

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

Cauê Zenatti Fernandes de Freitas

OTIMIZAÇÃO DA BIOSSECAGEM PULSANTE DA
BIOMASSA DE LARANJA EM LEITO FIXO

São Carlos – SP

2026

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

OTIMIZAÇÃO DA BIOSSECAGEM PULSANTE DA
BIOMASSA DE LARANJA EM LEITO FIXO

Cauê Zenatti Fernandes de Freitas

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

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

São Carlos – SP

2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Cauê Zenatti Fernandes de Freitas. realizada em 06/07/2026:

Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

Universidade Federal de São Carlos

Prof. Luís Augusto M. Ruotolo

Universidade Federal de São Carlos

Prof. Thiago Faggion de Pádua

Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

Primeiramente, dedico este trabalho aos meus pais, Fernando e Delma, que desde o início da minha vida colocaram a minha educação como uma de suas maiores prioridades. Este momento representa o resultado de mais de duas décadas de dedicação, amor, apoio e esforços que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Dedico também aos meus familiares e amigos, que estiveram presentes ao longo dessa caminhada, oferecendo apoio, incentivo e carinho nos momentos mais importantes. Aos meus tios e tias, avós e avôs, primos e primas, deixo meu profundo agradecimento, pois cada um contribuiu, de alguma forma, para a construção da pessoa que sou hoje.

Agradeço à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) pela excelência no ensino e por todo o aprendizado proporcionado durante minha graduação, não apenas no âmbito acadêmico, mas também na formação cultural, ética e humana.

Por fim, deixo um agradecimento especial ao professor Gustavo, pelos ensinamentos, orientação e dedicação ao longo de todos esses anos de trabalho conjunto. Sua contribuição foi essencial para minha formação e para a realização deste trabalho.

RESUMO

O trabalho em questão avaliou a intermitência de fluxo de ar no processo de biossecagem e seus efeitos no desenvolvimento térmico e perda de umidade, em prol da valorização de biomassa industrial. Os experimentos foram conduzidos em uma unidade experimental de biossecagem em leito fixo, com monitoramento da temperatura do leito, vazão de ar, perda de massa. Os resultados demonstraram que o aumento da vazão de ar favoreceu a transferência de massa e a remoção de água do material, porém seu efeito esteve diretamente relacionado às condições iniciais do sistema, como o nível de atividade biológica. Observou-se que maiores fluxos de ar não necessariamente resultaram em maior eficiência de secagem, evidenciando a importância do equilíbrio entre transferência de calor, remoção de umidade e atividade microbiológica. Além disso, a análise dos ensaios indicou que a geração de calor biológico, mesmo com microrganismos nativos tem o potencial de sustentar termicamente o processo. Portanto, conclui-se que a biossecagem apresenta potencial como alternativa sustentável para o pré-tratamento do bagaço de laranja, contribuindo para a redução da umidade da biomassa e ampliando suas possibilidades de aplicação energética.

Palavras chaves: Biossecagem, bagaço de laranja, intermitência de fluxo de ar, valorização de biomassa

ABSTRACT

This study evaluated the effects of intermittent air flow on the thermal development and moisture removal during the biodrying process, aiming at the valorization of industrial biomass. The experiments were carried out in a fixed-bed bios drying experimental unit, with monitoring of bed temperature, air flow rate, and mass loss. The results demonstrated that increasing the air flow rate enhanced mass transfer and water removal from the material; however, its effect was directly related to the initial conditions of the system, such as the level of biological activity. It was observed that higher air flow rates did not necessarily result in greater drying efficiency, highlighting the importance of balancing heat transfer, moisture removal, and microbial activity. Furthermore, the analysis of the experiments indicated that biological heat generation, even from native microorganisms, has the potential to sustain the thermal conditions of the process. Therefore, it is concluded that bios drying presents potential as a sustainable alternative for the pre-treatment of orange bagasse, contributing to biomass moisture reduction and expanding its possibilities for energy applications.

Key words: Biodrying, orange bagasse, intermittent air flow, biomass valorization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta Interna de Energia, Brasil 2025

Figura 2: Fluxograma do processo industrial de produção de suco de laranja.

Figura 3: Composição Química do Bagaço de laranja

Figura 4: Ilustração esquemática de um processo de secagem convencional.

Figura 5: Equipamento de biossecagem: corpo (1); rotâmetro (2); sistema de medição de temperatura com cinco sondas (3); sistema de medição de massa (4); aquisição de dados (5).

Figura 6: Valores de temperatura máxima, média e mínima, para cada ensaio de biossecagem.

Figura 7: Valores de temperatura máxima, média e mínima, em relação a temperatura média do ambiente, para cada ensaio de biossecagem

Figura 8: Comportamento térmico do ensaio 9 durante a biossecagem

Figura 9: Comportamento térmico do ensaio 10 durante a biossecagem

Figura 10: Comportamento térmico dos 4 ensaios com as maiores temperaturas médias.

Figura 11: Superfícies de resposta para a temperatura em função do tempo de pulso e do intervalo de intermitência

Figura 12: Teor de umidade final (X_f) e da umidade retirada (ΔX) a cada ensaio

Figura 13: Cinética de secagem dos 10 ensaios realizados

Figura 14: Superfícies de resposta para a umidade em função do tempo de pulso e do intervalo de intermitência

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planejamento de ensaios de secagem.

Tabela 2: Composição elemental de cada ensaio.

Tabela 3: Valores de HHV, a partir das equações de Yin e Sheng.

Sumário

1. Introdução	10
2. Revisão Bibliográfica	14
2.1. Biomassa	14
2.1.1. Composição química	14
2.2. Exemplos de biomassa.....	17
2.3. Biomassa de bagaço de laranja	20
2.3.1. Agroindústria da Laranja.....	21
2.3.2. Particularidades da biomassa de laranja	24
2.4. Secagem	26
2.4.1. Conceitos fundamentais da secagem.....	26
2.4.2. Transferência de calor e massa na secagem	28
2.4.3. Métodos convencionais de secagem: Tambor Rotativo	30
2.5. Biossecagem	31
2.5.1. Conceitos fundamentais da biossecagem.....	32
2.5.2. Intermittência na biossecagem	33
3. Materiais e Métodos	34
3.1. Materiais.....	34
3.2. Equipamentos.....	35
3.3. Procedimento experimental	36
3.4. Procedimento de Cálculo	38
3.4.1. Análise elemental.....	38
3.4.2. Higher heat value – HHV	38
4. Resultados e Discussão	39
4.1. Perfil de temperatura	39
4.2. Superfície de resposta da temperatura – DCC	44
4.3. Teor de umidade final.....	47
4.4. Superfície de resposta das umidades finais – DCC	51
4.5. Análise elemental, teor de cinzas e HHV	53
5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	55
6. Referências bibliográficas	56
7. Apêndice.....	64

1. Introdução

A agricultura ocupa o segundo lugar na hierarquia global como fonte de biomassa para bioenergia, contribuindo com aproximadamente 10% do total^[42]. Essa contribuição é derivada principalmente de três fontes: culturas energéticas, subprodutos agrícolas e resíduos de atividades agrícolas, todos com potencial para produção de diversos tipos de biocombustíveis. Destacam-se duas categorias principais de culturas energéticas agrícolas: aquelas destinadas à produção de biocombustíveis líquidos, como culturas açucareiras e oleaginosas, e aquelas voltadas para biomassa sólida, como plantas lignocelulósicas e culturas de alto rendimento energético ^[34].

A economia brasileira mantém uma forte ligação com os setores primários de produção, o que justifica a relevância da biomassa derivada de insumos agrícolas na matriz energética nacional. Segundo dados do IBGE, em 2018, a geração de energia elétrica proveniente desses produtos alcançou 54,4 mil giga watt-hora (GWh), correspondendo a aproximadamente 9% do total gerado no país. Ao longo de um período de quatro anos (2015-2018), a média dessa contribuição foi de 8,9%. Essas biomassas são originárias tanto de cultivos voltados para a produção de matéria orgânica destinada à energia quanto de subprodutos de diversas cadeias de produção agrícola^[17].

Com uma produção anual de laranja em torno de 18 milhões de toneladas, o Brasil se destaca como um dos principais produtores e exportadores de suco de laranja, sendo responsável por aproximadamente 53% da produção global e por 80% do comércio internacional desse produto^[40]. Na produção de suco de laranja, apenas aproximadamente metade do peso total da laranja fresca é transformada em suco. Os subprodutos são obtidos após duas prensagens, resultando em um resíduo com umidade em torno de 70% em base úmida, e que podem ser considerados como biomassa de laranja ^[15]. A umidade presente no bagaço de laranja é determinante na sua viabilidade para uma série de aplicações com vistas à sua valorização e uso sustentável, tais como adubo, ração animal, fonte de energia através da queima, na produção de etanol 2G e na produção de enzimas^[31]. Portanto, a secagem do bagaço é de fundamental importância para seu armazenamento, transporte e processamento de forma a viabilizar sua futura utilização em quaisquer dessas operações.

A seleção de técnicas e equipamentos adequados para as operações de secagem depende das características específicas do material a ser processado, do resultado desejado e dos custos envolvidos. A secagem é um processo energeticamente importante, consumindo de 20 a 25% da energia usada na indústria de processamento de alimentos^[27].

Perazzini^[35] estudou a cinética de secagem de resíduos sólidos provenientes da produção de suco de limão utilizando modelos semiempíricos e redes neurais empregando temperaturas entre 110°C e 170°C, exigindo um robusto sistema de aquecimento do ar de secagem. Em outro trabalho, Perazzini et al^[36], modelaram e analisaram os custos da secagem de resíduos cítricos como biomassa em secador rotativo empregando temperaturas de 70 a 140°C. Os autores concluíram que os custos totais do processo aumentaram com o aumento da temperatura e velocidade do ar de entrada, uma vez que o gasto energético é elevado para níveis de secagem mais elevados.

Há, portanto, evidente demanda no desenvolvimento de processos que tenham como objetivo a redução do consumo energético, dos custos de operação e a intensificação no processo de secagem que conduzam a operações energética e ecologicamente eficientes bem como economicamente atrativas.

Nesse contexto, o processo de biossecagem foi desenvolvido como uma alternativa de baixo consumo de energia para recuperar sólidos secos e biologicamente estabilizados de resíduos orgânicos^[26]. Ela pode ser compreendida como uma etapa intermediária do processo de compostagem. Enquanto a compostagem oxida toda a sua matéria orgânica disponível, a biossecagem consome apenas parte dessa matéria orgânica para a geração de calor, preservando o restante do resíduo. Segundo^[26], biossecagem é um processo de digestão e secagem aeróbica em dois estágios, que combina alta taxa digestão aeróbica termofílica e secagem com baixo consumo de energia. O gerenciamento eficiente do substrato, água, energia e ar – tanto para uso microbiano quanto para secagem – resulta em uma quantidade determinada de oxidação da matéria orgânica por bactérias termofílicas. A reação exotérmica de oxidação do substrato fornece energia para elevar a temperatura do reator a condições termofílicas (maiores que 43°C) aquecendo o ar de secagem e diminuindo a necessidade de fontes externas de energia.

Frei et al.^[20] estudaram o que foi por eles chamado de novo modelo de secagem utilizando aeração forçada através de uma matriz porosa de biomassa constituída de

resíduos da indústria de papel. Segundo os autores o processo de biossecagem tende a oferecer uma série de vantagens econômicas, como:

- economia de combustível devido ao aumento do valor calorífico do material seco, incluindo uma redução no combustível suplementar (tipicamente gás natural e / ou óleo) para a caldeira;
- redução ou mesmo eliminação da exigência de aterro para disposição do resíduo;
- redução nas emissões de gases de efeito estufa se a combustão de biomassa for considerada zero para emissões de CO₂;

Biossecadores têm sido aplicados com sucesso no tratamento de resíduos sólidos orgânicos, como a secagem de estrume em fazendas de gado leiteiro^[56], resíduos sólidos urbanos^[2; 6; 37; 38; 39; 43; 47; 49] e industriais^[8; 9; 20; 21; 23; 29; 30; 31; 33].

Pesquisas em biossecagem indicam que a tecnologia atual na construção, operação e aumento de escala necessita ser aprimorada. Maia et al.^[31] estudaram a biossecagem do bagaço de laranja empregando leito fixo comparando a operação convencional com dois modos de operação intermitentes. Os autores concluíram que apesar de evidências promissoras no emprego desse tipo de operação, a tecnologia da biossecagem ainda precisa ser mais bem estudada para garantir que a elevação de temperatura no leito provocada pela ação dos microrganismos não seja prejudicada pelo resfriamento evaporativo provocado pela passagem do ar seco pelo meio poroso constituinte do leito. Os autores empregaram como intermitência o aumento brusco da vazão de ar do sistema em intervalos fixos.

A secagem intermitente é uma técnica promissora que pode melhorar o desempenho da secagem, quando comparada à secagem estacionária. Uma secagem intermitente é composta por uma sucessão de ciclos, cada um deles constituído por um período de secagem ativa seguido de um período de têmpera^[54].

A secagem intermitente pode ser realizada controlando o fornecimento de energia térmica, o que pode ser conseguido variando a taxa de fluxo de ar, a temperatura do ar, a umidade ou a pressão operacional. Pode-se também variar o modo de entrada de energia (por exemplo, convecção, condução, radiação ou micro-ondas) para obter intermitência.

A forma mais comum de secagem intermitente disponível na literatura é a intermitência alcançada pela mudança das condições do ar de secagem^[11; 12; 13; 22]. Mais recentemente, a intermitência na entrada de calor foi aplicada com sucesso em métodos de secagem combinados, por exemplo, uso de micro-ondas, radiofrequência^[3; 7; 18; 19; 46] e ultrassom^[44].

Diferentes tipos de intermitência afetam a qualidade do produto e a eficiência energética à sua maneira. Portanto, a intermitência não deve ser escolhida arbitrariamente, mas sim selecionada com base na física envolvida no método de secagem. Caso contrário, a eficiência energética ideal esperada e a melhoria da qualidade do produto permanecerão inatingíveis. A intermitência deve ser selecionada com base na transferência de calor e massa envolvida no processo de secagem específico e nas propriedades do material do produto a ser seco^[27].

Dessa forma, com base nos registros da literatura até então, nenhum trabalho tratou a intermitência em processos de biossecagem utilizando pulsos de ar. Ainda que, Liu et al^[30] tenham empregado um tipo de intermitência na vazão de alimentação do biossecador, a secagem foi conduzida com um fluxo ininterrupto de ar e a intermitência estava no aumento súbito da vazão em intervalos fixos. Assim, o presente projeto visa aprimorar o processo de intermitência, removendo o fluxo de ar contínuo substituindo por uma série de pulsos de ar. O objetivo deste aprimoramento está na concepção de que eliminando o fluxo contínuo de ar, mas garantindo sua utilização em períodos específicos, o sistema possa se recuperar termicamente dos efeitos do resfriamento evaporativo e manter a temperatura elevada no leito durante a operação por mais tempo. Uma maior temperatura do leito por mais tempo implica numa maior energia para a remoção de água e, consequentemente, numa operação mais eficiente do biossecador.

Logo, o objetivo do presente projeto é analisar o impacto da adoção de pulsos de ar na intensificação do processo de biossecagem, especialmente no que se refere ao aumento e manutenção térmica no leito e na remoção de água do sistema. Para isso será empregado um planejamento composto central (CCD) adotando como variáveis o tempo de aplicação de cada pulso e o intervalo de tempo entre os pulsos. A biomassa será caracterizada quanto à sua granulometria, umidade inicial, umidade pós biossecagem e análise elemental. Em posse dos resultados das análises elementais, serão calculados o poder calorífico superior e índice de respiração do sistema.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Biomassa

Biomassa é definida como material biológico derivado de organismos vivos ou recentemente mortos, produzido direta ou indiretamente por meio da fotossíntese. Inclui madeira, resíduos, culturas energéticas e resíduos orgânicos, atuando como uma fonte renovável para a geração de calor, eletricidade e combustíveis^[25]. No contexto energético brasileiro, essa fonte assume papel de destaque. De acordo com o Balanço Energético Nacional^[17], elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a biomassa responde por aproximadamente 8,1% da geração de energia elétrica no país. Quando considerada a matriz energética total, sua participação é ainda mais expressiva, alcançando cerca de 25,3%, com destaque para fontes como biomassa de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal.

Esses valores são significativamente superiores à média global, estimada em aproximadamente 8,8%, evidenciando a relevância estratégica da biomassa no cenário energético nacional. Tal contexto posiciona o Brasil de forma favorável para atender à crescente demanda por energia de maneira mais sustentável, além de ampliar seu protagonismo no desenvolvimento de tecnologias associadas à biomassa e aos biocombustíveis.

2.1.1. Composição química

De forma geral a composição elemental de uma biomassa genérica pode ser dividida em 3 grupos, os majoritários ($> 1.0\%$), os minoritários ($0.1-1.0\%$) e os residuais ($<0.1\%$), em base seca (b.s.). Logo, em ordem decrescente, os elementos majoritários são C, O, H, N, Ca e K. Já os elementos minoritários incluem o Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl e o Na. Por fim, muitos elementos podem ser classificados como residuais, como exemplo temos o Mn e o Ti. Além disso, os elementos presentes na biomassa podem ser classificados quanto aos elementos da fase orgânica e os elementos da fase inorgânica (ash) e a fase fluida (umidade). Dessa maneira elementos como C, O, H, N e S são os mais comuns na formação das macromoléculas orgânicas do material, enquanto os outros 11 elementos

citados anteriormente ficam restritos a fase inorgânica, composta majoritariamente por óxidos, dióxidos e trióxidos^[55].

Um ponto que precisa ser salientado é que o termo biomassa pode ser referir a uma infinidade de fontes de material orgânico, cada uma com características elementares únicas. Logo, os mesmos podem ser divididos em grupos. Para realizar essa classificação foram consideradas a diversidades biológicas e fontes similares de origens^[49]. Com isso chegamos em 6 grupos, Wood and Woody biomass (WWB), Herbaceous and agricultural biomass (HAB), Animal biomass (AB), Animal and human biomass waste (AHBW), Contaminated biomass (CB), Biomass mixtures (BM). Além dos seis é possível realizar algumas subdivisões, a única que será levada em conta nesse trabalho é a do grupo das HAB, e ela terá três subgrupos, o de Grasses (HAG), Straws (HAS) e o Other residues (HAR)^[49].

2.1.1.1. Umidade

A umidade constitui um dos principais parâmetros na caracterização da biomassa, sendo geralmente expresso em base úmida e apresentando ampla faixa de variação, que pode se estender de aproximadamente 3% a valores superiores a 80%, como observado em algumas espécies de madeira in natura. De maneira geral, verifica-se uma tendência de redução do teor de umidade na seguinte ordem: WWB > HAG > HAR > CB > HAS > AB. No caso de resíduos agroindustriais, como o bagaço de laranja, os valores são tipicamente elevados, situando-se acima de 70% em base úmida^[15].

A umidade é um dos fatores mais críticos na avaliação e no aproveitamento da biomassa, pois exerce influência direta sobre diversas de suas propriedades físicas, químicas e energéticas. Entre os principais impactos, destacam-se a redução do poder calorífico efetivo, o comprometimento da estabilidade durante o armazenamento, favorecendo processos de degradação biológica e os desafios logísticos associados ao transporte.

Umidade elevada implicam aumento significativo de massa e volume, o que eleva custos operacionais e pode, em determinadas situações, inviabilizar o transporte por longas distâncias.

2.1.1.2. Cinzas

O teor de cinzas é outro parâmetro fundamental na caracterização da biomassa, sendo geralmente determinado em base seca após combustão em temperaturas na faixa de 550 a 600 °C. Esse parâmetro apresenta ampla variação, podendo oscilar de aproximadamente 0,1% até valores superiores a 40%, dependendo da origem e do tipo de biomassa. De maneira geral, observa-se que biomassas lenhosas tendem a apresentar menores teores de cinzas quando comparadas a resíduos agrícolas e agroindustriais, como palhas, gramíneas e bagaços, que incorporam maiores quantidades de nutrientes minerais durante seu crescimento. Em contrapartida, resíduos específicos, como lodo de esgoto e certos resíduos industriais, podem apresentar teores de cinzas significativamente elevados, refletindo maior concentração de componentes inorgânicos e possíveis contaminantes^[49].

A fração de cinzas corresponde ao resíduo inorgânico remanescente após a combustão completa da biomassa, sendo composta tanto por minerais originalmente presentes quanto por óxidos formados durante o processo térmico. Esse parâmetro exerce influência direta no aproveitamento energético da biomassa, uma vez que altos teores de cinzas estão associados à redução do poder calorífico e ao aumento de problemas operacionais, como incrustações, corrosão e formação de escórias em equipamentos térmicos^[49].

Apesar de sua relevância, a interpretação isolada desse parâmetro é limitada, sendo necessário analisá-lo em conjunto com a composição e a origem dos constituintes da biomassa para uma avaliação mais precisa de seu potencial energético e comportamento em processos de conversão^[49].

2.1.1.3. Materiais voláteis

O conteúdo de matéria volátil da biomassa, quando analisado em base seca, costuma se situar entre aproximadamente 48% e 86%, sendo um dos parâmetros que mais a diferenciam de outros combustíveis. Em geral, observa-se uma tendência de redução desse teor entre diferentes tipos de biomassa, seguindo a ordem HAG > WWB > HAB > HAS > HAR > CB > AB^[49].

Quando a biomassa é aquecida, a primeira etapa relevante não é a queima do carbono fixo, mas sim a liberação desses materiais voláteis. Esse processo, conhecido como

pirólise, gera uma mistura de gases e vapores — como hidrocarbonetos leves, CO, H₂ e compostos condensáveis — que se inflamam rapidamente na presença de oxigênio. Por isso, a combustão da biomassa tende a iniciar de forma mais rápida e com chama mais intensa em comparação a combustíveis com baixo teor de voláteis, como o carvão mineral^[49].

2.1.1.4. Carbonos fixos

O carbono fixo está diretamente ligado à etapa mais lenta e sustentada da combustão da biomassa. Diferente da matéria volátil, que queima rapidamente na fase gasosa, o carbono fixo corresponde à fração sólida rica em carbono que permanece após a liberação dos voláteis.

O teor de carbono fixo da biomassa, em base seca, costuma variar aproximadamente entre 1% e 38%, sendo, em geral, inferior ao observado em combustíveis fósseis sólidos. Existe também uma tendência de variação entre diferentes tipos de biomassa, seguindo a ordem: HAR > HAB > WWB > HAS > HAG > AB > CB. Em alguns casos específicos, como cascas de madeira e certos resíduos do tipo HAB, podem ser encontrados valores mais altos dentro da faixa típica da biomassa^[49].

2.2. Exemplos de biomassa

Conforme discutido, as diferentes origens e características da biomassa permitem sua classificação em distintos grupos, o que constitui uma abordagem fundamental para a compreensão de suas propriedades e aplicações. Essa sistematização é especialmente relevante diante da natureza intrinsecamente heterogênea desses materiais, possibilitando a identificação de similaridades e padrões de comportamento entre diferentes tipos de biomassa. Nesse contexto, destacam-se grupos de grande relevância, como as biomassas de madeira e lenha e aquelas derivadas da cana-de-açúcar, em função de sua expressiva participação na matriz energética mundial e, particularmente, na matriz energética brasileira.

2.2.1. Biomassa de madeira

A biomassa proveniente de lenha e madeira foi, por muitos séculos, a principal fonte de energia utilizada pela humanidade. Com o avanço da industrialização e a consolidação do mercado de combustíveis fósseis, esse recurso perdeu espaço na matriz energética global. Ainda assim, a lenha continua desempenhando um papel relevante e, atualmente, figura como a fonte de energia renovável mais utilizada no mundo.

Em 2010, a produção global de energia a partir da lenha foi da ordem de 30 EJ, enquanto o consumo total de energia da humanidade atingiu aproximadamente 541 EJ, o que corresponde a cerca de 6% da matriz energética mundial^[28]. Dados da Food and Agriculture Organization indicam que essa participação se manteve em torno desse valor, sendo que quase 60% de toda a biomassa destinada à geração de energia tem origem em madeira ou lenha.

Nos países de baixa renda, a lenha ainda é a principal fonte energética para atividades básicas, como a cocção de alimentos e o aquecimento doméstico. Já em países desenvolvidos, seu uso ocorre de forma mais técnica e integrada a cadeias agroindustrial, especialmente nos setores de papel e celulose. Nesses contextos, diversos subprodutos, como o licor negro e a casca de madeira, são aproveitados energeticamente por meio de processos de combustão, transformando essas indústrias em sistemas praticamente autossuficientes do ponto de vista energético, chegando até a venderem a energia excedente.

Essa relevância no cenário energético está diretamente associada às suas características físico-químicas, que influenciam seu comportamento em processos de conversão. Do ponto de vista composicional, a biomassa de madeira é classificada como uma biomassa lignocelulósica, sendo constituída majoritariamente por três frações estruturais: celulose, hemicelulose e lignina. E a proporção entre essas 3 estruturas vão influenciar as características caloríficas da biomassa, juntamente com outros valores como a umidade e o teor de cinzas. Valores esses, que na média, ficam em 20% e 4% respectivamente.

2.2.2. Biomassa de cana de açúcar

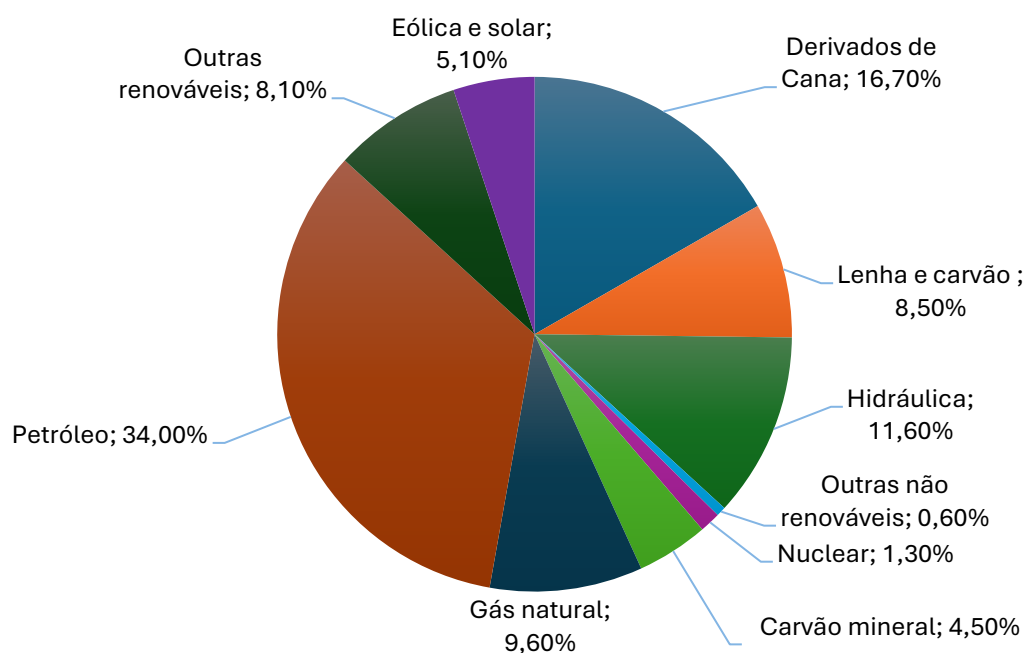
A biomassa de cana-de-açúcar possui uma relação histórica e estratégica com o Brasil, estando presente desde os primeiros ciclos econômicos do país, inicialmente nos engenhos coloniais, até sua consolidação atual em complexos agroindustriais altamente tecnificados, especialmente no estado de São Paulo. Ao longo desse percurso, a cana-de-açúcar deixou de ser apenas uma cultura voltada à produção de açúcar e passou a assumir papel central na matriz energética nacional, com destaque para a produção de etanol e o aproveitamento energético de seus resíduos, como o bagaço e a palha.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar a produção da safra 2025/2026 foi estimada em 663,4 milhões de toneladas de cana. Volume que impacta positivamente a matriz energética brasileira, no ano de 2025 O Ministério de Minas e Energia junto com a Empresa de Pesquisa Energética produziram o Balanço Energético Nacional que certificou a cana como a principal fonte de energia renovável do Brasil , sendo responsável por 16,7% da Oferta Interna de Energia (OIE)^[17].

Além da produção de etanol, a cadeia sucroenergética apresenta grande relevância devido à geração de resíduos com elevado potencial energético. O principal deles é o bagaço de cana-de-açúcar, subproduto resultante da moagem dos colmos para extração do caldo. Tradicionalmente utilizado como combustível nas próprias usinas, o bagaço é empregado em sistemas de cogeração para a produção simultânea de calor e eletricidade, contribuindo para a autossuficiência energética das unidades industriais e para a exportação de energia excedente para a rede elétrica nacional.

As características favoráveis da cana-de-açúcar, como elevada produtividade agrícola, ampla disponibilidade territorial e infraestrutura consolidada de produção e processamento, tornam essa cultura uma das mais importantes fontes de biomassa do Brasil. Dessa forma, a cana-de-açúcar desempenha papel fundamental na diversificação da matriz energética nacional, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o desenvolvimento de sistemas energéticos mais sustentáveis.

Figura 1: Oferta Interna de Energia, Brasil 2025



Fonte: Autoria própria, adaptado do Balanço energético Nacional 2025, EPE^[17].

Como ilustrado na figura 1, um caso de sucesso como o da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira evidencia a relevância da biomassa como uma alternativa essencial de fonte renovável de energia. Além de contribuir para a segurança energética do país, o aproveitamento de seus resíduos fortalece os princípios da economia circular, promovendo maior eficiência no uso dos recursos e agregando valor a subprodutos.

2.3. Biomassa de bagaço de laranja

Segundo o último relatório do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos^[51], a safra mundial de laranja 2024/25 foi estimada em 45,22 milhões de toneladas métricas. Apesar da redução observada nos últimos anos, considerando que a safra 2021/22 alcançou aproximadamente 50 milhões de toneladas, a laranja permanece como a cultura cítrica mais relevante do mundo. Nesse cenário, o Brasil se destaca como o maior produtor global, concentrando cerca de 34% do volume mundial de produção e aproximadamente 70% do mercado internacional de suco de laranja^[5].

Além da produção de suco, a citricultura apresenta elevado potencial de aproveitamento de subprodutos. Segundo a Embrapa, o processamento da laranja gera

materiais de alto valor agregado, como óleos essenciais, fibras, compostos para a indústria cosmética e fitoterápica. Paralelamente, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para ampliar o aproveitamento energético dos resíduos gerados nesse processo, especialmente o bagaço de laranja^[10]. Tradicionalmente utilizado como suplemento na alimentação bovina, esse resíduo vem sendo estudado como biomassa para geração de energia em caldeiras, representando uma alternativa mais nobre para o resíduo industrial.

2.3.1. Agroindústria da Laranja

A citricultura brasileira apresenta uma característica singular em relação a outras cadeias agrícolas: sua estrutura agroindustrial é fortemente concentrada geograficamente. O principal polo produtivo está localizado no interior do estado de São Paulo e no sul de Minas Gerais, regiões responsáveis por aproximadamente 83% da produção nacional de laranja^[5]. Essa concentração favorece a integração entre as etapas agrícola, industrial e logística da cadeia produtiva.

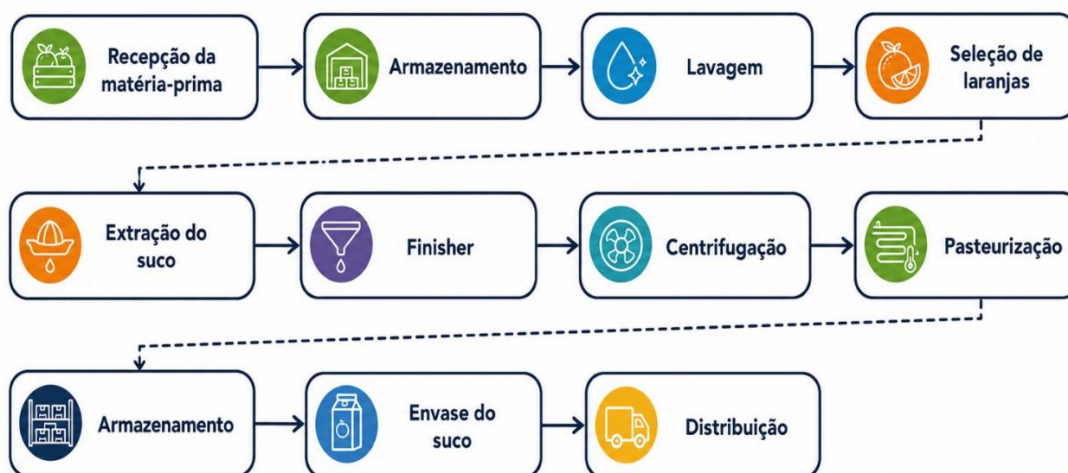
Além das lavouras, a região também abriga os principais parques industriais, de empresas como Cutrale e Citrosuco, responsáveis pelo processamento da fruta, especialmente para a produção de suco de laranja integral e concentrado. A proximidade entre as áreas produtoras e as unidades industriais reduz custos logísticos e aumenta a eficiência operacional.

A etapa final dessa cadeia de valor é sustentada por uma infraestrutura logística estratégica, composta principalmente pelas malhas rodoviária e ferroviária, responsáveis pelo escoamento da produção até o Porto de Santos. Nesse contexto, destacam-se os terminais de exportação das empresas Louis Dreyfus Commodities e Citrosuco, que desempenham papel central no comércio internacional do setor. Juntos, esses terminais movimentaram cerca de 1,974 milhão de toneladas de suco de laranja em 2025 (Companhia Docas do Estado de São Paulo – Codesp).

Nesse cenário, o processo industrial de transformação da laranja ganha destaque não apenas pela produção de suco, mas também pela geração de valor em todos os seus subprodutos. A Figura 2 apresenta o fluxograma adaptado do caminho principal do processo de Tocchini, Nisida e Martin (2025)^[51] pode-se resumir em 11 etapas de processamento, sendo eles, recepção da matéria prima, armazenamento, lavagem, seleção

das laranjas, extração do suco, finisher, centrifugação, pasteurização, tanque de armazenamento, envase do suco e armazenamento da distribuição.

Figura 2: Fluxograma do processo industrial de produção de suco de laranja.



Fonte: Autoria própria, adaptado de^[51].

2.3.1.1. Pré-processamento

A fase de pré-processamento é composta por quatro etapas principais. A primeira consiste na recepção da matéria-prima, durante a qual são realizadas a pesagem das frutas e análises iniciais de qualidade, como a determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix) e da acidez. Em seguida, as laranjas são encaminhadas para silos de armazenamento. Nessa etapa, o armazenamento ocorre sem refrigeração e, em condições normais de operação, não ultrapassa 48 horas^[51].

Posteriormente, as frutas entram na linha de produção e passam pelo processo de lavagem, que tem como objetivo remover impurezas e contaminantes presentes na superfície. Esse processo inclui um banho em água clorada, seguido por um enxágue com água limpa, além de uma etapa de escovação mecânica. Por fim, enquanto são transportadas por esteiras até as etapas principais do processamento, as laranjas passam por uma seleção visual, na qual são removidas frutas danificadas, deterioradas ou que não atendam aos padrões de qualidade estabelecidos^[51].

2.3.1.2. *Processamento*

Entrando na fase principal do processamento da laranja tem-se 4 etapas principais, a extrusão do suco, a fase de finisher, a centrifugação e a pasteurização.

De acordo com o Manual de Processamento de Suco de Laranja produzido pela Tetra Pak, no processo de extrusão o suco é removido da fruta por meio da aplicação de pressão mecânica em extratores específicos. Essa etapa é considerada uma das mais importantes de todo o processo produtivo, uma vez que influencia diretamente tanto o rendimento quanto a qualidade do suco obtido. Por isso diferentes técnicas de extração podem ser utilizadas, sendo elas a do tipo mandril e do tipo espremedor. Os dois tipos seguem o princípio de realizar uma extração mecânica, mudando apenas que a primeira é feita com a fruta inteira e a outra com ela cortada em dois hemisférios^[51].

Após a extração, o suco segue para as etapas de acabamento (finishing) e centrifugação. Essas operações têm como principal objetivo reduzir a concentração de sólidos insolúveis e ajustar o teor de polpa presente no produto. O finisher, geralmente do tipo pá, consiste em um cilindro rotativo equipado com peneiras, responsável por reter partículas maiores, como fragmentos de polpa, sementes e outros materiais provenientes da extração. Em seguida, o suco é encaminhado para a centrifugação, etapa que promove uma separação mais eficiente das partículas finas em suspensão, contribuindo para a clarificação do produto e permitindo o ajuste preciso do teor de polpa de acordo com as especificações de qualidade e os requisitos regulatórios^[51].

Por fim, o suco já clarificado entra na etapa de pasteurização. Essa etapa tem como foco aplicar um tratamento térmico para matar quais quer microrganismos que estejam presentes no suco, além de reduzir a atividade enzimática. Esse método aumenta o tempo de prateleira do produto e garante a segurança sanitária dos consumidores. Entretanto, o processo de pasteurização pode diminuir a qualidade do suco, por isso a técnica mais comum para a realização dessa pasteurização é a HTST(High Temperature and Short Time), esse processo garante altas temperatura por curtos períodos, sendo utilizados trocadores de calor de placas para isso^[51].

2.3.1.3. Armazenamento

As últimas etapas do processo consistem no envase, no armazenamento e na distribuição do suco.

Dentre essas a principal que será destacada nesse trabalho é o armazenamento. Essa etapa é crítica, pois será ela que manterá as características físico-químicas do produto e garantir a pasteurização do produto e sua qualidade final. Para garantir toda essa segurança, limpeza e temperatura são as variáveis principais, sendo a segunda mantida em torno de 4°C, o que promove um tempo de armazenagem de até 29 dias^[51].

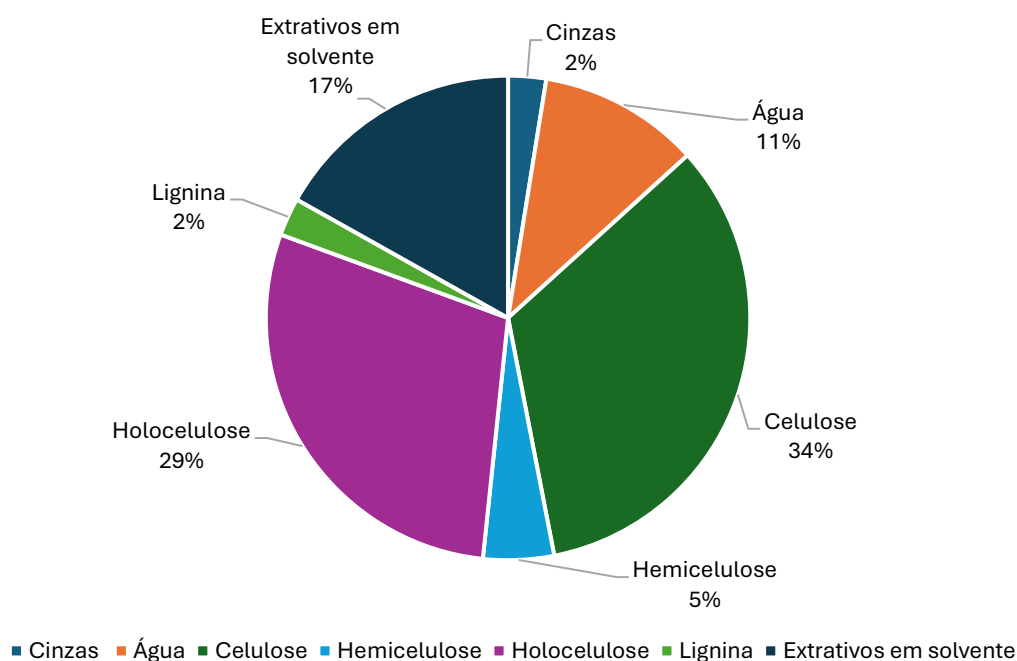
2.3.2. Particularidades da biomassa de laranja

Diferentemente de biomassas tradicionalmente utilizadas para fins energéticos, como a lenha e o bagaço de cana-de-açúcar, o bagaço de laranja é um resíduo oriundo do processamento de uma fruta cítrica. Essa característica confere ao material propriedades físico-químicas particulares, resultantes de sua elevada umidade, alto teor de matéria orgânica biodegradável e presença de compostos de alto valor agregado. Em função dessa composição singular, o bagaço de laranja apresenta potencial para diversas aplicações industriais, destacando-se a produção de ração animal, a utilização como matéria-prima para fertilizantes orgânicos e a extração de compostos de interesse comercial, como pectina, óleos essenciais e substâncias antioxidantes empregadas nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.

Do ponto de vista morfológico, a laranja é constituída por diferentes frações facilmente distinguíveis. A camada mais externa é denominada epicarpo ou flavedo, popularmente conhecida como casca, sendo rica em pigmentos carotenoides, vitaminas e óleos essenciais, especialmente o limoneno. Abaixo do epicarpo encontra-se o mesocarpo, também denominado albedo, uma estrutura esbranquiçada composta predominantemente por fibras, pectina, hemicelulose e compostos fenólicos. Já o endocarpo corresponde à porção interna e comestível do fruto, formada pelos gomos que armazenam o suco e abrigam as sementes. Essa distribuição heterogênea de componentes faz com que cada fração da laranja apresente potencial para aplicações específicas e agregação de valor ao resíduo gerado durante o processamento industrial^[51].

Em relação à sua composição química, estudos realizados por Ariane Tiemi et al. demonstram que o bagaço de laranja pode ser classificado como uma biomassa lignocelulósica, uma vez que apresenta em sua estrutura os três principais constituintes característicos dessa classe de materiais: celulose, hemicelulose e lignina. Embora o teor de lignina seja relativamente baixo quando comparado ao de outras biomassas, situando-se em torno de 2,9%, a presença desse componente, associada às quantidades significativas de celulose, holocelulose e hemicelulose, confere ao material características típicas de biomassas lignocelulósicas. Além disso, o elevado teor de carboidratos estruturais e compostos orgânicos torna o bagaço de laranja uma matéria-prima promissora tanto para processos fermentativos, etanol 2G, quanto para aplicações energéticas e de valorização de resíduos. A composição química média do material é apresentada na Figura 3:

Figura 3: Composição Química do Bagaço de laranja



Fonte: Autoria própria, adaptado de Ariane Tiemi et al. 2025^[48].

2.4. Secagem

A secagem é uma das operações unitárias mais antigas e amplamente utilizadas pela humanidade. Sua origem remonta às primeiras civilizações, que empregavam a secagem natural para a conservação de grãos, frutas e outros alimentos, utilizando a energia solar e a circulação natural do ar para remover a umidade dos produtos. Apesar de sua simplicidade, essa técnica apresentou elevada eficiência, baixo custo operacional e fácil aplicação, características que contribuíram para sua permanência ao longo dos séculos. No Brasil, por exemplo, a secagem natural foi amplamente empregada na produção de café durante os séculos XVIII e XIX, desempenhando papel fundamental na conservação e comercialização do produto.

Com o avanço científico e tecnológico ocorrido a partir do século XX, surgiram métodos de secagem mais sofisticados e eficientes. Entre os primeiros equipamentos desenvolvidos em escala industrial destacam-se os secadores de tambor rotativo, cuja utilização permitiu maior controle das condições operacionais e redução do tempo de processamento. Desde então, novas tecnologias foram sendo introduzidas com o objetivo de aumentar a eficiência da remoção de umidade e preservar as características físicas, químicas e sensoriais dos materiais processados. Dentre essas tecnologias podem ser citadas a secagem por micro-ondas, a secagem em leito fluidizado e a liofilização^[7].

Apesar da grande diversidade de equipamentos e técnicas disponíveis atualmente, os fundamentos do processo de secagem permanecem essencialmente os mesmos. A, secagem por métodos tradicionais de operação baseia-se na interação simultânea dos fenômenos de transferência de calor e transferência de massa, responsáveis pela remoção da umidade presente no material. O fornecimento de energia cria condições favoráveis para a migração da água do interior do sólido para sua superfície e, posteriormente, para o veículo de transporte de umidade.

2.4.1. Conceitos fundamentais da secagem

Como mencionado anteriormente, a secagem consiste na remoção da umidade contida em um material por meio da evaporação da água e transferência para o ambiente externo. Para que esse processo ocorra, é necessário o fornecimento de energia para promover a

mudança de fase da água líquida para vapor, bem como a existência de um veículo de transporte capaz de levar o vapor gerado para longe da superfície do material. Em aplicações industriais, essa função é frequentemente desempenhada por uma corrente de ar, que atua simultaneamente como fonte de energia e como meio de remoção da umidade evaporada.

O processo de secagem é fundamentado no desequilíbrio existente entre a umidade presente no material e as condições do ar circundante. A evaporação da água ocorre quando a pressão de vapor da água na superfície do material é superior à pressão parcial de vapor presente no ar de secagem, estabelecendo uma força motriz para a remoção da umidade. Dessa forma, quanto menor for a quantidade de vapor de água presente no ar, maior será sua capacidade de absorver a umidade evaporada do material, favorecendo o processo de secagem^[31].

Nesse contexto, um dos conceitos mais importantes é a umidade de equilíbrio. Materiais higroscópicos, como diversas biomassas lignocelulósicas, estabelecem uma relação de equilíbrio com a umidade do ambiente, absorvendo ou liberando umidade até que suas condições internas se igualem às condições externas, mais especificamente o potencial químico. Quando a umidade da biomassa atinge esse estado de equilíbrio, não há mais transferência líquida de água para o ambiente, independentemente do tempo de secagem empregado. Assim, a umidade de equilíbrio representa o limite teórico mínimo de umidade que pode ser alcançado sob determinadas condições operacionais.

Outro conceito fundamental é a distinção entre água não ligada e água ligada. A água livre ocupa espaços vazios e poros da biomassa, sendo removida com relativa facilidade durante as etapas iniciais da secagem. Já a água ligada encontra-se associada à estrutura celular por forças intermoleculares mais intensas, exigindo maior gasto energético e tempos mais prolongados para sua remoção, devido a necessidade de liberar essa água além do tempo de transporte dessa água até a superfície. Em biomassas vegetais, essa diferença é particularmente relevante, pois a estrutura fibrosa do material influencia diretamente a retenção e a mobilidade da água ao longo do processo.

A temperatura também exerce papel decisivo na secagem. Quando uma biomassa úmida é exposta a uma corrente de ar não saturado, parte da energia disponível é consumida na evaporação da água superficial. Como consequência, a temperatura da

superfície do material tende a se estabilizar próxima à temperatura de bulbo úmido do ar de secagem, desde que na ausência de outras fontes de energia que não o calor do próprio ar. A temperatura de bulbo úmido corresponde à menor temperatura que pode ser atingida por um sistema através da evaporação de água sob condições adiabáticas e representa um importante parâmetro para a análise de processos de secagem. Durante os estágios iniciais, enquanto há abundância de água na superfície, a temperatura da biomassa permanece próxima a esse valor. Somente após a redução significativa da umidade superficial é que a temperatura do material passa a se aproximar da temperatura de bulbo seco do ar, indicando uma diminuição da intensidade evaporativa. Para esse fenômeno se dá o nome de resfriamento evaporativo^[31].

Ao longo da secagem, a taxa de remoção de água geralmente não permanece constante. Nos momentos iniciais, a elevada disponibilidade de água favorece uma evaporação mais intensa. Entretanto, à medida que a umidade diminui, a reposição de água na superfície torna-se mais difícil e a velocidade de secagem tende a decrescer gradativamente. Esse comportamento é frequentemente observado em biomassas, cujas características estruturais e composição química fazem com que a velocidade de movimentação da umidade seja um dos limitantes do processo.

Portanto, a secagem de biomassa consiste em um processo físico de remoção de água cuja dinâmica é determinada pela interação entre o material e o ambiente de secagem. Conceitos como umidade de equilíbrio, atividade de água e temperatura de bulbo úmido fornecem a base para a compreensão desse fenômeno e servem como fundamento para o estudo dos mecanismos de transferência de calor e massa.

2.4.2. Transferência de calor e massa na secagem

Quando uma biomassa úmida é sujeita a uma secagem térmica tradicional, dois processos vão ocorrer simultaneamente:

- Transferência de energia (principalmente na forma de calor) do ambiente circundante para evaporar a umidade da superfície
- Transferência de umidade interna para a superfície do sólido e sua subsequente evaporação devido ao processo 1

O Processo 1, correspondente à remoção da água na forma de vapor a partir da superfície do material, depende das condições externas, como temperatura, umidade e velocidade do ar, área de superfície exposta e pressão. O Processo 2, referente ao movimento interno da umidade no interior do sólido, é função da natureza física do material, da temperatura e do seu teor de umidade. Durante uma operação de secagem, qualquer um desses processos pode constituir o fator limitante que governa a taxa global de secagem, embora ambos ocorram simultaneamente ao longo de todo o ciclo^[31].

A Figura 4 é uma ilustração, produzida pelo autor, que ilustra, de forma simplificada, o processo de secagem convencional.

Figura 4: Ilustração esquemática de um processo de secagem convencional.



Fonte: Autoria própria

Nesse processo, o gás aquecido entra em contato com a superfície do material (neste caso, o bagaço de laranja) promovendo a transferência de calor por convecção. Fora do estado de temperatura constante a energia térmica transferida eleva a temperatura do sólido e da umidade presente em sua superfície, essa energia pode elevar a temperatura do objeto a tal ponto que possibilite a evaporação de voláteis do material. Se isso acontecer, o vapor gerado é então removido pela própria corrente gasosa responsável pelo aquecimento, caracterizando a etapa externa do processo de secagem. Toda essa dinâmica está associada ao primeiro mecanismo descrito anteriormente, referente à transferência de energia do meio para o material.

Entretanto, para que a secagem continue ocorrendo, não basta apenas remover a umidade superficial. À medida que a água evapora da superfície do sólido, forma-se um gradiente de concentração de umidade entre as regiões internas e externas do material. Esse gradiente atua como a força motriz para o transporte interno de água, promovendo

o deslocamento da umidade das camadas mais internas em direção à superfície. Esse fenômeno depende de diversos fatores, incluindo a estrutura física do material, o teor de umidade presente, a magnitude do gradiente de concentração e a temperatura do sólido, uma vez que temperaturas mais elevadas tendem a aumentar a mobilidade da água no interior da matriz sólida.

Além da transferência interna de umidade, ocorre simultaneamente a transferência de massa entre a superfície do material e o ambiente de secagem. Como a concentração de vapor d'água na interface sólido-gás geralmente é superior à concentração presente na corrente gasosa, estabelece-se um novo gradiente de concentração. Esse gradiente promove a difusão do vapor de água da superfície do material para o ambiente, contribuindo para sua remoção contínua. Nesse contexto, o calor fornecido pelo gás de secagem exerce dupla função: aquecer o material e fornecer a energia latente necessária para a evaporação da água.

Logo, pode-se reiterar que não é necessário fazer com que o gás seja aquecido a uma temperatura tal que ocorra a evaporação térmica dos voláteis. Na realidade, no caso do bagaço de laranja isso não vai acontecer, principalmente pelo custo extremamente elevado de se aquecer o ar a altas temperaturas.

Por fim, conclui-se que a secagem resulta da interação simultânea entre fenômenos de transferência de calor e de transferência de massa. Enquanto a transferência de calor fornece a energia necessária para a mudança de fase da água, a transferência de massa possibilita tanto o transporte da umidade do interior do material para sua superfície quanto a remoção do vapor gerado para o ambiente. A compreensão desses mecanismos é fundamental para o estudo dos processos industriais de secagem. Nas principais indústrias processadoras de suco de laranja, como a Cutrale, a remoção de umidade do bagaço é tradicionalmente realizada em secadores de tambor rotativo, equipamentos que operam justamente com base nesses princípios clássicos de transferência de calor e massa.

2.4.3. Métodos convencionais de secagem: Tambor Rotativo

Os secadores rotativos ocupam posição de destaque entre os equipamentos empregados para a redução do teor de umidade de materiais particulados. Sua ampla adoção, por diferentes tipos de indústrias, se deve pela sua alta flexibilidade operacional,

que são derivados de um designe simples, que pode ser facilmente operado e escalável dependendo da aplicação. Como exemplo dessa escalabilidade, no livro de Mojumdar é dito que o diâmetro do equipamento pode variar entre 0.3 m até 5 m, com comprimentos chegando aos 90 m.

De maneira simplificada, o equipamento possui em uma de suas extremidades um funil de alimentação, por onde é introduzido o bagaço úmido. Nessa mesma região também se encontra uma das entradas do sistema, responsável pela alimentação de ar aquecido. Quando o processo inicia o material é então descarregado em um tambor cilíndrico ligeiramente inclinado e submetido a um movimento rotacional contínuo, junto a u fluxo de ar quente.

À medida que o tambor gira, o bagaço é elevado por pás internos e posteriormente lançado através da seção transversal do secador. Esse movimento gera uma cortina de partículas em queda livre, aumentando significativamente a área de contato entre o sólido e o gás aquecido. Como consequência, os mecanismos de transferência de calor e massa são intensificados, favorecendo a evaporação da umidade presente no material.

Além dessa rotação outra característica marcante do equipamento é a possibilidade de alterar a inclinação do tambor. A partir dessa inclinação se controla o tempo de residência do material dentro do equipamento, garantindo assim que se consiga manter o padrão de qualidade necessário para o processo.

2.5. Biossecagem

Diferentemente das técnicas convencionais de secagem, que dependem predominantemente do fornecimento externo de energia térmica para promover a evaporação da umidade, a biossecagem foi desenvolvida com foco na redução do consumo energético e dos custos operacionais. Essa mudança de paradigma resulta na adoção de estratégias operacionais distintas, nas quais o calor necessário ao processo é gerado pela atividade microbiológica presente no próprio material.

Como consequência, os mecanismos responsáveis pela transferência de calor e massa passam a apresentar características particulares quando comparados aos processos tradicionais de secagem. A interação entre atividade biológica, geração de calor

metabólico, transporte de umidade e condições de aeração torna a biossecagem um processo mais complexo. Que será portanto, abordado nesse tópico.

2.5.1. Conceitos fundamentais da biossecagem

Embora a biossecagem apresente características operacionais distintas das técnicas convencionais de secagem, seus fundamentos continuam baseados nos mesmos fenômenos de transporte descritos por Mujumdar no tópico 2.4.2. A remoção de umidade do material depende, necessariamente, da transferência simultânea de energia para promover a liberação de água presa no material e da transferência de massa para remover a umidade para o meio. A principal diferença entre a biossecagem e os processos tradicionais não está nos mecanismos envolvidos, mas sim na forma como a energia é gerada e fornecida ao material e o papel do ar na transferência de umidade para o ambiente.

Nos processos convencionais de secagem, a energia é fornecida predominantemente por uma corrente de ar aquecida ou por outra fonte externa de calor. Na biossecagem, por outro lado, a principal fonte de energia é gerada internamente, por meio da atividade metabólica de microrganismos aeróbios presentes na biomassa. Durante a degradação parcial da matéria orgânica, esses microrganismos oxidam compostos orgânicos e liberam energia na forma de calor, elevando a temperatura do material o que promove um aumento da concentração de água livre no material, criando um gradiente de concentração em direção a superfície, aumentando a velocidade secagem.

Nesse contexto, a corrente de ar desempenha uma função diferente daquela observada em secadores convencionais. Em vez de atuar como a principal fonte de energia térmica do processo, o ar é utilizado principalmente para fornecer oxigênio aos microrganismos e remover a umidade da superfície da massa de biomassa. Dessa forma, a aeração exerce papel fundamental tanto na manutenção da atividade biológica quanto na remoção contínua do vapor de água produzido durante a secagem.

Entretanto, a corrente de ar também irá atuar como um mecanismo de remoção de energia do sistema. A evaporação da água consome calor latente e promove o resfriamento da biomassa, fenômeno conhecido como resfriamento evaporativo. Dessa forma, existe um equilíbrio delicado entre a geração de calor pela atividade

microbiológica e sua remoção pela evaporação e pela ventilação. Taxas de aeração excessivas podem dissipar calor mais rapidamente do que ele é produzido, reduzindo a temperatura do material e comprometendo a eficiência do processo, chegando ao ponto de adormecer os microrganismos. Por outro lado, taxas insuficientes podem limitar o suprimento de oxigênio aos microrganismos e dificultar a remoção da umidade.

Portanto, a biossecagem pode ser entendida como um processo híbrido que combina fenômenos biológicos e mecanismos clássicos de transferência de calor e massa. Sua eficiência depende da capacidade de converter parte da matéria orgânica em energia térmica, utilizando essa energia para aumentar a concentração de água livre presente na biomassa, enquanto a aeração garante simultaneamente o fornecimento de oxigênio e a remoção da umidade gerada durante o processo.

2.5.2. Intermitência na biossecagem

A intermitência surge como uma estratégia operacional promissora para aumentar a eficiência da biossecagem, uma vez que esse processo depende de um delicado equilíbrio entre a geração de calor metabólico pelos microrganismos e as perdas térmicas associadas à aeração. Diferentemente dos processos convencionais de secagem, nos quais o aumento da vazão de ar geralmente resulta em maiores taxas de remoção de umidade, na biossecagem uma ventilação excessiva pode provocar resfriamento evaporativo intenso, reduzindo a temperatura do leito e limitando a atividade microbiológica responsável pela geração de calor^[30].

Nesse contexto, a operação intermitente consiste na alternância entre períodos com elevada taxa de aeração e períodos com aeração reduzida ou interrompida. Durante os intervalos de menor ventilação, o calor gerado pela degradação biológica tende a se acumular no interior da biomassa, promovendo o aumento da temperatura do leito e favorecendo a liberação da água. Já nos períodos de maior aeração, o sistema recebe oxigênio para sustentar a atividade microbiana aeróbica e remove o vapor de água acumulado na superfície do material. Dessa forma, a intermitência busca conciliar duas necessidades frequentemente conflitantes na biossecagem: a manutenção de temperaturas elevadas e a remoção eficiente da umidade.

Maia et al.^[31] investigaram a aplicação dessa estratégia na biossecagem de resíduos sólidos de laranja em leito fixo, comparando a operação contínua com diferentes modos de aeração intermitente. Os autores observaram que a técnica apresenta potencial para melhorar o desempenho do processo, mas ressaltaram que a definição dos ciclos de operação deve ser cuidadosamente estudada. Segundo os autores, a principal dificuldade consiste em evitar que o calor produzido pelos microrganismos seja dissipado pela passagem de grandes volumes de ar através do leito úmido, fenômeno associado ao resfriamento evaporativo. Além disso, ainda é difícil garantir que o leito consiga chegar em altas temperaturas, tanto pela falta de conhecimento dos tipos de microrganismos que estão no leito, quanto pela necessidade de refino no ajuste da intermitência de ar.

De forma mais ampla, a secagem intermitente é definida como uma sucessão de ciclos compostos por períodos de secagem ativa e períodos de repouso ou temperagem^[53]. Em processos convencionais, essa estratégia pode ser implementada por meio de alterações na temperatura, vazão, umidade ou pressão do ar de secagem, bem como pela modulação de diferentes fontes de energia térmica^[53]. Na biossecagem, entretanto, a intermitência está geralmente associada ao controle da aeração, uma vez que o fluxo de ar é simultaneamente responsável pelo fornecimento de oxigênio aos microrganismos e pela remoção da umidade evaporada.

A literatura demonstra que diferentes formas de intermitência podem produzir impactos significativos tanto na eficiência energética quanto na qualidade do produto. Além disso, estratégias de fornecimento intermitente de energia têm sido empregadas com sucesso em tecnologias híbridas de secagem, incluindo sistemas assistidos por micro-ondas, radiofrequência e ultrassom. Embora esses estudos não estejam diretamente relacionados à biossecagem, eles evidenciam a importância do correto gerenciamento dos fluxos de energia e massa para a otimização dos processos de remoção de umidade.

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

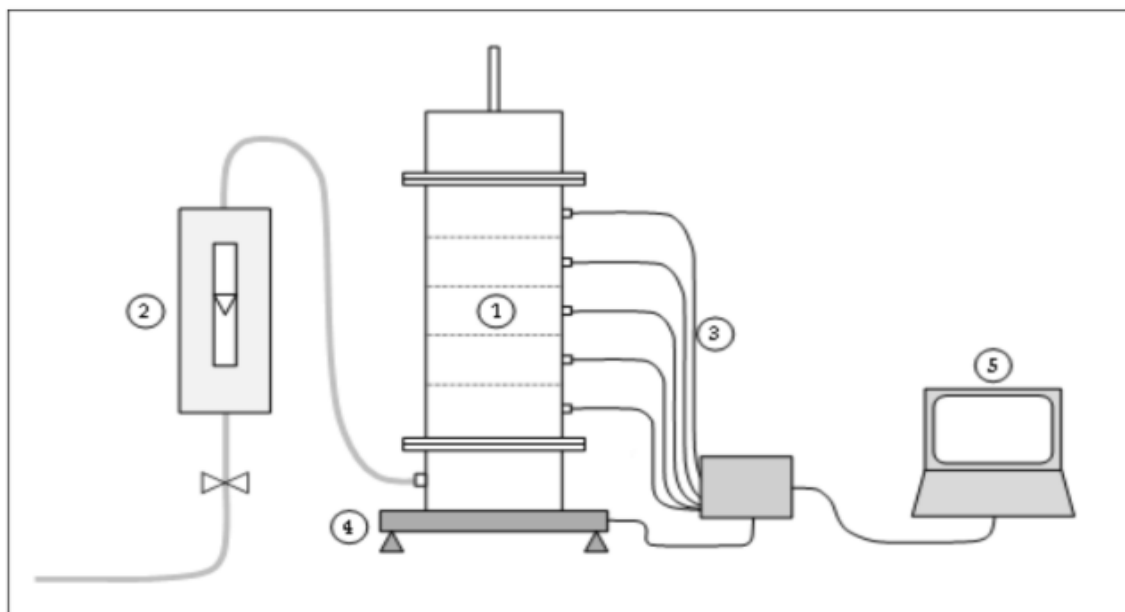
O material de análise desse trabalho é a biomassa de resíduo sólido de laranja, proveniente da produção de suco de laranja. Sua composição padrão é de casca, bagaço,

galhos sementes. Quando analisada, foi constatado que a composição inicial do resíduo apresentava umidade inicial (X_0) de $3,0 \pm 0,1$ em base seca (b.s.), kg de água/kg de biomassa seca, $2,9 \pm 0,2$ de cinzas, $19,3 \pm 0,9$ de extrativos em solvente, $38,5 \pm 1,5$ de celulose, $33,1 \pm 2$ de holocelulose, $24,0 \pm 2,0$ de hemicelulose e $2,9 \pm 0,5$ de lignina, todos os valores também calculados em base seca (b.s.)^[30].

3.2. Equipamentos

O diagrama abaixo (Figura 5) representa o sistema de biossecagem, composto pelo reator de biossecagem, os sistemas de coleta de dados de temperatura e o sistema de controle de fluxo de ar.

Figura 5: Equipamento de biossecagem: corpo (1); rotâmetro (2); sistema de medição de temperatura com cinco sondas (3); sistema de medição de massa (4); aquisição de dados (5).



Fonte: Autoria própria

O reator é um cilindro construído em PVC composto por três partes: a base, o cilindro central e o topo. O corpo principal do reator tem dimensões de $0,3 \text{ m}$ de diâmetro interno, $0,62 \text{ m}$ de altura e um volume máximo de aproximadamente $0,04 \text{ m}^3$. Ao redor do equipamento foi instalada uma manta cerâmica com o objetivo de isolar termicamente o

sistema. Esse equipamento foi projetado e construído pelo Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (DEQ-UFSCar)^[30].

Junto ao corpo do reator, foram incluídos orifícios onde termopares (modelo Ds18b20, Dallas Semiconductor, Estados Unidos) eram instalados para realizar a aquisição de temperatura do leito, com uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Já na base do reator foi posicionado o sistema de aquisição de massa, constituído por três placas de aquisição (modelo Hx711, Avia Semiconductor Co. Ltd., China), cada uma com limite de $2 \pm 0,005$ kg. Logo acima, temos conectado a base do reator o sistema de fluxo de ar que é controlado por um rotâmetro calibrado (modelo INF-R-P-200, Indflow Ind. Solutions, Brasil)^[30]. Por fim, dois sistemas foram responsáveis pelo controle e coleta das variáveis desse experimento, o primeiro é o sistema supervisor que envia os dados de massa e temperatura para um software, SuperSys Drying, desenvolvido internamente no DEQ-UFSCar, já o segundo é o sistema de controle de fluxo de ar que foi desenvolvido na plataforma Arduino para atuar sobre uma válvula solenoide e garantir a intermitência de fornecimento de ar para o sistema, nenhum dos dois sistemas está presente na figura 5.

3.3. Procedimento experimental

A biossecagem com fluxo de ar forçado pode ser compreendida como a combinação de dois fenômenos de natureza antagônica atuando simultaneamente no sistema. Por um lado, a injeção de ar promove a intensificação da transferência de massa entre o leito de biomassa e o meio externo, favorecendo a remoção da umidade presente no material. Esse processo ocorre principalmente pela evaporação da água contida na biomassa e pelo subsequente arraste do vapor pelo fluxo de ar. Por outro lado, a evaporação da água implica consumo de energia na forma de calor latente, o que resulta em um efeito de resfriamento evaporativo no interior do leito. Esse fenômeno pode reduzir a temperatura do sistema, assim diminuindo a atividade microbiana e por consequência a geração de calor, responsável direta pelo aumento de atividade de água do sistema (a_w).

Diante dessa característica do sistema, foi adotada uma estratégia de operação baseada na intermitência do fornecimento de ar, com o objetivo de equilibrar esses dois efeitos e buscar condições operacionais que maximizem a remoção de água sem comprometer significativamente a temperatura do leito.

Para investigar o comportamento do sistema sob diferentes condições operacionais, foi elaborado um planejamento experimental baseado no método de Delineamento Composto Central (DCC). Nesse planejamento, foram consideradas como variáveis independentes o tempo de duração dos pulsos de ar (Tpa), expresso em minutos, e o intervalo entre esses pulsos de ar (Ipa), expresso em horas. Ao final dos experimentos, os resultados obtidos permitiram a construção de um espaço amostral representativo do comportamento do processo. Esse conjunto de dados possibilita a geração de superfícies de resposta que auxiliam na identificação das regiões operacionais mais favoráveis.

Tabela 1: Planejamento de ensaios de secagem.

<i>Ensaio</i>	<i>Tempo [Tpa] (min)</i>	<i>Intervalo [Ipa] (h)</i>
1	15,0	1,0
2	15,0	3,0
3	45,0	1,0
4	45,0	3,0
5	9,0	2,0
6	51,0	2,0
7	30,0	0,6
8	30,0	3,4
9 (C)	30,0	2,0
10 (C)	30,0	2,0

Fonte: Autoria própria

A Tabela 1 apresenta o planejamento experimental realizado. Todos os valores foram definidos a partir dos pontos centrais, sendo os fatoriais, 15 minutos na Tpa e 1 hora no Ipa.

Em todos os experimentos, o reator foi inicialmente carregado com 4 kg de bagaço de laranja à temperatura ambiente. O fluxo de ar foi previamente calibrado e mantido constante em 2 m³/h durante toda a operação.

Os experimentos foram conduzidos por aproximadamente 72 horas, tempo suficiente para acompanhar o comportamento do processo de biossecagem e a remoção de umidade da biomassa sob as diferentes condições operacionais avaliadas.

3.4. Procedimento de Cálculo

3.4.1. Análise elemental

A análise elemental consiste na quantificação dos elementos C, H, N, O e S a partir da combustão completa da biomassa seca de laranja. Ela será utilizada para mensurar os efeitos que a biossecagem tivera na composição do material. E devido ao fato de ser um processo de combustão, a quantidade de oxigênio disponível para a combustão da biomassa normalmente é calculada por meio da Equação 1, Alakangas, E et al^[4].

$$O = 100 - (C + H + N + S) - M - a \quad \text{Equação (1)}$$

Os valores de C, H, N, S se referem as porcentagens dos respectivos elementos na amostra. Já o valor de M é o valor da umidade na amostra, que devido ao fato de todas as amostras terem sido secas anteriormente a análise, esse valor sempre será igual a zero. Por fim, a variável “a” representa a porcentagem de cinzas formados no processo de combustão. O equipamento utilizado para os testes foi um analisador elementar CHNS Fiosons (modelo EA-1108, Thermo Scientific, Estados Unidos).

3.4.2. Higher heat value – HHV

O Poder Calorífico Superior (HHV) é um parâmetro utilizado para quantificar a energia total liberada durante a combustão de um material. Nesse cálculo, considera-se que a água gerada é condensada ao final da reação, permitindo o aproveitamento do calor latente associado à mudança de fase do vapor para o estado líquido. Por esse motivo, o HHV representa o máximo potencial energético que pode ser extraído de um combustível ou resíduo.

A determinação do HHV pode ser realizada por diferentes metodologias, sendo a análise elemental (ultimate analysis) uma das abordagens mais importantes para esse tipo de avaliação. Os elementos carbono, hidrogênio e oxigênio possuem influência direta no potencial energético da biomassa, enquanto nitrogênio e enxofre são relevantes principalmente para a avaliação dos impactos ambientais associados à combustão, devido à possível formação de gases poluentes^[45].

Para o cálculo do HHV, diferentes equações empíricas podem ser utilizadas, relacionando a composição elementar do material com seu potencial energético. Em geral, essas correlações consideram principalmente os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, permitindo estimar a energia liberada durante a combustão completa da biomassa.

No trabalho em questão será calculado o HHV utilizando a equação de Sheng and Azevedo (Equação 2)^[45] e pela equação de Yin (Equação 3)^[57].

$$HHV = -1,3675 + 0,3137 * C + 0,7119 * H + 0,0318 * O \quad \text{Equação (2)}$$

$$HHV = 0,2949 * C + 0,8250 * H \quad \text{Equação (3)}$$

4. Resultados e Discussão

4.1. Perfil de temperatura

A avaliação térmica dos reatores é uma variável importante no estudo da intermitência na biossecagem, uma vez que sua magnitude determina a quantidade de água disponível para ser removida da biomassa. Dessa forma, busca-se analisar como os valores de Tpa e Ipa impactaram o sistema, por meio dos valores de Tmax, Tavg e Tmin.

Em relação à temperatura máxima, cinco ensaios conseguiram romper a barreira dos 40 °C, sendo eles os experimentos 2, 4, 5, 8 e 9, com destaque para o ensaio 10, que atingiu 38,8 °C. Todos esses ensaios apresentam em comum valores de Ipa iguais ou superiores a 2 horas, indicando que intervalos mais longos entre os pulsos de ar podem favorecer a recuperação térmica do leito. Em outras palavras, sem um tempo mínimo, que os resultados sugerem estar em torno de 2 horas, os microrganismos não apresentam uma taxa de crescimento metabólico suficientemente elevada para compensar as perdas térmicas decorrentes do resfriamento evaporativo causado pelos pulsos de aeração.

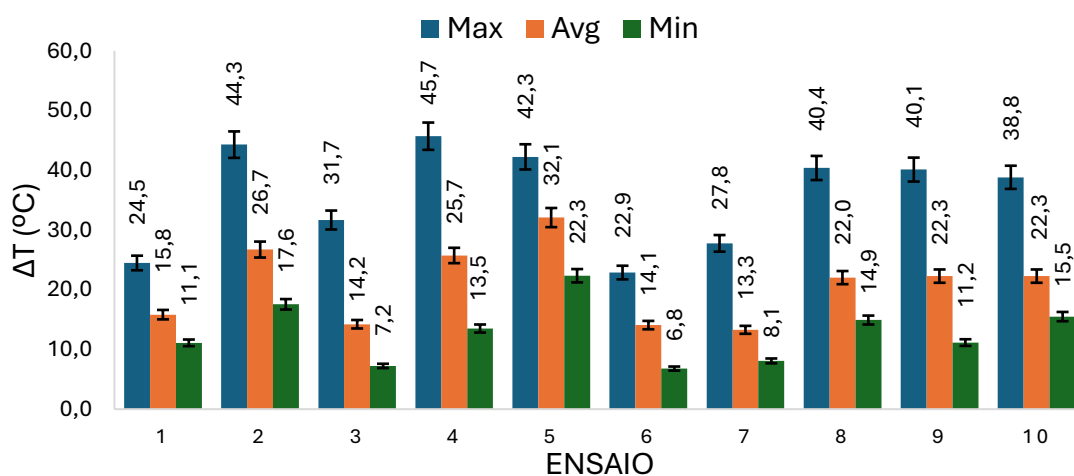
Já em relação às temperaturas médias, os ensaios 2, 4 e 5 se destacam por ultrapassarem a marca de 25 °C, além de serem os únicos a apresentarem valores de Tavg cerca de 4 °C acima da temperatura ambiente média. Esse comportamento, especialmente

os valores positivos de T_{avg} em relação ao ambiente, indica que o leito permaneceu sob predominância do metabolismo microbiano, principal fonte de energia da biossecagem, durante praticamente todo o ensaio.

Por outro lado, os experimentos 1, 3, 6 e 7 apresentaram os piores desempenhos, principalmente quando analisados os valores de T_{avg} e T_{min} . Em tais condições, as temperaturas permaneceram abaixo da temperatura ambiente durante quase todo o experimento, evidenciando que o resfriamento evaporativo inibiu a atividade microbiana. Além disso, o elevado fluxo de ar imposto ao leito dificultou a recuperação térmica do sistema, impedindo o restabelecimento das condições necessárias para o desenvolvimento metabólico dos microrganismos.

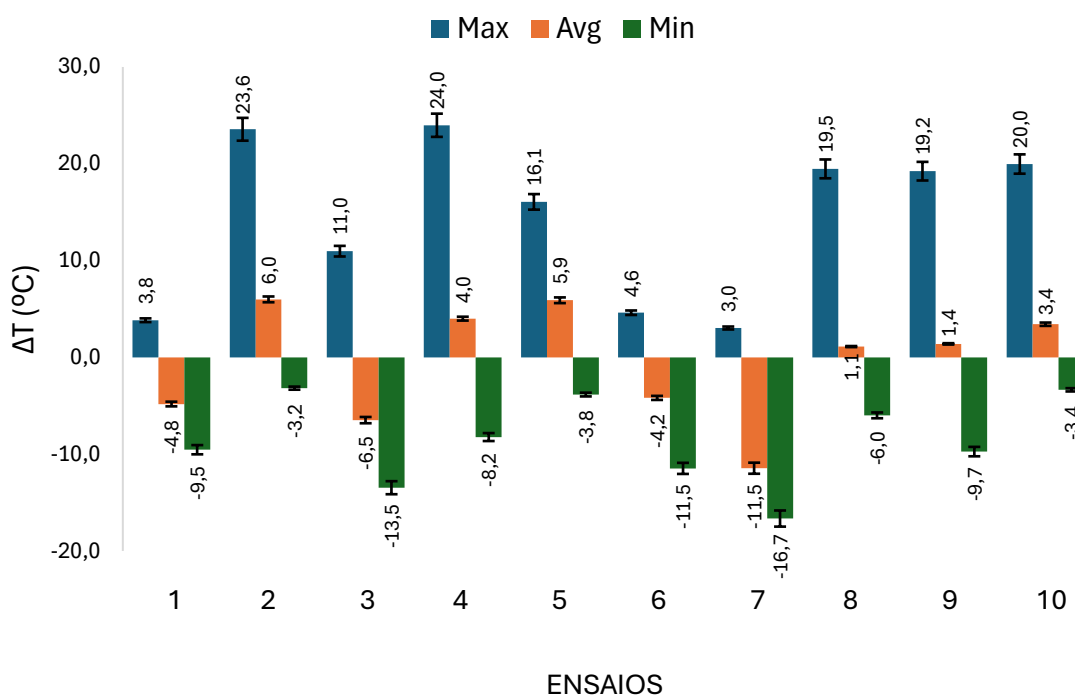
As figuras 6 e 7 trazem os resultados dos desempenhos térmicos dos experimentos, a primeira com os valores absolutos já a segunda relativo à temperatura média do ambiente.

Figura 6: Valores de temperatura máxima, média e mínima, para cada ensaio de biossecagem.



Fonte: Autoria própria

Figura 7: Valores de temperatura máxima, média e mínima, em relação a temperatura média do ambiente, para cada ensaio de biossecagem

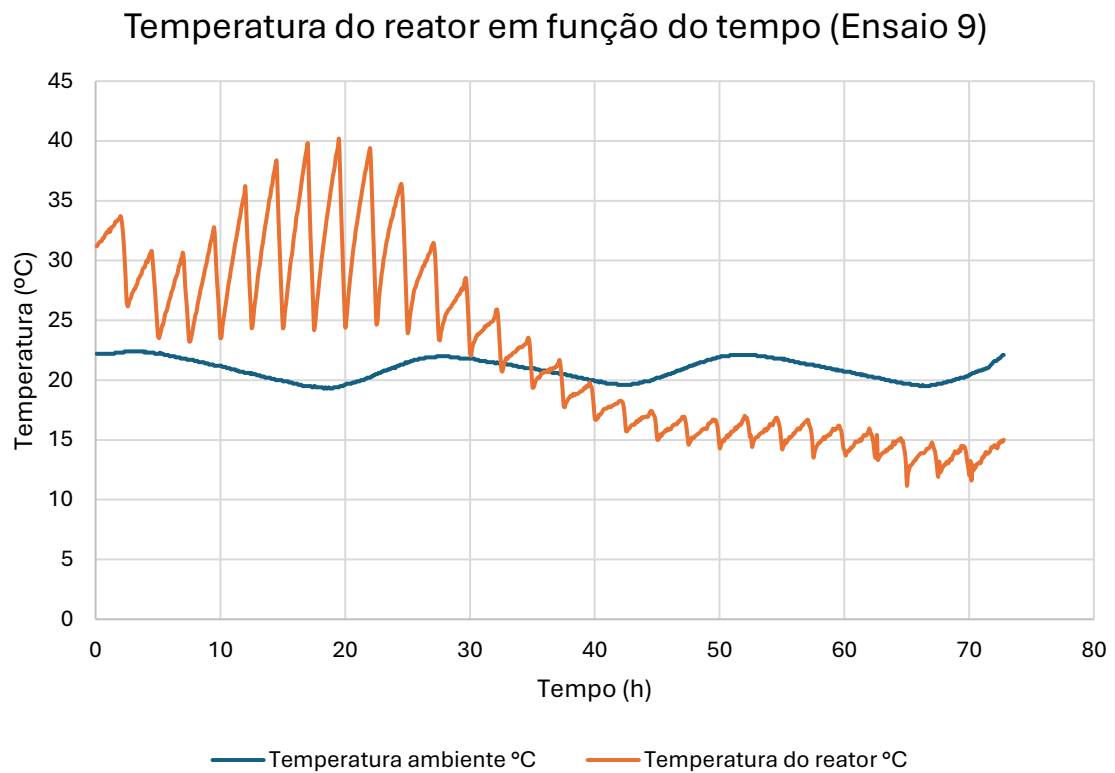


Fonte: Autoria própria

De maneira geral, não é possível afirmar que apenas a duração dos pulsos de ar e o intervalo entre eles tenham sido os fatores predominantes no comportamento térmico dos ensaios. Outros parâmetros, como a temperatura inicial do leito, a variabilidade microbológica associada aos microrganismos que se proliferam no sistema e a temperatura ambiente (que corresponde à temperatura do ar insuflado) também exercem influência significativa sobre a manutenção térmica do leito.

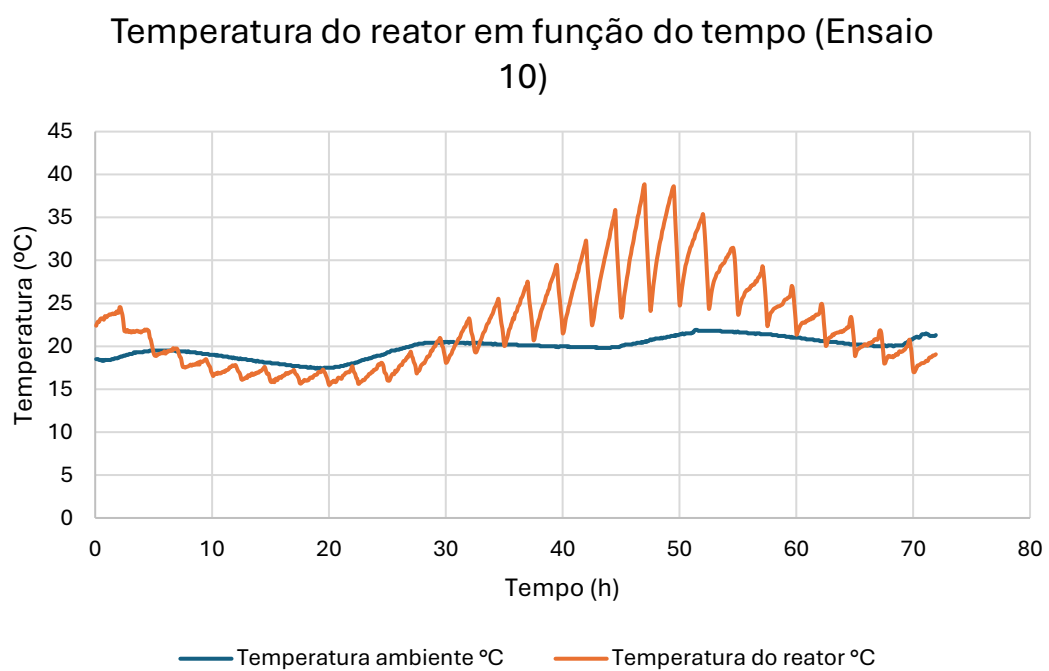
Um exemplo claro dessa influência pode ser observado nos ensaios 9 e 10. Ambos correspondem ao ponto central do Delineamento Composto Central (DCC), apresentando os mesmos valores de Ipa e Tpa, iguais a 2 horas e 30 minutos, respectivamente. Apesar disso, os resultados obtidos foram significativamente distintos, como mostrado nas figuras 8 e 9.

Figura 8: Comportamento térmico do ensaio 9 durante a biossecagem.



Fonte: Autoria própria

Figura 9: Comportamento térmico do ensaio 10 durante a biossecagem.



Fonte: Autoria própria

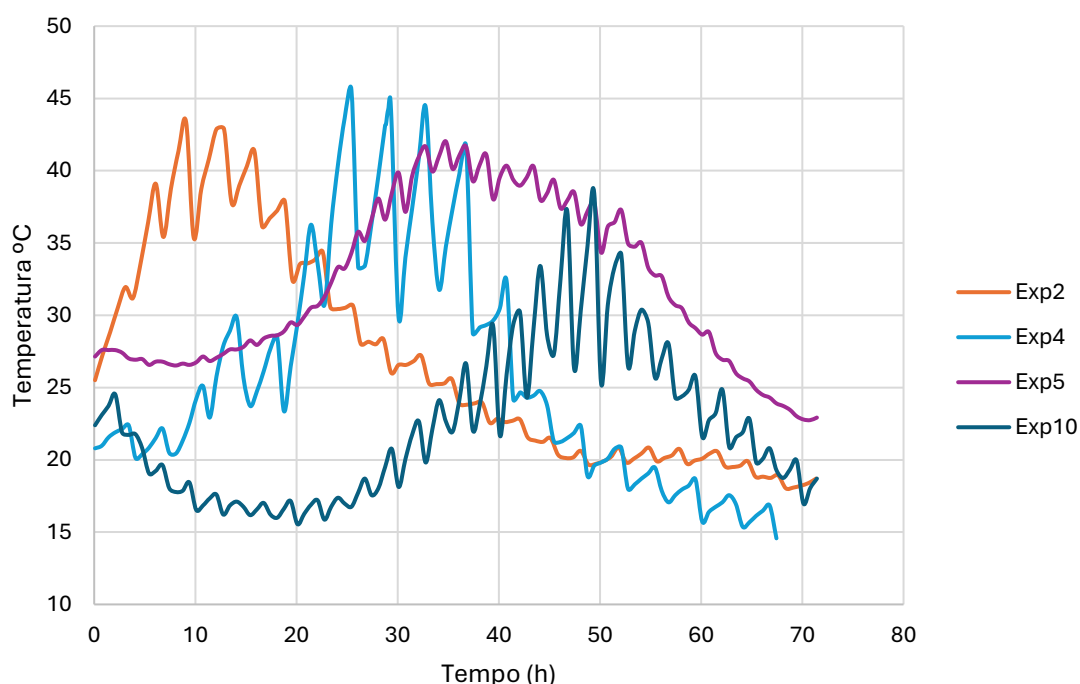
Neste caso, a variável que provavelmente exerceu maior influência foi a temperatura inicial do leite. O experimento 9 iniciou com o bagaço a 31,2 °C, valor mais de 10 °C acima da temperatura ambiente. Esse comportamento pode indicar que o ensaio começou com os microrganismos já em uma fase de elevada atividade metabólica, condição que se manteve durante as primeiras 30 horas do experimento, declinando posteriormente até atingir aproximadamente 15 °C ao final do ensaio.

Por outro lado, o experimento 10 iniciou com o leite a 22,4 °C, apenas 3,5 °C acima da temperatura ambiente. Nesse caso, a temperatura permaneceu próxima a do ambiente até aproximadamente a 30^a hora do ensaio, momento em que o leite passou a acumular calor e apresentar atividade biológica suficiente para, mesmo sob resfriamento evaporativo, recuperar sua temperatura. Esse comportamento indica que o período de maior atividade biológica ocorreu na metade final do experimento.

Observa-se, portanto, um comportamento completamente distinto em relação ao ensaio 9, fortemente condicionado por uma variável externa às condições controladas do estudo: a temperatura inicial do leite, associada diretamente ao nível de atividade biológica presente no tempo zero do experimento.

Entretanto, mesmo não sendo possível explicar plenamente todos os fenômenos que estão ocorrendo no reator ainda é possível tirar conclusões pertinentes a partir dos ensaios, que sustentaram novos projetos. Em sequência tem-se um gráfico, figura 10, plotado com os 4 ensaios com a maior temperatura média.

Figura 10: Comportamento térmico dos 4 ensaios com as maiores temperaturas médias.



Fonte: Autoria própria

De maneira geral os 4 ensaios seguem um comportamento parecido, com zonas de baixa atividade biológica e temperaturas menores e momentos em que o metabolismo microbiano assume protagonismo e promove o aquecimento do sistema. Esse tipo de comportamento evidencia que a intermitência de fluxos de ar não inviabiliza o desenvolvimento térmico do leito, mesmo operando apenas com microrganismos nativos da biomassa. Além do mais, pode-se observar que as temperaturas máximas estão em linha com a literatura, Van Heerden et al^[58] atingiu 45 °C com uma operação de 96 horas, já Maia et al^[31] alcançou uma temperatura de 47 °C.

4.2. Superfície de resposta da temperatura – DCC

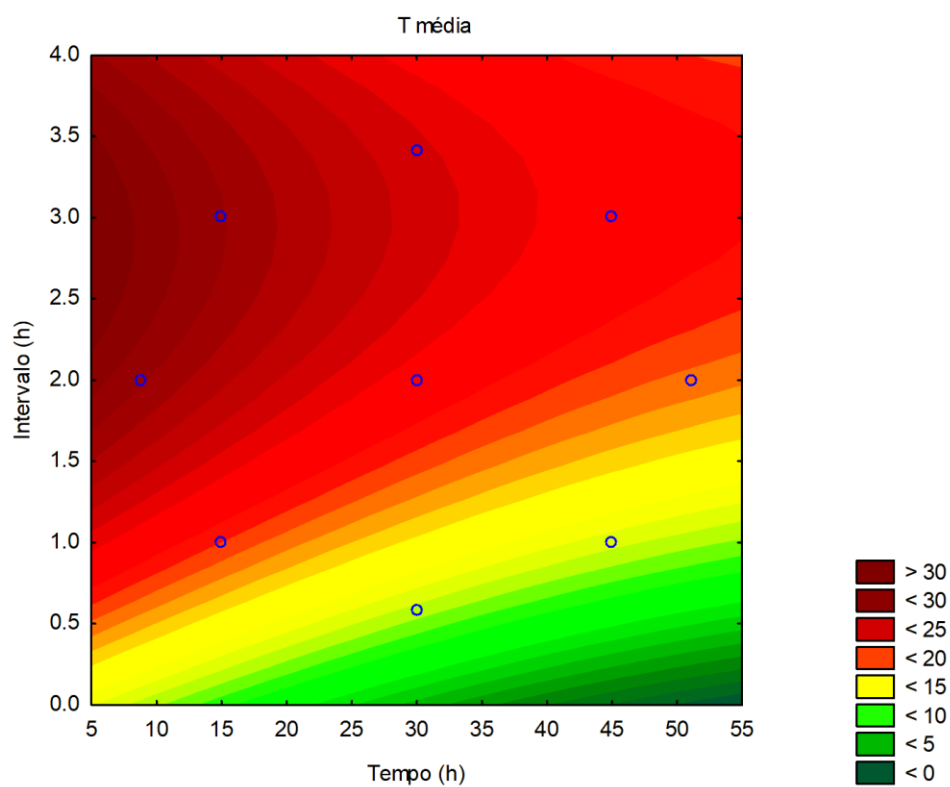
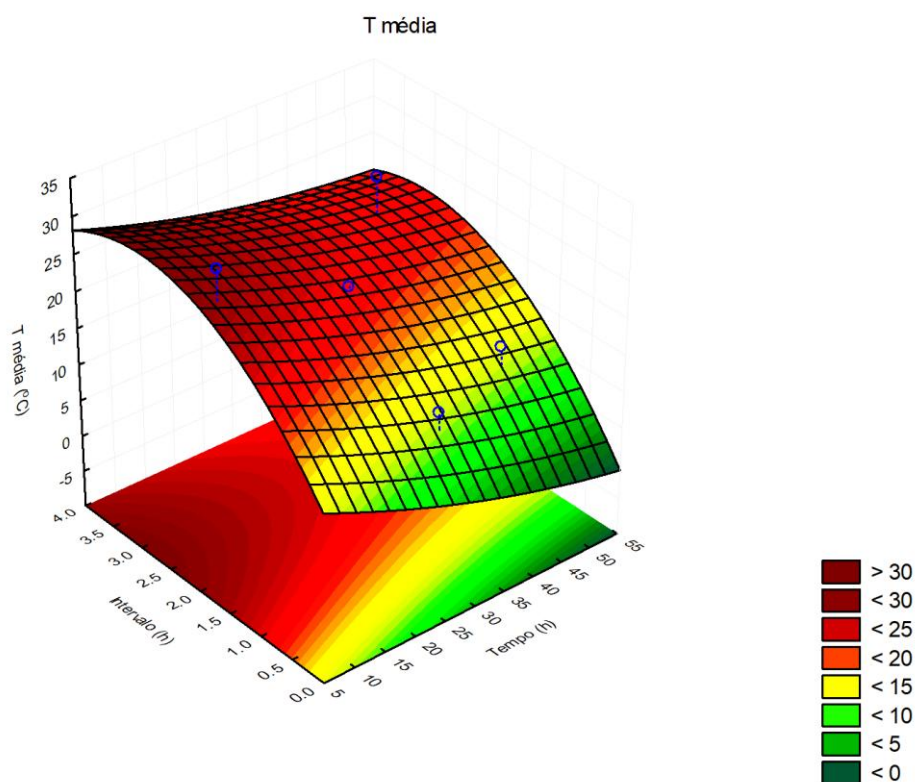
Como mencionado anteriormente, realizar uma análise de um processo de biossecagem consiste em entender como as diversas variáveis do sistema interagem entre si. Nos ensaios realizados, tentou-se restringir a análise a apenas duas variáveis e avaliar como a intermitência do fluxo de ar influencia a temperatura e a umidade final do sistema.

Para auxiliar nessa tarefa, foi utilizado um Delineamento Composto Central (DCC) para a definição dos pontos experimentais. Assim, foi possível avaliar a influência de variáveis independentes sobre uma resposta do sistema. No experimento em questão, os dois fatores avaliados foram o intervalo de intermitência do sistema e o tempo de cada pulso de ar, sendo a análise realizada duas vezes: uma considerando a temperatura como resposta do sistema e outra considerando a umidade final.

O DCC tem como principal característica a capacidade de avaliar os efeitos lineares e quadráticos das variáveis, sendo capaz de gerar uma superfície de resposta na região experimental. Isso possibilita a realização de análises de otimização do processo, desde que o modelo apresente um ajuste adequado aos dados experimentais. A qualidade desse ajuste pode ser avaliada por parâmetros estatísticos, como o quadrado médio residual (MS Residual), que representa a variabilidade não explicada pelo modelo^[8]. Para o experimento em questão, foi obtido um MS Residual de 22,049. A partir da raiz quadrada desse valor, obtém-se um desvio padrão residual (S) de aproximadamente 5 °C, que configura um erro moderado para alto, considerando a variação de temperatura do sistema que ficou entre 15°C e 45°C.

A superfície de resposta das temperaturas é apresentada na Figura 11.

Figura 11: Superfícies de resposta para a temperatura em função do tempo de pulso e do intervalo de intermitência



Fonte: Autoria própria

A partir dela, podem ser tiradas algumas conclusões. A primeira é que a curva mostra que nenhuma das configurações se mostrou adequada para encontrar a região de máximo, local em que as variáveis levam à maior temperatura possível, indicando que o modelo não apresentou um ajuste satisfatório à região experimental, fato também sugerido pelo quadrado médio residual de 22,049. Portanto, a figura 11 demonstra como o processo tem interferência multifatorial e que sem uma padronização de fatores como, atividade biológica inicial, tipo de microrganismos na biomassa, entre outros fatores, impossibilitam uma análise mais apropriada.

Entretanto, é possível levantar a hipótese de que intervalos longos de intermitência, de 2 a 3 horas, juntamente com pulsos rápidos de ar, tendem a apresentar melhores resultados. Isso pode ser justificado pela menor intensidade do resfriamento evaporativo provocado pelo curto fluxo de ar, juntamente com uma melhor oxigenação do leito promovida por esse fluxo, favorecendo o metabolismo aeróbico, além do maior tempo de recuperação térmica que o leito possui nessas configurações.

Todavia, vale ressaltar que diferenças nas temperaturas iniciais, que podem indicar estágios distintos no processo metabólico dos microrganismos, podem ter promovido distorções na análise. Portanto, ao final, apenas é possível afirmar que intervalos maiores e pulsos menores tendem a apresentar melhores resultados térmicos.

4.3. Teor de umidade final

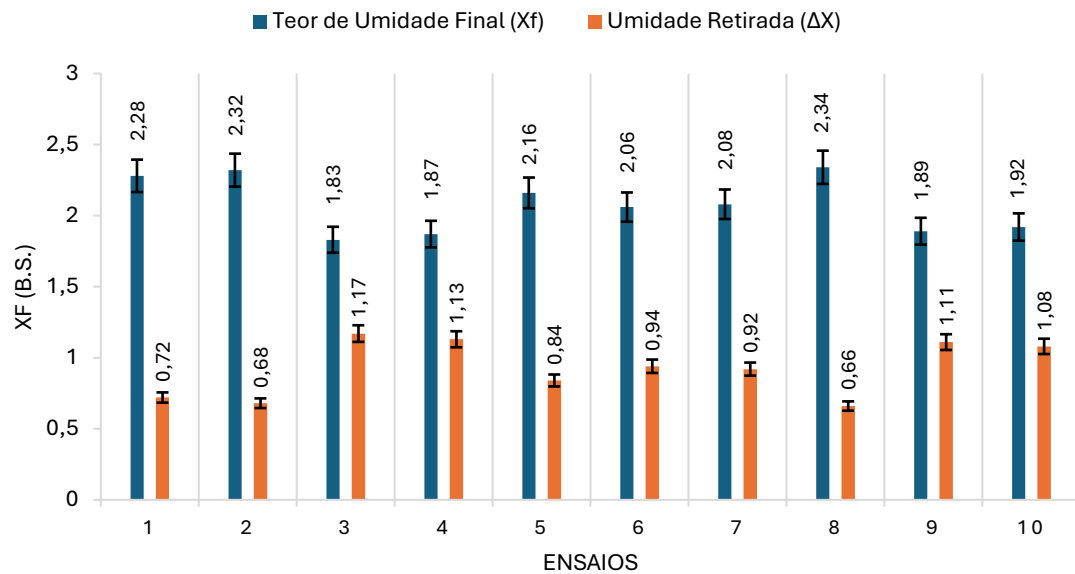
Alcançar o valor de umidade final (X_f) pretendido é o principal objetivo de qualquer processo de secagem. Entretanto, ao avaliar um novo processo de secagem, principalmente aplicado à biomassa, considerar apenas o ensaio que apresentou o menor valor de X_f pode levar a interpretações equivocadas. A compreensão integrada das variáveis envolvidas no sistema e a análise contextualizada de cada experimento permitem identificar os fatores responsáveis pelos resultados obtidos, fornecendo informações muito mais valiosas do que a simples observação do valor final de umidade.

Feito esse preambulo e revisitando a premissa de que todas as amostras apresentam umidade inicial (X_0) de $3,0 \pm 0,1$ em base seca (b.s.) (kg de água/kg de biomassa seca),

pode-se analisar a figura 12 e 13 que vão servir de base para toda a discussão acerca da retirada de umidade do material.

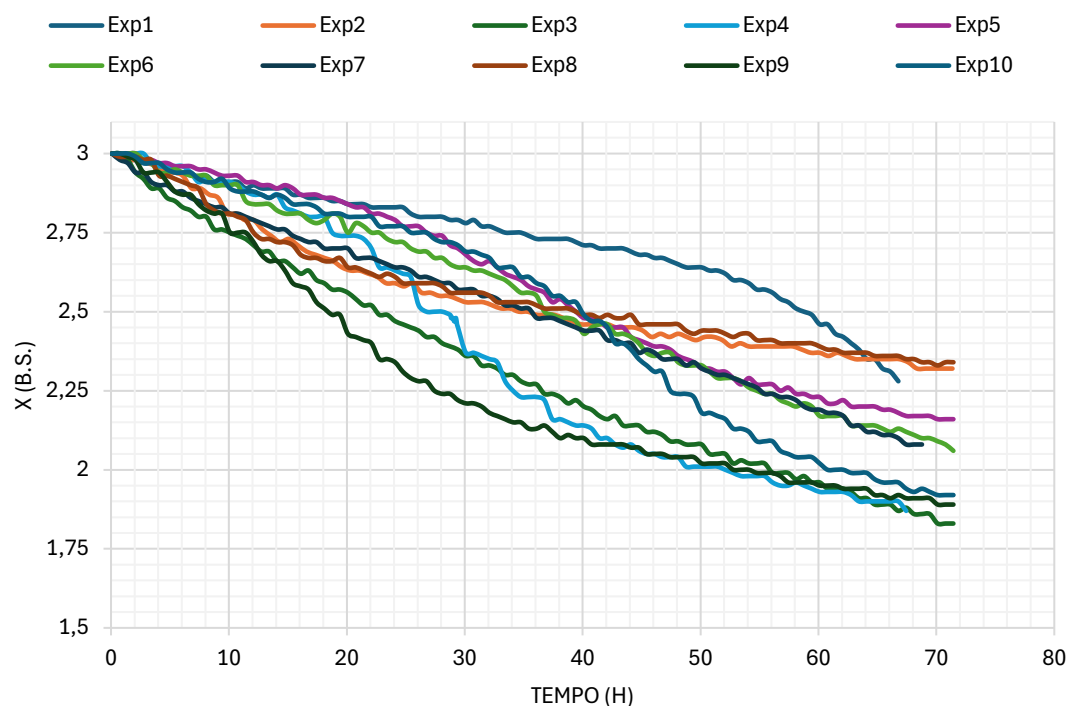
As figuras 12 e 13, trazem os resultados relativos à umidade ao longo do processo de secagem.

Figura 12: Teor de umidade final (X_f) e da umidade retirada (ΔX) a cada ensaio.



Fonte: Autoria própria

Figura 13: Cinética de secagem dos 10 ensaios realizados.



Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 12, é possível observar algumas tendências. Inicialmente, destacam-se os experimentos de menor desempenho: os ensaios 1, 2 e 8. Dentre eles, os ensaios 2 e 8 chamam atenção tanto pela baixa quantidade de água removida quanto pelo fato de terem apresentado desempenho térmico superior a outros ensaios. Esses ensaios alcançaram teores de umidade final de 2,32 e 2,34, respectivamente, mesmo registrando temperaturas máximas de 44,3 °C e 40,4 °C. Entretanto, em ambos os casos, o fator limitante foi, provavelmente, a baixa quantidade de ar fornecida ao sistema. O ensaio 2 recebeu um fluxo de ar total de apenas 11,08 m³, enquanto o ensaio 8 recebeu 18,46 m³, valores que correspondem ao menor e ao terceiro menor fluxo de ar entre todos os experimentos.

Em direção oposta, os ensaios 3, 4, 9 e 10 apresentaram os melhores resultados, embora cada um tenha alcançado esse desempenho por diferentes combinações de fatores. O ensaio 4, por exemplo, foi o que apresentou maior equilíbrio entre as variáveis avaliadas. Esse experimento combinou excelente desempenho térmico, registrando a maior T_{max} em relação à temperatura ambiente, com um fluxo de ar de 28,8 m³ ao longo

do ensaio. Apesar de intermediário, esse volume de ar mostrou-se suficiente para garantir a remoção eficiente da água livre presente no sistema.

Por outro lado, o ensaio 3 foi o experimento mais desbalanceado. Mesmo apresentando a segunda pior T_{avg} em relação à temperatura ambiente, com diferença de $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, foi o segundo ensaio com maior fluxo de ar, totalizando $61,71\text{ m}^3$ durante o experimento. Essa elevada quantidade de ar atuou como um mecanismo de remoção de umidade, permitindo a retirada de grandes quantidades de água mesmo sem condições térmicas ideais.

Observa-se que o ensaio 3, apesar de não ter recebido o maior fluxo de ar entre todos os experimentos, apresentou maior remoção de água do que o ensaio 7. Esse comportamento parece estar associado às condições iniciais de cada sistema. O ensaio 3 iniciou com temperatura de leito de $31,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o ensaio 7 começou com apenas $27,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando que o bagaço utilizado no ensaio 3 já se encontrava em um estágio mais avançado de aquecimento antes do início da operação. Esse aquecimento prévio provavelmente aumentou a disponibilidade de água livre no material e favoreceu sua migração para a superfície da biomassa. Como consequência, a combinação entre maior disponibilidade de umidade superficial e elevado fluxo de ar intensificou a remoção de água nas etapas iniciais do processo, conforme observado na Figura 13, contribuindo para o desempenho superior do ensaio 3.

Por fim, destacam-se os ensaios 9 e 10. Ambos apresentaram comportamentos bastante semelhantes entre si e em relação ao ensaio 4, já que os três experimentos utilizaram o mesmo volume total de fluxo de ar, de $28,8\text{ m}^3$. Entretanto, vale aprofundar a análise desses dois ensaios, pois eles demonstram claramente o impacto da temperatura na velocidade de secagem.

O ensaio 9 iniciou com temperatura de $31,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura ambiente. Esse comportamento remete ao observado no ensaio 3, indicando que o leito já se encontrava sob efeito da atividade metabólica microbiana antes mesmo do início do monitoramento experimental. Esse fenômeno refletiu diretamente na curva de secagem, que apresentou maior inclinação nas primeiras 30 horas, alcançando umidade de 2,2 em base seca, valor significativamente inferior ao obtido no ensaio 4 no mesmo período, cuja umidade atingiu 2,36.

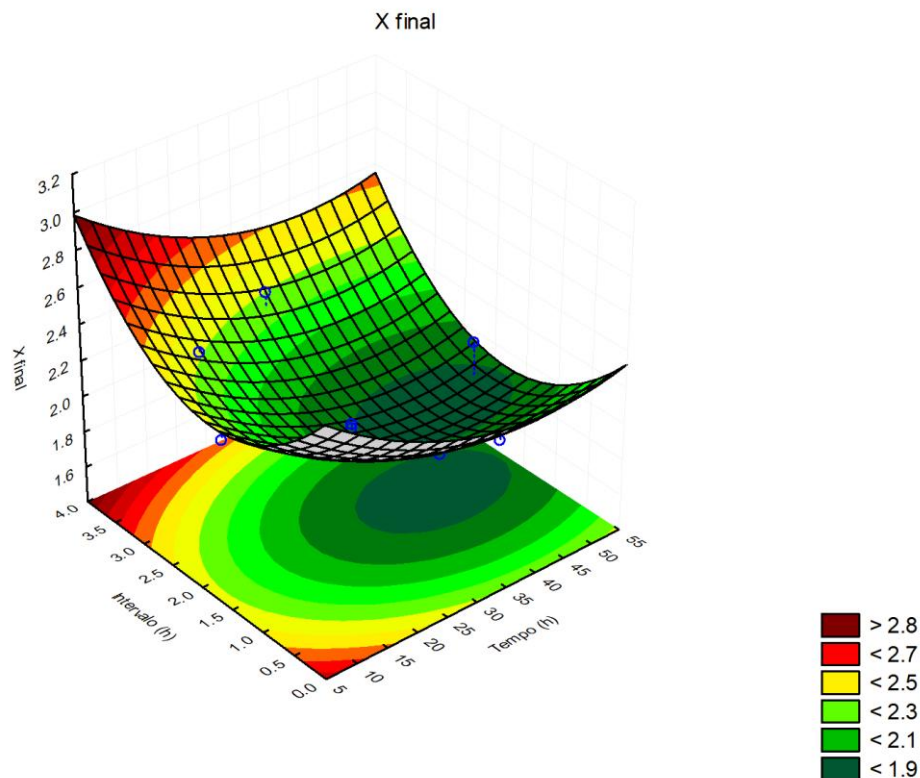
De maneira quase oposta, o ensaio 10 não apresentou um início tão acelerado. Com o leite iniciando a 22,4 °C, sua atividade biológica não estava acelerada o suficiente para sustentar termicamente o leite, fato que resultou em uma umidade de 2,69 após as primeiras 30 horas. Entretanto, logo em seguida, o metabolismo microbiano começou a se intensificar, atingindo um pico de 38,8 °C. Consequentemente, a curva de secagem passou a apresentar inclinação mais acentuada, reduzindo a umidade de 2,69 para 1,98 ao final do ensaio, valor próximo ao encontrado no ensaio 9, de 1,89.

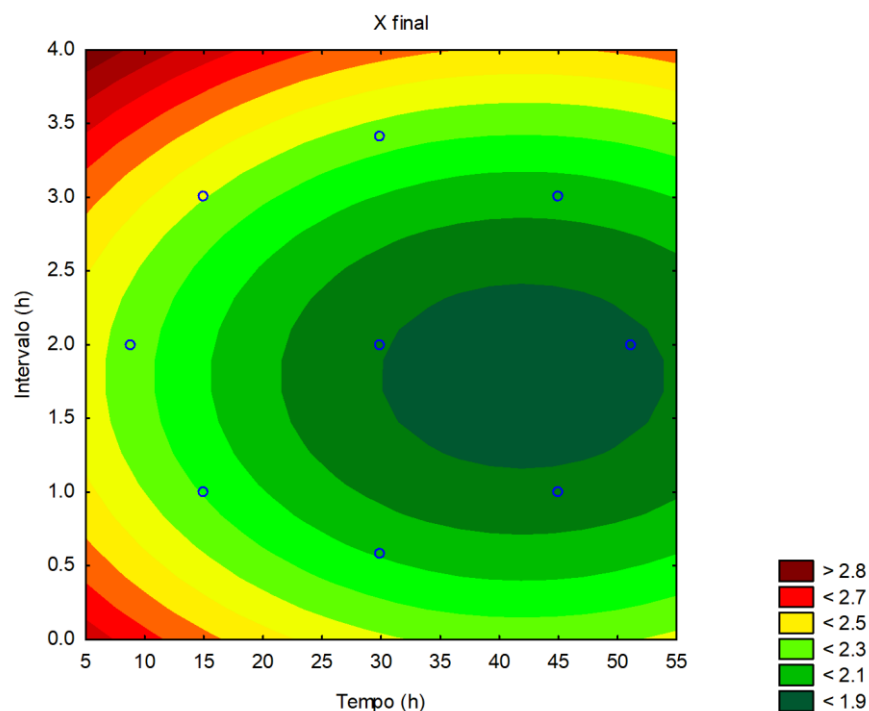
Esses dois últimos ensaios demonstram com clareza a importância da temperatura para a eficiência da secagem, além de evidenciarem como o trabalho com microrganismos nativos pode ser imprevisível e de difícil controle.

4.4. Superfície de resposta das umidades finais – DCC

A superfície de resposta das umidades finais é expressa na figura 14 abaixo:

Figura 14: Superfícies de resposta para a umidade em função do tempo de pulso e do intervalo de intermitência





Fonte: Autoria própria

De maneira oposta ao que foi observado na análise da superfície da temperatura, no caso da umidade final é possível verificar claramente a formação de uma curva com mínimo local bem definido dentro da região experimental. Esse comportamento indica que o modelo apresentou um ajuste mais adequado aos dados experimentais, tornando plausível seguir a tendência proposta pela superfície de resposta.

Os resultados indicam que tempos de pulso maiores, entre 30 e 55 minutos, juntamente com intervalos de intermitência intermediários, entre aproximadamente 1 hora e meia e pouco mais de 2 horas, tendem a minimizar a umidade final da biomassa.

Dentre os experimentos que apresentaram melhor desempenho, o ensaio 3 foi o que promoveu a maior remoção de umidade, seguido pelo ensaio 4. A diferença entre ambos foi pequena e permaneceu dentro do intervalo de confiabilidade da medição, com valores de perda de umidade de 1,17 e 1,13, respectivamente. Entretanto, observa-se que apenas o ensaio 4 apresentou recuperação térmica associada à atividade biológica, ao longo de todo o processo. Dessa forma, os resultados sugerem que maiores intervalos de intermitência podem favorecer o restabelecimento da atividade microbiana e a

recuperação da temperatura do leito, possibilitando uma operação mais eficiente com menor demanda de aeração por um período mais prolongado.

Além disso, os resultados sugerem que a umidade final do sistema apresentou um comportamento mais consistente em relação às variáveis operacionais avaliadas do que a temperatura. Enquanto a análise térmica apresentou maior variabilidade entre os ensaios, provavelmente devido a pequenas diferenças entre os ensaios (como temperatura inicial e estágio de atividade microbológica), dificultando a identificação de uma região ótima. A análise da umidade final mostrou uma tendência mais bem definida dentro da região experimental. Isso indica que a combinação entre tempo de pulso e intervalo de intermitência exerceu influência mais direta sobre a remoção total de água ao longo do processo.

4.5. Análise elemental, teor de cinzas e HHV

A partir dos dados obtidos por meio da análise elemental CHNS/O, realizada pelo Instituto de Química da UFSCar, e dos teores de cinzas advindas do trabalho de Vinícius Doimo e colaboradores, tendo em vista que nos dois trabalhos a biomassa utilizada eram da mesma amostra, foi elaborada a Tabela 2, contendo a composição elemental de cada ensaio. Adicionalmente, foram incluídos os valores correspondentes à biomassa in natura, possibilitando comparar a amostra fresca com as amostras submetidas a biossecagem.

Além dessa tabela, foi elaborada a, Tabela 3, com os valores de Higher heat value (HHV) utilizando os dados da análise elemental aplicados a duas equações empíricas, a equação de Yin (equação 2) e a equação de Sheng (equação 3).

Tabela 2: Composição elemental de cada ensaio.

Ensaio	Ash (%)	N (%)	C (%)	H(%)	O(%)
1	~ 2,9	2,6 ± 0,1	40,1 ± 0,1	3,8 ± 0,1	50,5 ± 0,1
2	~ 2,9	2,5 ± 0,1	39,3 ± 0,1	3,5 ± 0,1	51,8 ± 0,1
3	~ 2,9	2,2 ± 0,1	39,2 ± 0,1	3,9 ± 0,1	51,8 ± 0,1
4	~ 2,9	1,9 ± 0,1	39,1 ± 0,1	3,7 ± 0,1	52,4 ± 0,1
5	~ 2,9	1,8 ± 0,1	37,5 ± 0,1	3,3 ± 0,1	54,5 ± 0,1
6	~ 2,9	1,7 ± 0,1	39,9 ± 0,1	5,3 ± 0,1	50,0 ± 0,1
7	~ 2,9	1,4 ± 0,1	40,8 ± 0,1	5,4 ± 0,1	49,6 ± 0,1
8	~ 2,9	1,7 ± 0,1	39,0 ± 0,1	5,2 ± 0,1	51,2 ± 0,1
9 (C)	~ 2,9	1,6 ± 0,1	39,8 ± 0,1	5,2 ± 0,1	50,5 ± 0,1
10 (C)	~ 2,9	1,6 ± 0,1	40,3 ± 0,1	5,3 ± 0,1	49,9 ± 0,1
Fresco	~ 2,9	3,4 ± 0,1	49,1 ± 0,1	3,7 ± 0,1	38,9 ± 0,1

Fonte: Autoria própria

Tabela 3: Valores de HHV, a partir das equações de Yin e Sheng.

Ensaio	Yin (Mj/Kg)	% do total	Sheng(Mj/Kg)	% do total
1	14,9	85,33	15,5	86,3
2	14,5	82,57	15,0	83,9
3	14,8	84,28	15,3	85,4
4	14,6	83,18	15,1	84,5
5	13,8	78,6	14,4	80,4
6	16,1	92,05	16,4	91,8
7	16,5	94,04	16,8	93,7
8	15,8	90,07	16,1	90,1
9 (C)	16,0	91,42	16,4	91,4
10 (C)	16,3	92,73	16,6	92,5
Fresco	17,5	100	17,9	100

Fonte: Autoria própria

A partir dos dados apresentados, o primeiro aspecto que merece destaque é a ausência de enxofre na biomassa de laranja. Essa característica é positiva quando se considera sua utilização como combustível, uma vez que a inexistência desse elemento reduz os impactos ambientais associados ao processo de combustão, evitando a emissão de gases sulfurados, como o dióxido de enxofre (SO₂), um dos principais responsáveis pela formação da chuva ácida.

Conforme esperado, todos os ensaios de biossecagem apresentaram redução do poder calorífico superior (HHV). Esse comportamento indica que parte da matéria orgânica foi consumida pelos microrganismos nativos da biomassa, que utilizaram esse material como fonte de energia para seu metabolismo, convertendo uma fração da energia química armazenada em calor.

Nesse contexto, o ensaio 5 apresentou a maior redução de poder calorífico. De acordo com as equações propostas por Yin, a perda observada foi de aproximadamente 4 MJ/kg. Esse resultado era esperado, considerando que esse ensaio apresentou a maior temperatura média ao longo do processo. Dessa forma, pode-se inferir que a biomassa manteve elevados níveis de atividade metabólica por um período mais prolongado, resultando em maior consumo de matéria orgânica.

Entretanto, sob a ótica da eficiência da secagem, observa-se que o ensaio 5 não apresentou o menor teor de umidade final. Os ensaios realizados nos pontos centrais, 9 e 10, atingiram valores significativamente menores, próximos de 1,9 kg de água/kg de matéria seca, enquanto o ensaio 5 apresentou valor em torno de 2,15. Esse resultado foi obtido mesmo com uma redução de HHV de aproximadamente 1,5 MJ/kg nos ensaios centrais, valor substancialmente inferior ao observado no ensaio 5.

Dessa forma, é possível concluir que o consumo de poder calorífico durante a biossecagem apresenta forte correlação com a temperatura média da biomassa ao longo do processo, uma vez que temperaturas mais elevadas refletem maior atividade microbiana e, conseqüentemente, maior degradação da matéria orgânica. Além disso, considerando que apenas um dos ensaios apresentou redução superior a 20% no HHV, pode-se afirmar que a biossecagem não promoveu perdas excessivas de poder calorífico. Assim, a biomassa submetida a esse processo mantém potencial para utilização como fonte de energia em processo de combustão posterior.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos demonstraram que a intermitência do fluxo de ar exerce influência direta tanto sobre o comportamento térmico quanto sobre a remoção de umidade durante a biossecagem. De maneira geral, observou-se que intervalos maiores entre os pulsos de aeração favoreceram a manutenção térmica do leito, permitindo maior recuperação do metabolismo microbiano após os eventos de resfriamento evaporativo provocados pelo fluxo de ar. Em contrapartida, intervalos curtos e elevados volumes ar tenderam a dificultar a estabilização térmica do sistema, reduzindo a atividade biológica e comprometendo o aquecimento do leito.

A análise térmica indicou a hipótese de que a temperatura do sistema apresentou elevada sensibilidade às condições iniciais dos ensaios, especialmente à temperatura inicial do leito, indicando forte dependência do estágio metabólico em que os microrganismos se encontravam no início da operação. Esse comportamento resultou em elevada variabilidade experimental, dificultando a obtenção de um modelo estatístico robusto para a superfície de resposta das temperaturas. Ainda assim, os resultados sugerem que combinações envolvendo maiores intervalos de intermitência e pulsos curtos de ar tendem a favorecer o desempenho térmico do processo.

Em relação à remoção de umidade, os resultados mostraram comportamento mais consistente e melhor ajuste ao modelo proposto pelo Delineamento Composto Central. A superfície de resposta indicou a formação de uma região de mínimo local bem definida, sugerindo que tempos de pulso mais longos, associados a intervalos intermediários de intermitência, favorecem a redução da umidade final da biomassa. Esse comportamento evidencia que a remoção de água não depende exclusivamente das maiores temperaturas atingidas pelo sistema, mas também da combinação adequada entre disponibilidade térmica e quantidade de ar fornecida ao leito ao longo do processo.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a padronização mais rigorosa das condições iniciais da biomassa, especialmente da temperatura inicial do leito e do estágio de atividade microbiológica do material. Também se sugere a ampliação da região experimental do DCCR, principalmente para intervalos maiores de intermitência, buscando verificar a existência de uma região ótima fora da faixa estudada. Além disso, a inclusão de novas variáveis no planejamento experimental, como vazões de ar com intermitência variável, para aproveitar com mais eficiências momentos de picos de temperatura.

6. Referências bibliográficas

[1]. ADANI, F.; BAIDO, D.; CALCATERRA, E.; GENEVINI, P. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. Bioresource

Technology, v. 83, n. 3, p. 173–179, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00231-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00231-0).

[2]. ADANI, F.; TAMBONE, F.; GOTTI, A. Biostabilization of municipal solid waste. *Waste Management*, v. 24, n. 8, p. 775–783, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.007>.

[3]. AHRNÉ, L. M.; PEREIRA, N. R.; STAACK, N.; FLOBERG, P. Microwave convective drying of plant foods at constant and variable microwave power. *Drying Technology*, v. 25, n. 7-8, p. 1149–1153, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930701438436>.

[4]. ALAKANGAS, E. Biomass and agricultural residues for energy generation. In: *Fuel Flexible Energy Generation: Solid, Liquid and Gaseous Fuels*. Amsterdam: Elsevier, 2016. p. 59–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-378-2.00003-1>.

[5]. BANCO DO NORDESTE DO BRASIL. Citricultura: laranja. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2024. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1946/1/2024_CDS_328.pdf. Acesso em: 13 jun. 2026.

[6]. BILGIN, M.; TULUN, Ş. Biodrying for municipal solid waste: volume and weight reduction. *Environmental Technology*, v. 36, n. 13, p. 1691–1697, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1006262>.

[7]. BOTHA, G. E.; OLIVEIRA, J. C.; AHRNÉ, L. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. *Journal of Food Engineering*, v. 108, n. 2, p. 304–311, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.009>.

[8]. CAI, L.; CHEN, T. B.; GAO, D.; YU, J. Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge. *Water Research*, v. 90, p. 44–51, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.026>.

[9]. CAI, L.; GAO, D.; CHEN, T. B.; LIU, H. T.; ZHENG, G. D.; YANG, Q. W. Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge

biodrying. *Bioresource Technology*, v. 117, p. 13–19, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.092>

[10]. CÉSAR, Mariana; MELO, Paula A. T.; CARVALHO, Romero F.; BRANDOLINI, Hugo F.; COSTA, Ariany B. S.; COSTA, Adilson V.; SOUSA, Robson C. Physicochemical characterization, convective drying and evaluation of the energy potential of citrus waste for bioenergy production and solid biofuel combustion. *Fuel*, v. 393, p. 134777, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134777>

[11]. CHIN, S. K.; LAW, C. L. Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. *Drying Technology*, v. 28, n. 12, p. 1457–1465, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.482707>.

[12]. CHUA, K. J.; CHOU, S. K.; HO, J. C.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M. N. A. Cyclic air temperature drying of guava pieces: effects on moisture and ascorbic acid contents. *Food and Bioproducts Processing*, v. 78, n. 2, p. 72–78, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1205/096030800532761>.

[13]. CHUA, K. J.; HAWLADER, M. N. A.; CHOU, S. K.; HO, J. C. On the study of time-varying temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. *Drying Technology*, v. 20, n. 8, p. 1559–1577, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120014052>.

[14]. CONAGIN, Armando. Delineamentos compostos centrais ortogonais, rotacionais e divisíveis em blocos. *Bragantia*, v. 41, n. 1, p. 49–58, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051982000100005>. [14] Cai, L., Chen, T. Bin, Gao, D., & Yu, J. (2016). Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge. *Water Research*, 90, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.026>

[15]. DE LIMA, V. F.; ARAÚJO, L. F.; AGUIAR, E. M.; COELHO, R. R. P. C. Processos biotecnológicos aplicados ao bagaço de laranja para redução dos custos na alimentação animal. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 11, n. 2, p. 2466–2483, 2017. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta>.

[16]. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Processo de produção de suco de laranja. [S. l.]: Embrapa, [s. d.]. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/410324/1/FL0179.pdf>.

Acesso em: 4 jun. 2026.

[17]. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2025: relatório final. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dado-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf. Acesso em: 7 jun. 2026.

[18]. ESTURK, O. Intermittent and continuous microwave-convective air-drying characteristics of sage (*Salvia officinalis*) leaves. *Food and Bioprocess Technology*, v. 5, n. 5, p. 1664–1673, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0462-x>.

[19]. ESTURK, O.; ARSLAN, M.; SOYSAL, Y.; UREMIS, I.; AYHAN, Z. Drying of sage (*Salvia officinalis* L.) inflorescences by intermittent and continuous microwave-convective air combination. *Research on Crops*, v. 12, n. 2, p. 607–615, 2011.

[20]. FREI, K. M.; CAMERON, D.; STUART, P. R. Novel drying process using forced aeration through a porous biomass matrix. *Drying Technology*, v. 22, n. 5, p. 1191–1215, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120038587>.

[21]. GONZÁLEZ, D.; GUERRA, N.; COLÓN, J.; GABRIEL, D.; PONSÁ, S.; SÁNCHEZ, A. Filling in sewage sludge biodrying gaps: greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions. *Bioresource Technology*, v. 291, 121857, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121857>.

[22]. HO, J. C.; CHOU, S. K.; CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; HAWLADER, M. N. A. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering*, v. 51, p. 65–75, 2002.

[23]. HUILINIR, C.; VILLEGAS, M. Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge. *Water Research*, v. 82, p. 118–128, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.046>.

[24]. IBITOYE, Segun E. An overview of biomass solid fuels: biomass sources, processing methods, and morphological and microstructural properties. *Journal of*

Bioresources and Bioproducts, v. 8, n. 4, p. 333–360, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2023.09.005>.

[25]. IEA BIOENERGY. Annual Report 2017. [S. l.]: IEA Bioenergy, 2017. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/04/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2017-R1.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2026.

[26]. JEWELL, W. J.; CUMMINGS, R. J. Apple pomace energy and solids recovery. *Journal of Food Science*, v. 49, p. 407–410, 1984.

[27]. KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*, v. 121, n. 1, p. 48–57, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>.

[28]. LAURI, Pekka; HAVLÍK, Petr; KINDERMANN, Georg; FORSELL, Nicklas; BÖTTCHER, Hannes; OBERSTEINER, Michael. Woody biomass energy potential in 2050. *Energy Policy*, v. 66, p. 19–31, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.033>.

[29]. LI, Q.; LU, X.; GUO, H.; YANG, Z.; LI, Y.; ZHI, S.; ZHANG, K. Sewage sludge drying method combining pressurized electro-osmotic dewatering with subsequent biodrying. *Bioresource Technology*, v. 263, p. 94–102, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.110>.

[30]. LIU, Z.; TAN, X.; WANG, Y.; ZOU, W.; ZHANG, C. Effect of temperature and bulking agents on deep bio-drying of high-solid anaerobically digested sludge. *Drying Technology*, v. 38, n. 14, p. 1904–1914, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1678043>.

[31]. MAIA, G. D.; HORTA, A. C. L.; FELIZARDO, M. P. From the conventional to the intermittent biodrying of orange solid waste biomass. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 188, 109361, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109361>.

[32]. MUJUMDAR, Arun S. (ed.). *Handbook of industrial drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1348 p. ISBN 9781466596658.

[33]. NAVAEE-ARDEH, S.; BERTRAND, F.; STUART, P. R. Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludges. *Drying Technology*, v. 24, n. 7, p. 863–878, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930600734026>.

[34]. OECD; FAO. OECD-FAO Agricultural Outlook 2017–2026. Paris: OECD Publishing, 2017. DOI: https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2017-en.

[35]. PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Drying kinetics prediction of solid waste using semi-empirical and artificial neural network models. *Chemical Engineering and Technology*, v. 36, n. 7, p. 1193–1201, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201200593>.

[36]. PERAZZINI, H.; PERAZZINI, M. T. B.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Modeling and cost analysis of drying of citrus residues as biomass in rotary dryer for bioenergy. *Renewable Energy*, v. 175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.144>.

[37]. RADA, E. C.; FRANZINELLI, A.; TAISS, M.; RAGAZZI, M.; PANAITESCU, V.; APOSTOL, T. Lower heating value dynamics during municipal solid waste bio-drying. *Environmental Technology*, v. 28, n. 4, p. 463–469, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593332808618807>.

[38]. RADA, E. C.; VENTURI, M.; RAGAZZI, M.; APOSTOL, T.; STAN, C.; MARCULESCU, C. Biodrying role in changeable scenarios of Romanian MSW management. *Waste and Biomass Valorization*, v. 1, n. 2, p. 271–279, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-010-9023-9>.

[39]. RAGAZZI, M.; APOSTOL, T.; RADA, E. C.; NEGOI, R. M.; MĂRCULESCU, C. Bio-drying of Romanian municipal solid waste: an analysis of its viability. *UPB Scientific Bulletin, Series C*, v. 71, 2009.

[40]. REZZADORI, K.; BENEDETTI, S. Proposições para valorização de resíduos do processamento do suco de laranja. In: *International Workshop Advances in Cleaner Production*, 1., 2009. Anais [...]. [S. l.]: [s. n.], 2009. p. 1–11.

[41]. RIVAS, Beatriz et al. Submerged citric acid fermentation on orange peel autohydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 56, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf073388r>.

[42]. SALEEM, M. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. *Heliyon*, v. 8, n. 2, e08905, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08905>.

[43]. SCAGLIA, B.; TAMBONE, F.; GENEVINI, P. L.; ADANI, F. Respiration index determination: dynamic and static approaches. *Compost Science & Utilization*, v. 8, n. 2, p. 90–98, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701754>.

[44]. SCHÖSSLER, K.; JÄGER, H.; KNORR, D. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. *Journal of Food Engineering*, v. 108, n. 1, p. 103–110, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.018>.

[45]. SHENG, C.; AZEVEDO, J. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, v. 28, p. 499–507, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.008>.

[46]. SOYSAL, Y.; AYHAN, Z.; EŞTÜRK, O.; ARIKAN, M. F. Intermittent microwave-convective drying of red pepper: drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. *Biosystems Engineering*, v. 103, n. 4, p. 455–463, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.010>.

[47]. SUGNI, M.; CALCATERRA, E.; ADANI, F. Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. *Bioresource Technology*, v. 96, n. 12, p. 1331–1337, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.11.016>.

[48]. TIEMI, Ariane et al. Caracterização química do bagaço de laranja: potencial rota para uso desse resíduo. [S. l.]: [s. n.], 2022. DOI: <https://doi.org/10.18265/2447-9187a2022id7678>.

[49]. TOM, A. P.; PAWELS, R.; HARIDAS, A. Biodrying process: a sustainable technology for treatment of municipal solid waste with high moisture content. *Waste Management*, v. 49, p. 64–72, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.004>.

[50]. TURSI, Antonio. A review on biomass: importance, chemistry, classification, and conversion. *BioResources and Bioproducts*, v. 6, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3>.

[51]. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Citrus: world markets and trade. Washington, DC: USDA Foreign Agricultural Service, 2025. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/citrus-world-markets-and-trade-01302025>. Acesso em: 7 jun. 2026.

[52]. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Processo de produção de suco de laranja. Curitiba: UTFPR, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5480/1/AP_COENQ_2018_2_05.pdf. Acesso em: 17 maio 2026.

[53]. VALENTI, Francesca; SPIZZIRRI, Emanuele; MARALDI, Mirko. Valorising agricultural waste and by-products for renewable energy: sustainable technologies and pathways. *Energy Reports*, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.109000>.

[54]. VAN ENGELAND, C.; SPREUTELS, L.; LEGROS, R.; HAUT, B. Comprehensive analysis of intermittent drying: a theoretical approach. *Food and Bioproducts Processing*, v. 131, p. 86–101, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.10.009>.

[55]. VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

[56]. WRIGHT, P. Biodrying manure on a dairy farm. In: *Animal Residuals Management Conference*, 2000, Kansas City. Proceedings [...]. Kansas City: Water Environment Federation, 2000.

[57]. YIN, C. Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, v. 90, p. 1128–1132, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>.

[58]. VAN HEERDEN, I.; CRONJÉ, C.; SWART, S. H.; KOTZÉ, J. M. Microbial, chemical and physical aspects of citrus waste composting. *Bioresource Technology*, v. 81, n. 1, p. 71–76, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00058-X).

7. Apêndice

Apêndice 1: Tabelas com os dados experimentais de temperatura e perda de massa

Exp 1			Exp 2			Exp 3		
%Tempo(h)	Temperatura(°C)	Perda de massa	%Tempo(h)	Temperatura3(°C)	Perda de massa	%Tempo(h)	Temperatura3(°C)	Perda de massa
0,081	22,925	0	0,081	25,507	0	0,082	31,681	0
0,75	22,792	0	0,833	27,281	-0,01	0,749	33,502	0
1,417	21,816	-0,02	1,582	28,84	-0,02	1,416	29,988	-0,02
2,084	21,421	-0,02	2,334	30,523	-0,02	2,083	23,594	-0,06
2,748	19,416	-0,03	3,083	31,948	-0,03	2,751	24,841	-0,08
3,413	19,55	-0,03	3,829	31,191	-0,04	3,415	17,775	-0,11
4,08	18,125	-0,04	4,584	33,59	-0,06	4,083	18,214	-0,11
4,75	18,303	-0,05	5,333	36,437	-0,06	4,75	17,422	-0,14
5,417	17,11	-0,06	6,085	39,1	-0,07	5,418	15,105	-0,15
6,084	16,932	-0,06	6,834	35,413	-0,11	6,082	16,754	-0,17
6,752	16,62	-0,06	7,583	38,744	-0,11	6,75	15,061	-0,18
7,419	15,996	-0,08	8,335	41,365	-0,13	7,417	14,972	-0,2
8,081	15,952	-0,07	9,084	43,366	-0,14	8,084	16,308	-0,2
8,751	15,105	-0,09	9,833	35,368	-0,19	8,752	14,171	-0,24
9,419	15,595	-0,09	10,587	38,744	-0,19	9,419	15,818	-0,24
10,086	14,972	-0,09	11,333	40,793	-0,21	10,086	15,373	-0,25
10,753	15,284	-0,09	12,085	42,876	-0,21	10,751	14,615	-0,26
11,42	14,794	-0,11	12,837	42,876	-0,24	11,421	16,575	-0,27
12,082	15,016	-0,1	13,588	37,764	-0,26	12,085	14,749	-0,29
12,752	14,437	-0,11	14,334	38,966	-0,28	12,752	15,284	-0,31
13,42	14,838	-0,11	15,088	40,303	-0,27	13,417	16,041	-0,31
14,087	14,084	-0,11	15,835	41,365	-0,29	14,087	14,127	-0,34
14,751	14,571	-0,11	16,589	36,17	-0,31	14,754	15,863	-0,34
15,421	13,908	-0,13	17,338	36,705	-0,32	15,422	15,105	-0,36
16,088	13,952	-0,13	18,09	37,237	-0,33	16,089	14,615	-0,38
16,755	13,821	-0,14	18,838	37,897	-0,34	16,753	16,264	-0,37
17,423	13,245	-0,14	19,587	32,438	-0,36	17,421	13,865	-0,4

18,084	13,776	-0,14	20,339	33,546	-0,37	18,085	14,927	-0,41
18,754	12,222	-0,15	21,088	33,59	-0,37	18,755	15,105	-0,43
19,419	13,289	-0,15	21,84	33,854	-0,38	19,42	13,2	-0,43
20,086	12,888	-0,16	22,589	34,388	-0,39	20,09	15,239	-0,44
20,756	13,334	-0,16	23,34	30,567	-0,41	20,757	13,865	-0,46
21,423	12,933	-0,16	24,089	30,434	-0,41	21,422	13,865	-0,48
22,09	13,734	-0,17	24,841	30,523	-0,42	22,089	14,705	-0,48
22,757	13,245	-0,17	25,59	30,656	-0,41	22,756	12,131	-0,51
23,422	13,865	-0,17	26,336	28,038	-0,44	23,424	14,041	-0,51
24,089	13,467	-0,17	27,088	28,172	-0,44	24,091	13,734	-0,53
24,757	14,084	-0,17	27,84	27,994	-0,45	24,758	12,976	-0,54
25,424	13,821	-0,19	28,592	28,35	-0,45	25,423	14,838	-0,55
26,092	13,995	-0,2	29,344	26,034	-0,46	26,09	12,977	-0,56
26,759	14,172	-0,2	30,089	26,568	-0,47	26,757	13,645	-0,58
27,427	13,952	-0,2	30,844	26,568	-0,47	27,425	14,215	-0,58
28,091	14,526	-0,2	31,593	26,835	-0,47	28,092	12,354	-0,6
28,758	13,555	-0,21	32,34	27,192	-0,48	28,759	14,526	-0,61
29,426	14,615	-0,21	33,092	25,286	-0,49	29,427	13,908	-0,62
30,093	14,215	-0,22	33,844	25,242	-0,49	30,091	13,689	-0,64
30,757	14,749	-0,21	34,596	25,286	-0,5	30,761	15,863	-0,64
31,424	14,172	-0,23	35,345	25,595	-0,5	31,425	13,111	-0,67
32,095	14,794	-0,23	36,097	23,905	-0,51	32,093	14,794	-0,67
32,762	14,348	-0,24	36,846	23,816	-0,51	32,758	15,016	-0,68
33,426	14,972	-0,25	37,595	23,905	-0,51	33,428	13,512	-0,7
34,093	14,526	-0,25	38,347	23,95	-0,52	34,093	15,729	-0,7
34,761	15,15	-0,25	39,098	22,569	-0,53	34,757	14,172	-0,72
35,425	14,526	-0,26	39,847	22,836	-0,54	35,428	14,393	-0,73
36,095	14,66	-0,27	40,596	22,614	-0,54	36,095	16,041	-0,73
36,76	14,348	-0,27	41,347	22,703	-0,54	36,762	13,376	-0,76

37,43	13,952	-0,27	42,096	22,792	-0,54	37,43	15,105	-0,76
38,095	14,304	-0,27	42,848	21,554	-0,55	38,094	14,838	-0,77
38,761	13,644	-0,27	43,596	21,332	-0,55	38,761	13,289	-0,79
39,429	14,215	-0,28	44,348	21,243	-0,55	39,428	15,863	-0,78
40,09	13,423	-0,29	45,1	21,509	-0,56	40,093	12,799	-0,8
40,76	14,127	-0,29	45,849	20,352	-0,58	40,76	14,126	-0,81
41,424	13,2	-0,3	46,6	20,129	-0,57	41,43	14,705	-0,83
42,094	13,952	-0,3	47,349	20,174	-0,58	42,098	11,819	-0,84
42,765	13,289	-0,3	48,1	20,619	-0,57	42,762	14,217	-0,83
43,432	14,128	-0,3	48,846	19,684	-0,58	43,43	12,888	-0,86
44,096	13,334	-0,31	49,601	19,728	-0,59	44,097	12,22	-0,86
44,764	14,348	-0,32	50,349	19,906	-0,58	44,765	14,304	-0,86
45,431	13,865	-0,32	51,101	20,218	-0,58	45,432	10,973	-0,88
46,098	14,085	-0,33	51,853	20,842	-0,59	46,099	12,844	-0,88
46,766	13,995	-0,33	52,599	19,817	-0,61	46,761	12,799	-0,89
47,433	13,952	-0,34	53,351	20,085	-0,6	47,431	10,487	-0,91
48,1	14,393	-0,35	54,1	20,441	-0,61	48,099	13,022	-0,91
48,767	13,951	-0,36	54,854	20,842	-0,61	48,763	12,352	-0,92
49,431	15,105	-0,36	55,603	19,906	-0,61	49,43	11,775	-0,92
50,096	14,083	-0,36	56,352	20,129	-0,61	50,1	13,289	-0,92
50,763	15,551	-0,37	57,104	20,307	-0,61	50,767	11,238	-0,95
51,433	14,749	-0,37	57,853	20,753	-0,61	51,432	12,755	-0,95
52,1	16,175	-0,38	58,605	19,728	-0,62	52,099	12,309	-0,95
52,767	15,373	-0,4	59,351	19,951	-0,63	52,766	12,974	-0,98
53,434	16,843	-0,4	60,105	20,085	-0,63	53,434	13,689	-0,97
54,101	16,13	-0,41	60,854	20,441	-0,64	54,098	11,329	-0,98
54,769	17,555	-0,43	61,603	20,575	-0,63	54,768	12,621	-0,98
55,436	16,887	-0,43	62,355	19,55	-0,64	55,433	13,245	-0,98
56,1	17,465	-0,44	63,106	19,505	-0,65	56,103	11,017	-1,01

56,77	17,644	-0,46	63,856	19,595	-0,65	56,767	13,467	-1,01
57,435	17,199	-0,47	64,607	19,906	-0,65	57,434	12,487	-1,01
58,102	18,436	-0,49	65,356	18,837	-0,65	58,102	13,82	-1,03
58,769	16,887	-0,5	66,105	18,837	-0,65	58,769	14,304	-1,02
59,436	19,327	-0,51	66,857	18,748	-0,65	59,434	11,285	-1,04
60,104	17,731	-0,54	67,606	18,926	-0,66	60,103	12,977	-1,04
60,772	20,441	-0,54	68,358	18,037	-0,68	60,771	13,066	-1,06
61,436	18,837	-0,57	69,104	18,081	-0,68	61,438	16,04	-1,06
62,103	21,597	-0,58	69,859	18,214	-0,68	62,102	13,289	-1,06
62,771	19,862	-0,6	70,608	18,392	-0,68	62,767	11,329	-1,07
63,436	22,391	-0,62	71,36	18,704	-0,68	63,437	11,953	-1,09

Exp 4			Exp 5			Exp 6		
%Tempo(h)	Temperatura2(°C)	Perda de massa	%Tempo(h)	Temperatura2(°C)	Perda de massa	%Tempo(h)	Temperatura3(°C)	Perda de massa
0,082	20,797	0	0,081	27,147	0	0,082	20,842	0
0,749	20,975	0	0,748	27,593	0	0,746	21,728	0
1,414	21,554	0	1,415	27,593	0	1,413	22,035	0
2,081	21,903	0	2,08	27,593	0	2,083	22,881	0
2,749	22,124	0	2,747	27,415	-0,02	2,75	16,62	-0,02
3,413	22,391	-0,03	3,414	27,014	-0,02	3,417	16,041	-0,03
4,084	20,129	-0,04	4,084	26,925	-0,03	4,084	16,754	-0,06
4,751	20,396	-0,04	4,749	26,969	-0,03	4,749	17,555	-0,06
5,418	20,842	-0,04	5,417	26,568	-0,04	5,414	15,105	-0,05
6,081	21,509	-0,04	6,078	26,791	-0,04	6,081	13,111	-0,06
6,751	22,168	-0,06	6,751	26,791	-0,04	6,751	13,777	-0,07
7,418	20,485	-0,09	7,418	26,613	-0,05	7,416	14,883	-0,07

8,085	20,441	-0,08	8,085	26,524	-0,05	8,083	14,126	-0,07
8,75	21,331	-0,09	8,75	26,657	-0,06	8,75	13,685	-0,1
9,417	22,569	-0,09	9,417	26,568	-0,07	9,418	12,265	-0,1
10,084	24,217	-0,09	10,087	26,746	-0,07	10,082	13,155	-0,1
10,752	25,108	-0,1	10,751	27,147	-0,07	10,749	13,2	-0,1
11,419	22,925	-0,12	11,421	26,835	-0,09	11,419	12,665	-0,15
12,087	25,77	-0,13	12,085	27,058	-0,09	12,087	10,175	-0,16
12,754	27,86	-0,13	12,752	27,325	-0,1	12,754	12,042	-0,16
13,421	28,929	-0,14	13,419	27,637	-0,1	13,419	13,111	-0,16
14,088	29,855	-0,13	14,084	27,637	-0,11	14,086	11,731	-0,18
14,751	25,683	-0,17	14,754	27,815	-0,1	14,753	11,554	-0,19
15,421	23,727	-0,18	15,421	28,261	-0,11	15,421	11,285	-0,19
16,089	24,752	-0,19	16,089	27,949	-0,13	16,088	12,175	-0,19
16,753	26,123	-0,2	16,753	28,395	-0,13	16,755	11,151	-0,21
17,421	27,682	-0,2	17,421	28,573	-0,13	17,417	12,265	-0,22
18,088	28,484	-0,2	18,088	28,617	-0,14	18,087	9,909	-0,21
18,755	23,371	-0,25	18,755	28,885	-0,14	18,752	12,265	-0,19
19,423	26,479	-0,26	19,422	29,505	-0,15	19,422	11,997	-0,2
20,09	29,417	-0,26	20,09	29,33	-0,16	20,089	9,154	-0,25
20,757	32,795	-0,26	20,757	29,899	-0,17	20,756	11,017	-0,22
21,422	36,259	-0,27	21,424	30,523	-0,17	21,423	12,265	-0,23
22,089	33,546	-0,3	22,091	30,656	-0,19	22,09	13,555	-0,25
22,757	30,701	-0,36	22,756	31,28	-0,19	22,755	10,532	-0,25
23,424	36,304	-0,36	23,423	32,26	-0,2	23,422	14,706	-0,27
24,091	40,392	-0,37	24,09	33,327	-0,21	24,089	12,977	-0,28
24,758	43,634	-0,38	24,754	33,24	-0,23	24,757	14,749	-0,28
25,425	45,584	-0,39	25,421	34,299	-0,23	25,421	12,309	-0,3
26,093	33,326	-0,48	26,091	35,769	-0,23	26,091	11,418	-0,31
26,754	33,415	-0,5	26,758	35,145	-0,25	26,758	13,378	-0,31

27,425	36,393	-0,5	27,425	36,66	-0,26	27,426	15,239	-0,33
28,092	39,635	-0,5	28,093	38,075	-0,26	28,093	14,04	-0,33
28,757	43,144	-0,51	28,76	36,615	-0,29	28,757	12,754	-0,35
28,838	43,188	-0,52	29,427	38,476	-0,3	29,424	13,467	-0,36
28,926	43,678	-0,52	30,092	39,857	-0,32	30,092	15,284	-0,36
29,01	44,079	-0,52	30,759	37,15	-0,34	30,756	15,685	-0,37
29,092	44,346	-0,53	31,426	39,635	-0,35	31,426	11,775	-0,37
29,171	44,925	-0,53	32,094	40,971	-0,34	32,093	13,022	-0,38
29,258	45,057	-0,52	32,761	41,674	-0,36	32,76	15,551	-0,39
29,34	44,168	-0,54	33,426	39,946	-0,38	33,428	17,905	-0,4
29,427	42,654	-0,55	34,093	41,015	-0,39	34,092	11,819	-0,42
30,089	29,855	-0,63	34,76	42,03	-0,4	34,759	12,532	-0,44
30,759	33,987	-0,63	35,427	40,125	-0,42	35,427	15,328	-0,44
31,424	37,368	-0,64	36,094	41,06	-0,43	36,091	17,644	-0,45
32,094	40,882	-0,65	36,761	41,674	-0,44	36,761	13,734	-0,5
32,761	44,435	-0,66	37,429	39,278	-0,47	37,428	10,442	-0,51
33,425	36,482	-0,72	38,096	40,392	-0,46	38,095	14,172	-0,52
34,093	31,77	-0,75	38,763	41,104	-0,48	38,759	16,62	-0,52
34,76	34,745	-0,77	39,428	38,031	-0,5	39,43	15,195	-0,53
35,427	37,368	-0,77	40,095	39,545	-0,52	40,097	9,641	-0,57
36,094	39,768	-0,77	40,763	40,347	-0,52	40,762	13,111	-0,55
36,758	41,675	-0,78	41,427	39,367	-0,53	41,426	15,685	-0,54
37,426	28,751	-0,84	42,094	38,966	-0,55	42,096	16,353	-0,54
38,093	29,152	-0,84	42,764	39,545	-0,55	42,763	10,53	-0,57
38,763	29,33	-0,85	43,431	40,303	-0,55	43,43	12,71	-0,57
39,431	29,635	-0,86	44,096	37,986	-0,58	44,098	15,061	-0,58
40,098	30,478	-0,86	44,763	38,432	-0,59	44,763	17,11	-0,6
40,762	32,394	-0,87	45,43	39,367	-0,6	45,427	12,755	-0,63
41,429	24,173	-0,9	46,098	37,412	-0,61	46,097	12,487	-0,64

42,094	24,663	-0,9	46,765	37,942	-0,61	46,764	15,15	-0,63
42,764	24,306	-0,92	47,432	38,521	-0,62	47,431	17,11	-0,63
43,431	24,44	-0,93	48,1	36,304	-0,64	48,098	14,972	-0,66
44,098	24,752	-0,92	48,767	37,194	-0,65	48,765	11,42	-0,67
44,765	23,772	-0,94	49,431	37,808	-0,66	49,432	14,927	-0,67
45,433	21,287	-0,95	50,1	34,344	-0,68	50,1	16,976	-0,67
46,097	21,243	-0,95	50,762	36,125	-0,68	50,767	16,887	-0,69
46,762	21,51	-0,96	51,435	36,437	-0,69	51,434	10,975	-0,71
47,429	21,859	-0,96	52,099	37,281	-0,69	52,101	14,348	-0,71
48,099	22,346	-0,96	52,769	34,967	-0,71	52,766	16,709	-0,71
48,763	18,882	-0,99	53,43	34,745	-0,73	53,433	18,436	-0,72
49,429	19,595	-0,99	54,1	35,012	-0,71	54,1	12,487	-0,74
50,099	19,817	-0,99	54,768	33,284	-0,73	54,768	13,601	-0,75
50,765	20,085	-0,99	55,432	32,75	-0,73	55,434	15,729	-0,76
51,432	20,753	-0,99	56,099	32,705	-0,73	56,102	17,818	-0,76
52,101	20,842	-1	56,769	31,28	-0,75	56,769	13,953	-0,78
52,768	17,993	-1,01	57,436	30,701	-0,74	57,436	12,309	-0,79
53,434	18,303	-1,02	58,103	30,478	-0,76	58,101	14,66	-0,8
54,101	18,704	-1,02	58,771	29,505	-0,76	58,768	16,353	-0,79
54,767	19,06	-1,02	59,438	29,107	-0,77	59,436	14,838	-0,8
55,434	19,461	-1,02	60,105	28,662	-0,77	60,103	13,018	-0,83
56,1	17,862	-1,04	60,769	28,84	-0,79	60,77	13,467	-0,83
56,767	17,065	-1,05	61,436	27,37	-0,79	61,435	15,061	-0,83
57,436	17,555	-1,05	62,104	26,925	-0,78	62,102	15,818	-0,83
58,102	17,951	-1,04	62,771	26,835	-0,8	62,766	12,264	-0,86
58,769	18,214	-1,05	63,435	25,99	-0,8	63,433	12,175	-0,86

Exp 7	Exp 8	Exp 9
-------	-------	-------

%Tempo(h)	Temperatura2(°C)	Perda de massa	%Tempo(h)	Temperatura3(°C)	Perda de massa	%Tempo(h)	Temperatura3(°C)	Perda de massa
0,081	27,192	0	0,082	24,485	0	0,081	31,191	0
0,748	27,415	-0,02	0,749	26,256	-0,01	0,75	32,126	0
1,416	23,104	-0,03	1,416	27,86	-0,01	1,417	32,884	-0,01
2,081	18,837	-0,06	2,083	29,679	-0,01	2,079	33,415	-0,02
2,751	19,149	-0,06	2,751	31,458	-0,02	2,749	26,746	-0,06
3,415	16,442	-0,09	3,415	33,545	-0,02	3,416	28,439	-0,06
4,082	15,818	-0,1	4,082	26,435	-0,07	4,083	29,988	-0,06
4,75	15,818	-0,1	4,75	29,417	-0,07	4,751	27,637	-0,09
5,417	13,729	-0,12	5,417	31,993	-0,08	5,418	24,663	-0,12
6,084	15,061	-0,12	6,084	34,477	-0,09	6,085	27,37	-0,13
6,751	14,437	-0,14	6,745	37,237	-0,1	6,75	29,635	-0,13
7,418	14,126	-0,15	7,418	39,501	-0,11	7,417	24,395	-0,16
8,083	14,393	-0,16	8,086	27,771	-0,16	8,084	25,682	-0,18
8,753	13,776	-0,17	8,753	30,122	-0,18	8,752	29,196	-0,19
9,42	13,821	-0,17	9,417	32,082	-0,19	9,419	32,438	-0,19
10,084	13,734	-0,19	10,084	33,943	-0,19	10,087	23,594	-0,25
10,752	13,111	-0,19	10,752	35,769	-0,2	10,754	28,573	-0,25
11,419	13,555	-0,2	11,416	37,5	-0,21	11,418	32,705	-0,25
12,083	12,888	-0,21	12,086	27,905	-0,25	12,086	33,9	-0,28
12,75	12,888	-0,22	12,753	28,127	-0,27	12,753	26,39	-0,32
13,42	12,933	-0,23	13,418	29,196	-0,27	13,417	31,547	-0,34
14,087	12,042	-0,24	14,085	30,033	-0,28	14,085	36,081	-0,34
14,754	12,354	-0,24	14,752	30,745	-0,28	14,752	30,924	-0,37
15,419	12,265	-0,26	15,422	31,592	-0,29	15,419	27,949	-0,41
16,089	12,086	-0,27	16,087	25,905	-0,32	16,087	33,633	-0,42
16,751	12,086	-0,28	16,753	24,663	-0,33	16,754	38,343	-0,43
17,421	12,397	-0,28	17,42	25,019	-0,33	17,421	26,657	-0,47
18,088	11,864	-0,3	18,087	25,638	-0,34	18,089	29,9	-0,49

18,756	11,775	-0,3	18,755	25,902	-0,34	18,756	35,145	-0,51
19,423	11,552	-0,3	19,422	26,256	-0,33	19,42	39,501	-0,51
20,09	11,597	-0,3	20,089	23,638	-0,36	20,09	24,93	-0,57
20,757	11,331	-0,33	20,757	21,641	-0,36	20,757	31,636	-0,58
21,424	11,908	-0,33	21,424	22,124	-0,37	21,422	36,259	-0,59
22,089	12,265	-0,33	22,088	22,569	-0,38	22,09	37,368	-0,6
22,756	11,819	-0,34	22,756	22,925	-0,39	22,757	27,37	-0,65
23,423	12,532	-0,35	23,423	23,282	-0,38	23,424	32,037	-0,65
24,09	12,532	-0,36	24,09	22,346	-0,39	24,091	35,056	-0,66
24,757	12,576	-0,36	24,755	20,129	-0,41	24,756	31,146	-0,69
25,425	12,933	-0,37	25,423	20,575	-0,41	25,423	26,791	-0,71
26,092	11,73	-0,39	26,09	20,931	-0,41	26,091	29,063	-0,72
26,759	13,111	-0,39	26,754	21,685	-0,41	26,758	30,612	-0,72
27,426	13,2	-0,4	27,424	22,035	-0,41	27,425	25,107	-0,75
28,091	13,2	-0,41	28,089	21,991	-0,42	28,093	25,551	-0,76
28,758	13,734	-0,41	28,756	19,416	-0,44	28,758	26,613	-0,76
29,423	13,506	-0,43	29,423	19,862	-0,44	29,425	27,548	-0,78
30,09	13,556	-0,43	30,093	20,352	-0,44	30,093	22,035	-0,79
30,76	13,556	-0,43	30,761	20,886	-0,44	30,758	23,905	-0,79
31,427	13,066	-0,45	31,428	21,465	-0,44	31,428	24,663	-0,8
32,094	13,645	-0,45	32,092	21,554	-0,45	32,092	25,858	-0,82
32,761	13,066	-0,46	32,76	18,793	-0,47	32,76	21,464	-0,83
33,426	13,022	-0,48	33,427	19,283	-0,47	33,427	22,257	-0,84
34,093	13,378	-0,48	34,094	19,728	-0,47	34,095	22,747	-0,85
34,76	12,443	-0,49	34,762	20,129	-0,47	34,762	23,237	-0,85
35,428	13,066	-0,49	35,429	20,753	-0,47	35,429	20,174	-0,87
36,095	12,71	-0,52	36,096	20,886	-0,48	36,094	20,708	-0,87
36,762	12,532	-0,52	36,763	17,994	-0,49	36,761	20,975	-0,86
37,429	12,844	-0,52	37,43	18,57	-0,49	37,428	19,105	-0,88

38,096	15,019	-0,53	38,095	18,882	-0,49	38,096	18,704	-0,9
38,763	12,443	-0,54	38,759	19,372	-0,49	38,763	18,971	-0,89
39,428	12,265	-0,55	39,426	19,862	-0,5	39,428	19,461	-0,9
40,095	11,73	-0,56	40,096	19,995	-0,51	40,095	16,665	-0,9
40,759	11,509	-0,56	40,763	17,511	-0,51	40,76	17,6	-0,92
41,429	11,775	-0,56	41,428	17,95	-0,52	41,43	17,862	-0,92
42,096	11,908	-0,59	42,095	18,169	-0,51	42,097	18,258	-0,92
42,761	12,175	-0,59	42,765	18,748	-0,52	42,764	15,952	-0,92
43,431	11,596	-0,6	43,432	19,105	-0,52	43,432	16,486	-0,92
44,098	12,309	-0,6	44,097	19,639	-0,51	44,099	16,932	-0,93
44,763	12,042	-0,63	44,764	16,976	-0,54	44,763	17,021	-0,93
45,433	12,131	-0,62	45,432	17,6	-0,54	45,431	15,551	-0,95
46,1	12,665	-0,63	46,099	17,994	-0,54	46,098	15,907	-0,95
46,765	12,042	-0,65	46,766	18,659	-0,54	46,765	16,531	-0,95
47,432	12,71	-0,65	47,433	19,06	-0,54	47,43	15,284	-0,96
48,093	12,933	-0,65	48,1	19,728	-0,54	48,1	15,373	-0,96
48,766	12,487	-0,67	48,768	16,976	-0,56	48,764	15,952	-0,96
49,433	13,645	-0,66	49,432	17,687	-0,57	49,432	16,665	-0,96
50,1	12,977	-0,68	50,099	18,038	-0,56	50,097	14,482	-0,98
50,768	13,155	-0,69	50,766	18,882	-0,56	50,767	15,462	-0,98
51,435	13,467	-0,7	51,434	19,505	-0,56	51,434	16,13	-0,98
52,102	13,198	-0,7	52,101	19,906	-0,57	52,101	16,754	-0,98
52,769	13,777	-0,71	52,768	17,021	-0,58	52,766	15,016	-1
53,436	13,2	-0,72	53,436	17,644	-0,57	53,433	15,64	-1
54,101	13,066	-0,73	54,103	18,169	-0,57	54,101	16,264	-1
54,768	13,908	-0,74	54,768	18,837	-0,59	54,768	16,308	-1,01
55,435	12,576	-0,76	55,435	19,194	-0,59	55,436	14,927	-1,01
56,103	13,555	-0,76	56,1	19,728	-0,59	56,103	15,729	-1,01
56,767	13,2	-0,77	56,77	16,665	-0,6	56,767	16,397	-1,02

57,437	12,354	-0,77	57,437	17,333	-0,6	57,435	14,838	-1,04
58,104	13,601	-0,78	58,104	17,905	-0,6	58,102	14,883	-1,04
58,766	12,398	-0,8	58,771	18,125	-0,6	58,769	15,462	-1,04
59,436	12,933	-0,81	59,433	18,615	-0,6	59,436	16,041	-1,04
60,1	12,977	-0,81	60,103	19,015	-0,61	60,103	13,689	-1,05
60,77	11,596	-0,82	60,77	15,863	-0,62	60,77	14,571	-1,05
61,438	13,066	-0,82	61,437	16,709	-0,62	61,438	15,105	-1,05
62,105	12,175	-0,83	62,105	17,021	-0,63	62,105	15,506	-1,06
62,772	11,73	-0,86	62,772	17,244	-0,63	62,77	13,466	-1,06
63,44	12,621	-0,86	63,436	17,818	-0,63	63,437	14,084	-1,06

Exp 10		
%Tempo(h)	Temperatura3(°C)	Perda de massa
0,081	22,391	0
0,748	23,104	0
1,416	23,727	0
2,083	24,529	-0,01
2,75	21,903	-0,03
3,415	21,728	-0,03
4,082	21,772	-0,03
4,749	20,797	-0,05
5,417	19,06	-0,06
6,084	19,238	-0,06
6,751	19,639	-0,06
7,418	18,038	-0,08
8,085	17,775	-0,09
8,75	17,863	-0,09
9,414	18,436	-0,08
10,084	16,531	-0,11
10,752	16,843	-0,12
11,419	17,333	-0,12
12,083	17,598	-0,12
12,751	16,219	-0,13
13,418	16,843	-0,14
14,085	17,11	-0,13
14,755	16,754	-0,14
15,42	16,175	-0,16
16,087	16,575	-0,16

16,751	17,021	-0,16
17,421	16,219	-0,17
18,089	15,996	-0,19
18,756	16,62	-0,19
19,42	17,155	-0,19
20,09	15,551	-0,2
20,757	16,264	-0,2
21,422	16,887	-0,2
22,089	17,199	-0,2
22,756	15,863	-0,23
23,423	16,754	-0,23
24,087	17,377	-0,23
24,754	16,976	-0,23
25,424	16,754	-0,25
26,091	17,731	-0,25
26,758	18,704	-0,25
27,425	17,555	-0,27
28,093	18,038	-0,28
28,758	19,505	-0,28
29,425	20,753	-0,29
30,092	18,125	-0,31
30,759	20,04	-0,31
31,423	21,728	-0,32
32,093	22,658	-0,33
32,761	19,817	-0,36
33,428	22,124	-0,36
34,095	24,128	-0,36
34,76	22,658	-0,39
35,427	21,947	-0,39

36,094	24,128	-0,41
36,761	26,657	-0,42
37,429	22,035	-0,45
38,093	23,727	-0,45
38,763	26,479	-0,47
39,43	29,285	-0,47
40,097	21,685	-0,51
40,764	25,9	-0,53
41,428	29,374	-0,53
42,093	30,212	-0,55
42,763	24,306	-0,6
43,431	29,107	-0,6
44,098	33,415	-0,62
44,765	28,617	-0,65
45,433	27,281	-0,67
46,097	32,527	-0,69
46,762	37,194	-0,69
47,432	26,346	-0,75
48,099	30,345	-0,76
48,763	34,789	-0,76
49,427	38,432	-0,77
50,1	25,33	-0,82
50,768	30,701	-0,82
51,434	33,327	-0,83
52,101	34,21	-0,84
52,768	26,479	-0,87
53,435	28,929	-0,87
54,102	30,389	-0,88
54,769	29,46	-0,91

55,436	25,682	-0,91
56,101	27,014	-0,91
56,768	28,038	-0,94
57,435	24,306	-0,95
58,103	24,395	-0,96
58,77	24,841	-0,96
59,435	25,769	-0,96
60,102	21,597	-0,98
60,769	22,747	-1
61,434	23,237	-1
62,104	24,841	-1
62,769	20,886	-1,01
63,436	21,554	-1,01