazenamento de carbono) e CCUS (Captura com utilização do carbono) (HUSSIN, 2021). O primeiro envolve a captura de CO₂ de processos industriais e o armazenamento seguro no subsolo em formações geológicas. Já o segundo sugere reutilizar o CO₂ em processos industriais, convertendo-o, por exemplo, em plásticos, concreto ou biocombustível (NATIONAL GRID, 2023).

Para tornar o processo de sequestro de CO₂ economicamente viável, é necessário que a etapa de captura seja rentável. Nesse sentido, a captura a partir da adsorção é uma alternativa promissora devido à energia necessária reduzida e lucratividade (KAUR, 2019). No entanto, o principal desafio na disseminação dessa tecnologia é o desenvolvimento de adsorventes eficazes e de baixo custo. Já foram testados, até hoje, diversos materiais para adsorção de CO₂, como aminas, zeólitas, sílicas e carvões ativados de biomassa, por exemplo.

O uso de biomassa para a produção de carvão ativado tem demonstrado muito interesse por ser altamente poroso, além de apresentar custo reduzido, alta capacidade de adsorção e fácil regeneração (ELLO, 2013). São exemplos de biomassas utilizadas o bagaço de cana, casca do coco, resíduos do açaí e de madeira de pinus.

O Brasil, maior produtor mundial de cana-de-açúcar, gera cerca de 12 milhões de toneladas de bagaço anualmente, sendo aproximadamente 280 kg por tonelada de cana moída (CONAB, 2023). Nesse sentido, a possibilidade de transformar o bagaço em biocarvão surge como uma alternativa para lidar com esse resíduo.

Dessa forma, a fabricação de biocarvão a partir do bagaço de cana-de-açúcar representa uma solução promissora para a captura de CO₂. Contudo, esse processo demanda uma quantidade considerável de energia, o que pode impactar sua viabilidade econômica e ambiental. Para que essa tecnologia seja verdadeiramente vantajosa, é essencial que o saldo energético seja positivo. Em outras palavras, a quantidade de CO₂ adsorvida pelo biocarvão deve superar as emissões de dióxido de carbono associadas à energia consumida durante a sua produção. Considerando a média nacional de 98 gramas de CO₂ emitidos para a geração de 1kWh de energia (EMBER, 2024), espera-se que o processo de fabricação do biocarvão seja eficiente o suficiente para garantir uma redução líquida nas emissões do gás.

Assim, este estudo tem como objetivo analisar e quantificar a energia necessária para as etapas de secagem, carbonização e ativação do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de biocarvão. Além disso, busca determinar a capacidade de adsorção de CO₂ do biocarvão produzido em relação à energia consumida durante sua fabricação, avaliando a eficiência do processo.

Material e Métodos

Produção do carvão e análise da capacidade de adsorção

Para a produção do carvão, inicialmente, é necessário que o bagaço de cana passe por um processo de secagem, para garantir a eficiência do processo e a qualidade do carvão. Assim, o bagaço é seco por 8 horas a 100°C na estufa e armazenado em saco de plástico vedado até a conversão em carvão. É determinado, portanto, o rendimento por meio da razão de massa de bagaço seco por massa de bagaço úmido.

Para a obtenção de carvão ativado, o bagaço passa por duas etapas: a carbonização da biomassa e a ativação do material carbonizado. Na carbonização, a biomassa é submetida à pirólise em temperaturas, normalmente, superiores a 200 °C, removendo componentes voláteis e formando uma estrutura porosa (TEIXEIRA, 2020). A ativação subsequente envolve reações secundárias para obter um produto poroso com elevada área superficial, eliminando componentes que obstruem os poros (CLAUDINO, 2003). Os carvões podem ser ativados por processos físicos, químicos ou por uma combinação dos dois métodos. A ativação física envolve a carbonização do material e a seguinte ativação em altas temperaturas, entre 800 °C e 1.100 °C (RAMOS, 2009).

Dessa forma, o bagaço já seco foi triturado em um moinho de martelo em pedaços de até 1 cm de comprimento e colocado no interior de uma panela de ferro. Argamassa refratária foi passada ao redor da tampa, a fim de melhorar a vedação do sistema e manter uma atmosfera o mais inerte possível (sem oxigênio). Logo após, a panela foi inserida na mufla para o processo de carbonização por 1 hora, a 750°C, seguido da etapa de ativação por 2 horas, a 850°C. Para avaliar o rendimento da conversão do bagaço em carvão (razão entre a massa de carvão e a massa de bagaço seco), foi feita uma análise gravimétrica, com medições das massas de bagaço antes e após o processo, comparando-as com a massa de carvão produzido.

Após essa etapa, foi realizado o teste de adsorção. Para isso, foi utilizado um dispositivo (Figura 1), que continha um manômetro para verificação da pressão (à esquerda) e um tubo para a entrada de dióxido de carbono (à direita), proveniente de um cilindro de CO₂. O tubo foi conectado a uma bomba peristáltica, que foi previamente calibrada. Em seguida, foi feita a análise da capacidade de adsorção, comparando a massa do equipamento antes e depois do processo para verificar quanto de dióxido de carbono tinha sido adsorvido.

Figura 1 – Dispositivo de adsorção de CO₂



Fonte: Autor, 2023

Para aumentar a quantidade total de CO₂ capturada, pode-se estudar sobre a regeneração do carvão ativado. Os processos de regeneração do carvão possibilitam a sua reutilização em um número finito de ciclos de adsorção-regeneração. O objetivo do processo é restaurar a capacidade adsorptiva do carvão sem danificar sua superfície ou causar perda de massa (HUBNER, 2020).

A regeneração do carvão ativado é especialmente relevante para tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS), que utilizam o carvão sem estocá-lo permanentemente após a primeira adsorção. Embora a regeneração seja uma técnica com muitos benefícios, é importante considerar que a capacidade de adsorção tende a diminuir ao longo dos ciclos de regeneração (ROCHA, 2014). Portanto, compreender o padrão de queda na capacidade é crucial para avaliar a viabilidade dessa técnica.

Para isso, o carvão ativado foi preparado conforme descrito anteriormente, passando pelas etapas de secagem, carbonização e ativação. Em seguida, ele foi submetido a três ciclos de adsorção e regeneração para determinar o padrão de queda da capacidade de adsorção. A regeneração foi realizada por meio da dessorção, mantendo o carvão ativado na mufla à 850°C por 1 hora. Após cada ciclo, foi realizado um teste de adsorção para medir a capacidade de captura de CO₂ do carvão.

Determinação da energia gasta na estufa e mufla

Para determinar a energia consumida nos equipamentos, inicialmente, foi necessário determinar a corrente elétrica atuante na estufa e na mufla durante os processos de secagem e carbonização do bagaço de cana-de-açúcar. Para isso, utilizou-se um sensor de corrente SCT-013, associado a um Arduino (Figura 2). O sensor foi acoplado ao fio de alimentação dos dispositivos, com a saída conectada ao Arduino, que leu e registrou os valores de corrente ao longo do tempo (DEMETRAS, 2017).

Figura 2 – Sensor SCT-013 associado ao Arduino



Fonte: Autor, 2023

Com esses dados, utilizando a Equação 1, que relaciona corrente (I), tensão (V) e potência (P), foi calculada a potência em cada instante do processo. Em seguida, a energia consumida (E) foi determinada pela integração da potência ao longo do tempo (t), tendo em mente a Equação 2. Para isso, foi calculada a área sob o gráfico da potência em função do tempo, com o método numérico apresentado pela Equação 3.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

$$E = \int_0^t P(t) dt \quad (2)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \cdot (t_{i+1} - t_1) \quad (3)$$

Para otimizar o processo de secagem e garantir o uso mais eficiente da energia, foi realizada uma análise para identificar o tempo mínimo necessário na estufa, e, conseqüentemente, a energia mínima necessária. Assim, dez amostras de bagaço de cana foram colocadas em placas de Petri e submetidas ao processo de secagem na estufa. A diferença de massa das amostras foi analisada em intervalos de tempo com a balança analítica, assumindo que a única perda de massa se deve à evaporação de água. Esse procedimento permitiu determinar o ponto em que toda a água presente no material orgânico foi removida.

Além do processo de secagem, foi importante considerar a otimização da capacidade de carga nos equipamentos para maximizar a eficiência do processo e minimizar o consumo de energia. Tendo em mente que tanto a estufa quanto a mufla operam com circulação de ar, teoricamente, se os equipamentos fossem carregados ao máximo com bagaço de cana, o processo deveria funcionar da mesma forma. Portanto, determinar a massa máxima que cada equipamento pode conter é essencial para a otimização. Então, o volume interno da estufa e da mufla foi medido para determinar a capacidade volumétrica total de cada equipamento. Ademais, calculou-se a densidade aparente do bagaço in natura (que será processado na estufa) e do bagaço já seco e triturado (que será utilizado na mufla). Para isso, uma amostra de bagaço de cana foi colocada em um béquer graduado para medir seu volume e a massa foi medida posteriormente. Assim, relacionando os resultados, foi possível obter a capacidade mássica total dos aparelhos.

Em seguida, também foi determinada a energia final de cada equipamento (E_f), considerando a energia mínima necessária (E_{\min}) e a capacidade mássica do aparelho (C_M), a partir da Equação 4. Além disso, com a mesma equação, utilizando a energia gasta na dessorção e a capacidade mássica da mufla, foi determinada a energia necessária na regeneração.

$$E_f = \frac{E_{\min}}{C_M} \quad (4)$$

Para que o processo de captura seja verdadeiramente vantajoso, a quantidade de dióxido de carbono adsorvida (C_{ads}) pelo biocarvão deve superar as emissões de CO_2 associadas à energia consumida durante a sua produção. Nesse sentido, o carvão produzido deve adsorver mais do que a média nacional de emissões de 98 gramas de CO_2 por kWh de energia utilizado na fabricação do material. Para realizar esse cálculo, utilizou-se a Equação 5, em que η é o rendimento.

$$C = \frac{\eta_{secagem} \cdot \eta_{carvão} \cdot C_{ads} \cdot \frac{MM_{CO_2}}{1000}}{E_{f,estufa} + (\eta_{secagem} \cdot E_{f,mufla})} \quad (5)$$

No cálculo que leva em conta a regeneração do material, utilizou-se a Equação 6. Nela, os parâmetros "a" e "b" representam os coeficientes da reta obtida a partir do padrão de regeneração do carvão, enquanto "n" corresponde ao número de ciclos de regeneração realizados. A variável " E_{regen} " refere-se à energia total consumida pela mufla durante a etapa de dessorção do carvão.

$$C = \frac{\eta_{secagem} \cdot \eta_{carvão} \cdot \left(\frac{an(n+1)}{2} + bn \right) \cdot \frac{MM_{CO_2}}{1000}}{E_{f,estufa} + (\eta_{secagem} \cdot E_{f,mufla}) + (\eta_{secagem} \cdot \eta_{carvão} \cdot E_{regen} \cdot (n-1))} \quad (6)$$

Resultados e Discussão

A partir do processo de secagem do bagaço de cana, foi obtido o rendimento de massa $\text{bagaço seco} / \text{massa bagaço}$. A média dos valores encontrados foi de 49,25%, segundo a Tabela 1. Este resultado é consistente com as características conhecidas do bagaço de cana, que possui aproximadamente 50% de umidade, 46% de fibras lignocelulósicas, 2% de sólidos solúveis e 2% de impurezas minerais (GRAEBIN, 2014).

Tabela 1 – Rendimento de massa $\text{bagaço seco} / \text{massa bagaço}$

	1º teste	2º teste	3º teste
Massa bagaço úmido (kg)	0,834	0,572	0,633
Massa bagaço seco (kg)	0,401	0,285	0,316
Rendimento (%)	48,01	49,81	49,94

A etapa de carbonização e ativação do bagaço de cana resultou em um rendimento de massa $\text{carvão} / \text{massa bagaço seco}$ de 22,21%, de acordo com a Tabela 2. Esse valor é próximo ao obtido em testes com condições semelhantes, que apresentaram uma conversão de 21,45% (SILVA, 2023). Isso indica que o processo utilizado é consistente e replicável, fornecendo resultados confiáveis.

Tabela 2 – Rendimento de massa $\text{carvão} / \text{massa bagaço seco}$

	1º teste	2º teste
Massa bagaço seco (g)	314,00	421,00
Massa carvão (g)	67,10	97,00
Rendimento (%)	21,37	23,04

Utilizando a vazão de 0,2 mL/s, que foi previamente calibrada com a bomba peristáltica, foi realizado o teste de adsorção de CO_2 com o carvão produzido. A partir dos dados apresentados na Tabela 3, a média de adsorção foi de 2,61 mmol CO_2/g de carvão. Um experimento semelhante, utilizando um carvão produzido da mesma forma, obteve uma adsorvidade máxima de 1,5 mmol CO_2/g de carvão (SILVA, 2023). O aumento observado pode ser atribuído ao uso da vazão de 0,2 mL/s no experimento mais recente, em comparação à vazão de 2 L/min (33 mL/s) utilizada no experimento anterior. A diminuição da vazão permite um maior tempo de contato para que as moléculas de CO_2 sejam adsorvidas, o que provavelmente resultou em uma maior capacidade de adsorção.

Além disso, ao comparar esse valor de adsorção com outros carvões obtidos a partir de matérias orgânicas encontrados na literatura (Tabela 4), observa-se que o valor adquirido está próximo aos demais, demonstrando um desempenho competitivo. No entanto, ainda há espaço para melhorar a capacidade de adsorção deste carvão, explorando possíveis otimizações no processo de produção e ativação.

Tabela 3 – Capacidade de adsorção do carvão

	1º teste	2º teste	3º teste
Massa carvão (g)	10,48	11,51	18,43
Massa CO_2 adsorvido (g)	1,23	1,34	2,05
Adsorção (mmol CO_2/g carvão)	2,667	2,645	2,527

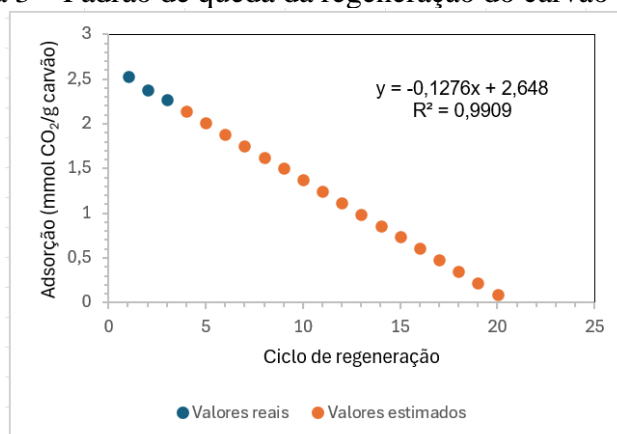
Tabela 4 – Capacidade adsortiva máxima de adsorventes disponíveis na literatura

Matéria-prima	Capacidade de adsorção (mmol.g ⁻¹)	Referência
Casca de amêndoa	2,7	(PLAZA, 2010)
Serragem	3,2	(SEVILLA, 2012)
Bambu	4,5	(CHEN, 2012)
Caule de algodão	2,18	(ZHANG, 2014)
Madeira	1,11	(PLAZA, 2009)
Bagaço de cana	2,65	Este trabalho

No estudo da regeneração do carvão produzido, conforme apresentado na Figura 3, observou-se uma redução relativamente pequena na capacidade de adsorção ao longo dos ciclos de regeneração. Embora essa diminuição seja perceptível, ela não afetou de forma significativa o desempenho do material, indicando que o carvão ainda mantém uma boa eficiência após múltiplos usos. Além disso, obteve-se a equação que descreve a tendência de diminuição da capacidade de adsorção a cada ciclo de regeneração, com coeficiente angular de -0,1276 e coeficiente linear de 2,648.

Com base nesses resultados, foi determinado que o carvão poderia ser reutilizado até 20 vezes, sendo esse o último ciclo antes de a capacidade de adsorção se tornar negativa. Essa capacidade de múltipla regeneração sugere que o carvão possui um bom potencial de reutilização, tornando-o uma opção viável para processos contínuos de captura de CO₂, uma vez que a perda de eficiência é relativamente baixa ao longo dos ciclos.

Figura 3 – Padrão de queda da regeneração do carvão ativado



Usando as Equações 1 e 3, foram calculadas as áreas sob os gráficos da Figura 4, que representam a energia gasta na estufa e na mufla, respectivamente. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5. A análise revelou que a energia média gasta na estufa é 34,7 MJ, enquanto na mufla é 24,5 MJ.

É possível perceber que, em ambos os equipamentos, o resistor é ativado e desativado periodicamente para manter a temperatura média desejada. Em média, os dispositivos mantiveram-se ligados por 60 segundos e, em seguida, desligados por 240 segundos, repetindo esse ciclo de forma contínua. Especificamente na mufla, o resistor permanece ligado constantemente durante as primeiras horas devido à alta temperatura inicial exigida (750°C). Além disso, mesmo mantendo uma temperatura mais baixa, a estufa apresenta um gasto médio de energia maior (34,7 MJ), provavelmente por ser mantida ligada por mais tempo e nunca estar desligada completamente (devido a recirculação do ar). Dessa forma, a análise do tempo mínimo necessário se torna ainda mais relevante.

Figura 4 – Energia estufa (esquerda) e mufla (direita)

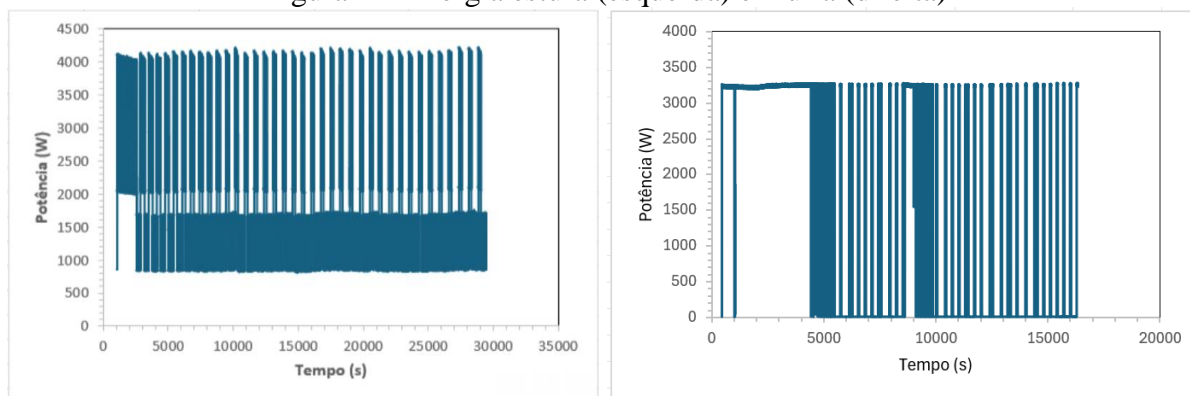


Tabela 5 – Valores de energia calculados para os equipamentos

	1º teste	2º teste
Energia gasta na estufa (MJ)	35,382	34,018
Energia gasta na mufla (MJ)	24,617	24,407

Para a análise do tempo mínimo necessário para a secagem, foram realizadas medições com 10 amostras ao longo de aproximadamente 4 horas. Os dados obtidos estão apresentados na Figura 5. Considerando que o rendimento de massa $\text{bagaço seco} / \text{massa bagaço}$ foi de 49,25%, a umidade representa cerca de 50% do bagaço. Portanto, o momento em que a quantidade de umidade retirada ultrapassa 50% da massa inicial representa o tempo mínimo necessário para a secagem. No experimento, esse tempo foi determinado como 1 hora (3600s).

Observa-se, entretanto, que após esse período, a taxa de remoção de umidade diminui, o que poderia sugerir um tempo mínimo mais longo. No entanto, é importante considerar que o bagaço pode ter adsorvido umidade antes de ser pesado. Durante a pesagem na balança analítica, a quarta casa decimal da massa aumentava constantemente, indicando uma adsorção rápida e praticamente instantânea de umidade. Dado que as amostras tinham massas reduzidas, até mesmo pequenas variações na massa poderiam impactar significativamente o resultado.

Com o tempo de secagem estabelecido como 1 hora, foi possível calcular a energia mínima necessária na estufa utilizando a Equação 3. Os valores calculados estão apresentados na Tabela 6, com uma média de 5,7 MJ.

Figura 5 – Tempo mínimo necessário na secagem

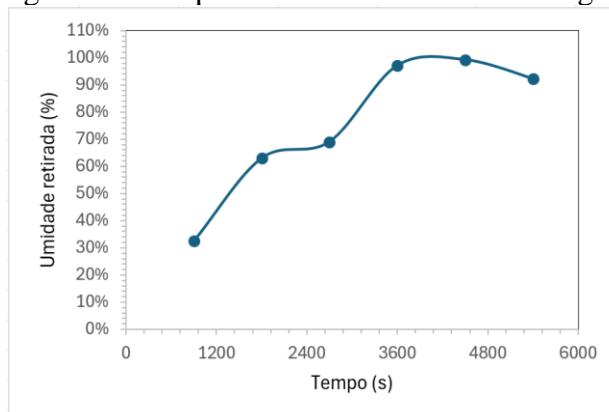


Tabela 6 – Energia mínima necessária calculada para a estufa

	1º teste	2º teste
Energia gasta na estufa em 1 hora (MJ)	5,873	5,585

Para determinar a massa máxima que a estufa e a mufla poderiam conter, foi calculada a densidade aparente do bagaço de cana. A Tabela 7 apresenta os resultados da densidade aparente do bagaço de cana in natura, que será utilizado na estufa, e do bagaço de cana já seco e triturado, que será processado na mufla. Com base nesses valores e nos volumes dos equipamentos, calculou-se a capacidade mássica total de ambos os aparelhos. Em seguida, foi determinada, com a Equação 4, a razão da energia gasta pela massa de bagaço nos equipamentos durante o processo de fabricação do carvão, conforme mostrado na Tabela 8. Esses valores permitiram calcular a energia final total gasta nos aparelhos em relação ao CO₂ adsorvido.

Além disso, a energia consumida durante o processo de regeneração utilizando a mufla foi calculada. Inicialmente, determinou-se o valor de 16,5 MJ, representando a energia associada a cada ciclo de regeneração. Posteriormente, considerando a capacidade mássica da mufla, foi calculado o valor de 7,704 kJ/g, correspondente à energia mínima necessária para essa etapa.

Tabela 7 – Resultado da densidade aparente

Bagaço in natura (g.cm ⁻³)	Bagaço seco e triturado (g.cm ⁻³)
0,11329	0,11616

Tabela 8 – Cálculo da capacidade mássica dos equipamentos

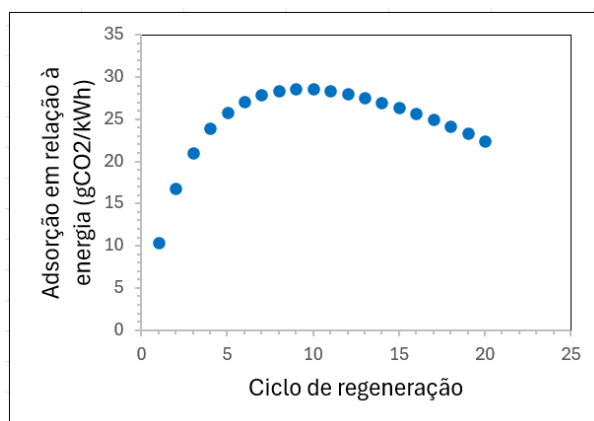
	Estufa	Mufla
Volume (cm ³)	84875,00	28600,00
Capacidade (g)	9615,92	3322,18
Energia final (kJ.g ⁻¹)	0,5958	7,3784

Finalmente, foi possível calcular a capacidade de adsorção do carvão produzido em relação à energia consumida durante a sua produção. Utilizando a Equação 5, obteve-se uma adsorção de 10,69 g CO₂/kWh, o que representa um valor mais de 800% menor do que a emissão brasileira de 98 g CO₂/kWh. Esse resultado indica que, nesse momento, o processo consome mais energia (e conseqüentemente, emite mais CO₂) do que o carvão de bagaço de cana é capaz de adsorver. Dessa forma, a tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCU) não seria a mais indicada para esse tipo de carvão.

Para viabilizar essa tecnologia, seria necessário otimizar ainda mais o processo. Uma possibilidade seria estudar a secagem do bagaço utilizando um concentrador solar, o que eliminaria a energia gasta na estufa. Além disso, aumentar a capacidade de adsorção do carvão seria crucial, por exemplo, trocando a ativação física pela química. Utilizando a ferramenta “Atingir meta” do Excel, verificou-se que, com uma adsorção de 23,92 mmol CO₂/g de carvão, o resultado igualaria as emissões.

Contudo, considerando a tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), em que seria possível reutilizar o mesmo carvão, a regeneração do material demonstra um potencial significativo para melhorar a eficiência do processo. Isso é evidenciado na Figura 6, que mostra a variação da capacidade de adsorção em relação à energia ao longo dos ciclos de regeneração. Observa-se que o ponto máximo ocorre no 9º ciclo, com uma capacidade de 28,57 g CO₂/kWh. Embora esse valor ainda seja inferior à emissão média brasileira, ele é mais de 100% superior ao valor obtido sem a regeneração. Além disso, a partir desse ponto, há uma queda nos valores de capacidade, indicando que, após o 9º ciclo, a regeneração se torna menos vantajosa em função da energia consumida nos ciclos subsequentes. Por fim, projetando o mesmo padrão de redução da regeneração ao longo dos ciclos, estima-se que o valor de captura equivalente à média brasileira de 98 g CO₂/kWh poderia ser alcançado após 17 ciclos, considerando uma capacidade inicial de adsorção de 7 mmol CO₂/g de carvão, o que torna essa tecnologia mais viável para aplicação prática.

Figura 6 – Capacidade de adsorção em relação à energia



Conclusões

Este estudo investigou a secagem, carbonização e ativação do bagaço de cana-de-açúcar para produzir biocarvão com o objetivo de capturar CO₂. Foram medidas as energias consumidas na estufa e na mufla, com médias de 35 MJ e 24 MJ, respectivamente. O tempo mínimo para secagem do bagaço foi identificado como 1 hora, consumindo 5,6 MJ na estufa. Além disso, as densidades aparentes do bagaço in natura e seco foram determinadas para calcular a capacidade mássica dos equipamentos e otimizar o processo. A capacidade de adsorção do biocarvão produzido foi de 10,69 g CO₂/kWh, bem abaixo das emissões de 98 g CO₂/kWh relacionadas ao consumo de energia no Brasil. Isso indica que o processo atual consome mais energia do que o biocarvão é capaz de adsorver, destacando a necessidade de otimizações para tornar o processo mais eficiente. A regeneração do carvão foi destacada como uma estratégia promissora para aumentar a eficiência do processo, permitindo a reutilização do material e potencialmente multiplicando a capacidade de adsorção.

Em suma, esse estudo demonstra que, embora o biocarvão de bagaço de cana-de-açúcar seja promissor para a captura de CO₂, são necessárias otimizações nos processos de secagem, carbonização e regeneração para melhorar a eficiência energética e a capacidade de adsorção. Futuras pesquisas devem focar na utilização de energias renováveis, como concentradores solares, e no desenvolvimento de métodos para aumentar a capacidade de adsorção do biocarvão, garantindo que a tecnologia de captura e armazenamento de carbono se torne uma solução viável e sustentável.

Referências Bibliográficas

CHEN, Z.; WEI, H. (2012). Granular Bamboo-Derived Activated Carbon for High CO₂ Adsorption: The Dominant Role of Narrow Micropores. ChemSusChem

CLAUDINO, A. (2003). Preparação de Carvão Ativado a partir de Turfa e sua utilização na Remoção de Poluentes. Repositório UFSC.

CONAB. (2023). Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/]

DEMETRAS, E. (2017). SCT-013 – Sensor de Corrente Alternada com Arduino. Fonte: Vida de Silício: [https://portal.vidadesilicio.com.br/sct-013-sensor-de-corrente-alternada/]

- ELLO, A. S.; JARONIEC, M.; TROKOUREY, A. (2013). Coconut shell-based microporous carbons for CO₂ capture. *Microporous and Mesoporous Materials*.
- EMBER. (2024). Energy Institute. Fonte: Statistical Review of World Energy: [<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?time=latest>]
- GRAEBIN, G. O. (2014). Secagem do bagaço de cana-de-açúcar e estudo da sua aplicação na remoção de metal pesado.
- HUBNER, J. (2020). Avaliação experimental da habilidade do carvão ativado em adsorver cafeína múltiplas vezes.
- HUSSIN, F.; YUSOFF, R. (2021). Adsorption of CO₂ on palm shell based activated carbon modified by deep eutectic solvent: Breakthrough adsorption study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- KAUR, B.; BHUNIA, H. (2019). Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO₂ capture: Breakthrough adsorption study. *Microporous and Mesoporous Materials*.
- NATIONAL GRID. What is Carbon Capture and Storage? Available in: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-ccs-how-does-it-work>
- PLAZA, M. G.; GARCIA, S. (2010). Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: Comparison of different regeneration strategies. *Chemical Engineering Journal*.
- PLAZA, M. G.; PREVIDA, C. (2009). Development of lowcost biomass-based adsorbents for postcombustion CO₂ capture.
- RAMOS, P. H.; GUERREIRO, M. C.; GONÇALVES, M. Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do defeito preto, verde, ardido (PVA) do café. Universidade Federal de Lavras
- ROCHA, P. D. (2014). Avaliação comparativa de tratamentos termo-químicos visando a produção de adsorvente a partir de resíduos agroindustriais para remoção de fenol em soluções aquosas.
- SEVILLA, M.; FUERTES, A. B. (2012). CO₂ adsorption by activated templated carbons. *Journal of Colloid and Interface Science*.
- SILVA, M. J. (2023). Carbon dioxide storage using biochar adsorbent.
- TEIXEIRA, J. d. (2020). Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde. Lume UFRGS.
- ZHANG, X.; ZHANG, S. (2014). Nitrogen enriched biochar modified by high temperature CO₂-ammonia treatment: Characterization and adsorption of CO₂.