

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**Estudo exploratório do processo de biossecagem
aplicado ao controle de umidade da biomassa de
cana de açúcar**

Marina de Brito Pimenta

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

São Carlos – SP
2025

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia ____

de _____

de _____

perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia
Universidade Federal de São Carlos, SP, Brasil

Convidado: Profa . Dra. Thalyne de Almeida Ferreira Rocha
Universidade Fderal de São Carlos, SP, Brasil

Professor da Disciplina: Prod. Dr. Luís Augusto Martins Ruotolo
Universidade Federal de São Carlos, SP, Brasil

AGRADECIMENTOS

Quando cheguei à universidade, há cinco anos, não imaginava que seria tão feliz, grata e acolhida.

Primeiramente, quero agradecer aos meus pais Mariângela e Adinaldo, que nunca mediram esforços para que eu pudesse viver meus sonhos. Obrigada por serem sinônimo de amor, dedicação e acolhimento. Sem vocês, nada disso seria possível.

Agradeço à minha irmã Mariana, que sempre foi exemplo de força e coragem, me inspirando a ser como ela. Minha gratidão também à minha avó Clarice e toda minha família por sempre me apoiarem e incentivarem com muito amor. Estendo meus agradecimentos aos meus avós, Dalci, Antônio e Orlando, que partiram durante minha formação, mas que sempre sonharam e torceram para que este momento se realizasse.

Aos meus amigos de turma, meu muito obrigado. Cada um de vocês tornaram essa jornada mais leve, foram “casa” quando a minha estava tão longe, compartilhando conhecimentos, risadas e apoio.

Agradeço imensamente a todos os professores do DEQ/UFSCar, que foram fundamentais na minha jornada acadêmica. Em especial meu orientador, professor Gustavo, sua dedicação, paciência e amizade foram essenciais, não apenas no desenvolvimento deste trabalho, mas na minha formação como engenheira química.

Agradeço ainda ao Centro de Secagem, pela estrutura e oportunidade de desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

No Brasil, cada tonelada de cana-de-açúcar moída nas unidades sucroalcooleiras gera aproximadamente 250 quilogramas de biomassa na forma de bagaço de cana, o que resulta em uma faixa de produção anual de 5 a 12 milhões de toneladas desse resíduo. Visando sua valorização, o bagaço de cana de açúcar pode ser empregado como fonte de energia através de processos de combustão e pirólise. Para tanto, a biomassa de cana de açúcar precisa ser submetida a um processo de controle de umidade a fim de proporcionar as melhores condições de operação durante a combustão. Considerando o alto custo dos processos convencionais de secagem, uma alternativa consiste no emprego de uma fonte biológica de calor para a remoção da água do sistema. Nesse processo, conhecido como biossecagem, os microrganismos presentes na biomassa geram calor devido à sua atividade metabólica, podendo atingir temperaturas de até 70 °C. Entretanto, o número de pesquisas é escasso e há uma grande demanda de estudos científicos que permitam um melhor desenvolvimento desse processo para o emprego na secagem de resíduos sólidos orgânicos em escala industrial. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo o estudo exploratório do processo de biossecagem aplicado ao controle de umidade da biomassa de cana de açúcar adotando os microrganismos nativos do próprio resíduo. Serão investigados o perfil térmico do sistema e a perda de umidade ao longo do tempo a fim de fomentar possíveis caminhos para a elaboração de estratégias de intensificação para este processo em particular. Foram conduzidos três ensaios, adotando uma configuração de leito fixo, com variações no tempo de operação, regime de aeração, umidificação inicial da biomassa e práticas de homogeneização do leito. Os resultados demonstram que, nos dois primeiros ensaios, de curta duração, não houve elevação significativa da temperatura e a perda de massa foi discreta, indicando atividade microbiológica limitada. No terceiro ensaio, com duração de 30 dias, aplicação de aeração contínua e homogeneização periódica, apresentou melhora no desempenho térmico e maior redução de massa, ainda que os valores de temperatura não tenham atingido níveis característicos de biossecagem eficiente (acima de 40°C). A perda de massa total foi de 1,7 quilogramas, indicando perda parcial de umidade e alguma atividade microbiológica. Os resultados obtidos indicam que o método é promissor e as condições operacionais precisam ser otimizadas.

Palavras- chave: Bagaço de cana de açúcar; biossecagem; controle de umidade

ABSTRACT

In Brazil, each metric ton of sugarcane processed in sugar and ethanol mills generates approximately 250 kilograms of biomass in the form of sugarcane bagasse, resulting in an annual production ranging from 5 to 12 million metric tons of this residue. Sugarcane bagasse can be used as an energy source through combustion process. However, sugarcane biomass must be subjected to a moisture control process in order to optimize operation conditions during the combustion. Conventional drying processes are highly costly, so an alternative involves the use of biological heat generated by microbial activity to remove water from the system. This process, known as biodrying, relies on the metabolic activity of microorganisms present in the biomass, which can generate temperatures of up to 70 °C. Nevertheless, studies on biodrying remains limited and there is a significant demand for scientific studies that optimize the development of this process for industrial scale drying of organic solid waste. Therefore, the objective of this study is to present an exploratory investigation of the biodrying process applied to moisture control in sugarcane biomass, utilizing native microorganisms from the biomass. The thermal profile of the system and the mass loss over time were monitored to support the development of process intensification strategies. Three experiments were conducted, adopting a fixed bed configuration, with variations in operating time, aeration regime, initial biomass humidification and turning processes. The results demonstrate that, in the first two short-term experiments, there was no significant increase in temperature and mass loss was minimal, indicating limited microbiological activity. In contrast, the third experiment, which lasted 30 days, employed continuous aeration and periodic turning, resulting in improved thermal performance and a greater mass reduction. However, the temperature values did not reach characteristics of efficient biodrying (above 40°C). The total mass loss was 1,7 kilograms, indicating partial moisture removal and some microbiological activity. The results indicate that the method is promising but the operational conditions require optimization.

Keywords: Sugarcane bagasse; biodrying; moisture control

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Biossecagem	3
2.2	Estado da arte da biossecagem de resíduos orgânicos	6
2.3	Características do Bagaço de Cana-de-Açúcar	14
2.4	Composição físico-química	15
2.5	Comportamento microbiológico	16
2.6	Pesquisas Relacionadas à Biossecagem de Bagaço de Cana	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1	Aquisição de Biomassa de cana de açúcar.....	22
3.2	Descrição do aparato experimental.....	22
3.3	Análise do teor de umidade preliminar	24
3.4	Ensaio de biossecagem.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1	Comportamento térmico	27
4.2	Variação da massa ao longo do tempo.....	30
4.3	Comparação com dados da literatura.....	34
4.4	Natureza do material usado nos estudos	35
4.5	Avaliação do uso do bagaço de cana como agente de <i>bulking</i>	36
5	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Perfil térmico das quatro fases da biossecagem.....	4
Figura 2- Fluxograma simplificado de produtos, subprodutos e resíduos da indústria de cana-de-açúcar.....	14
Figura 3- Gráfico da temperatura e teor de umidade do material em função do tempo.....	20
Figura 4 - Resultados de porcentagem dos gases, temperatura e teor de umidade ao longo do experimento	21
Figura 5 - (a) corpo do biossecador; (b) placas separadoras.	23
Figura 6 - (a) rotâmetro Indflow, (b) suporte para aquisição de massa, (c) software SuperSys Drying para aquisição de dados de temperatura, pressão e massa.	23
Figura 7 - Perfis de temperatura durante os ensaios de biossecagem: (a) Ensaio 1 – duração de 3 dias, com pulso inicial de aeração; (b) Ensaio 2 – duração de 6 dias, com pulsos periódicos de aeração; (c) Ensaio 3 – duração de 30 dias, com aeração contínua.	28
Figura 8 - Perda de massa durante os ensaios de biossecagem: (a) Ensaio 1 – duração de 3 dias, com pulso inicial de aeração; (b) Ensaio 2 – duração de 6 dias, com pulsos periódicos de aeração; (c) Ensaio 3 – duração de 30 dias, com aeração contínua.	31
Figura 9 - Gráfico do teor de umidade do bagaço de cana em função do tempo.	35
Figura 10 - Redução de umidade ao longo de sete dias.....	37
Figura 11 - Comportamento da temperatura durante o experimento.....	38

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O Brasil é, atualmente, o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Na safra de 2023/24, apresentou um desempenho histórico, consolidando-se como a maior série registrada pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). No quarto boletim de levantamento da safra, foram colhidas 713,2 milhões de toneladas da matéria-prima, representando um crescimento de 16,8% em relação à safra anterior. Com relação aos derivados desta produção, a produção de açúcar alcançou 45,68 milhões de toneladas, enquanto a de etanol totalizou 35,61 bilhões de litros, sendo 29,69 bilhões oriundos da cana-de-açúcar (CONAB, 2024).

Este fato, associado ao crescimento de toda a cadeia de produção da cana, gera, paralelamente, um aumento na produção de resíduos nesse setor da indústria e impulsiona investimentos em estudos para uma melhor utilização dos subprodutos gerados no campo de produção ou na industrialização da cana (Gurgel et al., 2024).

Dentre os subprodutos da indústria sucroalcooleira, o bagaço de cana de açúcar se destaca como o maior e mais importante, tanto em volume de produção quanto em relevância devido à sua composição rica em material fibroso. Após a moagem da cana o bagaço é destinado a diferentes finalidades podendo ser utilizado na produção de bioeletricidade, como adubo orgânico incorporado ao solo, e até mesmo como suplementação alimentar para animais ruminantes. Além disso, também serve como matéria-prima para outras indústrias, como, por exemplo, a de celulose de papel. No entanto, de modo geral, quase todo bagaço gerado na agroindústria é utilizado como fonte de energia nas usinas de açúcar. As próprias usinas utilizam entre 60% e 90% desse bagaço como fonte de energia, substituindo combustíveis fósseis no aquecimento das caldeiras e na geração de energia elétrica (ALCARDE et al., 2009; FURTADO et al., 2009).

Apesar do bagaço de cana apresentar um papel muito importante como fonte de energia, ele é destinado às caldeiras com alto teor de umidade, o que compromete a eficiência no processo de cogeração. Da mesma forma, a umidade representa um desafio significativo para o armazenamento do material, visto que, quando armazenado, o açúcar residual aliado ao teor de umidade e à ação microbiana estimula uma fermentação exotérmica, ocasionando sua decomposição, deteriorando-o e muitas vezes, provocando uma combustão espontânea não desejável. Considerando seu uso energético, torna-se necessária a realização de uma

etapa de pré-secagem, a fim de reduzir a umidade presente na biomassa (CORTEZ, 1992; SANTOS, 2020).

Os processos convencionais de secagem demandam elevado consumo energético e são significativamente onerosos, o que compromete o valor agregado do resíduo. Diante desse cenário, surge a necessidade de métodos de secagem mais sustentáveis e energeticamente eficientes. Nesse contexto, destaca-se a biossecagem como uma alternativa promissora, uma vez que utiliza o calor gerado pela atividade metabólica dos microrganismos presente nos resíduos orgânicos para a remoção de água, podendo atingir até 70 °C, sem a necessidade de uma fonte externa de calor (MAIA et al., 2023).

Dessa forma, o presente trabalho tem como proposta o estudo exploratório da potencialidade do emprego de um processo de biossecagem visando a redução de umidade da biomassa de cana de açúcar, utilizando os microrganismos nativos do próprio resíduo. Para isso, será adotada uma configuração de leito fixo exposto uma vazão de ar constante, com o propósito de investigar o comportamento térmico do sistema e a perda de umidade ao longo do tempo. Espera-se assim, fomentar possíveis caminhos para a elaboração de estratégias de intensificação para este processo em particular.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biossecagem

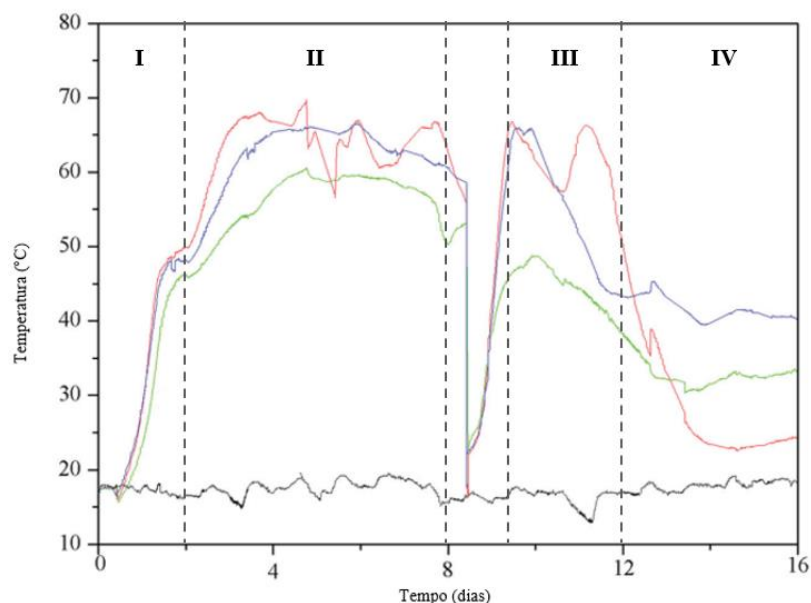
Estudos apontam que o termo biossecagem foi originalmente utilizado por Jewell et al. (1984), em um estudo que abordava os parâmetros operacionais para a secagem de esterco bovino (CHOI et al., 2001). A biossecagem caracteriza-se como uma tecnologia que utiliza a bioenergia de resíduos orgânicos para remover a umidade e melhorar o valor agregado e a tratabilidade dos resíduos, além de beneficiar etapas de armazenamento e transporte, devido à redução volumétrica e à estabilização biológica que ocorre durante o processo. Nessa metodologia, o próprio resíduo se seca utilizando sua energia química inerente (ZHAO et al., 2010). O desenvolvimento da biossecagem está associado à busca por alternativas sustentáveis de gestão de resíduos, especialmente em áreas urbanas.

O biorreator responsável pelo processo de biossecagem consiste em uma combinação de engenharia física e processos bioquímicos. No lado físico, a remoção da umidade convectiva é conseguida através de aeração controlada para secar os resíduos. Já no que diz respeito ao processo bioquímico, ocorre a degradação aeróbica da matéria orgânica de fácil decomposição, gerando calor por meio da atividade microbiana. Essa técnica utiliza a atividade aeróbia de microrganismos para gerar calor, promovendo a evaporação da água presente na matriz residual. A secagem ocorre por meio da evaporação convectiva, sendo o ar forçado responsável pelo transporte do vapor para fora do reator (VELIS et al., 2009).

De maneira geral, o teor de umidade do material orgânico é reduzido através de dois passos. Primeiramente, as moléculas de água evaporam da superfície dos resíduos para o ar circundante e, então, a água evaporada é transportada através da matriz pelo fluxo de ar e removida com as emissões gasosas de escape. O processo depende da aeração forçada ou natural e do calor gerado pela degradação exergônica da matéria orgânica, podendo elevar a temperatura dos resíduos entre 45 °C e 65 °C, o que permite alcançar teores de umidade abaixo de 20% em base úmida (VELIS et al., 2009).

Segundo Felicio et al. (2019), o processo de biossecagem é composto por quatro fases principais: a fase inicial de aumento de temperatura, a fase termofílica (com temperaturas superiores a 45°C), uma segunda fase de elevação térmica e, por fim, a fase de resfriamento. A Figura 1 ilustra um gráfico representativo dessas quatro etapas do processo.

Figura 1- Perfil térmico das quatro fases da biossecagem.



Fonte: Adaptado de Shao et al (2012).

A degradação da matéria orgânica é conduzida por comunidades microbianas compostas principalmente por bactérias mesófilas e termófilas, além de fungos e actinobactérias. Esses microrganismos promovem a liberação de calor durante processos aeróbios (VELIS et al., 2009). No entanto, a eficiência desse processo biológico é interligada a alguns fatores críticos. A disponibilidade de umidade na biomassa, por exemplo, é fundamental para a manutenção da atividade microbiana, uma vez que baixos teores podem limitar o metabolismo, enquanto excesso de umidade dificulta a transferência de oxigênio e pode prejudicar o processo. Além disso, características físicas do leito, como porosidade, permeabilidade, exercem influência direta na biossecagem. Paralelamente, parâmetros operacionais, como a taxa de fluxo de ar, o tempo de operação e o modo de aplicação da aeração, também são determinantes, pois garantem a reposição de oxigênio, a remoção de vapor de água e a manutenção de temperaturas adequadas para o desenvolvimento das populações microbianas. Somam-se ainda a esses aspectos a disponibilidade de nutrientes e a concentração inicial de microrganismos presentes no material (VELIS et al., 2009; HE et al., 2013).

Considerando esses fatores que influenciam diretamente a atividade microbiana e, conseqüentemente, a eficiência da biossecagem, torna-se relevante avaliar também os efeitos do processo sobre o valor energético da biomassa. Embora parte da matéria orgânica mais

facilmente degradável seja perdida durante a atividade aeróbia na qual o carbono na biomassa é consumido pelos microrganismos para a produção de energia, com liberação de CO₂, diversos estudos comprovam que esse fenômeno não compromete o desempenho energético final da biomassa, demonstrando que o efeito da biossecagem é positivo em termos energéticos (HAO et al., 2017; WRINKLER et al., 2013).

Em estudos com lodos de esgoto submetidos a biossecagem, mesmo com perdas de até 23% de materiais voláteis, observou-se um aumento de aproximadamente 38 % no poder calorífico do produto seco e, além disso, a combustão subsequente desse material gerou menor produção de poluentes nitrogenados em comparação ao lodo seco por meio de secadores convencionais. O poder calorífico inferior final do produto biodessacado foi superior a 5.355,86 kJ/kg, valor considerado suficiente para a combustão autossustentável (HAO et al., 2017). Esses resultados evidenciam que, apesar da perda parcial da matéria orgânica, a remoção de água compensa esse *déficit*, elevando a eficiência energética da biomassa e reforça sua viabilidade como fonte energética.

Há uma notável semelhança entre os processos de biossecagem e compostagem e pode ser de grande utilidade diferenciá-los para efeito de desambiguação. Enquanto a compostagem visa a máxima conversão da matéria orgânica pelos microrganismos e, como consequência, mais dias de operação, a biossecagem representa uma etapa intermediária onde parte da matéria orgânica é consumida, mas preserva-se grande parte da composição original do resíduo, tornando possível o seu aproveitamento e mesmo a extração de compostos de interesse. Dessa forma, o produto final contém alto valor energético e pode ser utilizado como biocombustível, produção e extração de compostos secundários de alto valor agregado, produção de combustíveis de segunda geração e até mesmo produção de biochar (WINKLER et al, 2013; TAMBONE et al., 2011; VILLEGAS, 2015).

Ademais, a biossecagem continua sendo uma tecnologia relativamente nova e promissora e muitos autores se empenham na desvendá-la para sua utilização em diversos materiais. Dessa forma, a dinâmica dos biossecadores, bem como sobre os fundamentos físico-químicos e biológicos e a aplicação do processo precisam ser aprimorados. Entretanto, o processo de biossecagem oferece vantagens significativas como: os resíduos são reduzidos e reciclados, tornando esta tecnologia não apenas renovável, mas também sustentável; redução do uso de aterros; diminuição da emissão de fuligem e CO₂ e, ainda, melhor aproveitamento energético, visto que, o material seco tem maior valor calorífico.

Sendo assim, mais pesquisas sobre essa tecnologia são importantes, a fim de obter mais conhecimento e, conseqüentemente, melhorar nossa compreensão desse conceito tecnológico.

2.2 Estado da arte da biossecagem de resíduos orgânicos

O processo de biossecagem tem sido aplicado com sucesso para diferentes tipos de resíduos, nem todos industriais, o que demonstra o interesse por esse tipo de processo em particular e revela a necessidade de estudos mais consistentes nas etapas de desenvolvimento, controle e padronização deste tipo de operação.

Diversos tipos de resíduos foram investigados na literatura, principalmente no contexto europeu, com destaque para os resíduos sólidos urbanos, lodos industriais e resíduos agroindustriais de alta umidade. A escolha do resíduo a ser submetido ao processo de biossecagem influencia diretamente na eficiência da tecnologia, no tempo de residência necessário, temperatura máxima que o processo vai atingir, necessidade de aeração, necessidade de agentes potencializadores na estabilidade do produto, no potencial para valorização energética, entre outros.

O resíduo sólido urbano, por exemplo, é caracterizado por sua elevada heterogeneidade e teores de umidade entre 35 e 55%, sendo necessário um pré-tratamento mecânico para trituração e homogeneização, a fim de viabilizar sua aplicação na produção de combustível sólido recuperado (VELIS et al., 2009).

Já os resíduos industriais, como o lodo de efluentes, apresentam teor de umidade ainda mais elevado (até 80%) e origem mista, o que dificulta a padronização dos processos de secagem e exige frequentemente a adição de materiais estruturais, como madeira, para melhorar a eficiência do processo (FREI et al., 2004; FELICIO et al., 2019).

No âmbito dos resíduos agrícolas, o esterco bovino também se destaca por sua elevada umidade (cerca de 88%) e textura pastosa, características que impõem desafios à biossecagem e demandam mistura com outros materiais para viabilizar seu uso, sendo sua principal aplicação como fertilizante de liberação controlada e agente de mitigação de odores (WRIGHT, 2000).

Frei et al. (2004) estudaram um processo de biossecagem, cujo objetivo era aumentar o poder calorífico de lodo de efluentes de papel e celulose para combustão eficiente em fornos de resíduos de madeira. Para isso, deve-se secar o lodo da fábrica de papel e celulose a níveis que possam ser queimados de forma econômica e eficiente em caldeiras de resíduos de madeira, ou seja, acima de aproximadamente 40% de secura, e idealmente mais perto de

50% de secura. O método utilizado por eles foi a aeração forçada em que se aumentaram as taxas de secagem pela atividade metabólica exotérmica de microrganismos termofílicos aeróbicos. Os autores realizaram três experimentos com proporção de massa de lodo/resíduo de madeira de 1:0,5; 1:1 e 1:0,25, sendo o experimento mais eficiente o com proporção de 1:0,5 e com duração de 13 dias, que resultou em taxas de secagem ideais, proporcionando condições pneumáticas favoráveis e resultando na remoção mais eficaz de umidade, o teor de sólidos secos do lodo subiu de 30,5% para 41,6% e a temperatura da matriz subiu até 65 °C, por fim, a perda total de carbono foi estimada entre 5% e 18%.

González et al. (2019) realizaram um estudo da tecnologia de biossecagem de lodo de esgoto em escala de bancada, com o objetivo de avaliar seu desempenho e fornecer uma visão sobre os diferentes padrões de emissão gasosa encontrados para gases de efeito estufa e poluentes. Segundo os autores, as principais vantagens que podem ser destacadas da biossecagem de lodo de esgoto sobre a compostagem são que a biossecagem é um tratamento biológico mais rápido e que requer menos espaço para tratar o mesmo fluxo de material, gerando recuperação de energia com menores emissões gasosas. Dessa forma, os resultados obtidos a partir do trabalho indicaram um bom desempenho do processo de biossecagem e as emissões correspondentes de gases de efeito estufa e odorantes foram contabilizadas como inferiores às relacionadas para a compostagem convencional.

Wright (2000) realiza, em seus estudos, a biossecagem de estrume em fazendas de gado leiteiro, a fim de controlar os odores e contaminantes de suas operações. Esse processo ocorre de forma que se utiliza ar forçado para secar camadas de cerca de 2 metros de estrume em 21 dias. Então, utiliza-se este composto reciclado ou uma mistura de composto e serragem, ou outro aditivo, com 40% de matéria seca, espalhando no confinamento das vacas com cerca de 8 centímetros de espessura para absorver um dia de produção de 12% de esterco em massa seca. Sendo assim, conforme descrito pelo autor, este processo poderia potencialmente secar todo o estrume produzido com pouca alteração adicional necessária. O composto seria reduzido à metade em volume e um sexto em peso do estrume original devido à perda de água e conversão de sólidos em gases.

Ao se tratar de resíduos sólidos urbanos, Adani et al. (2002) estudou sobre a influência da temperatura da biomassa na biossecagem desse material realizados em três ensaios com três diferentes temperaturas da biomassa, obtidas pelo controle da vazão de ar, sendo elas, 70°C; 60°C e 45°C. Os resultados analisados pelos autores, comprovaram que, a rápida biossecagem determina baixa estabilidade biológica e vice-versa, representados,

efetivamente, nos ensaios para temperaturas de 70°C e 45°C. Dessa forma, o ensaio com temperatura de 60°C mostrou melhores resultados entre o baixo teor de umidade, alto teor de energia e boa estabilidade biológica de modo que, o produto poderia ser utilizado imediatamente para combustível ou armazenado com mínimo impacto poluente (odores, lixiviações e produção de biogás).

Melayib Bilgin & Şevket Tulun (2015) concentraram-se em estudar a redução de volume e peso durante o processo de biossecagem usando resíduos sólidos urbanos. Os materiais foram colocados em um biossecador e repetidos várias vezes entre as temperaturas de 30°C e 50°C. Os resultados apresentados pelos autores indicaram que, após 13 dias de processo, a biossecagem reduziu o conteúdo volumétrico de resíduos em 32% e atingiu cerca de 50% de redução de peso na massa original e o produto apresentou alto poder calorífico, equivalente a 4680 kcal/kg, o que indica, benefícios econômicos e ambientais.

Negoi et al. (2009) pesquisaram sobre a biossecagem de resíduos sólidos romenos, a fim de apresentar um método de pré-tratamento de resíduos urbanos antes da recuperação de energia por processos térmicos ou termoquímicos seguido de um armazenamento controlado do resíduo. Realizaram o estudo de três casos, e concluíram que a taxa de biodegradação tem fração de 50% e o poder calorífico na combustão completa em torno de 8.000 kJ/kg. Dessa forma, os autores pontuam que o processo de implementação de uma instalação de biosecagem na Romênia poderia ajudar a alcançar os objetivos da União Europeia em relação aos resíduos biodegradáveis depositados em aterro, uma vez que 95% dos resíduos são aterrados.

Em contraste com esses materiais, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta características particulares. Após a extração do caldo feito nas indústrias, o bagaço possui um teor de umidade moderado (40 a 55%) e alta porosidade, o que, de acordo com os estudos de Contreras-Cisneros et al. (2021), favorece a convecção de ar e a transferência de calor no processo de biossecagem. Ademais, o bagaço é rico em celulose e hemicelulose, com elevada tolerância térmica, tornando-se ideal para aplicações energéticas, podendo se destacar em relação a outros resíduos tradicionalmente estudados.

A Tabela 1 relata os principais resultados dos estudos sobre de biossecagem empregando diferentes biomassas. As informações estão compiladas em quadro de síntese contendo os principais parâmetros observados nos experimentos dos artigos consultados. De maneira geral, a aplicação da metodologia representa uma solução tecnicamente viável e

ambientalmente mais adequada em comparação aos métodos tradicionais de secagem de biomassa.

Tabela 1- Principais trabalhos envolvendo a biossecagem de resíduos orgânicos.

Resíduo Estudado	Autor	Resumo	Condições de Operação	Tempo de Operação	Principais Parâmetros Observados
Resíduos sólidos urbanos	Adani et al., 2001	Estudo sobre a biossecagem de RSU para reduzir a umidade e aumentar o poder calorífico.	Pilhas aeradas mecanicamente; temperatura ambiente; umidade inicial 50-60%.	10 dias	Umidade, temperatura, emissão de CO ₂ .
Resíduos sólidos urbanos	Adani et al., 2002	Estudo para obter dados sobre a influência da temperatura da biomassa na biossecagem de resíduos sólidos urbanos	Pilhas estáticas aeradas; monitoramento de temperatura e umidade.	21 dias	Redução de umidade, estabilidade biológica.
Lodo de esgoto e RSU	Adani et al., 2004	Biossecagem combinada para otimização energética.	Mistura controlada; pilhas com aeração forçada.	21 dias	Teor de sólidos voláteis, redução de massa.
Lodo de esgoto	Cai et al., 2012	Observou-se a variação da umidade do resíduo durante a biossecagem. A umidade do material reduziu de 66% para 54% com o controle do processo.	Pilhas em reator laboratorial; temperatura e aeração controladas.	20 dias	Taxa de remoção de água, calor gerado.
Lodo de esgoto	Cai et al., 2016	Investigar as variações das comunidades bacterianas e as relações entre comunidades bacterianas, evaporação de água, geração de água e degradação da matéria orgânica durante a biossecagem de lodo de esgoto. Análise de diferentes intensidades de aeração durante a biossecagem.	Reator de laboratório com controle de aeração.	20 dias	Eficiência de remoção de umidade, consumo energético e a variação das comunidades bacterianas
Lodo de esgoto	Gonzales et al., 2019	Investigar o desempenho do processo e, principalmente, as emissões gasosas geradas, tanto de gases de efeito estufa, quanto de poluentes odoríferos.	Biossecador com controle de aeração contínuo.	13 dias	Emissões gasosas.
Lodo de esgoto e resíduos sólidos municipais	Zhang et al., 2018	Investigação do desempenho da co-biossecagem de lodo de esgoto e resíduos sólidos municipais em diferentes proporções	Biorreator de membrana; Pilhas misturadas; aeração controlada; reversão a cada 3 dias.	15 dias	Variação de temperatura, degradação de matéria orgânica, teor de umidade.

Resíduo Estudado	Autor	Resumo	Condições de Operação	Tempo de Operação	Principais Parâmetros Observados
Resíduos sólidos urbanos	Rada et al., 2010	Buca propor soluções para o tratamento de RSU romeno com base no processo de biossecagem, comparando quatro cenários adequados para o tratamento de resíduos sólidos urbanos.	Pilhas industriais; controle de aeração e temperatura.	15 dias	Poder calorífico, umidade residual.
Resíduos sólidos urbanos	Velis et al., 2009	Uma revisão de um modelo de biossecagem industrial em plantas tratamento mecânico-biológico, gerando um combustível sólido recuperado de alta qualidade, rico em biomassa.	Vazão de ar controlada. Biossecador	15 dias	Umidade final, energia consumida.
Resíduos sólidos urbanos	Rada et al., 2007	Biossecagem como pré-tratamento. Avaliou-se a dinâmica do Valor Calorífico Inferior durante a biossecagem de RSU.	Biossecador em escala piloto; vazão controlada de ar	30 dias	Poder calorífico, teor de umidade, sólidos voláteis.
Lodo de esgoto	Bilgin et al., 2015	Aplicação da biossecagem para redução de volume e peso do material para obtenção de um produto estável.	Reator de biossecagem com ventilação forçada e diferentes teores de umidade inicial de 48,49–50,00%. O processo foi repetido em várias temperaturas entre 30 °C e 50 °C.	13 dias	Redução de umidade, volume final, poder calorífico.
Resíduos sólidos urbanos	Zawadzka et al., 2010	Biossecagem de lodos de esgoto ativado com diferentes cargas de aeração.	Sistema de laboratório com variação de cargas. Reator de compostagem horizontal equipado com um sistema de suprimento de ar, sistema de medição da temperatura da biomassa e sensores de umidade e temperatura do ar. Utilizou-se adição de um material estrutural.	10-12 dias	Perda de massa, umidade final, poder calorífico

Resíduo Estudado	Autor	Resumo	Condições de Operação	Tempo de Operação	Principais Parâmetros Observados
Resíduos sólidos urbanos	Sugni et al., 2005	Estudo laboratorial para obter produtos homogêneos em termos de umidade e energia. A proposta para solucionar essa falta de homogeneidade é inverter periodicamente a direção do fluxo de ar.	O material foi seco em área aberta até que seu teor de umidade estivesse abaixo de 50%. Três ensaios: variando umidade e fluxo de ar. Controle de temperatura (45°C) e fluxo de ar	11 dias	Umidade, sólidos voláteis e cinzas
Lodos mistos de celulose e papel	Navaee-Ardeh et al., 2016	Análise das vantagens e desvantagens dessas tecnologias usadas na indústria e a comparação com a biossecagem	Reatores de laboratório, resíduo de madeira como agente estrutural, aeração forçada.	15 dias	Umidade, matéria orgânica, produção de calor, temperatura.
Lodo de águas residuais de papel e celulose	Frei et al., 2004	Estudo de um novo processo de biossecagem, cujo objetivo era aumentar o valor calorífico da biomassa para combustão eficiente em fornos de resíduos de madeira.	Biossecador com aeração forçada	13 dias	Temperatura, umidade, pressão, fluxo de ar e massa total.
Resíduos agroindustriais	Genevini et al., 1997	Biossecagem de esterco bovino leiteiro líquido com casca de arroz como matriz absorvente e agente de volume.	Sistema piloto de compostagem/biossecagem.	52 dias	Teor de dióxido de carbono, temperatura e umidade.
Lodo de esgoto industrial	Bian et al., 2020	Biossecagem controlada por microrganismos termofílicos para reduzir e desintoxicar o lodo de resíduos perigosos.	Biossecador com aeração forçada. Serragem foi selecionada como material auxiliar para ajustar o teor de umidade e a porosidade da alimentação,	15 dias	Redução de umidade, potencial energético.

Resíduo Estudado	Autor	Resumo	Condições de Operação	Tempo de Operação	Principais Parâmetros Observados
Resíduos orgânicos municipais	Negoi et al., 2009	Estudo de um método para pré-tratar resíduos sólidos urbanos antes recuperação de energia através de processos térmicos ou termoquímicos.	Planta piloto de biossecagem com ar forçado.	29 dias	Perda de massa, potencial energético.
Resíduos sólidos urbanos	Shao et al., 2012	Estudo da influência da taxa de aeração na eficiência da biossecagem. Neste estudo, três modos de ventilação foram utilizados para fornecer a mesma quantidade total de ar.	Pilhas de laboratório com taxas variadas de aeração.	16 dias	Redução de umidade, geração de calor, geração de gases
Resíduos sólidos urbanos	Tom et al., 2016	Pesquisa e o desenvolvimento detalhados de um reator de biossecagem inovador para o tratamento de resíduos sólidos urbanos mistos com alto teor de umidade.	Biossecador com fluxo de ar controlado	33 dias	Taxa de umidade, evolução da temperatura.
Resíduos de laranja	Maia et al., 2023	Avaliar a biossecagem de biomassa do resíduo em três modos de operação: convencional com carga total e longo tempo de operação; convencional com carga parcial e curto tempo de operação; e biossecagem intermitente com carga parcial e homogeneização.	Biossecador, fluxo de ar	21 dias	Taxa de umidade, evolução da temperatura.
Resíduos agrícolas	Wright et al., 2000	Estudo do método de biossecagem para atender às preocupações ambientais, proteção da qualidade da água, aumentando a probabilidade de exportação; fornecer um sólido estabilizado para distribuição em solo de feno durante a estação de crescimento e controle de odores.	Biossecador com fluxo de ar controlado	21 dias	Perda de massa e teor de umidade

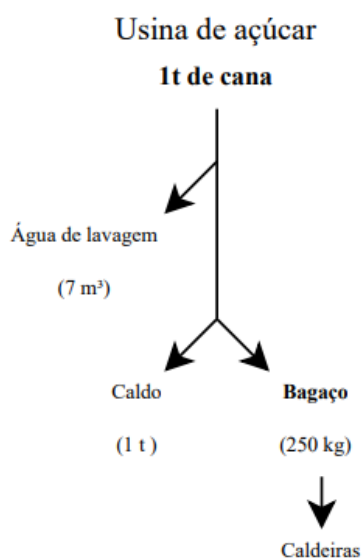
Fonte: Autoria própria (2025).

2.3 Características do Bagaço de Cana-de-Açúcar

À medida que a cana-de-açúcar passou a ganhar destaque em diversas áreas, também aumentaram as preocupações ambientais relacionadas à sua cadeia produtiva. A expansão do setor resultou em uma produção em larga escala, gerando uma grande quantidade e variedade de resíduos que requerem destinação adequada (SUN et al., 2004).

O bagaço, aqui referido como biomassa de cana de açúcar dada a sua aplicabilidade como fonte para geração de energia, é um subproduto resultante da extração do caldo da cana-de-açúcar em usinas ou destilarias na produção de álcool etílico e açúcar. Cada tonelada de cana moída rende cerca de 250 kg de bagaço úmido que equivale a 560 mil quilocalorias (CORTEZ & MAGALHÃES, 1992). A Figura 2 apresenta o fluxograma do processo industrial em uma usina de açúcar, iniciando com o processamento de 1 tonelada de cana-de-açúcar como matéria-prima e finalizando com a geração do bagaço.

Figura 2- Fluxograma simplificado de produtos, subprodutos e resíduos da indústria de cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de GURGEL et al. (2024).

A principal destinação deste resíduo é sua utilização em caldeiras como combustível para a produção de energia elétrica em processos industriais. No Brasil, com o crescimento econômico, a matriz energética do país sofreu mudanças e surgiram desafios relacionados à geração de energia, especialmente em períodos de estiagem e baixa disponibilidade hídrica. Nesse contexto, a produção de agroenergia a partir de resíduos industriais, como o bagaço da

cana, apresenta-se como uma alternativa viável para mitigar esses impactos (GALBIATI; GALLO; LAVANHOLI, 2010).

Até o ano de 1980, as usinas produziam 60% da eletricidade que consumiam com a queima do bagaço, agora, em sua grande maioria, elas são autossustentáveis, gerando 100% da energia que precisam. Sendo assim, o Brasil tem potencial para a geração de eletricidade com a queima de bagaço e palha de cana, que superaria a capacidade da maior hidrelétrica brasileira (Itaipu) - em 1.000 megawatts médios. (Pesquisa FAPESP, 2001, 2009).

Entretanto, no Brasil, a bioeletricidade gerada a partir da cana-de-açúcar ocupa atualmente a quarta posição entre as fontes da matriz elétrica nacional. Apesar do potencial da biomassa, estima-se que apenas 15% dele esteja sendo aproveitado de forma efetiva. De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA, 2025), caso a biomassa presente nos canaviais fosse plenamente utilizada, a bioeletricidade teria potencial técnico para alcançar 151 mil GWh, o suficiente para suprir mais de 30% do consumo de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).

2.4 Composição físico-química

O bagaço de cana-de-açúcar in natura, ou seja, recém moído é composto por, em média, 50% de umidade, cerca de 45% de fibras lignocelulósicas (divididas entre celulose, hemicelulose e lignina) e, aproximadamente 5% de outros componentes, como extrativos e cinzas. Quimicamente, a composição do bagaço de cana-de-açúcar foi estudada por Rocha (2012) e Rocha (2015) e os resultados de seus estudos foram concentrados e exibidos na Tabela 2. Em relação aos extrativos presentes no bagaço, Sanjuán (2001) define que tais componentes podem ser divididos em extrativos em uma mistura de etanol e benzeno, extrativos em etanol e extrativos em água quente.

De maneira geral, o bagaço de cana-de-açúcar tem grande potencial de uso. Entretanto, devido à alta umidade, quando in natura, verifica-se que independente do destino, o bagaço necessita de secagem, visto que, quando armazenado, o açúcar residual aliado ao teor de umidade e à ação microbiana estimula uma fermentação exotérmica, ocasionando sua decomposição, deteriorando-o e muitas vezes, provocando uma combustão espontânea não desejável (CORTEZ et al., 1992).

Tabela 2 - Resultados analíticos sobre a composição química do bagaço de cana-de-açúcar “in natura”.

Componente	Variação de porcentagem (% B. U.)	Média de porcentagem (% B. U.)
Celulose	18,44 - 25,85	21,33
Hemicelulose	9,45 - 14,79	13,20
Lignina	9,45 - 13,06	11,12
Extrativos	0,50 - 5,23	2,11
Cinzas	0,57 - 4,65	1,79
Umidade	48,00 - 52,00	50,00

Fonte: Adaptado de Rocha et al. (2012) e Rocha et al. (2015).

A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool é o principal fator a ser levado em conta para o melhor desempenho da matéria-prima. (FIGUEIREDO et al., 2008). Essa importância vale também para as demais utilizações do bagaço de cana.

Sendo assim, as empresas têm atribuído grande importância aos fatores que afetam a qualidade da cana-de-açúcar. Segundo a Embrapa (2022) dois tipos de fatores afetam a qualidade da matéria-prima destinada à indústria. O primeiro são os fatores intrínsecos que estão relacionados à composição da cana (teores de sacarose, açúcares redutores, fibras, compostos fenólicos, amido, ácido aconítico e minerais), sendo estes afetados de acordo com a variedade da cana, variações de clima (temperatura, umidade relativa do ar, chuva), solo e práticas agrícolas, como adubação, irrigação e controle de pragas. Já os fatores extrínsecos são aqueles materiais que não fazem parte do caule da cana, como terra, pedras, folhas secas ou plantas daninhas misturadas na colheita ou até mesmo compostos produzidos por microrganismos devido à sua ação sobre os açúcares do caule.

2.5 Comportamento microbiológico

O resíduo estudado neste trabalho, possui características propícias ao desenvolvimento de microrganismos e entender o comportamento microbiológico da matéria-prima ajuda a

otimizar o processo, controlando a temperatura, umidade, aeração tornando a biossecagem mais rápida, eficiente e com menos perda de material.

Rattanachomsri et al. (2011) e Gebbie et al. (2020) estudaram pilhas de bagaço de cana-de-açúcar não perturbadas e realizaram uma análise independente da comunidade microbiológica, identificando uma diversidade significativa de microrganismos.

Gebbie et al. (2020) observou mudanças nas propriedades físico-químicas com a profundidade, como aumento da temperatura e redução do pH. Os autores identificaram a predominância da bactéria *Alicyclobacillus*, devido à sua abundância nas duas amostras de camada profunda. Este gênero tem capacidade de degradação de biomassa bem caracterizada e prospera em açúcares, pentose e hexose. Fungos do filo Ascomycota, com destaque para os gêneros *Trichoderma*, *Penicillium*, *Aspergillus* e *Fusarium* também foram observados nos estudos dos autores. Esses microrganismos são amplamente reconhecidos por sua capacidade de produzir enzimas hidrolíticas como celulasas e xilanases, essenciais para a degradação de biomassa vegetal. No geral, os microrganismos que colonizaram as partes mais profundas da pilha de bagaço, eram em sua maioria funcionalmente especializados para a decomposição de lignocelulose.

As análises de Rattanachomsri et al. (2011) investigaram a diversidade de microrganismos procarióticos e eucarióticos na cana de açúcar. Segundo os autores, a diversidade microbiana eucariótica era composta por 9 linhagens: *Firmicutes* (35,5%), *Acidobacteria* (10,9%), *Proteobacteria* (24,6%) e *Bacteroidetes* (15,3%), que atuam na degradação, principalmente, de celulose e hemicelulose e as *Acidobacterias* ajudam na degradação da lignina. Já a comunidade eucariótica tinha uma diversidade relativamente baixa composta apenas pelo filo *Ascomycota*, principalmente das classes *Eurotiomycetes* e *Sordariomycetes*, que degradam exclusivamente celulose e hemicelulose.

Em ambos os estudos foi possível analisar a influência que a profundidade da pilha tem no comportamento microbiano da biomassa. Em camadas mais profundas observa-se menor diversidade e predominância de microrganismos termófilos, uma vez que, estão submetidas a menor oxigenação e maiores temperaturas.

2.6 Pesquisas Relacionadas à Biossecagem de Bagaço de Cana

Durante pesquisas feitas em literatura científica, foi identificado o estudo de Contreras-Cisneros et al. (2021) como o único, até o momento, que aborda a biossecagem envolvendo o bagaço de cana-de-açúcar como parte de sua pesquisa. O experimento foi feito em uma estufa do tipo túnel, durou 46 dias e comparou duas pilhas semi estáticas: a primeira (P1) formada por

casca de laranja, madeira triturada e bagaço de cenoura; e a segunda (P2), por casca de laranja, madeira triturada e bagaço de cana. Na Tabela 3 encontram-se as porcentagens de cada biomassa usadas pelos autores.

Tabela 3 - Percentagens de cada biomassa usadas pelos autores durante o experimento.

Pilha	Casca de laranja	Bagaço de cenoura	Bagaço de cana	Madeira triturada
P1	79,8%	10%	0%	10,2%
P2	79,8%	0%	16,7%	3,5%

Fonte: Adaptado de CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021.

O objetivo do estudo foi entender a relação entre umidade, temperatura e a concentração dos gases oxigênio e dióxido de carbono a fim de caracterizar o processo de biossecagem.

A análise dos níveis de oxigênio e dióxido de carbono permitiu identificar o momento em que a atividade microbiana foi interrompida, com base na atividade da água (a_w). Esse parâmetro pode ser explicado como a quantidade de água disponível em um material para suportar reações químicas, como a atividade microbiana. Os autores observaram que valores abaixo de 0,9 são capazes de limitar o metabolismo biológico (CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021).

O arranjo das pilhas escolhido pelos autores seguiu o formato piramidal, com volumes iniciais de 1,49 m³ (P1) e 1,13 m³ (P2). Os materiais foram organizados em camadas, seguindo a sequência: palha, casca de laranja e bagaço de cenoura ou de cana-de-açúcar. As pilhas foram homogeneizadas manualmente a cada sete dias, fornecendo assim, a difusão dos gases para o sistema e a remoção de umidade. Para o experimento com o bagaço de cana de açúcar, o material foi adicionado no quarto dia de experimento.

Neste trabalho, o foco está nos resultados obtidos para a pilha P2, pois nela foi utilizado o bagaço de cana-de-açúcar, biomassa estudada neste trabalho. Nesse âmbito, os resultados foram positivos para o material com a presença do bagaço de cana de açúcar, mostraram o aumento da porosidade da pilha, favorecendo a aeração e acelerando a redução da umidade, que chegou a 11,9% no final do processo. Já a redução de peso do material foi de 85%. A Tabela 4 contempla o comparativo dos resultados obtidos pelos autores no início e no fim do estudo.

Os autores também relatam a presença de três fases comuns no processo de biossecagem, a primeira ocorreu dos dias 0 até 12, em que a temperatura aumenta devido a intensa atividade microbiana inicial, depois observa-se a segunda fase dos dias 12 até 26. Quando a temperatura apresentou uma estabilização ocasionado pelo equilíbrio entre o calor

microbiano e do resfriamento do monte e, por fim, a última fase foi observada do dia 26 até o dia 46 do experimento e representa a queda da temperatura devido a redução da atividade microbiana. A maior taxa de secagem ocorreu durante a primeira fase, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 4 - Resultados gerais do experimento

Parâmetros	Início	Fim
Tempo (dias)	0	46
Peso (Kg)	372,3	55,84
Volume (m ³)	1,13	0,746
Densidade (kg/m ³)	329	75
Teor de umidade (%)	88	11,9
Água Total (kg)	327,65	6,25
Redução de peso (%)	-	85
Redução de volume (%)	-	34
Redução de densidade (%)	-	77
Redução do teor de umidade (%)	-	98,09

Fonte: Adaptado de CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021.

Tabela 5 - Resultados da biossecagem de acordo com a fase do processo.

Fase	Duração (dias)	Redução de umidade (%)	Taxa de secagem (kg de água/ dia)
1	0 a 12	23,58	8,12
2	12 a 26	20,89	4,11
3	26 a 46	29,65	2,55

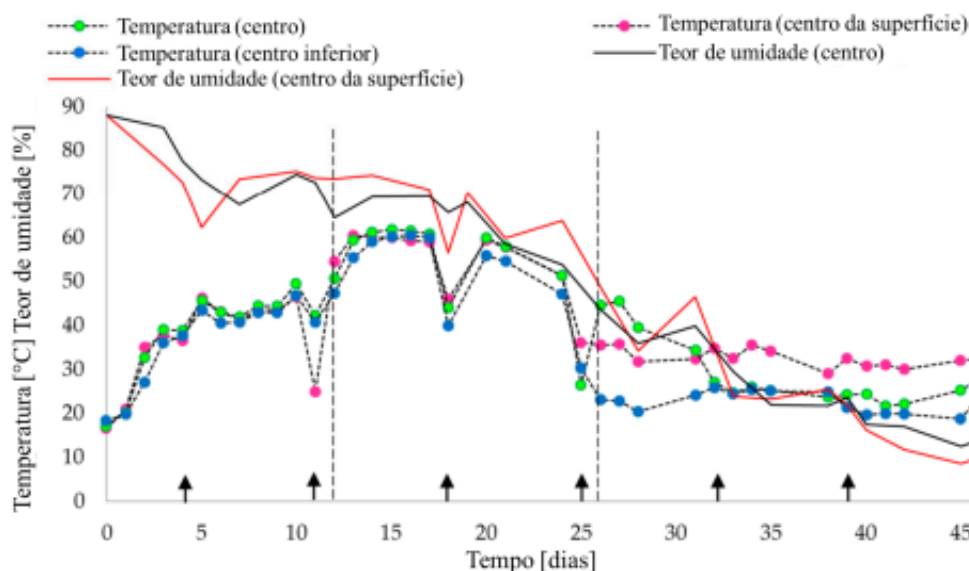
Fonte: Adaptado de CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021.

No estudo de Contreras-Cisneros et al. (2021), foi relatado que, à medida que o material perde umidade, apresenta maior porosidade, favorecendo a troca gasosa entre a pilha e o ambiente externo. Com isso, foi possível observar que os menores valores de concentração de oxigênio foram registrados no dia 10 do processo, uma vez que, foi o início do crescimento microbiano na sua taxa mais alta. Esse alto consumo de O₂ também foi favorecido pela porosidade dos resíduos, proporcionando níveis favoráveis de aeração para sustentar a intensa atividade microbiana.

Quando o foco do estudo foi a temperatura durante o experimento, os autores observaram que, a fase termofílica (período em que a temperatura está acima de 45°C) durou do dia 5 ao dia 27 para a P2, totalizando 22 dias. Uma temperatura expressiva de, aproximadamente, 60° foi observada entre os dias 15 e 17. Esses dados foram coletados a partir

de sensores em três níveis diferentes: centro superior (localizado a 0,05 metros da superfície da pilha), centro da superfície e centro inferior (localizados a 0,05 metros da base da pilha). A Figura 3 apresenta o comportamento térmico e o teor de umidade em diferentes pontos da pilha ao longo do experimento.

Figura 3- Gráfico da temperatura e teor de umidade do material em função do tempo.



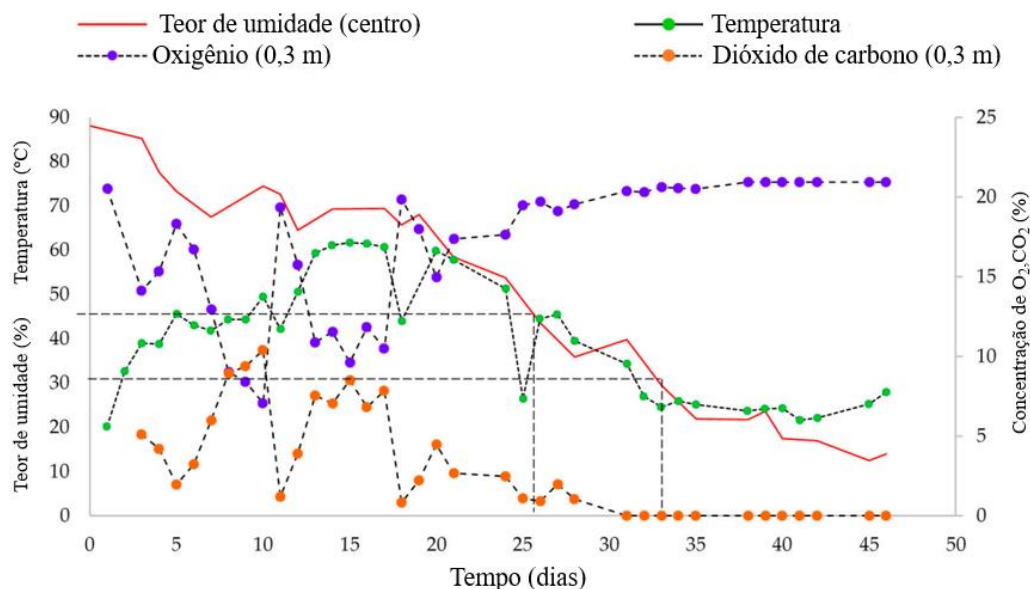
Fonte: Adaptado de Contreras-Cisneros (2021)

Na Figura 4, é possível observar a relação entre a temperatura a perda de umidade e as concentrações de gases no centro da pilha (0,3 metros de profundidade). É possível observar que quando a umidade estava em níveis abaixo de 45% a concentração de oxigênio no interior começou a subir, o que indica que esse fato afetou a diminuição da atividade microbiana a partir desse momento (dia 26 do experimento) até atingir 21% entre os dias 33 e 34. Dessa forma, como menos umidade significa menos atividade dos microrganismos, pois eles precisam de água para realizar suas funções metabólicas, não é possível sustentar a atividade enzimática da população de bactérias, leveduras e bolores. Indicativos de remoção de água após o dia 34 aponta para secagem convectiva favorecida pelas condições de estufa, não mais pela atividade microbiana.

Contreras-Cisneros et al. (2021) relatam que, após o dia 34, indicativos de remoção de água após o dia 34 aponta para secagem convectiva favorecida pelas condições de estufa, não mais pela atividade microbiana. Isso significa que a remoção de água passou a ser influenciada

mais pelas condições externas, como a radiação solar, do que pela atividade microbiana. A umidade foi reduzida em 15% durante esse período.

Figura 4 - Resultados de porcentagem dos gases, temperatura e teor de umidade ao longo do experimento



Fonte: Adaptado de CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021.

Além disso, a presença do bagaço contribuiu para um maior poder calorífico (15.832 kJ/kg) em comparação à pilha que utiliza bagaço de cenoura e casca de laranja que apresentou 15,272 kJ/kg e supera ao da madeira com 15% de umidade, sendo este de 15.360 kJ/kg. (CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021).

Em resumo, o estudo destaca o bagaço de cana como um material suscetível ao processo de biossecagem o que permitiria o desenvolvimento de técnicas de secagem que estejam em consonância com as boas práticas de sustentabilidade energética e alinhadas às necessidades de intensificação dos processos de secagem desse tipo de resíduo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Aquisição de Biomassa de cana de açúcar

A biomassa de cana de açúcar foi adquirida fresca nas usinas de beneficiamento de açúcar e álcool próximas à cidade de São Carlos no período de safra e operação das usinas.

3.2 Descrição do aparato experimental

O equipamento utilizado nos ensaios de biossecagem está ilustrado na Figura 5 (a). A lateral do equipamento é revestida com manta cerâmica para isolamento térmico. O corpo do biossecador foi construído em PVC, composto por três partes: base, cilindro central e topo. O cilindro central possui 30 cm de diâmetro interno e 62 cm de altura. A separação dos leitos pode ser feita utilizando o conjunto de placas separadoras, conforme ilustrado na Figura 5 (b). A base do cilindro central é formada por uma placa perfurada, que serve como suporte para a biomassa e como distribuidor do ar de secagem.

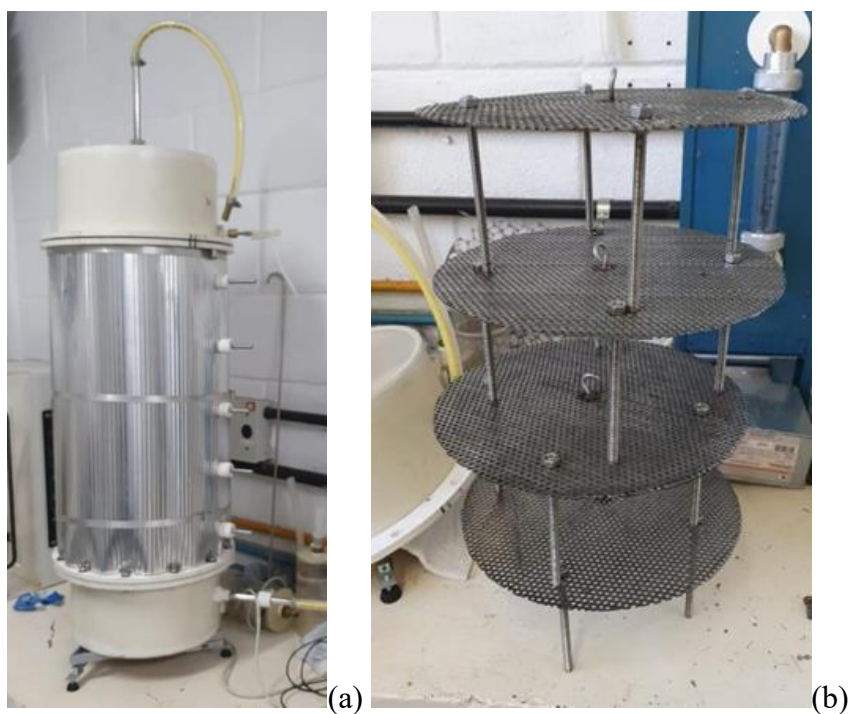
Para o sistema de aquisição de temperatura ao longo do leito, foram instalados cinco sensores igualmente espaçados ao longo da altura do cilindro, permitindo a subdivisão do leito em cinco zonas, quando necessário. O Sensor 1 foi posicionado na base do equipamento, com a numeração seguindo em ordem crescente até o Sensor 5, localizado no topo do sistema.

A aquisição de temperatura é realizada por sensores do modelo DS18B20 (Dallas Semiconductor, Estados Unidos) com precisão de $\pm 0,5$ °C, compatíveis com a plataforma Arduino. A queda de pressão ao longo do leito durante a operação e biossecagem foi monitorada por um sensor de pressão MPX5010DP, também compatível com a plataforma Arduino.

O controle de vazão de ar é realizado através da regulação de um rotâmetro calibrado da marca Indflow (modelo INF-R-P-200, Indflow Ind. Solutions, Brasil), conforme observado na Figura 6 (a). A massa do sistema foi monitorada por meio de três células de carga, com capacidade para 2000 g e precisão de ± 5 g, conectadas a placas de aquisição HX711 (Avia Semiconductor Co. Ltd., China), conforme Figura 6 (b).

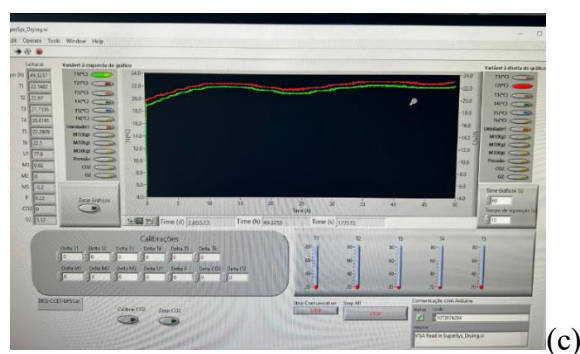
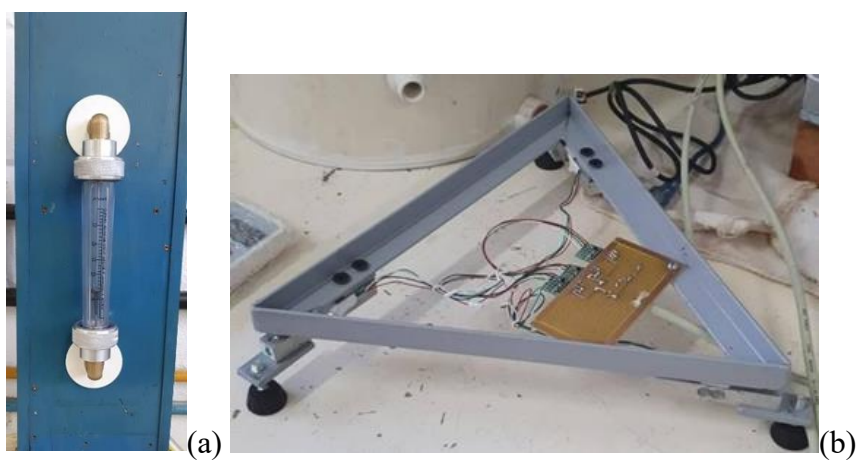
O software SuperSys Drying (LabVIEW, National Instruments Corp., Estados Unidos) foi especialmente desenvolvido no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para a aquisição de dados online de temperatura, pressão e massa, além de permitir a incorporação de sensores de CO₂, O₂ e umidade (Figura 6c).

Figura 5 - (a) corpo do biossecador; (b) placas separadoras.



Fonte: Acervo Pessoal.

Figura 6 - (a) rotômetro Indflow, (b) suporte para aquisição de massa, (c) software SuperSys Drying para aquisição de dados de temperatura, pressão e massa.



Fonte: Acervo Pessoal.

3.3 Análise do teor de umidade preliminar

A análise do teor de umidade em uma biomassa é um procedimento realizado para determinar a quantidade de água presente no material. No presente trabalho, o bagaço de cana-de-açúcar foi umidificado previamente, com o objetivo de atingir valores observados na literatura. Para isso, foi calculada a quantidade de água necessária para atingir um teor de umidade de 80%, considerando. A água foi adicionada de forma gradual aos 12 kg de biomassa, garantindo uma distribuição homogênea da umidade.

Após a umidificação, foram realizados os testes de determinação do teor de umidade, a fim de confirmar se o material havia atingido o valor previamente calculado. As amostras foram coletadas, preparadas e distribuídas em quatro placas de Petri, com o intuito de garantir uma avaliação representativa e homogênea da umidade durante a análise. Cada placa foi pesada individualmente, antes e depois da adição do material, obtendo-se a massa inicial (M_i) da amostra antes da secagem.

As amostras foram colocadas em uma estufa convencional a 105 °C, mantida constante para evitar a degradação de outros componentes da biomassa durante um intervalo de 24 horas. Após esse período, foram novamente pesadas para determinar a massa seca (M_s). A discrepância entre a massa inicial e a massa após o processo de secagem é empregue para determinar a quantidade de água que foi eliminada.

Com os dados de massa fornecidos pela balança analítica, o teor de umidade foi calculado com base na diferença da M_i e a M_s , conforme a Equação 1:

$$\text{Teor de Umidade (\%)} = [(M_i - M_s) / M_i] * 100 \quad (1)$$

O procedimento foi realizado em quadruplicada para cada experimento.

3.4 Ensaios de biossecagem

Para os ensaios de biossecagem, foi utilizado o biossecador descrito na seção 2.2, com monitoramento contínuo da temperatura e da massa ao longo do tempo. Foram realizados três experimentos distintos, com duração de 3, 6 e 30 dias, com o objetivo de avaliar as condições operacionais para a ocorrência da biossecagem do bagaço de cana de açúcar. Em todos os experimentos utilizou-se 12 kg de biomassa.

O primeiro experimento, com duração de 3 dias, teve um caráter preliminar, com o intuito de testar o funcionamento do equipamento e a resposta térmica do sistema a partir do material coletado da indústria sucroalcooleira. Neste ensaio, utilizou-se a biomassa da forma

que foi recebida, sem tratamento prévio. Todo o equipamento foi preenchido com o material e vazão de ar de 1 m³/h durante 30 minutos. Em seguida, o sistema foi mantido sem fluxo de ar pelo restante do tempo. Ao final dos três dias, não se observou aumento significativo da temperatura do sistema, o que poderia indicar ausência de atividade microbiana suficiente de forma que pudéssemos caracterizar o ensaio como biossecagem (temperaturas acima de 40 °C). Concluiu-se que o teor de umidade da biomassa era provavelmente insuficiente para estimular o crescimento microbiano, conforme observado na literatura, que apresentaram umidades iniciais próximas de 80% (CONTRERAS-CISNEIROS et al., 2021).

Com base nisso, no segundo experimento, a biomassa foi previamente umedecida até cerca de 77% de umidade. Outra alteração realizada foi a realização de pulsos de aeração, ou seja, uma vazão de ar de 1 m³/h foi aplicada por 30 minutos a cada 24 horas, com o intuito de fornecer oxigênio periodicamente para favorecer o crescimento microbiano. A operação permaneceu fechada durante todo o processo e o experimento durou 6 dias seguindo essa metodologia. Ainda assim, não foram observados aumentos expressivos de temperatura, o que sugeriu que o tempo total de operação ou a frequência dos pulsos poderiam ser insuficientes para o processo.

De acordo com Frei et al. 2004, a remoção eficiente de umidade da biomassa durante o processo de biossecagem requer temperaturas elevadas, que favorecem a atividade de microrganismos termofílicos. Para que esses microrganismos possam respirar adequadamente, é essencial garantir uma transferência uniforme e suficiente de oxigênio por todo o material biodegradável. No entanto, quando ocorrem zonas de compactação, o ar não consegue penetrar de forma eficaz, criando condições anaeróbicas que reduzem a eficiência do processo.

Por fim, estabeleceu-se um experimento mais longo, com duração de 30 dias, a fim de simular com maior fidelidade as condições ideais para a ocorrência de biossecagem, conforme observado na literatura. A biomassa foi novamente umedecida previamente até atingir aproximadamente 75% de umidade, e o processo foi conduzido com aplicação constante de fluxo de ar a 1 m³/h ao longo de todo período experimental. Além disso, foi realizada a homogeneização manual do leito a cada 5 dias com o objetivo de evitar zonas de compactação e promover uma distribuição mais uniforme da atividade microbiana.

As configurações experimentais adotadas estão sumarizadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados analíticos sobre a composição química do bagaço de cana-de-açúcar “in natura”.

Ensaio	Duração (dias)	Aeração	Observações
1	3	1 m ³ /h por 30 min (pulso inicial), depois sistema fechado	Teste preliminar. Sem umidificação prévia da biomassa. Sem homogeneização do leito. Sem aumento de temperatura.
2	6	Pulsos de 1 m ³ /h por 30 min a cada 24h	Umidificação prévia da biomassa. Sem homogeneização do leito. Pequeno aumento de temperatura, insuficiente.
3	30	Contínua a 1 m ³ /h	Umidificação prévia da biomassa. Homogeneização do leito a cada 5 dias. Aumento de temperatura insuficiente.

Fonte: Autoria própria (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Comportamento térmico

A Figura 7 apresenta as variações de temperatura do biossecador para cinco posições ascendentes ao longo do leito. Os gráficos ilustram o tempo total de operação para cada ensaio realizado permitindo comparar o comportamento térmico em diferentes condições operacionais. A análise do comportamento térmico é fundamental, uma vez que a geração de calor pela atividade microbológica é um dos principais indicadores da eficiência do processo de biossecagem.

Observa-se que, no Ensaio 1 (Figura 7a), realizado por 3 dias, não houve elevação significativa de temperatura e as curvas do gráfico apresentam comportamentos semelhantes. Destaca-se, no entanto, o comportamento das regiões onde estão posicionadas as temperaturas 2 e 3, que apresentaram valores ligeiramente mais elevados em comparação com os demais pontos monitorados. Essa diferença, embora discreta, pode indicar uma zona local com maior atividade biológica ou menor perda de calor. Ainda assim, não há evidência de formação de gradientes térmicos significativos. As temperaturas iniciais variaram entre 18°C e 20°C, alinhadas às condições ambientais no início do ensaio. Houve um leve aumento nas primeiras horas, atingindo um pico de aproximadamente 22°C a 23°C, seguido por uma estabilização das temperaturas, que permaneceram na faixa de 21°C. No final do período analisado, nota-se que as Temperaturas 2 e 3 atingem cerca de 24 °C, sendo essa a maior elevação térmica observada.

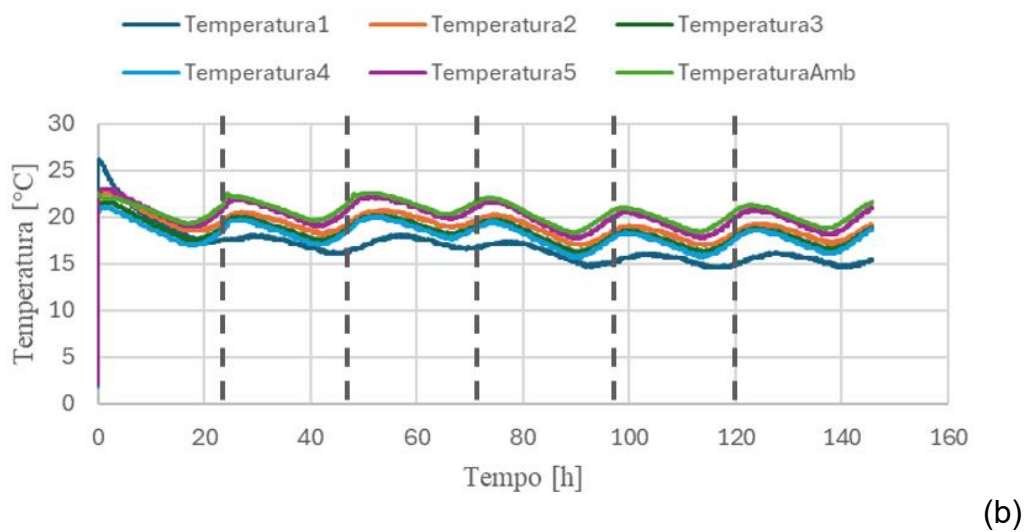
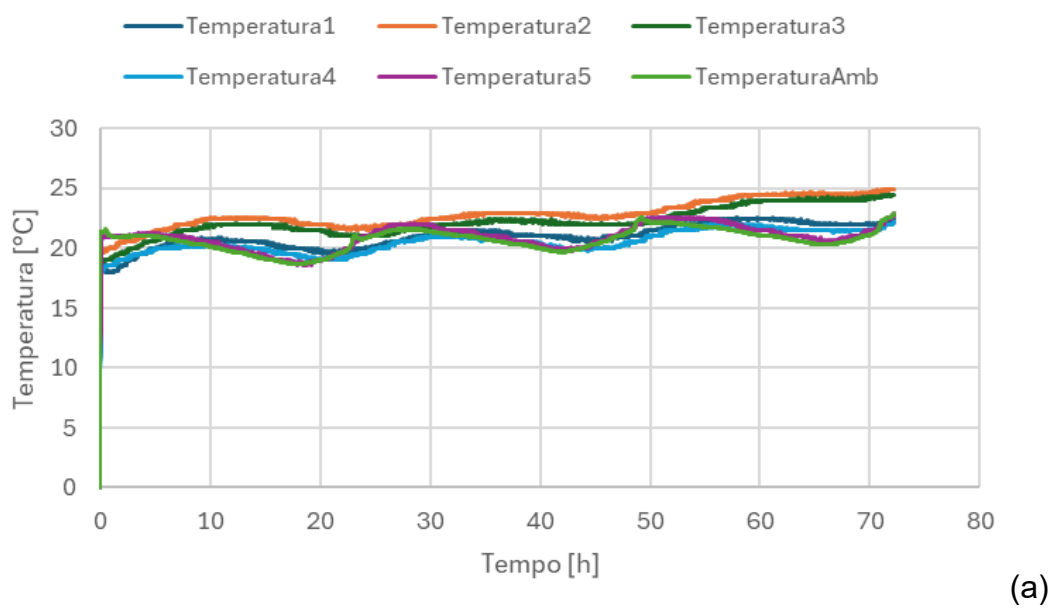
A Figura 7b contempla a variação da temperatura ao longo do experimento de 144 horas. Durante o ensaio, percebe-se um comportamento oscilatório, no qual há pequenos aumentos de temperatura seguidos de quedas, comportamento este diretamente associado à aplicação dos pulsos de aeração. Na figura apresentada, as linhas pontilhadas indicam os momentos em que foi realizada a aeração do leito durante o experimento.

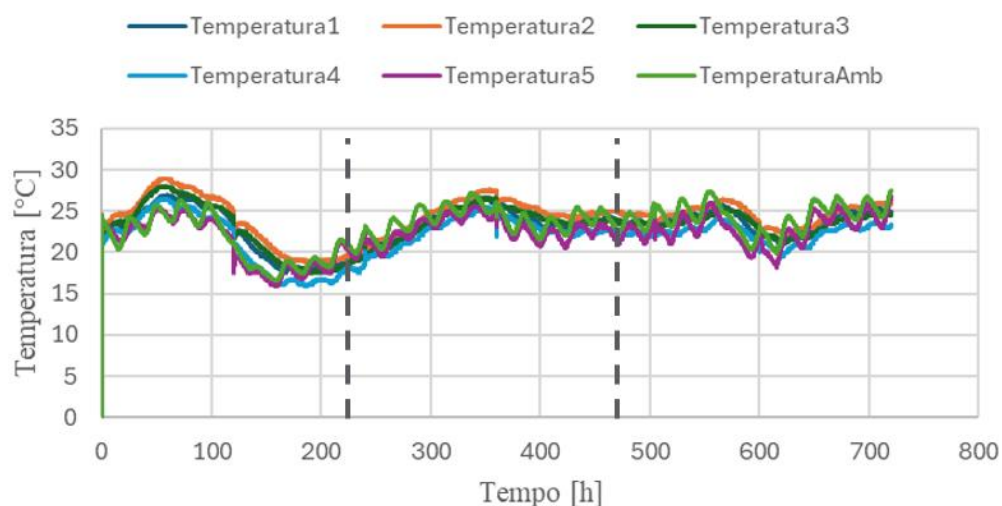
Adicionalmente, nota-se que as cinco curvas de temperatura se mantêm relativamente próximas entre si, com desvios geralmente inferiores a 2 °C. Essa proximidade sugere que o leito apresentou um comportamento térmico homogêneo durante a operação. De maneira geral, observa-se que as temperaturas se mantiveram na faixa de 15°C a 22°C, próximas da temperatura ambiente, sem atingir elevações significativas que caracterizam a ocorrência efetiva da biossecagem. Destaca-se que a Temperatura 1, representativa da base do equipamento, apresentou os menores valores, atingindo cerca de 15 °C ao final do processo.

Esse comportamento indica que não houve aumento expressivo de temperatura no interior da biomassa, o que sugere que a atividade microbiana foi limitada. A ausência de picos

térmicos localizados também reforça essa hipótese, provavelmente devido à baixa frequência de aeração, que pode ter restringido a disponibilidade de oxigênio necessário para a intensificação da atividade biológica.

Figura 7 - Perfis de temperatura durante os ensaios de biossecagem: (a) Ensaio 1 – duração de 3 dias, com pulso inicial de aeração; (b) Ensaio 2 – duração de 6 dias, com pulsos periódicos de aeração; (c) Ensaio 3 – duração de 30 dias, com aeração contínua.





(c)

Fonte: Dados próprios (2025).

Apesar da umidificação prévia, o aumento de temperatura foi insuficiente para alcançar os níveis típicos de atividade microbiana intensa, geralmente acima de 40°C, o que sugere que a estratégia de aeração adotada não foi eficiente para garantir o fornecimento contínuo de oxigênio necessário para sustentar a atividade dos microrganismos aeróbios.

Além disso, o fato de não ter sido realizada a homogeneização do leito pode ter contribuído para a formação de zonas onde parte da biomassa possivelmente ficou compactada, prejudicando tanto a distribuição de oxigênio quanto a dispersão do calor gerado.

No último ensaio apresentado (Figura 7c), observa-se o comportamento térmico durante o maior período e com todas as alterações observadas como essenciais nos experimentos anteriores. As cinco medições realizadas em diferentes pontos do leito apresentaram comportamento semelhante, indicando boa distribuição térmica, possivelmente favorecida pela homogeneização manual realizada a cada cinco dias. Vale destacar ainda que, as linhas pontilhadas presentes no gráfico indicam os momentos em que foi realizada a homogeneização manual do leito de biomassa.

Nos primeiros dias de processo, foi registrado um aumento da temperatura, atingindo valores entre 25 e 30°C até aproximadamente 100 horas, resultado da atividade microbiana inicial, responsável pela degradação dos compostos mais facilmente biodegradáveis presentes na biomassa. Após esse pico, verifica-se uma queda significativa, com estabilização da temperatura em torno de 18 a 22°C, indicando possível redução da atividade microbiana momentânea ou influência de perdas de calor para o ambiente.

Posteriormente, entre 250 e 400 horas, há um novo aumento de temperatura, provavelmente associado à homogeneização do leito feita em 240 horas, que pode ter impulsionado a degradação de compostos orgânicos mais recalcitrantes. Na sequência, a temperatura se mantém relativamente estável até o final do experimento, oscilando entre 22 e 26°C, o que sugere uma redução gradual da atividade microbiana e aproximação do equilíbrio térmico do sistema.

Apesar dos aumentos observados, os valores de temperatura são considerados baixos em comparação com processos de biossecagem realizados com resíduos urbanos, lodo de esgoto ou bagaço de laranja, que costumam alcançar temperaturas entre 45 e 70°C (MAIA et al., 2023; ZHANG et al., 2018). Isso pode estar relacionado às características específicas do bagaço de cana-de-açúcar, como menor teor de compostos orgânicos facilmente degradáveis, maior teor de fibras (celulose e lignina).

Esses resultados indicam que, embora o processo apresente algum grau de atividade microbiológica, as condições operacionais adotadas, principalmente a aeração do sistema e umidade inicial da biomassa, não foram suficientes para provocar uma elevação significativa de temperatura que caracterize uma biossecagem eficiente.

Assim, para futuros estudos, recomenda-se a análise de estratégias como pré-tratamentos da biomassa, ajustes na umidade inicial ou intensificação da aeração, buscando maximizar a atividade microbiana e, conseqüentemente, o desempenho do processo. Entre os pré-tratamentos, destacam-se a adição de agentes de bulking, como a serragem ou palha, que podem melhorar a porosidade e a circulação de oxigênio no leito e, outra abordagem promissora, é a inoculação com microrganismos específicos capazes de acelerar a biodegradação e a geração de calor durante a biossecagem.

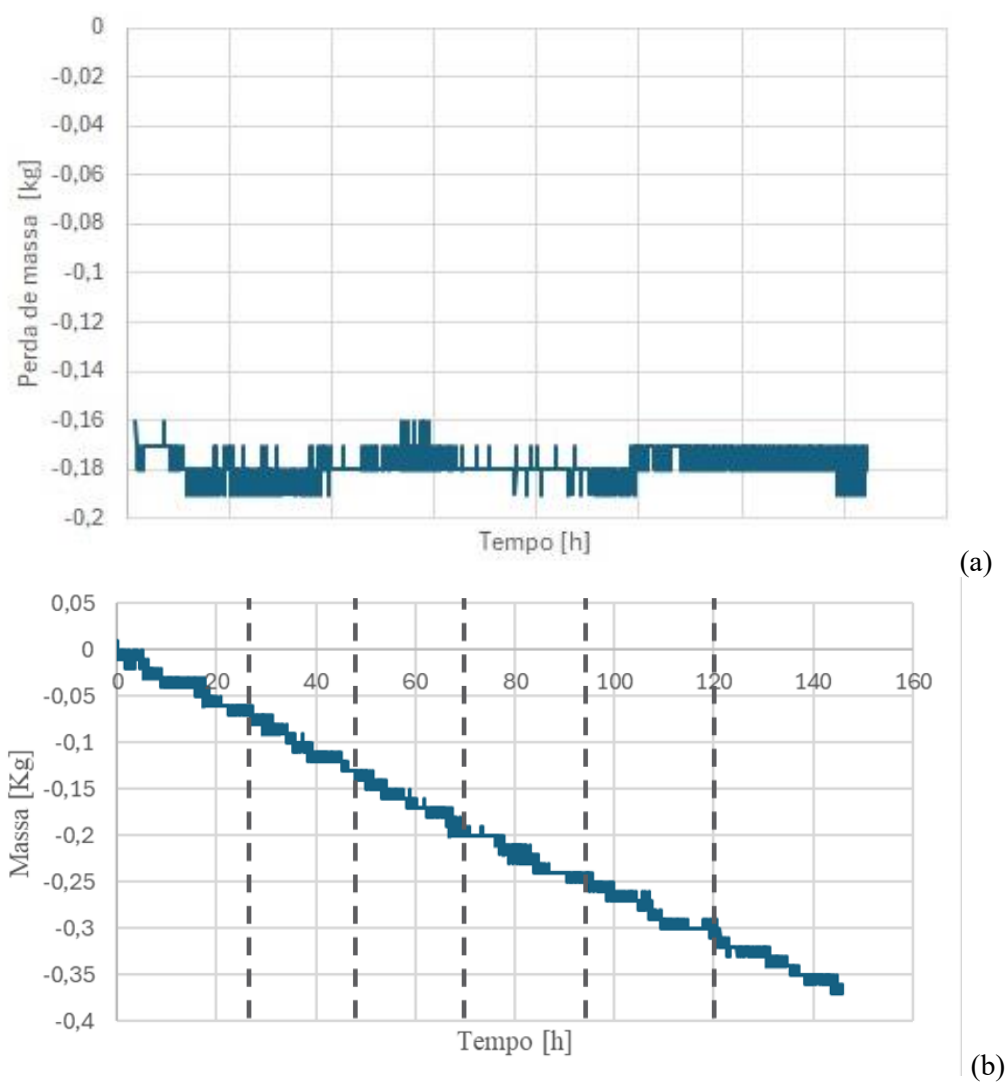
4.2 Variação da massa ao longo do tempo

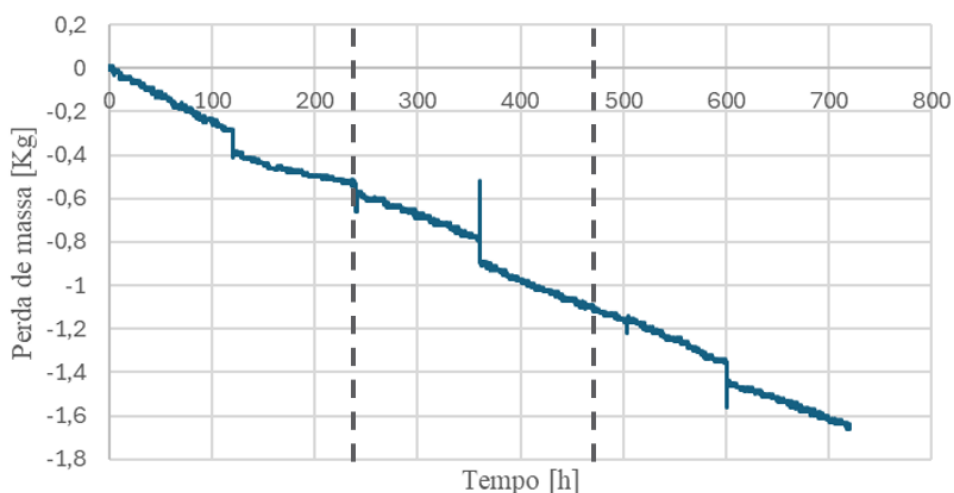
A variação da massa ao longo do tempo também é um parâmetro importante utilizado para avaliar o desempenho do processo de biossecagem. A redução de massa está diretamente associada, à remoção de umidade da biomassa, embora também possa refletir perdas de matéria orgânica volátil devido à atividade microbiológica. Esse acompanhamento permite compreender a eficiência das condições operacionais aplicadas, como o regime de aeração, umidificação e homogeneização, além de fornecer subsídios para a análise da viabilidade do processo.

O gráfico apresentado na Figura 8a ilustra a perda de massa da biomassa em função do tempo para o experimento de 3 dias. Observa-se que houve uma leve tendência de redução da

massa, embora com oscilações ao longo do período. Essas variações podem ser atribuídas principalmente à sensibilidade do sistema de medição, à estabilidade dos sensores ou às flutuações nas condições ambientais. A análise da curva sugere que a perda de massa foi limitada, refletindo um processo de secagem muito discreto.

Figura 8 - Perda de massa durante os ensaios de biossecagem: (a) Ensaio 1 – duração de 3 dias, com pulso inicial de aeração; (b) Ensaio 2 – duração de 6 dias, com pulsos periódicos de aeração; (c) Ensaio 3 – duração de 30 dias, com aeração contínua.





(c)

Fonte: Dados próprios (2025).

Além disso, durante todo o experimento, não foi registrado aumento expressivo da temperatura no interior do sistema, permanecendo em níveis próximos à temperatura ambiente. A ausência desse comportamento térmico alinhado à perda de massa escassa, indica que não houve atividade microbiana suficiente para promover a biossecagem efetiva da biomassa utilizada no ensaio. Contudo, a leve redução da massa observada pode ser atribuída à perda de umidade superficial, promovida pela própria movimentação inicial do ar e por processos de secagem natural ao longo do tempo.

Esses resultados preliminares foram fundamentais para compreender as limitações do sistema e permitiram o ajuste das condições experimentais para os ensaios subsequentes.

A Figura 8b apresenta o comportamento da perda de massa da biomassa ao longo dos seis dias de operação. Observa-se uma tendência de redução contínua e relativamente linear, com pequenas flutuações ao longo do tempo. A perda total registrada foi de aproximadamente 0,4 kg, em relação à massa inicial de 12 kg, o que representa uma redução de cerca de 3,3% da massa total.

Do ponto de vista quantitativo, a redução observada pode ser considerada pouco expressiva quando comparada aos valores típicos encontrados na literatura. Esse comportamento reforça os resultados de temperatura que, embora tenha ocorrido uma leve remoção de umidade, o sistema operou de forma limitada, sem efetiva caracterização como um processo de biossecagem e sem apresentar desenvolvimento microbiano suficiente para intensificar o processo por meio da geração de calor metabólico, característica essencial do processo. A perda de massa observada pode ser atribuída, à evaporação de água livre, favorecida pelos pulsos de aeração aplicados.

Adicionalmente, a estratégia operacional adotada de aplicar pulsos de aeração de 30 minutos a cada 24 horas mostrou-se insuficiente para promover uma taxa significativa de evaporação ou estimular o crescimento microbiano robusto. A baixa frequência de aporte de oxigênio, aliada às condições de umidade, pode ter limitado tanto a atividade biológica quanto os mecanismos físicos de remoção de umidade.

Por fim, na Figura 8c estão apresentados os resultados da evolução da perda de massa da biomassa de bagaço de cana durante o experimento de biossecagem conduzido por 30 dias, sob fluxo constante de ar de 1 m³/h. A biomassa foi inicialmente umedecida até atingir aproximadamente 75% de umidade (base úmida), totalizando uma massa inicial de 12 kg. Durante o experimento, foram realizadas homogeneizações manuais a cada cinco dias para evitar zonas de compactação e promover a distribuição uniforme da umidade e da atividade microbiana no leito.

Neste cenário observa-se uma tendência de redução contínua da massa da biomassa ao longo do tempo, com uma perda total acumulada de aproximadamente 1,7 kg. Durante as primeiras 100 a 150 horas, observa-se uma inclinação mais acentuada da curva, indicando uma fase inicial com maior taxa de perda de massa. Este fato é corroborado pelo mesmo crescimento observado no gráfico de temperatura. Essa etapa corresponde à remoção predominante da umidade livre presente na biomassa, facilitada pelo calor gerado pela atividade microbiológica e pela ação do fluxo de ar forçado. Na sequência, a curva apresenta uma tendência de estabilização, com redução mais gradual, refletindo a remoção de umidade mais fortemente adsorvida aos sólidos e uma possível diminuição da atividade microbiológica, conforme a disponibilidade de matéria biodegradável se reduz ou condições internas, como excesso de umidade residual, começam a limitar o processo.

As oscilações pontuais e quedas abruptas na curva estão diretamente associadas aos momentos de homogeneização do leito, realizados periodicamente. Essas intervenções promovem a redistribuição da umidade, podendo gerar picos transitórios nas medições, além de favorecerem aeração em zonas que poderiam estar compactadas.

A redução efetiva do teor de umidade da biomassa, embora modesta, apresentou comportamento superior à observada nos ensaios anteriores, o que indica uma evolução no desempenho do sistema. Entretanto, os níveis de umidade ainda permaneceram elevados, não atendendo aos requisitos típicos para o processo estudado.

Portanto, os resultados obtidos ao longo dos experimentos indicam que, nas condições experimentais aplicadas, não foi possível obter uma redução de massa que caracterize efetivamente o processo como uma biossecagem eficiente. Isso demonstra a necessidade de

ajustes nas variáveis operacionais.

4.3 Comparação com dados da literatura

Os resultados obtidos neste estudo foram comparados com os dados apresentados por Contreras-Cisneros et al. (2021). Na pesquisa conduzida pelos autores, observa-se um comportamento típico de biossecagem em que o autor apresentou as fases do processo, caracterizado por uma elevação acentuada da temperatura nas diferentes regiões do material (centro, centro inferior e superfície) atingindo valores entre 50 °C e 60 °C nos primeiros 10 a 15 dias. Esse aumento térmico decorre da atividade microbiana intensa, responsável pela geração de calor metabólico, após esse período, há um declínio gradual da temperatura. Paralelamente, é registrada uma expressiva redução do teor de umidade, que decresce de aproximadamente 75% para menos de 12% ao longo de 45 dias, evidenciando a eficiência do processo. Os resultados estão apresentados na Figura 3.

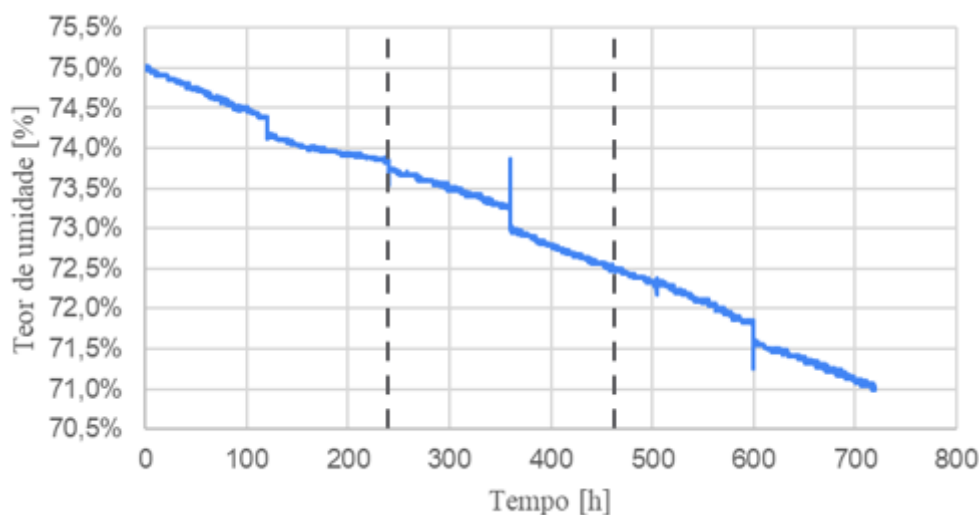
Por outro lado, os dados obtidos neste trabalho (Figura 7c) não apresentam os mesmos padrões observados na literatura. As temperaturas medidas em cinco pontos distintos do leito permaneceram entre 20 °C e 30 °C durante as 720 horas de monitoramento, sem indícios de atividade microbiana significativa. Além disso, a variação do teor de umidade foi modesta, com uma redução de apenas 75% para cerca de 71%, o que representa uma diferença de apenas 4 pontos percentuais ao longo de todo o período. Os resultados da variação do teor de umidade ao longo do experimento apresentados na Figura 9.

Uma possível justificativa para essa divergência está relacionada à composição dos resíduos utilizados. No estudo de Contreras-Cisneros (2021), o autor empregou, além do bagaço de cana, outros materiais como madeira triturada e bagaço de laranja, que são ricos em carbono e favorecem a atividade microbiana, além de melhorarem a estrutura física do leito (aeração e porosidade). Já no presente estudo, foi utilizado apenas o bagaço de cana, o que pode ter limitado a disponibilidade de nutrientes e dificultado o desenvolvimento microbiano necessário para a biossecagem.

Adicionalmente, é importante considerar a possível diferença na origem do bagaço. É plausível que o material utilizado por Contreras-Cisneros tenha sido proveniente de pequenas unidades de extração artesanal (como garapeiras), cujas características físicas e químicas diferem do bagaço originado em processos industriais de larga escala. O bagaço industrial tende a apresentar umidade mais elevada, maior compactação e menor porosidade, o que pode dificultar a oxigenação e reduzir a eficiência do processo biológico.

Dessa forma, a comparação com a literatura não apenas evidencia o desempenho inferior do sistema estudado, como também ressalta a importância dos materiais utilizados e das condições operacionais para o sucesso da biossecagem. Fatores como composição da mistura, origem do resíduo, umidade inicial, porosidade e oxigenação são determinantes e devem ser considerados em trabalhos futuros para garantir resultados mais satisfatórios.

Figura 9 - Gráfico do teor de umidade do bagaço de cana em função do tempo.



Fonte: Dados Próprios, 2025.

4.4 Natureza do material usado nos estudos

O bagaço de cana-de-açúcar pode ter origens distintas, geralmente classificadas como industriais, provenientes de usinas que produzem exclusivamente açúcar, etanol ou que atuam de forma integrada, ou de moendas artesanais, como é o caso das garapeiras.

No processo industrial, após a colheita, a cana é cortada em pedaços e transportada até as usinas de processamento. A colheita ocorre manual ou mecanicamente, geralmente a cada seis meses. Após a chegada à usina, a cana é descarregada nos pátios de armazenagem ou diretamente nas mesas alimentadoras. Em seguida, passa por um processo de lavagem e é conduzida por esteiras rolantes até os picadores e desfibradores. A extração do caldo ocorre por meio de rolos de moenda que exercem intensa pressão sobre a cana, sendo possível extrair cerca de 96% do caldo, destinado à produção de açúcar (MACHADO, 2016).

O bagaço excedente é então direcionado a pátios de estocagem. Como a indústria sucroenergética é sazonal, o fornecimento contínuo de bagaço para fins industriais, como a produção de vapor e energia elétrica, exige a formação de estoques reguladores, especialmente

para o período de entressafra. No entanto, essa estocagem apresenta desafios: o bagaço úmido retém entre 2 e 3% de açúcar residual, o que, aliado ao alto teor de umidade, favorece a fermentação microbiana, um processo exotérmico que leva à deterioração da biomassa e altera suas propriedades. Essa deterioração é causada, principalmente, por fungos da classe *Basidiomycota*, que atuam de diferentes formas: realizando a decomposição de polissacarídeos como celulose e hemicelulose; e àqueles que degradam também a lignina (SANTOS et al., 2011).

Por outro lado, as garapeiras, podem ser classificadas como, estabelecimentos de pequeno porte voltados à produção artesanal de caldo de cana. O pequeno produtor realiza todas as etapas de forma manual: colheita, limpeza, moagem e preparação da cana *in natura* (PRADO et al., 2010). O bagaço gerado nesses locais resulta de uma única etapa de prensagem, menos agressiva que a extração industrial, o que mantém uma maior umidade e concentração de açúcares residuais e fibras solúveis no resíduo. Essas características tornam o bagaço mais propenso à fermentação e à degradação microbiana.

4.5 Avaliação do uso do bagaço de cana como agente de *bulking*

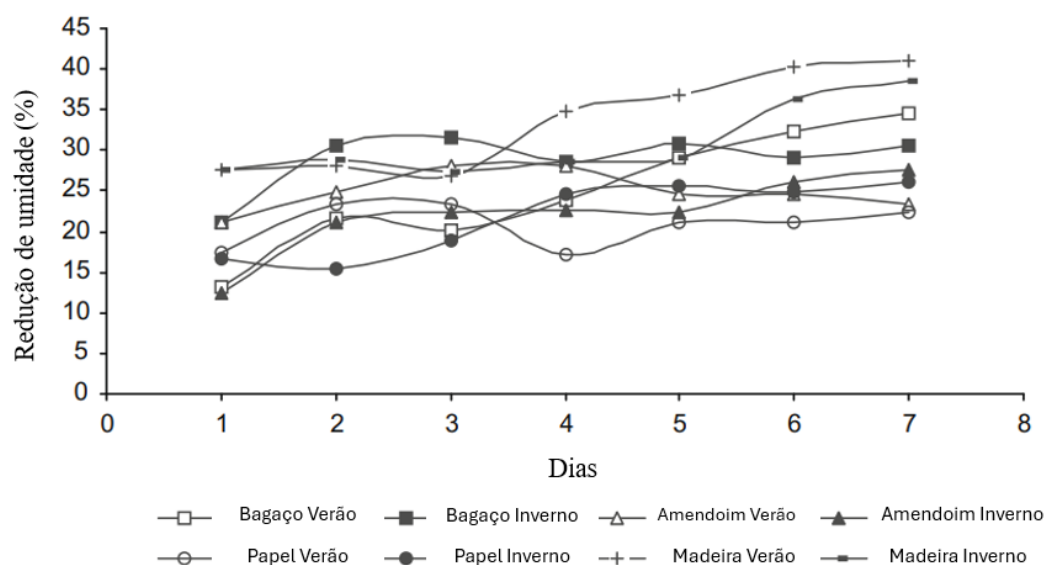
Apesar dos resultados obtidos neste trabalho não terem sido totalmente satisfatórios, é importante destacar que o bagaço de cana-de-açúcar apresenta características favoráveis para sua utilização como agente de *bulking*. Esse material contribui para o aumento da porosidade do substrato e atua como uma fonte relevante de carbono em função de seu elevado teor de carboidratos. Além disso, fornece suporte estrutural, criando espaços livres entre as partículas e aumenta o pH da matriz compostada, favorecendo a atividade microbiana (OVIEDO-OCANA et al., 2015; IQBAL 2010).

A literatura destaca que o uso de agentes de *bulking* é uma estratégia amplamente adotada para controlar a umidade, melhorar a aeração e estabilizar o pH durante processos biológicos, como a compostagem e a biossecagem. De acordo com Iqbal (2010), o bagaço de cana apresentou alta capacidade na redução da umidade, ficando atrás apenas da madeira, que é o agente de *bulking* mais usado. O material também contribui para o aumento do espaço livre de ar e para a diminuição da densidade aparente e da densidade de partículas do substrato. O estudo revelou, ainda, que o desempenho do bagaço foi proporcional à sua adição na mistura, sendo a proporção de 40% aquela que proporcionou os melhores resultados, tanto no verão quanto no inverno.

De acordo com os dados apresentados na Figura 10, referentes à redução de umidade ao longo de sete dias, observa-se que o bagaço de cana de açúcar apresentou desempenho

satisfatório no controle da umidade, tanto no verão quanto no inverno. No verão, nota-se que houve uma redução de umidade de aproximadamente 19 pontos percentuais, partindo de cerca de 13% no início do experimento e atingindo valores próximos a 32% ao final do período. Já no inverno, a redução foi ligeiramente inferior, em torno de 6 pontos percentuais, com valores iniciais de aproximadamente 22% e finais próximos de 28%, entretanto, atingiu picos de redução de aproximadamente 33%.

Figura 10 - Redução de umidade ao longo de sete dias



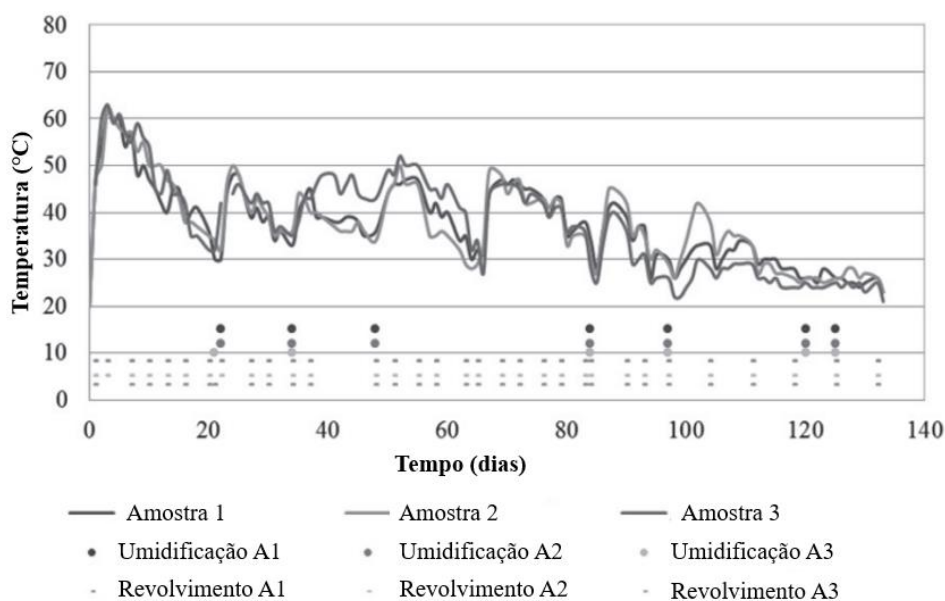
Fonte; Adaptado de IQBAL (2010)

Características semelhantes foram observadas nos estudos de Oviedo-Ocana et al. (2015). Os autores compararam o efeito do acréscimo de bagaço de cana e grama estrela como agentes de bulking em processos de compostagem de resíduos sólidos municipais. O processo foi estabelecido em pilhas, composta por 78% bioresíduo e 22% de bagaço de cana de açúcar, sendo testado em triplicata. Para manter a umidade em até 40%, foi adotada a metodologia de umedecer as pilhas com água, distribuída de maneira uniforme durante o processo. Adicionalmente, realizaram-se revolvimentos do leito, quando as pilhas atingiram temperaturas de 65 °C ou superiores, com o objetivo de evitar a compactação do material e garantir a homogeneização (OVIEDO-OCANA et al.; 2015).

O bagaço apresentou resultados positivos nos estudos. De maneira geral, as temperaturas máximas foram atingidas mais rapidamente e com menor duração na fase termofílica (acima de 45°C) quando comparado ao método sem o acréscimo de materiais de estruturantes. Na Figura 11, é possível observar o gráfico que mostra o comportamento da temperatura ao longo dos dias

de experimento, apresentando oscilações contínuas, que, segundo os autores, se devem a presença de compostos difíceis de degradar, que retardam ou aceleram o processo sempre que há uma homegeinização ou umidificação do leito. Na etapa inicial do processo apresentou uma redução de umidade de 70,8% para 65,7% sem afetar significativamente o pH do substrato sendo 5,67 na amostra de controle e 5,12 na amostra com o bagaço (OVIEDO-OCANA et al.; 2015)

Figura 11 - Comportamento da temperatura durante o experimento



Fonte; Adaptado de OVIEDO-OCANA et al. (2015)

Segundos os autores, o acréscimo de agentes de bulking foi eficaz para acelerar a degradação dos materiais orgânicos na etapa inicial do processo de compostagem, reduzindo o tempo necessário para alcançar temperaturas para a fase termofílica e diminuindo a duração das fases mesofílica e termofílica. Além disso, a presença desses materiais de estruturação melhorou a qualidade dos produtos obtidos resultando em melhores teores de carbono total, aumento no teor de cinzas, densidade aparente, além de incremento capacidade de retenção de água.

Dessa forma, embora os resultados específicos deste trabalho não tenham atingido os parâmetros esperados, os dados corroboram a viabilidade do bagaço de cana-de-açúcar como agente de bulking, principalmente no que se refere à sua capacidade de absorção de umidade, melhoria da aeração e redução da densidade da matriz orgânica. Além disso, trata-se de um resíduo amplamente disponível e de baixo custo, o que reforça seu potencial para aplicações em processos de compostagem, biossecagem e secagem de resíduos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do processo de biossecagem do bagaço de cana-de-açúcar, visando à redução da umidade da biomassa. Embora os resultados obtidos não tenham atingido os comportamentos esperados, com base na literatura consultada, o estudo proporcionou importantes aprendizados sobre o comportamento do material e os desafios operacionais envolvidos.

Esses resultados evidenciaram não apenas a diferença de desempenho entre o sistema aplicado neste estudo e aqueles descritos na literatura, mas também a necessidade de ajustes no projeto experimental e nas condições operacionais para alcançar resultados compatíveis com os relatados em pesquisas anteriores.

Diante das análises apresentadas, conclui-se que o sistema operado neste estudo não proporcionou as condições ideais para a ocorrência da biossecagem. Entre os possíveis fatores que limitaram o desempenho do processo destacam-se: a baixa umidade inicial, a possível insuficiência de oxigenação, a ausência de um inóculo ativo, e condições ambientais externas pouco favoráveis. Esse cenário evidencia a importância do controle rigoroso de variáveis operacionais para viabilizar a biossecagem de forma eficiente.

Para futuros estudos, recomenda-se a investigação de estratégias que visem otimizar as condições operacionais da biossecagem do bagaço de cana, buscando aumentar sua eficiência. Entre essas estratégias, destaca-se a realização de pré-tratamentos na biomassa, que podem contribuir para a redução do teor de umidade e facilitar a ação microbiana. Além disso, sugere-se o aumento do fluxo de ar no sistema, o que melhora a oxigenação e a remoção do vapor gerado, promovendo um ambiente aeróbico favorável ao processo. A intensificação da frequência de homogeneização do leito também é recomendada, uma vez que auxilia na distribuição uniforme da umidade e temperatura, evitando pontos frios ou saturados. Por fim, a redução da carga de biomassa no leito pode favorecer a penetração do ar e diminuir a resistência à transferência de massa e calor, resultando em um processo mais eficiente.

Além disso, sugere-se a continuidade das avaliações sobre o uso do bagaço de cana-de-açúcar como agente de bulking em processos de biossecagem, visando à redução da umidade de resíduos orgânicos com alto teor de umidade (como o lodo de esgoto) e à melhoria das características físicas da matriz. Os resultados obtidos até o momento, evidenciaram que o bagaço de cana apresenta características favoráveis para essa aplicação. Ressalta-se, ainda, que se trata de um resíduo de fácil obtenção, abundante na indústria sucroenergética e de baixo custo, o que reforça sua viabilidade técnica, econômica e ambiental.

REFERÊNCIAS

ADANI, Fabrizio; BAIDO, Diego; CALCATERRA, Enrico; *et al.* The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 3, p. 173–179, 2002.

ADANI, Fabrizio; LOZZI, Paolo; GENEVINI, Pierluigi. Determination of biological stability by oxygen uptake on municipal solid waste and derived products. **Compost Science & Utilization**, v. 9, n. 2, p. 163-178, 2001.

ADANI, Fabrizio; TAMBONE, Fulvia; GOTTI, Andrea. Biostabilization of municipal solid waste. **Waste management**, v. 24, n. 8, p. 775-783, 2004.

BIAN, Bo; SHEN, Yue; HU, Xiuren; *et al.* Reduction of sludge by a biodrying process: Parameter optimization and mechanism. **Chemosphere**, v. 248, p. 125970, 2020.

BILGIN, Melayib; AND TULUN, Şevket. Biodrying for municipal solid waste: volume and weight reduction. **Environmental Technology**, v. 36, n. 13, p. 1691–1697, 2015.

CAI, Lu; GAO, Ding; CHEN, Tong-Bin; *et al.* Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying. **Bioresource Technology**, v. 117, p. 13–19, 2012.

CAI, Lu et al. Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge. **Water Research**, v. 90, p. 44-51, 2016.

CONAB. *Boletim da safra de cana-de-açúcar: 4º levantamento 2023/24*. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cana-de-acucar/arquivos-boletins/4o-levantamento-safra-2023-24/boletim-cana-de-acucar-4o-levantamento-2023-24/view>. Acesso em: 20 abr. 2025.

Contreras-Cisneros, R.M.;Orozco-Álvarez, C.; Piña-Guzmán, A.B.; Ballesteros-Vásquez, L.C.; Molina-Escobar, L.; Alcántara-García, S.S.; Robles-Martínez, F. The Relationship of Moisture and Temperature to the Concentration of O₂ and CO₂ during Biodrying in Semi-Static Piles. *Processes* 2021, 9, 520.

CORTEZ, L. & MAGALHÃES, P.(1992). Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. IN: Revista Brasileira de Energia, Vol.2, n. 2, 1992.

CHOI, H.L.; Richard ,T.L.; AND AHN, H.K. Composting High Moisture Materials: Biodrying Poultry Manure in a Sequentially Fed Reactor. **Compost Science & Utilization**, v. 9, n. 4, p. 303–311, 2001.

DOS SANTOS, W. R. et al. Uso de concentrador solar para secagem de bagaço de cana-de-açúcar. 2020.

EMBRAPA. Qualidade de matéria-prima. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de->

[informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/gestao-industrial/qualidade-de-materia-prima](#). Acesso em: 24 abr. 2025.

FREI, Ken M.; Cameron ,David; AND STUART, Paul R. Novel Drying Process Using Forced Aeration Through a Porous Biomass Matrix. **Drying Technology**, v. 22, n. 5, p. 1191–1215, 2004.

FURTADO, A. D. Utilização dos subprodutos da cana-de-açúcar na alimentação animal – Módulo VI Curso de Especialização em Gestão na Indústria Sucroalcooleira, 1. ed. Campina Grande - PB: Centro de Tecnologia e Recursos Naturais – Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, 2010. 83 p. (Apostila apresentação forma slides)

GEBBIE, Leigh; DAM, Tuan Tu; AINSCOUGH, Rebecca; *et al.* A snapshot of microbial diversity and function in an undisturbed sugarcane bagasse pile. **BMC Biotechnology**, v. 20, n. 1, p. 12, 2020.

GENEVINI, Pierluigi; Adani ,Fabrizio; AND VILLA, Caterina. Rice hull degradation by co-composting with dairy cattle slurry. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 43, n. 1, p. 135–147, 1997.

GONZÁLEZ, Daniel et al. Filling in sewage sludge biodrying gaps: Greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions. **Bioresource technology**, v. 291, p. 121857, 2019.

GRAEBIN, Grasielli Orso. **Secagem do bagaço de cana-de-açúcar e estudo da sua aplicação na remoção de metal pesado.**

GURGEL, MN do A. et al. Gerenciamento, tratamento e disposição de resíduos na cana-de-açúcar. 2024.

HAO, Zongdi; YANG, Benqin; JAHNG, Deokjin. Combustion characteristics of biodried sewage sludge. **Waste Management**, v. 72, p. 296-305, 2018.

HE, Pinjing; Zhao ,Ling; Zheng ,Wei; *et al.* Energy Balance of a Biodrying Process for Organic Wastes of High Moisture Content: A Review. **Drying Technology**, v. 31, n. 2, p. 132–145, 2013.

HE, Pinjing; Zhao ,Ling; Zheng ,Wei; *et al.* Energy Balance of a Biodrying Process for Organic Wastes of High Moisture Content: A Review. **Drying Technology**, v. 31, n. 2, p. 132–145, 2013.

IQBAL, Muhammad Khalid; SHAFIQ, Tahira; AHMED, Khurshed. Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 6, p. 1913–1919, 2010.

KUDRA, Tadeusz. Energy aspects in drying. **Drying technology**, v. 22, n. 5, p. 917-932, 2004.

MACHADO, Simone Silva. Tecnologia da fabricação do açúcar. 2016.

MAIA, Gustavo D.; HORTA, Antônio C. L.; FELIZARDO, Marcos P. From the conventional to the intermittent biodrying of orange solid waste biomass. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 188, p. 109361, 2023.

MARTINS, Fernanda Pereira; NETO, Juan Canellas Bosch; SILVA, Alex Júnior Oliveira; *et al.* Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, p. 0600–0607i, 2020.

MCCABE, W. SMITH, J.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 5a ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991. 1130 p

MENDES, Cláudia Rodrigues. **Métodos inovadores para a bio-secagem do CDR produzido na linha de processo da unidade de Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) – Caso de estudo na VALNOR SA.** masterThesis, 2014. Disponível em: <<https://run.unl.pt/handle/10362/13953>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

NAVAEE-ARDEH, Shahram; BERTRAND, François; STUART, Paul R. Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludges. **Drying Technology**, v. 24, n. 7, p. 863-878, 2006.

NEGOI, Ramona Mihaela *et al.* Biodrying of Romanian municipal solid waste: An analysis of its viability. **UPB Sci. Bull. Ser. C**, v. 71, n. 4, 2009.

OVIEDO-OCAÑA, Ricardo; MARMOLEJO-REBELLÓN, Luis Fernando; TORRES-LOZADA, Patricia; *et al.* Effect of adding bulking materials over the composting process of municipal solid biowastes. **Chilean journal of agricultural research**, v. 75, n. 4, p. 472–480, 2015.

PRADO, Sonia de Paulo Toledo; BERGAMINI, Alzira Maria Morato; RIBEIRO, Eliana Guimarães Abeid; *et al.* Avaliação do perfil microbiológico e microscópico do caldo de cana in natura comercializado por ambulantes. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 69, n. 1, p. 55–61, 2010.

RADA, Elena Cristina *et al.* Bio-drying role in changeable scenarios of Romanian MSW management. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, p. 271-279, 2010.

RADA, Elena Cristina *et al.* Lower heating value dynamics during municipal solid waste bio-drying. **Environmental technology**, v. 28, n. 4, p. 463-469, 2007.

RATTANACHOMSRI, Ukrit; KANOKRATANA, Pattanop; EURWILAICHITR, Lily; *et al.* Culture-independent phylogenetic analysis of the microbial community in industrial sugarcane bagasse feedstock piles. **Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry**, v. 75, n. 2, p. 232–239, 2011.

ROCHA, G. J. M.; GONÇALVES, A. R.; OLIVEIRA, B. R.; *et al.* Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production. **Industrial Crops and Products**, v. 35, n. 1, p. 274–279, 2012.

ROCHA, George Jackson de Moraes; NASCIMENTO, Viviane Marcos; GONÇALVES, Adilson Roberto; *et al.* Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental

and physical–chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52–58, 2015.

ROY, G. R.; JASMIN, S.; STUART, Paul R. Technical Modeling of a batch Biodrying Reactor for Pulp and Paper Mill Sludge. *In*: Prague, Czech Republic: [s.n.], 2006. Disponível em: <<https://publications.polymtl.ca/22556/>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

SANJUÁN, R.; ANZALDO, J.; VARGAS, J.; *et al.* Morphological and Chemical Composition of Pith and Fibers from Mexican Sugarcane Bagasse. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 59, n. 6, p. 447–450, 2001.

SANTOS, Moacyr L. dos; LIMA, Omar J. de; NASSAR, Eduardo J.; *et al.* Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, v. 34, p. 507–511, 2011.

SHAO, Li-Ming; HE, Xiao; YANG, Na; *et al.* Biodrying of municipal solid waste under different ventilation modes: drying efficiency and aqueous pollution. **Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 30, n. 12, p. 1272–1280, 2012.

SOSA-ARNAO, Juan H.; AND NEBRA, Silvia A. Bagasse Dryer Role in the Energy Recovery of Water Tube Boilers. **Drying Technology**, v. 27, n. 4, p. 587–594, 2009.

SUGNI, Mara; CALCATERRA, Enrico; ADANI, Fabrizio. Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. **Bioresource Technology**, v. 96, n. 12, p. 1331–1337, 2005.

SUGNI, Mara; CALCATERRA, Enrico; ADANI, Fabrizio. Biostabilization–biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. **Bioresource technology**, v. 96, n. 12, p. 1331–1337, 2005.

SUN, J. X; SUN, X. F; ZHAO, H; *et al.* Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. **Polymer Degradation and Stability**, v. 84, n. 2, p. 331–339, 2004.

TAMBONE, F. *et al.* Effects of biodrying process on municipal solid waste properties. **Bioresource technology**, v. 102, n. 16, p. 7443–7450, 2011.

TEIXEIRA, Divino Eterno; COSTA, A. F.; SANTANA, Marcos Antonio Eduardo. Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores. **Scientia forestalis**, v. 52, n. 29-34, 1997.

TOM, Asha P.; PAWELS, Renu; HARIDAS, Ajit. Biodrying process: A sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. **Waste management**, v. 49, p. 64–72, 2016.

UNICA- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. Bioeletricidade. *[S.l.]*. UNICA, 2022. Disponível em: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>.

Vásquez, L.C.; Molina-Escobar, L.; Alcántara-García, S.S.; Robles-Martínez, F. The Relationship of Moisture and Temperature to the Concentration of O₂ and CO₂ during Biodrying in Semi-Static Piles. *Processes* 2021, 9, 520.

VELIS, C. A.; LONGHURST, P. J.; DREW, G. H.; *et al.* Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 11, p. 2747–2761, 2009.

VILLEGAS, Manuel; HUILIÑIR, Cesar. Biodrying of sewage sludge: Kinetics of volatile solids degradation under different initial moisture contents and air-flow rates. **Bioresource Technology**, v. 174, p. 33–41, 2014.

WINKLER, M. -K. H.; BENNENBROEK, M. H.; HORSTINK, F. H.; *et al.* The biodrying concept: An innovative technology creating energy from sewage sludge. **Bioresource Technology**, v. 147, p. 124–129, 2013.

WRIGHT, Peter. Biodrying Manure on a Dairy Farm. *In*: [s.l.]: Water Environment Federation, 2000, p. 404–419. Disponível em: <<https://www.accesswater.org/publications/proceedings/-287171/biodrying-manure-on-a-dairy-farm>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

ZAWADZKA, Agnieszka; KRZYSZEK, Liliana; LEDAKOWICZ, Stanisław. Autothermal biodrying of municipal solid waste with high moisture content. **Chemical Papers**, v. 64, n. 2, p. 265–268, 2010.

ZHAO, Ling; GU, Wei-Mei; HE, Pin-Jing; *et al.* Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge. **Water Research**, v. 44, n. 20, p. 6144–6152, 2010.

ZHANG, Difang; LUO, Wenhai; YUAN, Jing; *et al.* Co-biodrying of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: Role of mixing proportions. **Waste Management**, v. 77, p. 333–340, 2018.

Soluções para geração de eletricidade. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/solucoes-para-geracao-de-eletricidade/>>. Acesso em: 26 jun. 2025.

APÊNDICE A – Base de dados de biossecagem.

Tabela A1- Base de dados de biossecagem para o experimento de 72 horas.

Tempo (h)	Temperatura3 (°C)	Temperatura2 (°C)	Temperatura1 (°C)	Temperatura4 (°C)	Temperatura5 (°C)	TemperaturaAmb (°C)	Massa1 (kg)	Massa2 (kg)	Massa3 (kg)	Perda de Massa (kg)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,502	20,575	21,02	19,951	19,773	21,065	21	0,04	-0,02	-0,19	-0,17
4,505	20,575	21,02	19,951	19,773	21,065	21	0,04	-0,02	-0,19	-0,17
9,009	21,772	22,391	20,664	20,174	20,53	20,3	0,03	-0,02	-0,2	-0,19
13,512	21,99	22,525	20,619	20,04	19,55	19,5	0,03	-0,02	-0,2	-0,19
13,515	21,99	22,525	20,619	20,04	19,55	19,5	0,03	-0,02	-0,19	-0,18
18,021	21,51	22,124	20,04	19,327	18,793	18,7	0,03	-0,02	-0,2	-0,19
22,525	21,109	21,685	19,862	19,283	19,995	19,9	0,03	-0,01	-0,2	-0,18
22,528	21,065	21,685	19,862	19,283	19,995	19,9	0,03	-0,01	-0,2	-0,18
27,029	21,51	22,035	20,575	20,53	21,99	21,6	0,03	0	-0,19	-0,16
31,532	21,99	22,48	21,109	20,975	21,51	21,2	0,02	0	-0,19	-0,17
36,036	22,346	22,97	21,154	20,664	20,975	20,6	0,02	0	-0,2	-0,18
36,039	22,346	22,97	21,154	20,619	20,975	20,6	0,02	0	-0,2	-0,18
40,54	22,213	22,97	21,02	20,174	20,085	19,9	0,02	0	-0,2	-0,18
45,042	21,99	22,614	20,619	20,04	20,441	20,4	0,02	0	-0,2	-0,18
49,545	22,124	22,97	21,332	20,753	22,48	22,3	0,02	0	-0,2	-0,18
54,049	23,015	23,772	22,035	21,597	22,48	22	0,02	0,01	-0,2	-0,17
58,551	23,816	24,44	22,48	21,946	21,772	21,4	0,02	0,01	-0,2	-0,17
63,052	23,995	24,574	22,346	21,51	21,02	20,7	0,02	0,01	-0,2	-0,17
67,556	24,128	24,44	22,035	21,465	20,797	20,6	0,02	0,01	-0,21	-0,18
72,062	24,44	24,93	22,48	21,99	22,703	22,8	0,01	0,02	-0,21	-0,18

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela A2- Base de dados de biossecagem para o experimento de 144 horas

Tempo (h)	Temperatura3 (°C)	Temperatura2 (°C)	Temperatura1 (°C)	Temperatura4 (°C)	Temperatura5 (°C)	Temperatura Amb (°C)	Massa1 (kg)	Massa2 (kg)	Massa3 (kg)	Perda de Massa (kg)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,696	21,198	22,257	22,881	20,575	22,525	21,9	-0,03	0,02	0	-0,01
7,394	20,04	21,02	20,797	19,55	21,51	21,2	-0,04	0,02	0	-0,02
11,09	19,06	20,04	19,55	18,525	20,53	20,5	-0,04	0,01	0	-0,03
14,784	18,169	19,015	18,57	17,6	19,461	19,7	-0,04	0,01	-0,01	-0,04
18,48	17,6	18,57	17,6	17,021	19,06	19,5	-0,05	0	-0,01	-0,06
22,173	18,303	19,06	17,422	18,036	20,085	20,7	-0,05	0	-0,01	-0,06
25,869	19,906	20,485	17,644	19,595	21,903	22,2	-0,05	0	-0,01	-0,06
29,563	19,595	20,307	17,993	19,372	21,554	21,7	-0,06	0	-0,01	-0,07
33,259	19,06	19,639	17,687	18,57	20,797	21,1	-0,06	-0,01	-0,02	-0,09
36,953	18,347	19,105	17,11	17,993	19,995	20,3	-0,07	-0,01	-0,02	-0,1
40,649	17,644	18,525	16,62	17,199	19,194	19,6	-0,07	-0,02	-0,03	-0,12
44,343	17,993	18,57	16,175	17,6	19,55	20,4	-0,07	-0,02	-0,03	-0,12
48,04	19,149	19,55	16,62	19,06	21,421	22,4	-0,08	-0,03	-0,03	-0,14
51,733	20,129	20,575	17,288	20,04	22,168	22,6	-0,08	-0,03	-0,03	-0,14
55,43	19,995	20,619	17,905	19,595	21,946	22,1	-0,09	-0,03	-0,03	-0,15
59,124	19,505	20,04	17,862	19,105	21,02	21,5	-0,09	-0,03	-0,04	-0,16
62,82	18,57	19,55	17,6	18,258	20,396	20,7	-0,09	-0,04	-0,04	-0,17
66,514	18,125	18,971	16,798	17,687	19,995	20,4	-0,1	-0,04	-0,04	-0,18
70,211	18,793	19,461	16,665	18,57	20,619	21,3	-0,1	-0,05	-0,04	-0,19
73,905	19,55	20,129	17,11	19,505	21,554	22,1	-0,1	-0,05	-0,05	-0,2
77,602	19,327	20,04	17,288	19,015	21,154	21,4	-0,1	-0,06	-0,05	-0,21

(continuação)										
Tempo (h)	Temperatura3 (°C)	Temperatura2 (°C)	Temperatura1 (°C)	Temperatura4 (°C)	Temperatura5 (°C)	Temperatura Amb (°C)	Massa1 (kg)	Massa2 (kg)	Massa3 (kg)	Perda de Massa (kg)
81,296	18,303	19,06	16,976	17,993	20,04	20,3	-0,1	-0,06	-0,05	-0,21
84,993	17,466	18,125	16,175	17,021	18,971	19,3	-0,11	-0,07	-0,05	-0,23
88,687	16,665	17,155	15,506	15,996	17,905	18,4	-0,11	-0,07	-0,06	-0,24
92,384	16,575	17,11	14,794	16,13	18,169	19	-0,11	-0,07	-0,06	-0,24
96,079	17,6	18,08	15,105	17,555	19,639	20,4	-0,12	-0,07	-0,06	-0,25
99,776	18,481	19,015	15,685	18,08	20,53	20,9	-0,12	-0,07	-0,07	-0,26
103,47	18,08	18,704	16,041	17,775	20,04	20,4	-0,12	-0,08	-0,07	-0,27
107,16	17,555	18,303	15,818	17,11	19,06	19,6	-0,12	-0,08	-0,07	-0,27
110,86	16,665	17,6	15,373	16,308	18,169	18,8	-0,13	-0,09	-0,07	-0,29
114,55	16,353	17,065	14,883	15,907	17,862	18,6	-0,13	-0,09	-0,08	-0,3
118,25	17,244	17,644	14,705	17,021	19,194	19,9	-0,13	-0,09	-0,08	-0,3
121,95	18,615	19,06	15,328	18,347	20,575	21,2	-0,14	-0,1	-0,08	-0,32
125,64	18,57	19,105	15,952	18,525	20,53	21	-0,14	-0,1	-0,08	-0,32
129,34	18,125	18,704	16,041	17,905	19,995	20,3	-0,14	-0,1	-0,09	-0,33
133,03	17,422	18,08	15,685	17,021	19,06	19,5	-0,14	-0,11	-0,08	-0,33
136,73	16,665	17,377	15,105	16,219	18,214	18,8	-0,15	-0,11	-0,09	-0,35
140,43	16,976	17,511	14,749	16,665	18,704	19,6	-0,15	-0,11	-0,09	-0,35
144,13	18,303	18,704	15,15	18,125	20,53	21,1	-0,15	-0,11	-0,09	-0,35

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela A3 - Base de dados de biossecagem para o experimento de 720 horas

Tempo (h)	Temperatura3 (°C)	Temperatura2 (°C)	Temperatura1 (°C)	Temperatura4 (°C)	Temperatura5 (°C)	Temperatura Amb (°C)	Massa1 (Kg)	Massa2 (Kg)	Massa3 (Kg)	Perda de Massa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18,464	23,772	24,529	23,104	22,48	21,332	21,2	-0,07	-0,01	0,03	-0,05
36,932	25,945	26,435	24,93	24,529	22,97	22,5	-0,09	-0,02	0,02	-0,09
55,4	27,905	28,84	26,88	26,39	24,975	25	-0,11	-0,03	0	-0,14
73,87	27,014	27,905	26,435	25,42	24,93	26,1	-0,13	-0,05	-0,01	-0,19
92,335	25,9	26,925	25,464	24,306	23,371	24,4	-0,14	-0,07	-0,03	-0,24
92,338	25,9	26,925	25,464	24,306	23,415	24,4	-0,14	-0,07	-0,03	-0,24
110,80	25,286	26,39	24,93	23,683	22,614	22,5	-0,15	-0,08	-0,04	-0,27
129,26	22,435	23,46	21,99	19,906	18,615	19,1	-0,34	-0,28	0,21	-0,41
129,27	22,435	23,46	21,99	19,906	18,615	19,1	-0,34	-0,28	0,21	-0,41
147,73	20,441	21,51	19,55	17,6	17,11	17,6	-0,34	-0,29	0,2	-0,43
166,19	18,347	19,55	17,862	16,219	18,08	18,5	-0,35	-0,29	0,19	-0,45
166,19	18,347	19,505	17,862	16,175	18,08	18,5	-0,35	-0,29	0,19	-0,45
184,66	17,862	18,971	17,993	16,085	17,065	17,6	-0,36	-0,3	0,18	-0,48
184,66	17,862	18,971	18,036	16,13	17,065	17,6	-0,36	-0,3	0,18	-0,48
203,12	17,818	19,06	18,392	16,62	17,687	18,5	-0,37	-0,3	0,18	-0,49
203,13	17,818	19,015	18,347	16,62	17,644	18,5	-0,37	-0,3	0,18	-0,49
221,54	18,347	19,55	19,238	17,862	20,931	21,3	-0,38	-0,3	0,17	-0,51
240,05	19,238	20,53	20,04	18,57	22,48	22,6	-0,39	-0,3	0,15	-0,54
258,52	20,53	21,554	20,753	19,728	20,04	21,1	0,68	-0,35	-0,93	-0,6
276,98	21,946	22,925	22,48	21,02	22,035	22,7	0,66	-0,36	-0,93	-0,63
295,44	23,46	24,44	23,995	22,614	23,95	25	0,64	-0,36	-0,95	-0,67
313,91	24,44	25,42	24,618	23,46	24,663	26,2	0,63	-0,37	-0,96	-0,7
313,91	24,44	25,42	24,663	23,46	24,707	26,2	0,63	-0,37	-0,96	-0,7
332,38	25,464	26,435	25,42	24,44	24,44	25,9	0,62	-0,38	-0,97	-0,73

(continuação)

Tempo (h)	Temperatura3 (°C)	Temperatura2 (°C)	Temperatura1 (°C)	Temperatura4 (°C)	Temperatura5 (°C)	Temperatura Amb (°C)	Massa1 (Kg)	Massa2 (Kg)	Massa3 (Kg)	Perda de Massa
350,84	26,479	27,415	26,435	25,42	24,44	25	0,61	-0,39	-0,99	-0,77
350,85	26,479	27,415	26,39	25,42	24,44	25	0,61	-0,4	-0,99	-0,78
369,31	25,42	26,479	25,42	24,44	22,97	23,7	2,11	-2,14	-0,87	-0,9
369,31	25,42	26,479	25,42	24,44	22,97	23,7	2,11	-2,14	-0,87	-0,9
387,77	24,93	25,507	24,262	23,46	22,97	24,1	2,09	-2,16	-0,89	-0,96
406,24	23,905	24,529	22,97	22,48	22,391	23,6	2,08	-2,17	-0,9	-0,99
424,71	23,505	24,395	22,97	21,99	20,931	22,2	2,07	-2,18	-0,91	-1,02
443,17	23,594	24,529	23,95	22,658	22,658	24	2,05	-2,19	-0,92	-1,06
461,64	23,95	24,93	24,084	22,614	22,97	24,4	2,04	-2,19	-0,93	-1,08
480,10	23,505	24,44	23,46	22,124	23,282	24,7	2,03	-2,21	-0,94	-1,12
498,57	23,46	24,44	23,326	21,99	22,035	23,3	2,02	-2,22	-0,95	-1,15
517,03	23,46	24,485	23,95	22,48	21,51	23,5	-1,01	-0,2	0,04	-1,17
535,50	23,995	24,975	24,485	22,97	23,638	25,2	-1,03	-0,21	0,02	-1,22
553,96	24,395	25,42	24,93	23,015	25,9	27,3	-1,04	-0,23	0,02	-1,25
572,43	24,975	26,301	25,242	23,505	22,97	24,3	-1,05	-0,25	0	-1,3
590,89	23,95	24,885	22,97	21,99	19,55	20,5	-1,06	-0,27	-0,02	-1,35
590,9	23,95	24,841	22,97	21,99	19,55	20,5	-1,06	-0,27	-0,02	-1,35
609,36	21,99	22,97	22,035	20,842	19,595	21,2	-0,58	0,03	-0,91	-1,46
627,83	21,51	22,48	21,728	20,53	22,569	24,2	-0,6	0,02	-0,91	-1,49
646,29	21,99	22,97	22,213	20,664	23,995	25,3	-0,61	0,01	-0,92	-1,52
664,76	23,46	24,44	24,217	22,48	23,683	24,9	-0,63	0,01	-0,92	-1,54
683,23	24,44	25,507	24,93	23,326	23,46	24,5	-0,64	-0,01	-0,92	-1,57
701,69	24,44	25,551	25,153	23,46	25,108	26,2	-0,66	-0,02	-0,94	-1,62
720,16	24,529	25,856	24,975	23,237	26,613	27,5	-0,67	-0,03	-0,95	-1,65

Fonte: Autoria própria (2025)

APÊNDICE B – Gráfico de perda de água em base úmida

Tabela B1 – Cinética de biossecagem em base úmida

Tempo (h)	Perda de massa (kg)	Massa de água	Umidade (%) (b.u.)
0	0	9	75,0%
18,456	-0,05	8,95	74,9%
36,921	-0,1	8,9	74,8%
55,383	-0,13	8,87	74,7%
73,85	-0,18	8,82	74,6%
92,313	-0,24	8,76	74,5%
110,781	-0,27	8,73	74,4%
129,246	-0,41	8,59	74,1%
129,246	-0,41	8,59	74,1%
147,709	-0,44	8,56	74,0%
166,174	-0,45	8,55	74,0%
166,174	-0,45	8,55	74,0%
184,639	-0,48	8,52	74,0%
184,639	-0,48	8,52	74,0%
203,105	-0,49	8,51	73,9%
203,105	-0,49	8,51	73,9%
221,571	-0,51	8,49	73,9%
240,033	-0,53	8,47	73,8%
258,501	-0,6	8,4	73,7%
276,964	-0,64	8,36	73,6%
295,433	-0,66	8,34	73,5%
313,9	-0,7	8,3	73,5%

313,9	-0,7	8,3	73,5%
332,364	-0,73	8,27	73,4%
350,828	-0,76	8,24	73,3%
369,291	-0,91	8,09	72,9%
387,756	-0,96	8,04	72,8%
406,221	-0,98	8,02	72,8%
424,689	-1,02	7,98	72,7%
443,158	-1,06	7,94	72,6%
461,627	-1,09	7,91	72,5%
480,092	-1,12	7,88	72,4%
480,092	-1,12	7,88	72,4%
498,557	-1,15	7,85	72,4%
517,019	-1,17	7,83	72,3%
535,484	-1,22	7,78	72,2%
553,949	-1,26	7,74	72,1%
572,414	-1,3	7,7	72,0%
572,414	-1,3	7,7	72,0%
590,884	-1,34	7,66	71,9%
609,35	-1,46	7,54	71,5%
627,814	-1,49	7,51	71,5%
646,28	-1,52	7,48	71,4%
646,28	-1,52	7,48	71,4%
664,745	-1,55	7,45	71,3%
664,745	-1,55	7,45	71,3%
683,21	-1,58	7,42	71,2%
701,676	-1,62	7,38	71,1%
720,142	-1,65	7,35	71,0%
