

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

VINICIUS DE CAMPOS DOIMO DA SILVA

**HOMOGENEIZAÇÃO INTERMITENTE DO LEITO
COMO ESTRATÉGIA PARA APRIMORAR O
PROCESSO DE BIOSSECAGEM DA BIOMASSA DE
RESÍDUO SÓLIDO DE LARANJA**

SÃO CARLOS -SP
2025

VINICIUS DE CAMPOS DOIMO DA SILVA

**HOMOGENEIZAÇÃO INTERMITENTE DO LEITO COMO ESTRATÉGIA PARA
APRIMORAR O PROCESSO DE BIOSSECAGEM DA BIOMASSA DE RESÍDUO SÓLIDO
DE LARANJA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentada ao Departamento de
Engenharia Química da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Dias Maia

São Carlos-SP
2025

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 graduação do candidato Vinicius de Campos Doimo da Silva, realizada em 14/07/2025:

Prof. Dr. Felipe Fernando Furlan
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Gustavo Dias Maia
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares
Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que foram e continuam sendo minha base em todos os momentos. Com amor, dedicação e muitos sacrifícios, me ensinaram o valor do esforço, da honestidade e do conhecimento. Tudo o que conquistei até aqui é reflexo do apoio incondicional e da educação que recebi de vocês.

À minha irmã, meus avós e ao meu tio, por todo o carinho, pelos ensinamentos, pelas palavras de incentivo e por sempre acreditarem no meu potencial.

E à minha namorada, pela paciência, parceria e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, sempre me inspirando a seguir em frente com coragem e confiança.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, saúde e discernimento ao longo dessa jornada. Sem fé e resiliência, não teria chegado até aqui.

Aos professores que marcaram minha trajetória acadêmica, em especial ao professor Gustavo, pela orientação atenciosa, pelos conselhos técnicos e humanos, e pela confiança no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, por serem minha base e maior exemplo de amor, coragem e determinação. Pela dedicação incansável, pelos valores transmitidos e por cada sacrifício feito em nome do meu futuro. Tudo o que conquistei até hoje carrega a marca do apoio e da confiança de vocês.

À minha irmã, que sempre esteve ao meu lado com companheirismo, cuidado e apoio genuíno. Seu carinho e amizade foram fundamentais em tantos momentos, e sou imensamente grato por poder contar com você em todas as fases da vida.

Aos meus avós e ao meu tio, por representarem força, sabedoria e afeto. Cada conversa, cada gesto e cada palavra de incentivo tiveram um papel importante na minha formação pessoal. São exemplos de dedicação à família e de amor incondicional, e levarei seus ensinamentos comigo para sempre.

À minha namorada, por ser uma presença constante, firme e acolhedora. Obrigado por cada gesto de incentivo, pela paciência nos momentos difíceis e por acreditar em mim mesmo quando as incertezas me tomavam. Seu apoio foi essencial para que este trabalho se concretizasse.

Aos meus sogros, pelo carinho e pela acolhida generosa desde o início. Agradeço por todo o apoio, pelos conselhos e por contribuírem de forma tão positiva durante essa etapa da minha vida.

Aos amigos e colegas que fizeram parte dessa caminhada, pelos aprendizados compartilhados, pelo apoio mútuo e pelos momentos de descontração que tornaram essa jornada mais leve.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero e eterno agradecimento.

RESUMO

Este trabalho avaliou os efeitos da intermitência na vazão de ar (Q) e no período de homogeneização do leito (BHP) sobre o desempenho do processo de biossecagem da biomassa de resíduo sólido de laranja (BRSL), visando sua valorização energética. Os experimentos foram conduzidos em uma unidade automatizada de biossecagem, seguindo um planejamento composto central (CCD), com monitoramento contínuo da temperatura, fluxo de ar e variação de massa. Os resultados demonstraram que o aumento de Q favoreceu a remoção de umidade por convecção, enquanto menores intervalos de BHP comprometeram a elevação térmica do sistema. Não foi identificada uma condição experimental capaz de maximizar simultaneamente a temperatura e a desidratação do leito. Nos ensaios com maior atividade microbológica, observou-se consumo de O_2 , geração de CO_2 e manutenção do poder calorífico superior (HHV), evidenciando um processo de biossecagem mais efetivo. Conclui-se que, embora a homogeneização intermitente seja eficaz em secagens convencionais, nas condições estudadas, pode prejudicar a biossecagem ao intensificar perdas térmicas e romper o equilíbrio biológico do sistema. Os achados confirmam o potencial da BRSL como fonte bioenergética e apontam para a importância de estratégias futuras voltadas à padronização da biomassa, como a inoculação microbiana, para garantir maior reprodutibilidade e eficiência do processo.

Palavras-chave: biossecagem, bagaço de laranja, vazão de ar, valorização energética.

ABSTRACT

This study evaluated the effects of intermittent air flow (Q) and bed homogenization period (BHP) on the performance of the biodrying process of orange solid waste biomass (OSWB), aiming at its energy recovery. Experiments were conducted in an automated biodrying unit following a central composite design (CCD), with continuous monitoring of temperature, airflow, and mass variation. The results showed that increasing Q enhanced moisture removal by convection, while shorter BHP intervals compromised the thermal rise of the system. No experimental condition was identified that could simultaneously maximize bed temperature and dehydration. In trials with higher microbial activity, oxygen consumption, carbon dioxide production, and preservation of the higher heating value (HHV) were observed, indicating a more effective biodrying process. It is concluded that, although intermittent homogenization is effective in conventional drying, under the conditions studied, it may hinder biodrying by increasing thermal losses and disrupting the system's biological balance. The findings confirm the potential of OSWB as a bioenergy source and highlight the importance of future strategies focused on biomass standardization, such as microbial inoculation, to ensure greater reproducibility and process efficiency.

Keywords: biodrying, orange waste, airflow, energy recovery.

LISTA ABREVIATURA E DE SIGLAS

Al – Alumínio
As – Arsênio
Ba – Bário
BRSL – Biomassa de Resíduo Sólida de Laranja
C – Carbono
Ca – Cálcio
Cd – Cádmio
Cl – Cloro
CO_{2p} – Produção de dióxido de carbono
C₀ – Conteúdo inicial de carbono
C_f – Conteúdo final de carbono
Cr – Cromo
Cu – Cobre
DCC – Delineamento Composto Central
Fe – Ferro
H – Hidrogênio
Hg – Mercúrio
K – Potássio
Mg – Magnésio
Mn – Manganês
Mo – Molibdênio
N – Nitrogênio
Na – Sódio
Ni – Níquel
O – Oxigênio
O_{2c} – Consumo de oxigênio
P – Fósforo
Pb – Chumbo
PCI – Poder Calorífico Inferior
Q – Vazão de ar (m³/h)
S – Enxofre
Sb – Antimônio
Se – Selênio
Si – Silício

T – Temperatura (°C)

Ti – Titânio

Tl – Tálho

V – Vanádio

W – Tungstênio

Xf – Teor de umidade final da biomassa

ΔC – Variação percentual do teor de carbono

ΔT – Variação de temperatura

ΔX – Perda de umidade

Zn – Zinco

°C – Grau Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 BIOMASSA	3
2.1.1 Composição Química da Biomassa	3
2.1.1.1 Composição Elementar	3
2.1.1.2 Matéria Orgânica	4
2.1.1.3 Composição de Água Presente na Biomassa	5
2.1.1.4 Compostos Inorgânicos e Teor de Cinzas	6
2.1.2 Exemplos de Biomassa	6
2.1.2.1 Biomassa Florestal.....	6
2.1.2.2 Biomassa de Resíduos Urbanos	7
2.1.2.3 Biomassa de Tratamento de Água.....	9
2.1.2.4 Processamento de Madeira	9
2.1.2.5 Biomassa da Agricultura	10
2.1.2.6 Biomassa de Grãos	12
2.1.2.7 Biomassa de Cana de Açúcar	14
2.1.3 Biomassa Lignocelulósica	15
2.1.4 Biomassa de Bagaço de Laranja.....	17
2.2 SECAGEM CONVENCIONAL	19
2.2.1 Aspectos Gerais da Secagem de Resíduos Sólidos.....	20
2.2.2 Técnicas de Secagem	22
2.2.2.1 Secagem em Leito Fixo	22
2.2.2.2 Secagem em Tambor Rotativo	23
2.2.2.3 Túnel de Secagem	25
2.2.2.4 Secagem em Leito de Jorro	26
2.2.2.5 Secagem Pneumática.....	26
2.2.2.6 Secagem em Leito Fluidizado	27
2.3 PROCESSO DE BIOSSECAGEM E BIOSSECAGEM INTERMITENTE	28
2.4 MICROORGANISMOS NATIVOS DO BAGAÇO DE LARANJA	30

3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 BIOMASSA DE RESÍDUO SÓLIDO DE LARANJA	31
3.2 EQUIPAMENTO DE BIOSSECAGEM, OPERAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS	31
3.3 CONFIGURAÇÃO DA BIOSSECAGEM INTERMITENTE	33
3.4 ANÁLISE ELEMENTAR	35
3.5 MISTURA FINAL, TEOR DE CINZAS E ANÁLISE HHV	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 PERFIS DE TEMPERATURA DA BIOSSECAGEM INTERMITENTE...	37
4.2 DIAGRAMAS DE PARETO	41
4.3 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DAS TEMPERATURAS E GANHO DE TEMPERATURA	44
4.4 CONTEÚDO FINAL DA MISTURA DA BIOSSECAGEM INTERMITENTE E PERDA DE MASSA.....	46
4.5 ANÁLISE DOS DIAGRAMAS DE PARETO E DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA PARA A MISTURA FINAL	48
4.6 ANÁLISE ELEMENTAR, TEOR DE CINZAS E HHV	50
5 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO A - TÍTULO DO ANEXO.....	64

1 INTRODUÇÃO

A produção em larga escala de suco de laranja gera uma quantidade significativa de biomassa residual sólida de laranja (BRSL) como subproduto. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), aproximadamente 70 milhões de toneladas de laranja foram processadas no mundo em 2018, resultando na geração de cerca de 14 milhões de toneladas de BRSL [1]. Esse fluxo de resíduos representa desafios tanto ambientais quanto econômicos, tornando sua valorização uma área-chave de pesquisa [2].

Independentemente da rota de valorização escolhida — seja para a extração de compostos de alto valor agregado ou para fins energéticos — a BRSL requer uma etapa de pré-secagem para redução do seu teor de umidade [3]. As técnicas convencionais de secagem, como a secagem por ar quente, são intensivas em energia e podem provocar a degradação de compostos valiosos. Dessa forma, há uma demanda por métodos de secagem mais sustentáveis e eficientes [4–9].

Nesse contexto, a biossecagem surgiu como uma alternativa promissora às técnicas convencionais de secagem, uma vez que essa estratégia utiliza a energia liberada durante a decomposição aeróbia da matéria orgânica pelos microrganismos (geralmente nativos, presentes no próprio resíduo) para remover a umidade de materiais orgânicos úmidos, sem a necessidade de fonte externa de calor [3]. A biossecagem apresenta diversas vantagens, incluindo menor consumo de energia, menor impacto ambiental e o potencial de geração de bioprodutos de valor agregado [10–21]. Essa abordagem representa um avanço em termos de eficiência energética e tem apresentado resultados promissores na remoção de água, impactando significativamente a sustentabilidade do processo de secagem [3].

Embora a biossecagem seja uma técnica promissora, ainda existem desafios operacionais a serem superados, como o melhor controle das variáveis do processo, o aumento da capacidade de remoção de umidade e o estudo de escalonamento industrial. Por isso, estratégias de intensificação do processo são necessárias para otimizar seu desempenho e estabelecer as melhores condições operacionais. Isso é particularmente importante ao se considerar que os mecanismos fundamentais da biossecagem— transferência de massa associada à vazão de ar e geração de calor

associada à atividade microbiana — podem ser antagonistas entre si [3,11–15]. Isso ocorre porque o resfriamento evaporativo causado pela passagem de uma corrente de ar não saturado em um meio poroso úmido provoca o resfriamento do sistema, o que afeta negativamente a atividade metabólica dos microrganismos nativos presentes no resíduo, comprometendo a geração de calor no leito e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência da secagem [20].

Pesquisas anteriores demonstraram que a intermitência no fluxo de ar pode melhorar significativamente o processo de biossecagem, por proporcionar maior controle sobre o resfriamento evaporativo [1]. Além disso, secadores industriais convencionais de resíduos geralmente utilizam leitos móveis, sejam eles fluidizados, deslizantes ou jorrantes [5]. No entanto, a secagem em leito fixo apresenta-se como uma alternativa promissora, com baixo custo de capital e de manutenção [22]. Essa tecnologia é amplamente utilizada nas indústrias agrícola e química sob as formas de secagem em leito profundo ou em filme fino. Grãos, café, tabaco, cavacos de madeira, carvão e diversos produtos químicos costumam ser secos dessa forma [23].

Em leitos fixos, a não uniformidade ocorre não apenas na temperatura e umidade relativa do ar, mas também na temperatura, teor de umidade e pressão dentro do meio poroso [23]. Uma das alternativas para minimizar esses efeitos de não uniformidade é promover, periodicamente, a homogeneização mecânica do leito. Dessa forma, podem ser reduzidos os efeitos de compactação, formação de caminhos preferenciais de fluxo e gradientes de umidade, o que pode ter impacto significativo no desempenho do biossecador.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo avaliar o impacto da homogeneização intermitente do leito no desempenho do processo de biossecagem da RSBL. A homogeneização intermitente do leito, aplicada sob diferentes vazões de ar, pode aumentar a eficiência de secagem e reduzir o tempo de processamento. Essa estratégia ainda não havia sido investigada no contexto da RSBL, o que torna os resultados desta pesquisa altamente relevantes para o projeto e operação de sistemas de biossecagem. Os conhecimentos obtidos podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes em termos energéticos, ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BIOMASSA

Conforme indicado no relatório da Empresa Brasileira de Energia [24], durante o período de 2006 a 2015, a composição média da produção de energia primária no Brasil foi caracterizada por uma predominância de 54,2% de fontes não renováveis e 45,8% de fontes renováveis. Essas fontes renováveis englobam energia hidrelétrica, representando 13,4% da produção total, além de biomassa, que compreendeu produtos derivados da cana-de-açúcar (18,1%) e lenha (10,7%). Em consonância, o relatório de Bioenergia da IEA [25] destaca o Brasil como líder global no uso de biomassa para geração de energia, contribuindo com cerca de 16% do consumo mundial total, seguido pelos Estados Unidos (9%) e Alemanha (7%). Esses dados evidenciam a significativa participação das fontes renováveis, em especial a biomassa, no panorama brasileiro, ressaltando a importância do país na promoção de alternativas sustentáveis.

2.1.1 Composição Química da Biomassa

2.1.1.1 Composição Elementar

A maior parte da biomassa vegetal é composta principalmente por três elementos: carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), representando entre 42% e 47%, 40% e 44%, e 6%, respectivamente, de sua matéria seca. Em seguida a essa composição elemental básica, encontram-se os macronutrientes, essenciais para a produção de biomassa, tais como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Adicionalmente, as plantas também requerem a presença de elementos em menor quantidade, denominados micronutrientes e elementos traço, incluindo sódio (Na), cloro (Cl), ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), selênio (Se) e silício (Si), os quais, juntos, somam até 4% da composição. Além disso, na biomassa também são encontrados outros elementos, especialmente nas cinzas, como alumínio (Al), arsênio

(As), bário (Ba), cádmio (Cd), cromo (Cr), mercúrio (Hg), chumbo (Pb), antimônio (Sb), titânio (Ti), tálio (Tl), vanádio (V) e tungstênio (W). [26]

2.1.1.2 Matéria Orgânica

Os carboidratos são compostos formados a partir da combinação de carbono, hidrogênio e oxigênio, constituem os blocos fundamentais da biomassa vegetal, sendo cruciais para a estrutura e funcionamento das plantas. A partir desses elementos, surgem os açúcares solúveis, como os monossacarídeos (destacando-se glicose e frutose) e dissacarídeos, além dos carboidratos poliméricos, como os polissacarídeos. A glicose e a frutose, quando combinadas, formam a sacarose, um dissacarídeo essencial para o metabolismo vegetal. [26]

Os polissacarídeos, por sua vez, são o resultado da união de diferentes monossacarídeos e desempenham papéis fundamentais nas plantas. Durante períodos de intensa atividade fotossintética, os polissacarídeos de reserva, como o amido e a inulina, são acumulados e posteriormente utilizados para fornecer energia para o metabolismo vegetal. O amido, presente em sementes, tubérculos e raízes, é uma importante fonte de energia, enquanto a inulina, encontrada em raízes e tubérculos, desempenha um papel crucial no armazenamento de carboidratos. [26]

Além dos polissacarídeos de reserva, há os polissacarídeos estruturais, presentes nas paredes celulares das plantas, como a celulose, hemicelulose, pectinas e lignina. A celulose é composta por aproximadamente 200 a 5000 moléculas de glicose, formando microfibras e fibras em cadeias lineares ou feixes. A hemicelulose, por sua vez, consiste em polímeros de pentoses e hexoses, entrelaçados com as fibras de celulose. Ambos representam cerca de dois terços da biomassa lignocelulósica. As ligninas são polímeros de alto peso molecular e insolúveis, constituídos por álcoois fenilpropanóides, sendo o segundo polímero mais abundante na biomassa vegetal, após a celulose. O teor de lignina varia de aproximadamente 27% a 32% em plantas lenhosas e de 14% a 25% em plantas herbáceas. A lignina proporciona rigidez às plantas, além de evitar a degradação do tecido. Assim, requer ácidos fortes, bases ou tratamentos hidrotérmicos para hidrolisar e tornar a celulose e a hemicelulose acessíveis. A pectina é um componente menos significativo na biomassa lignocelulósica, constituído por polímeros de ácido galacturônico que

promovem a extensão da parede celular e o crescimento das plantas. A viabilidade e a demanda energética para a hidrólise dos polissacarídeos estruturais são fundamentais para o desenvolvimento de biocombustíveis de segunda geração. [26]

As proteínas são constituídas por sequências de aminoácidos, que são compostos orgânicos contendo grupos funcionais de amina (-NH₂) e carboxila (-COOH). Esses grupos proporcionam às plantas funções enzimáticas e estruturais. Assim, sua concentração de nitrogênio é relativamente elevada (16%), o que pode resultar em possíveis emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) durante a queima de biomassa rica em proteínas, contribuindo para a poluição do ar. Além disso, a síntese de proteínas pelas plantas demanda quantidades significativas de energia (40,33 kJ. g⁻¹), em comparação com outros compostos orgânicos, como a celulose (19,73 kJ. g⁻¹). Ao considerarmos o valor do poder calorífico superior (PCS) das proteínas (22,19 kJ. g⁻¹) e da celulose (19,05 kJ. g⁻¹), observa-se que o rendimento energético é de 52,5% e 96,5%, respectivamente. Conseqüentemente, as biomassas ricas em proteínas são mais vantajosas para a produção de alimentos ou ração do que para usos energéticos. [26]

Os lipídios são substâncias orgânicas variadas e repelentes à água que desempenham um papel fundamental na estrutura e função das células vivas. Nas fontes de biomassa, encontramos principalmente gorduras, óleos, fosfolipídios e ceras. As gorduras e óleos são compostos principalmente por triglicerídeos, que consistem em ácidos graxos e glicerol. Dependendo do grau de saturação dos ácidos graxos, eles podem ser classificados como saturados ou insaturados. As gorduras saturadas, presentes em gorduras animais, tendem a ser sólidas à temperatura ambiente, enquanto os óleos vegetais, ricos em ácidos graxos insaturados, geralmente são líquidos devido às suas cadeias mais longas. As ceras, por sua vez, são ésteres formados pela combinação de álcoois e ácidos graxos longos, funcionando como barreiras à água em diversas partes das plantas. Já os fosfolipídios, constituídos por glicerol, ácidos graxos e uma molécula de fosfato, desempenham um papel crucial na estrutura e proteção das células. [26]

2.1.1.3 Composição de Água Presente na Biomassa

A quantidade de água presente na biomassa, conhecida como teor de umidade, é expressa como uma proporção da massa total do material. Em seu estado natural,

ou seja, sem qualquer processamento adicional, essa umidade varia consideravelmente conforme o tipo de biomassa, indo de menos de 15% em palha de cereais a mais de 90% em biomassa de algas. Esse fator é crítico ao empregar biomassa para propósitos energéticos, pois influencia significativamente na eficiência da conversão e no valor do calor. Adicionalmente, altos níveis de umidade acarretam desafios logísticos, aumentando a propensão à decomposição (resultando em perda de energia durante o armazenamento) e afetando os balanços energético e financeiro. [26]

2.1.1.4 Compostos Inorgânicos e Teor de Cinzas

Elementos em baixas concentrações estão presentes nas fontes de biomassa, influenciando a combustão, formação de emissões e comportamento das cinzas. O sódio (Na) e potássio (K) podem vitrificar as cinzas, enquanto um alto teor de cloro (Cl) está relacionado à emissão de dioxinas e corrosão. A oxidação do enxofre (S) gera dióxido de enxofre (SO₂), contribuindo para a chuva ácida. Alguns elementos, como arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), fósforo (P), chumbo (Pb), antimônio (Sb), tálio (Tl), vanádio (V) e zinco (Zn), permitem o uso das cinzas como fertilizantes, melhorando o impacto ambiental do uso de biomassa para energia. É crucial compreender essa composição para o controle de processos e gestão adequada dos resíduos. [26]

2.1.2 Exemplos de Biomassa

2.1.2.1 Biomassa Florestal

Em nível global, as florestas e outras áreas com árvores desempenham um papel fundamental como fonte primária de biomassa para energia. Conforme indicado pela Associação Mundial de Bioenergia (Kummamuru, 2017), a grande maioria, cerca de 88% (em termos de energia), da biomassa utilizada para energia em todo o mundo tem sua origem na atividade florestal. Segundo dados das Nações Unidas (2018), em 2015, aproximadamente 728 milhões de toneladas equivalentes de petróleo de

energia foram geradas a partir da madeira, sendo que cerca de 6,5% dessa produção correspondia ao carvão vegetal. No que diz respeito ao uso energético em geral, a utilização da biomassa lenhosa apresenta contrastes significativos. Em muitos países de baixa renda, por exemplo, a madeira continua a ser a principal fonte de energia para atividades como cozimento e aquecimento, com aproximadamente 2,4 bilhões de pessoas dependendo dela para esses fins (FAO, 2014). Este recurso é muitas vezes coletado manualmente em áreas florestais locais e queimado em fogões e lareiras a céu aberto (Richards et al., 2015). Por outro lado, em nações mais desenvolvidas, os combustíveis derivados da madeira têm recebido uma nova atenção nas últimas décadas como uma alternativa renovável aos combustíveis fósseis. Esse aumento no interesse acompanha o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de combustíveis como cavacos de madeira, pellets e biocombustíveis líquidos, juntamente com o aprimoramento de queimadores de alta eficiência. No entanto, as diferentes abordagens em relação ao uso da madeira como fonte de energia refletem as disparidades regionais na intensidade da exploração florestal e nos esforços para promover práticas mais sustentáveis [26].

2.1.2.2 Biomassa de Resíduos Urbanos

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma realidade inevitável na sociedade moderna, e sua redução e gestão sustentável representam um dos principais desafios para as gerações futuras. Apesar dos esforços significativos para minimizar a produção de resíduos e aumentar a reciclagem de materiais residuais em larga escala, "o uso de recursos ainda é em grande parte insustentável e ineficiente, e os resíduos ainda não são adequadamente gerenciados" (UE, 2013). Na ótica da bioeconomia circular, os resíduos, especialmente os orgânicos e renováveis, não são mais vistos como produtos indesejados, mas sim como valiosos recursos para energia e produtos de base biocombustível. [26]

A definição e classificação dos RSU variam conforme o país e a prática de gestão adotada. De acordo com o Eurostat, RSU são "resíduos coletados por ou em nome das autoridades municipais e descartados através do sistema de gestão de resíduos". Essa definição exclui resíduos provenientes de redes de esgoto municipal e seu tratamento, assim como resíduos de construção e demolição municipais

(Eurostat, 2017b). A ausência de uma definição padronizada gera incertezas e inconsistências na avaliação e coleta de dados sobre gestão de resíduos. O setor de bioenergia, juntamente com a bioeconomia de forma geral, concentra-se na fração orgânica e renovável dos RSU, independentemente de sua origem ou atividade geradora, abrangendo resíduos provenientes das três fontes principais de RSU: residencial, industrial e comercial/institucional. [26]

Em geral, quanto maior o desenvolvimento econômico e a taxa de urbanização, maior a quantidade de RSU gerados. Por exemplo, os países da OCDE respondem por cerca de 44% dos resíduos mundiais, enquanto a África e a Ásia Oriental e Central são regiões de menor produção de resíduos. Ao mesmo tempo, a composição dos RSU também varia consideravelmente de acordo com o desenvolvimento econômico e, conseqüentemente, a localização geográfica, influenciada por fatores como normas culturais, fontes de energia e clima. Países de baixa e média renda possuem uma proporção elevada de matéria orgânica na corrente de resíduos urbanos, enquanto as frações de papel, plástico, vidro e metal aumentam na corrente de resíduos de países de renda média e alta. Além disso, a localização geográfica também influencia a composição dos resíduos, determinando os materiais de construção (por exemplo, madeira versus aço), o teor de cinzas (frequentemente provenientes de aquecimento doméstico) e os resíduos hortícolas. Da mesma forma, a fonte de energia utilizada tem impacto na composição dos RSU, especialmente em países de baixa renda, onde a energia para cocção, aquecimento e iluminação não é proveniente de sistemas de aquecimento centralizados ou da rede elétrica (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012). [26]

A estratégia para a gestão de resíduos e a produção de energia a partir desses resíduos pode variar consideravelmente, dependendo de múltiplos fatores, como critérios e restrições sociais, econômicas e ambientais. A produção de energia a partir de resíduos, pode contribuir tanto para uma estratégia adequada de tratamento de resíduos quanto para uma produção de energia ambientalmente amigável, desde que os princípios de sustentabilidade sejam observados (Conselho Mundial de Energia, 2016a). [26]

2.1.2.3 Biomassa de Tratamento de Água

As águas residuais urbanas e os resíduos gerados durante seu processo de tratamento representam uma fonte valiosa de água, matéria orgânica e nutrientes que podem ser reaproveitados, não apenas como fonte de energia, mas também como fertilizantes e outros compostos (UE, 2013). No entanto, devido ao potencial conteúdo de metais pesados, os usos alternativos para bioenergia podem ser limitados em certos casos. [26]

Existem três processos distintos no tratamento de águas residuais, cada um com objetivos específicos: o tratamento primário visa remover sólidos suspensos, tanto orgânicos quanto inorgânicos, por meio de processos mecânicos; o tratamento secundário destina-se a decompor e remover materiais orgânicos solúveis por meio de processos biológicos aeróbicos ou anaeróbicos, ou por processos termoquímicos ou mecânicos; enquanto o tratamento terciário é destinado à remoção de nutrientes, microrganismos e matéria suspensa restante, utilizando várias tecnologias, como filtração por membrana e desinfecção (Eurostat, 2017b). [26]

A digestão anaeróbica é uma estratégia comum para estabilizar o lodo gerado no processo, produzindo biogás para geração de eletricidade e calor, ou para ser refinado e utilizado como biocombustível para transporte. Por outro lado, a incineração direta do lodo também pode ser utilizada para gerar calor e eletricidade. Embora menos comuns, os processos de gaseificação, pirólise e oxidação química a altas temperaturas e pressões também podem ser empregados para aproveitar o potencial energético dos resíduos (Bachmann, 2015; Tyagi e Lo, 2016). Além disso, o tratamento hidrotérmico, que envolve o aquecimento do lodo em uma fase aquosa a temperaturas elevadas na ausência de oxigênio, pode gerar compostos orgânicos dissolvidos que são úteis para aumentar a proporção de carbono/nitrogênio na produção de biogás. [26]

2.1.2.4 Processamento de Madeira

Ao longo das cadeias de valor da madeira industrial, são gerados subprodutos. Esses subprodutos de madeira assumem diversas formas, como casca, serragem, retalhos, madeira dividida, cavacos de plaina, poeira de lixamento e licor negro, cada

um dos quais pode ter diferentes aplicações. A quantidade de subprodutos gerados varia de acordo com o tipo de indústria, seu porte e seu nível de modernização. Por exemplo, de acordo com o JRC (Camia et al., 2018), na União Europeia, aproximadamente 85% da madeira utilizada pela indústria de painéis e 50% da madeira utilizada pelas indústrias de serraria e celulose são incorporados nos produtos. Em Honduras, os subprodutos de serraria, incluindo a casca, representam entre 47% e 52% do volume total de toras processadas, dependendo da eficiência da serraria e do aproveitamento de produtos secundários a partir dos resíduos sólidos. No Gana, a taxa média de geração de subprodutos para serrarias é de 55% (Mahin, 1991). Com a valorização econômica crescente dos subprodutos, especialmente para fins energéticos, algumas empresas das indústrias de painéis de madeira e polpa de celulose passaram a considerar seus subprodutos como valiosos coprodutos que fazem parte de seus modelos de negócios. [26]

Esses subprodutos podem ser aproveitados pela própria indústria que os gera. Por exemplo, muitas indústrias de papel utilizam seus subprodutos como fonte de energia para seus processos, especialmente para secagem. Os subprodutos também podem ser aproveitados por outras indústrias de materiais e indústrias de energia. No caso europeu, 36% dos subprodutos são utilizados por outras indústrias, enquanto 64% são destinados à geração de energia. No total, os subprodutos industriais de madeira representam 30% do consumo de combustíveis de madeira na UE em 2013 (Camia et al., 2018). Ainda há espaço para avanços na utilização mais eficiente dos subprodutos (Bais-Moleman et al., 2018). [26]

2.1.2.5 Biomassa da Agricultura

A agricultura ocupa o segundo lugar na hierarquia global de fornecimento de biomassa para bioenergia, contribuindo com aproximadamente 10% do total (Kummamuru, 2017). Essa contribuição é derivada principalmente de três fontes: culturas energéticas, subprodutos agrícolas e resíduos de atividades agrícolas, todos potenciais para produção de diversos tipos de biocombustíveis (OCDE, 2004). Brown e Le Feuvre (2017) identificaram 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. [26]

A escolha das culturas para bioenergia é influenciada por uma série de fatores, incluindo condições locais, conhecimento técnico, infraestrutura existente e políticas governamentais (HLPE, 2013). No entanto, o cultivo de culturas convencionais para esse fim tem sido objeto de debates intensos devido às preocupações relacionadas à segurança alimentar, mudanças no uso da terra e desmatamento, tornando a sustentabilidade uma consideração crucial (OCDE/IEA e FAO, 2017). [26]

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 gigawatt-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.

Tabela 1 – Produção de Insumos Agrícolas

Insumo Agrícola	Quantidade Produzida (Toneladas)
Arroz	10.776.268
Café	3.172.562
Laranja	16.929.631
Milho	109.420.717
Soja	120.701.031
Mandioca	17.648.564
Trigo	10.343.182
Feijão	2.842.395
Algodão	6.422.030

Fonte: (Adaptado de IBGE, 2022).

Ao analisar a Tabela 1 das principais culturas agrícolas do Brasil, é evidente o vasto potencial que o país possui em termos de biomassa. Essas culturas não apenas fornecem alimentos essenciais, mas também representam uma fonte significativa de matéria orgânica que pode ser aproveitada para a produção de energia renovável. A

biomassa, nesse contexto, refere-se à matéria orgânica renovável proveniente de plantas e resíduos animais, que podem ter diversos destinos para contribuir com o aumento da reutilização dos derivados destes insumos.

2.1.2.6 Biomassa de Grãos

As culturas cerealíferas constituem a principal fonte de matéria-prima para a produção de etanol, baseando-se no amido contido nos grãos; os Estados Unidos lideram a produção global de biocombustíveis, utilizando o milho como sua principal cultura. Esta é uma cultura agrícola amplamente reconhecida e altamente tecnificada, caracterizada por possuir um caminho fotossintético, o qual pode apresentar alta produtividade em condições ideais de temperatura, água e radiação solar. Os Estados Unidos, com uma área de 35,1 milhões de hectares cultivados com milho e uma produção de quase 385 milhões de toneladas de milho, são o principal produtor mundial de milho (FAO, 2017a), e ocupam a primeira posição na produção de etanol. Em 2012, o etanol produzido a partir do amido de milho representou 94% de toda a produção de biocombustíveis. Dados estatísticos sobre bioenergia fornecidos por esse país indicam que cerca de 31,7% do milho total foi destinado à produção de etanol, resultando em uma produção de etanol de 60 milhões de metros cúbicos em 2017 (USDA, 2018). As tecnologias atuais permitem a utilização integral da produção do milho de diversas maneiras, dependendo do tipo de instalação, incluindo a produção de etanol e ração animal a partir dos grãos, óleo a partir do gérmen de milho, e bioenergia (etanol de segunda geração ou biomassa sólida), bem como produtos à base de biocombustíveis a partir dos resíduos da cultura, como a palha (Rosentrater, 2015). [26]

O milho, uma das culturas mais importantes em todo o mundo, não apenas fornece alimento para humanos e animais, mas também produz uma quantidade significativa de resíduos após a colheita [27]. O sabugo, que é o resíduo fibroso resultante do processo de debulha do milho, geralmente é utilizado como ração animal devido à sua composição rica em celulose, hemicelulose e lignina. Estudos analíticos revelam que o sabugo de milho contém aproximadamente 31,7% de celulose, 34,7% de hemicelulose e 20,3% de lignina, tornando-o uma fonte potencialmente valiosa de açúcares fermentáveis (AGUIAR, 2010). A palha de milho, muitas vezes deixada no

campo após a colheita, também representa um resíduo excedente com uma composição semelhante, composta por celulose, hemicelulose e lignina em proporções variáveis. Com todos esses açúcares disponíveis na composição desses resíduos, eles apresentam um potencial promissor para a produção de biocombustíveis, como o bioetanol. No entanto, estratégias de pré-tratamento são essenciais para otimizar a conversão de resíduos de milho em bioetanol, devido à necessidade de se desestruturar a matriz lignocelulósica, contribuindo assim para a produção sustentável de energia renovável (OLIVEIRA et al., 2011).

O milho desempenha um papel significativo como matéria-prima para o bioetanol na China, juntamente com a mandioca, uma cultura de raiz tuberosa rica em amido cultivada em regiões tropicais e subtropicais. Os quatro maiores produtores mundiais de mandioca são Nigéria, Tailândia, Brasil e Indonésia, enquanto a produção de mandioca na China, embora menor em comparação com esses países, ainda é significativa, atingindo 4,8 milhões de toneladas em 2016 (FAO, 2017a). Na China, o milho e a mandioca representaram 70% e 25% das matérias-primas para o etanol combustível em 2016, respectivamente, enquanto o país ocupava a quarta posição na produção de etanol combustível no mundo, depois dos Estados Unidos, Brasil e União Europeia (Euroserv'Er, 2017b). A produção de etanol combustível para 2018 foi projetada em 3,95 milhões de metros cúbicos (Macke, 2017). [26]

Na União Europeia, o milho não é a cultura dominante no mercado de matérias-primas para a produção de etanol, ao contrário dos Estados Unidos. Trigo (com uma participação de 37%) e outros cereais (9%), além do milho (38%), são utilizados para esse fim. Em 2015, foram utilizadas 5,2 milhões de toneladas de milho, 5,07 milhões de toneladas de trigo e 1,33 milhões de toneladas de outros cereais e culturas ricas em amido para a produção de etanol (Calderón et al., 2017). O consumo de etanol para transporte em 2016 totalizou 2,1 milhões de metros cúbicos na UE (Euroserv'Er, 2017b). Embora os grãos de cereais sejam commodities amplamente negociadas, vale ressaltar que a área cultivada com trigo e cevada na UE foi de 39,4 milhões de hectares (68% de trigo), com uma produção total de 200,9 milhões de toneladas de grãos (71% de trigo) em 2016. Em contraste, a cultura de milho ocupou 8,8 milhões de hectares e produziu 62,7 milhões de toneladas de milho no total (FAO, 2017a). [26].

Já a biomassa do arroz surge como uma fonte abundante de subprodutos, impulsionada pela produção global anual de arroz, que atinge cerca de 640 milhões de toneladas métricas (MMT). A Ásia se destaca como o principal produtor, contribuindo com 90% da produção anual, seguida por América (5%), África (3%) e Europa (1%) [28]. Os subprodutos resultantes dessa produção, notadamente a palha e a casca de arroz, representam quantidades enormes, estimadas em 126,6 MMT e 22,4 MMT, respectivamente [28]. No entanto, apesar do potencial desses subprodutos, sua utilização eficiente permanece desafiadora, principalmente devido à complexidade de processamento decorrente da presença elevada de sílica e cinzas [28]. A palha de arroz, por exemplo, é composta por uma matriz complexa de celulose, hemicelulose e lignina, tornando-a resistente à degradação e difícil de ser convertida em produtos de valor agregado. Tradicionalmente, a palha de arroz é frequentemente deixada como resíduo nos campos ou queimada, resultando em perdas consideráveis de recursos e poluição ambiental. No entanto, estratégias de valorização da biomassa de arroz estão ganhando destaque, com potencial para transformar esses subprodutos em uma variedade de produtos.

Estudos indicam que até 20% da palha de arroz poderia ser direcionada para a produção de biocombustíveis [28], como bioetanol e biodiesel. Além disso, a casca de arroz tem sido explorada em diversas aplicações, incluindo biogás, aditivos alimentares, biofertilizantes e materiais de construção [28]. Com a implementação de tecnologias adequadas de pré-tratamento e conversão, a biomassa de arroz tem o potencial de desempenhar um papel significativo na promoção da sustentabilidade e da segurança energética, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses subprodutos, alinhando-se assim aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

2.1.2.7 Biomassa de Cana de Açúcar

A cana-de-açúcar tem sido a cultura predominante para a produção de etanol combustível globalmente, devido às suas características naturais (como ser uma planta C4 de alto rendimento e ter matéria-prima rica em sacarose), além das políticas proativas de implementação do etanol no Brasil (FAO, 2017a). O Brasil, como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, lidera esse mercado, representando 41% da

produção global de cana (FAO, 2017a). Desde 1931, o Brasil tornou obrigatória a mistura de etanol, resultando na consolidação das instalações de produção de etanol de cana-de-açúcar como agroindústrias convencionais (Horta Nogueira e Silva Capaz, 2013). Apesar do etanol de milho dos EUA liderar o mercado global, a cana-de-açúcar brasileira é mais competitiva em termos de rendimento de etanol, redução de emissões de gases de efeito estufa e custos de produção (Manochio et al., 2017; Zabed et al., 2017). Além disso, a Argentina também contribui para a produção global de etanol a partir da cana-de-açúcar (Ciani, 2017). [26]

Em contraste, a beterraba sacarina é outra cultura de açúcar utilizada para produção de etanol, principalmente na Europa (FAO, 2017a). Apesar de representar a maioria da produção mundial de beterraba sacarina, sua eficiência energética é significativamente menor que a da cana-de-açúcar (Manochio et al., 2017). No entanto, o cultivo de beterraba sacarina é justificado pelo conceito de biorrefinaria, já que está associado à produção de açúcar cristalizado para uso alimentício (Flach et al., 2017). [26]

O sorgo sacarino é uma cultura semelhante à cana-de-açúcar, com alto teor de sacarose no caule e também estudada para a produção de etanol em regiões temperadas (Zegada-Lizarazu e Monti, 2012; Regassa e Wortmann, 2014; Nghiem et al., 2016). Embora não haja dados globais sobre a área cultivada com sorgo sacarino, relatórios indicam que o Brasil, a China e a Índia estão explorando comercialmente essa cultura para produção de etanol (ICRISAT, 2016; Macke e Ward, 2017). [26]

2.1.3 Biomassa Lignocelulósica

A biomassa, proveniente diretamente ou indiretamente do processo fotossintético de plantas e algas, excluindo materiais fossilizados, constitui uma fonte versátil e renovável de energia e materiais orgânicos. Sua ampla variedade de usos é decorrente da vasta gama de materiais que se enquadram nessa definição [29]. No cenário atual, destaca-se seu emprego como insumo energético nos diversos setores produtivos. Entre os tipos mais relevantes de biomassa para essa finalidade estão os materiais lignocelulósicos, de origem agrícola e florestal, abrangendo desde plantações energéticas até resíduos das etapas de processamento industrial, além do aproveitamento de outros subprodutos dentro do mesmo setor. [30]

A biomassa lignocelulósica representa uma fonte valiosa de energia renovável com amplo potencial de contribuir para a matriz energética global. Sua produção e utilização estão alinhadas com os princípios ambientais e sociais, uma vez que é uma fonte renovável, contribuindo para a redução das emissões de carbono e promovendo a geração de empregos em diversas etapas da cadeia produtiva [31]. Além disso, sua abundância e acessibilidade em quase todas as regiões habitáveis do planeta a tornam uma opção atrativa para a diversificação das fontes de energia. No entanto, apesar desses benefícios, a biomassa lignocelulósica enfrenta desafios significativos que limitam sua participação efetiva na matriz energética. [30]

A heterogeneidade físico-química, o alto teor de umidade e a baixa densidade energética são algumas das características desfavoráveis da biomassa lignocelulósica que dificultam sua utilização [30]. Para superar esses desafios, é imprescindível direcionar investimentos significativos para o avanço tecnológico e aprimoramento dos processos existentes. Este investimento é fundamental para alcançar maior eficiência e qualidade ao longo de todo o ciclo de produção e conversão da biomassa [30]. Diversos tratamentos podem ser aplicados para modificar as características físicas e químicas das biomassas, visando otimizar seu desempenho como a secagem, redução em lascas e partículas, e a densificação através da produção de pellets e briquetes [30]. Estes são exemplos de métodos utilizados para homogeneizar e aumentar a densidade energética da biomassa, facilitando seu armazenamento e transporte.

A quantidade de água presente na biomassa, conhecida como teor de umidade, é expressa como uma proporção da massa total do material. Em seu estado natural, ou seja, sem qualquer processamento adicional, essa umidade varia consideravelmente conforme o tipo de biomassa, indo de menos de 15% em palha de cereais a mais de 90% em biomassa de algas. Esse fator é crítico ao empregar biomassa para propósitos energéticos, pois influencia significativamente na eficiência da conversão e no valor de calor. Adicionalmente, altos níveis de umidade acarretam desafios logísticos, aumentando a propensão à decomposição (resultando em perda de energia durante o armazenamento) e afetando os balanços energético e financeiro.

2.1.4 Biomassa de Bagaço de Laranja

No contexto da agricultura global, o cultivo de laranjas ocupa uma posição de relevância, classificando-se em 20º lugar em volume de frutos, e representando cerca de 10,5% da produção mundial, conforme registros da Faostat (2010) e do USDA (2010). Com uma produção anual de laranja em torno de 18 milhões de toneladas (Faostat, 2009), 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 (Abecitrus, 2008).

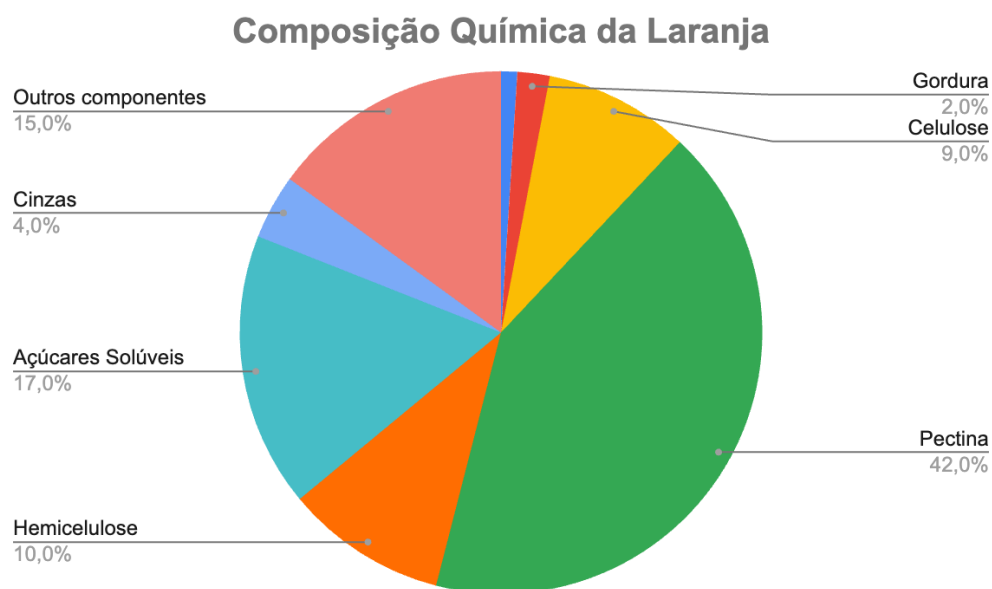
No decorrer do processo de produção de suco de laranja, é essencial destacar que apenas aproximadamente metade do peso total da laranja fresca é transformada em suco, como evidenciado por Braddock (1995). Tal cenário resulta na geração de volumes significativos de resíduos, abrangendo casca, polpa e sementes, os quais são estimados em cerca de 9 milhões de toneladas de resíduo sólido agroindustrial de laranja anualmente. Estes subprodutos são obtidos após duas prensagens, resultando em um resíduo com umidade em torno de 70% em base úmida, conforme observado por Lima et al. (2017) e que podem ser caracterizados como biomassa cítrica.

A laranja é uma fruta que apresenta diversas propriedades nutricionais e funcionais dignas de destaque, conferindo benefícios significativos para a saúde humana. Além das fibras, a laranja contém uma variedade de compostos antioxidantes, incluindo vitamina C, compostos fenólicos e carotenóides[32-33]. Esses compostos antioxidantes desempenham um papel crucial na prevenção de uma série de doenças, incluindo doenças cardíacas, neurológicas, metabólicas e neoplásicas. Ademais, a biomassa proveniente do suco de laranja tem sido destinada para várias finalidades, como pellets para ração animal, obtenção de fertilizantes orgânicos, extração de pectina e óleos essenciais, obtenção de compostos antioxidantes e como substrato para a produção de diversos compostos com alto valor agregado, tais como proteínas microbianas, ácidos orgânicos, etanol 2G, enzimas e metabólitos secundários biologicamente ativos (ABECITRUS, 2008).

Com uma composição que varia entre 72,0% e 86,0% de umidade, a laranja também é rica em polissacarídeos como celulose e hemicelulose, além de conter açúcares solúveis como hexoses e arabinoses [2]. Segundo Rivas et al, o bagaço de

laranja é considerado um material lignocelulósico devido à presença de lignina em sua parede celular, que compreende aproximadamente 4,0% de sua composição total. Sintetizando a composição química da laranja, os constituintes foram representados na Figura 1.

Figura 1 - Composição química da laranja.

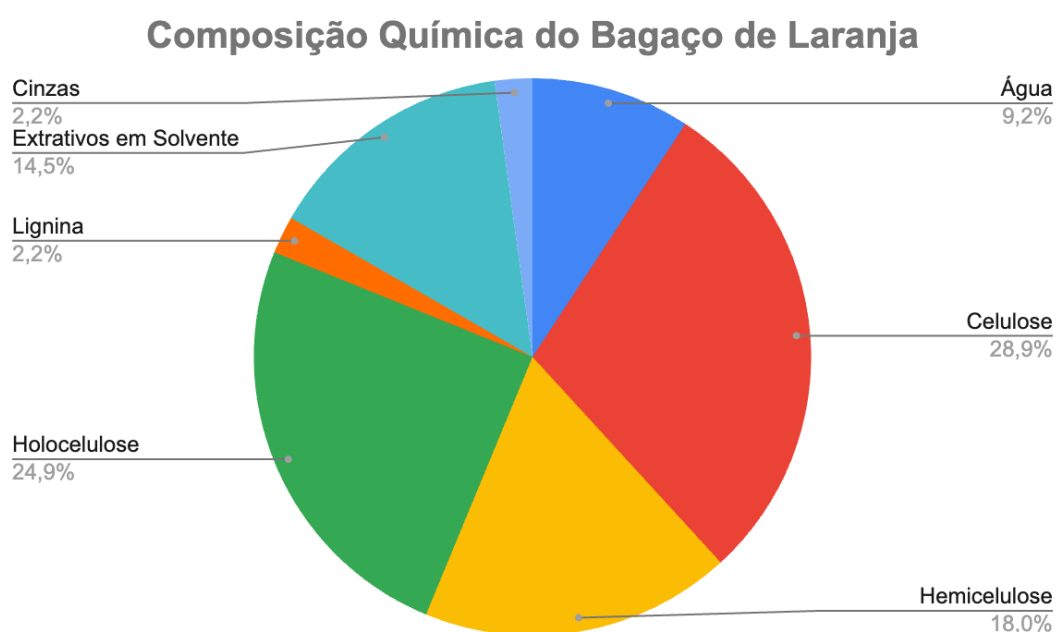


Fonte: (Adaptado de Rivas et al., 2008)

A umidade presente no bagaço de laranja desempenha um papel crucial na determinação de sua viabilidade para uma série de aplicações, incluindo sua utilização na composição de rações para gado, na produção de medicamentos, na fabricação de esterco, em outras atividades agrícolas e também na produção de biocombustíveis. Apesar da composição rica em componentes valiosos, como lignina e polissacarídeos, a presença de um teor excessivo de umidade pode representar um desafio significativo para a sua aplicação eficaz em tais contextos. A umidade elevada pode comprometer a estabilidade e a qualidade da ração animal, bem como a eficácia de medicamentos e fertilizantes que têm como base o bagaço de laranja. Além disso, no contexto dos biocombustíveis, a umidade excessiva pode dificultar os processos de hidrólise e fermentação, essenciais para a conversão dos polissacarídeos em açúcares fermentáveis e, posteriormente, em etanol. Portanto, a necessidade de procedimentos de secagem do bagaço se apresenta como uma consideração crucial para garantir a sua adequada utilização em diferentes esferas.

Com o intuito de fornecer informações detalhadas sobre a composição do bagaço de laranja e contribuir para o desenvolvimento de estratégias de processamento apropriadas, a Figura 2 apresenta os teores de lignina, polissacarídeos, umidade e outros componentes relevantes em massa seca, conforme evidenciado por Moraes e Crestani (2018). Tais dados são de importância primordial para assegurar a eficiência e a sustentabilidade das práticas agrícolas e industriais relacionadas ao aproveitamento do bagaço de laranja como recurso multifuncional.

Figura 2 - Composição química do bagaço de laranja.



Fonte: (Adaptado de Moraes e Crestani, 2018).

2.2 SECAGEM CONVENCIONAL

O estudo e manejo dos resíduos sólidos são cruciais devido aos problemas ambientais associados a esses materiais. A diversidade e quantidade dos poluentes sólidos gerados representam um desafio, especialmente pela falta de controle na disposição e pela dificuldade de tratamento devido à sua variedade. A alta umidade inicial dos resíduos orgânicos acelera sua degradação e torna complicado seu tratamento e armazenamento adequados. A decomposição lenta dos resíduos inorgânicos e sua capacidade de absorver umidade complicam ainda mais o cenário. Reduzir a umidade inicial dos resíduos é crucial para mitigar seu impacto ambiental e

facilitar seu tratamento e reutilização. A secagem surge como uma alternativa promissora, permitindo a redução da umidade através do contato com ar quente, o que diminui o volume dos resíduos e inibe reações prejudiciais. Além disso, a secagem oferece benefícios como a redução de custos de transporte, inativação de microrganismos, armazenamento seguro e valorização dos produtos secos, promovendo assim a reutilização. [34]

Apesar do crescimento observado no uso da secagem para tratar resíduos sólidos e dos estudos publicados sobre o tema, ainda enfrentamos desafios significativos. A complexidade do processo de secagem, somada à heterogeneidade dos resíduos sólidos em termos de origem e propriedades físicas, químicas e biológicas, torna difícil recomendar um único método para todos os tipos de resíduos. A seleção de técnicas e equipamentos adequados depende das características específicas do material a ser tratado, do resultado desejado e dos custos envolvidos, exigindo análises detalhadas para determinar a abordagem mais apropriada. Este trabalho se concentra nas principais técnicas de secagem aplicadas ao tratamento térmico de resíduos sólidos, destacando as principais técnicas e revisando estudos relevantes. Além disso, são discutidos aspectos importantes da eficiência térmica e energética dos secadores, fundamentais para avaliar a viabilidade do processo. [34]

2.2.1 Aspectos Gerais da Secagem de Resíduos Sólidos

O estudo da secagem de resíduos sólidos é uma área de pesquisa intrincada, dada a vasta gama de materiais envolvidos, as múltiplas variáveis do processo e a necessidade imperativa de se obter uma umidade final apropriada de maneira eficaz. Estes resíduos consistem em uma mescla diversificada de elementos, como embalagens de papelão [35], resíduos hospitalares [36] e sobras de frutas cítricas [37, 38], cada qual exibindo propriedades físicas e químicas distintas que influenciam diretamente o procedimento de secagem. A heterogeneidade estrutural destes materiais implica que suas características são intrinsecamente relacionadas à sua disposição no espaço físico [39], enquanto determinados materiais podem também manifestar anisotropia, como cristais específicos, fibras e materiais laminados. [40]

Uma abordagem para confirmar a natureza heterogênea dos resíduos sólidos é conduzir estudos de caracterização, visando identificar suas principais propriedades

térmicas, físicas e estruturais. Em resíduos sólidos anisotrópicos, os coeficientes de transferência (momento, calor e massa) variam conforme a direção de transferência, o que implica que esses materiais possuem preferências específicas para a transferência de calor e massa. Essa anisotropia pode ter uma importância considerável durante o processo de secagem de resíduos. Por exemplo, em um leito de resíduos sólidos, a permeabilidade pode ser consideravelmente maior na direção axial do que na direção radial, resultando em uma secagem mais rápida nessa direção particular, como é observado na secagem em leito fixo. Essa informação pode ser fundamental ao buscar reduzir os custos energéticos da secagem e otimizar a eficiência do processo. [34]

Os resíduos sólidos podem ser categorizados como higroscópicos ou não higroscópicos, dependendo da interação entre água e sólidos. Os resíduos higroscópicos incluem principalmente resíduos orgânicos (como resíduos de frutas e vegetais) e alguns resíduos inorgânicos (como borracha, papel e tecido), enquanto os não higroscópicos consistem apenas em outros resíduos inorgânicos, como materiais poliméricos. Os resíduos não higroscópicos não retêm umidade do ambiente devido à água em estado líquido presente nesses materiais não estar intimamente ligada ao sólido, resultando em um excesso de umidade, já que o teor de umidade de equilíbrio coincide com a umidade de saturação [40]. Nos resíduos não higroscópicos, a pressão de vapor interna é idêntica à do componente puro, dependendo exclusivamente da temperatura [40]. Por outro lado, nos resíduos higroscópicos, a água está ligada à estrutura do material, resultando em uma pressão de vapor menor que a da água pura na mesma temperatura. Essa água pode ser retida no sólido de várias maneiras, como por retenção capilar ou adsorção química ou física na superfície sólida. Isso significa que a umidade se desloca dos espaços internos do material para a superfície, onde é mais difícil de ser transferida para a fase gasosa do que nos resíduos não higroscópicos que possuem umidade livre. Esses fatores devem ser considerados ao escolher os métodos de secagem e as condições operacionais, pois influenciam o desempenho térmico e energético do processo de secagem de resíduos sólidos [34].

2.2.2 Técnicas de Secagem

A categorização e escolha de secadores para secagem de resíduos sólidos apresentam desafios significativos devido à diversidade desses resíduos e à complexidade dos sistemas não uniformes. Geralmente, os secadores são classificados com base no método de transferência de calor e nas características físicas dos sólidos úmidos, como discutido na literatura. McCormick [39] propõe um método de classificação que distingue os tipos de secador e seus métodos de operação, enquanto Mujumdar [40] categoriza os secadores com base nos meios de transporte do material e nas condições de operação. Considerações sobre eficiência térmica, energética e custos operacionais são cruciais na escolha do método de secagem ideal, que deve garantir um contato eficaz entre a superfície sólida e a fase gasosa, além de uma mistura eficiente entre eles. Embora ainda não exista uma classificação definitiva para secadores de resíduos sólidos, a análise das propriedades físicas e reológicas dos materiais, juntamente com a revisão de dados experimentais anteriores, pode auxiliar na seleção do equipamento ou método mais adequado para o tratamento térmico dos resíduos. Mais informações sobre os equipamentos podem ser encontradas em diversas fontes de pesquisa [34].

2.2.2.1 Secagem em Leito Fixo

O secador de leito fixo é conhecido por sua simplicidade estrutural, constituindo-se de uma câmara retangular ou cilíndrica onde o material a ser desidratado é posicionado. Geralmente empregado em operações de menor escala [41], ainda há escassez de estudos sobre sua aplicação em larga escala com resíduos sólidos, embora seja reconhecido como um equipamento valioso para investigar os processos de transferência de umidade. Durante o processo, o material permanece estacionário enquanto o ar aquecido atravessa o leito, facilitando a troca de calor e umidade e removendo a água do resíduo. Uma de suas principais vantagens reside nos custos de construção e manutenção acessíveis, além da operação simplificada [36]. Quando o material é disposto em bandejas, observam-se dois modos de transferência de calor: um direto, quando o fluxo de ar é alinhado ou perpendicular ao leito de sólidos, e outro indireto, quando o material é colocado diretamente sobre as bandejas metálicas e a energia é transferida por condução [42].

Um exemplo de secagem em leito fixo seria Carvalho e Silva [34] que conduziram uma análise sobre o processo de secagem de resíduos hospitalares utilizando um secador de bandejas, explorando diversas configurações operacionais. Os resíduos hospitalares, conhecidos por sua notável diversidade, demandam uma redução significativa do teor de umidade para diminuir o volume e assegurar a eliminação dos microrganismos. Durante as investigações, foi constatada uma taxa de secagem estável em amostras com elevado teor inicial de umidade (85%, base úmida). A evaporação da água foi mais acentuada quando empregados maiores fluxos de ar e temperaturas. Observou-se que a inativação microbiológica apresenta menor eficácia em temperaturas mais baixas e em condições de alta umidade relativa do ar. Os resultados destacaram uma redução no volume dos resíduos entre 30% a 50% em relação ao volume inicial, além de uma diminuição na eficácia da inativação microbiológica com a redução do tempo de exposição dos resíduos a altas temperaturas (160 °C), apesar da redução na umidade atingida.

2.2.2.2 Secagem em Tambor Rotativo

O secador rotativo é aplicado para extrair a umidade de resíduos sólidos altamente diversos de forma ininterrupta. Suas vantagens incluem a capacidade de secar materiais de diferentes formatos, tamanhos e áreas superficiais, resultando em uma secagem uniforme devido à eficiente mistura das partículas. Além disso, sua adaptação flexível à geometria do sistema o torna uma escolha atraente para a secagem de resíduos sólidos. Embora seja conceitualmente simples, compreender seu funcionamento implica em uma análise complexa, pois diversos mecanismos, além dos processos de transferência de calor e massa, influenciam o processo de secagem. Em média, aproximadamente doze variáveis independentes precisam ser consideradas, impactando o resultado final da umidade e o comportamento da matéria particulada durante a secagem. A cascata de partículas desempenha um papel essencial na taxa de secagem neste tipo de secador, ao facilitar o contato entre o gás de secagem e o material a ser seco. Estudos detalhados sobre a cascata e a caracterização do tempo de residência do resíduo sólido são cruciais, dada a considerável heterogeneidade dos materiais, que muitas vezes resulta em uma

distribuição não uniforme da cascata e na produção de um produto final com características menos ideais.

Perazzini et al [35], investigaram o processo de secagem de resíduos cítricos utilizando um secador rotativo, focalizando na análise da distribuição do tempo em que as partículas permanecem no tambor rotativo. Seus resultados indicaram que, sob condições de alta velocidade do ar, as partículas foram mais suscetíveis à influência da força de arrasto, resultando em uma redução significativa no tempo de residência. A taxa de fluxo de massa sólida não demonstrou uma influência substancial, conforme evidenciado pela semelhança geométrica nas curvas de distribuição do tempo de residência. Eles também concluíram que o uso do secador rotativo é apropriado para o processo de secagem dos resíduos cítricos.

Pinacho et al. [42] realizaram uma comparação entre processos de secagem contínua utilizando secadores rotativos e secadores de bandejas descontínuos. Eles observaram que os resíduos orgânicos secam de maneira mais apropriada em um processo contínuo, enquanto o secador rotativo oferece uma secagem mais eficiente para materiais heterogêneos em comparação com o secador de bandejas. A utilização do secador rotativo para secagem contínua foi identificada como uma abordagem rápida, econômica e simples para reduzir o teor de umidade em resíduos sólidos vegetais.

Zabanitou [43] examinou os principais parâmetros operacionais de um secador rotativo, incluindo o ângulo de inclinação, a velocidade de rotação e as condições de fluxo de ar e temperatura, observando sua influência no teor final de umidade da biomassa, especificamente nos resíduos de madeira florestal. Ao reduzir a temperatura do ar de entrada, constatou-se um prolongamento do período de aquecimento, resultando em um aumento na taxa de secagem constante, enquanto o período de queda na taxa de secagem foi reduzido. Além disso, foi ressaltada a importância do tempo que os resíduos permanecem dentro do secador, destacando que um tempo inadequado pode levar a uma umidade final do produto acima do desejado, sublinhando a necessidade de assegurar um tempo de residência apropriado para atingir o teor de umidade almejado da biomassa, que é de 7%.

2.2.2.3 Túnel de Secagem

Os secadores de túnel, assim como os secadores de leito fixo e móvel, são compostos principalmente por uma longa câmara retangular, pela qual o material a ser desidratado é conduzido. Geralmente, esse material é movido ao longo da câmara de secagem por meio de uma esteira perfurada, permitindo que o ar quente seja introduzido a partir da base do equipamento para atravessar o leito de resíduos sólidos, aquecê-lo e eliminar sua umidade. A temperatura do ar pode ser elevada até valores abaixo de 205°C por meio de combustão direta ou indireta [40]. Dependendo do método de transporte dos resíduos, o fluxo de ar pode ocorrer de forma contracorrente, corrente ou transversal em relação ao sistema de partículas. Em uma configuração transversal, o material move-se ao longo da câmara de secagem. De acordo com Sokhansanj e Jayas [44], uma das principais vantagens desses secadores é sua concepção simples e adaptável. A transferência de calor nos secadores de túnel ocorre principalmente por radiação, em equipamentos retangulares, orientados horizontalmente e revestidos com material refratário para promover a eficiência na troca térmica [40]. Em tal sistema, não há contato direto do material com os gases de combustão, e geralmente é necessária a presença de um fluxo de ar para transportar o vapor d'água gerado.

Pang e Xu [45] utilizaram um secador de leito móvel empacotado como solução para diminuir o teor de umidade inicial das lascas de biomassa lenhosa. Quando recém-produzido, esse resíduo sólido apresenta um teor de umidade considerável, o qual deve ser reduzido para 5-20%, dependendo do uso final pretendido do produto seco. Eles desenvolveram um modelo matemático para prever tanto o teor de umidade quanto a temperatura da fase sólida e fluida em função da profundidade do leito e do comprimento da correia transportadora. Esse modelo, fundamentado em equações de balanço de massa e energia de cada fluxo de biomassa (madeira), umidade e ar de secagem, foi empregado para aprimorar tanto o projeto quanto o funcionamento do secador. Como resultado, os autores sugeriram que a otimização do processo de secagem poderia ser alcançada adotando uma configuração de fluxo contracorrente reverso, observando ainda que uma taxa de fluxo de ar menor pode ser suficiente para atender às necessidades de secagem dos resíduos sólidos.

2.2.2.4 Secagem em Leito de Jorro

O leito de jorro surge como uma opção promissora para desidratar diversos materiais com necessidades específicas, como altas taxas de transferência de calor e massa, uniformidade na temperatura do leito e a capacidade de processar materiais sensíveis ao calor [46]. Isso o torna relevante para uma variedade de processos industriais, incluindo revestimento de partículas, granulação e secagem de pastas e suspensões [47, 48]. Segundo Mathur e Epstein [46], a formação do jorro é um fenômeno observável que se inicia a partir de uma velocidade específica do ar, dependendo da combinação de gases e sólidos e da configuração do equipamento. Durante o processo de jorro, as partículas movem-se ciclicamente, gerando três zonas distintas no leito: uma região de jorro, uma de fonte e uma anular. Embora o secador de leito jorrante possa ser utilizado para secar tanto materiais sólidos quanto pastosos, como resíduos sólidos e efluentes líquidos, é mais comum sua aplicação em efluentes líquidos, havendo poucos estudos sobre seu uso para desidratar resíduos sólidos.

Silva [48] examinou o processo de secagem de resíduos cítricos em um secador de leito jorrante e observou que este não é adequado para a completa desidratação desse material devido a desafios, como a formação inconsistente do jorro. A inclusão de material inerte no equipamento complicou ainda mais a obtenção do regime de jorro e a separação do material inerte dos resíduos secos.

2.2.2.5 Secagem Pneumática

Os secadores pneumáticos, conhecidos como secadores de flash, são empregados para secar materiais sólidos e pastosos, transportando-os através de um tubo vertical ou horizontal com um fluxo constante de ar quente. São comumente utilizados em materiais com umidade superficial, como bagaço de laranja, de cana-de-açúcar e borra de café, onde a fase sólida é separada da gasosa por um ciclone na saída do secador. Esse sistema proporciona um eficiente contato entre fluido e partículas, resultando em altos coeficientes de transferência de calor e massa por convecção, adequados para uma ampla gama de aplicações industriais [49]. Os secadores pneumáticos apresentam outras vantagens, como uma alta capacidade de retenção de calor no leito, facilidade no manuseio e transporte de sólidos, e a

capacidade de secar materiais sensíveis ao calor devido ao curto tempo em que as partículas permanecem no processo, geralmente inferior a 30 segundos [50]. A viabilidade do uso de transportadores pneumáticos está diretamente relacionada às condições de fornecimento de ar quente e de alimentação de sólidos, à mistura entre as fases sólida e gasosa, e à energia necessária para movimentar o material ao longo do tubo de transporte [39]. Em casos envolvendo materiais pegajosos, como lodo de esgoto e certos resíduos com alto teor de açúcar, uma porção do material já seco pode ser misturada ao sólido ainda úmido na entrada do secador e reintroduzida no processo para aprimorar o tratamento do material [49].

Sosa-Arno et al. [51] fizeram uma análise dos principais sistemas utilizados na secagem do bagaço de cana-de-açúcar. Segundo eles, embora o secador rotativo tenha sido o primeiro a ser utilizado para processar o bagaço de cana, os secadores pneumáticos são atualmente mais prevalentes devido à sua viabilidade econômica e à menor necessidade de espaço. O bagaço de cana-de-açúcar seco é comumente empregado como fonte de combustível em instalações industriais de produção de açúcar e álcool.

2.2.2.6 Secagem em Leito Fluidizado

O leito fluidizado é amplamente empregado em processos de secagem devido à sua versatilidade operacional, que permite lidar com uma ampla gama de materiais com características diversas. Entre as vantagens desse sistema, estão a boa mistura de partículas, a uniformidade do produto final, as altas taxas de transferência de calor e massa, e a facilidade de transporte do material [52]. Em termos de configuração, os secadores de leito fluidizado geralmente consistem em um leito cilíndrico preenchido com partículas (fase sólida), em contato com um fluxo de fluido ascendente (fase gasosa) a uma velocidade pré-determinada. Estudos preliminares sobre a dinâmica dos fluidos são essenciais para garantir uma secagem eficaz de resíduos sólidos em um leito fluidizado [53]. É importante ressaltar que o uso desse sistema na secagem de resíduos sólidos apresenta algumas características específicas. Por exemplo, resíduos compostos por partículas heteromórficas não isométricas podem assumir diferentes arranjos no leito, o que influencia o comportamento fluidodinâmico. Durante o processo de secagem de materiais biológicos, fenômenos como a contração podem

ser alterados, afetando as condições de fluidização. Essas condições podem ser ainda mais desafiadoras para resíduos sólidos biológicos, pois podem influenciar as características fluidodinâmicas do leito e dificultar a circulação uniforme do material [18].

Liébanes et al. [54] alcançaram resultados positivos ao secar a torta de azeitona em um leito fluidizado. Eles observaram melhorias nos processos de transferência de calor e massa entre o sólido e o ar devido ao uso do leito fluidizado, o que resultou em uma eficiência aprimorada na secagem. Além disso, conseguiram manter taxas de secagem elevadas, mesmo quando as temperaturas do ar eram relativamente baixas, abaixo de 150°C. No entanto, enfrentaram desafios adicionais relacionados à fluidização devido à heterogeneidade do material.

2.3 PROCESSO DE BIOSSECAGEM E BIOSSECAGEM INTERMITENTE

O processo de biossecagem foi desenvolvido como uma alternativa de baixo consumo energético para a recuperação de sólidos secos e biologicamente estabilizados a partir de resíduos orgânicos [55], sendo considerado uma etapa intermediária entre o resíduo bruto e a compostagem completa. Enquanto a compostagem promove a oxidação total da matéria orgânica disponível, a biossecagem consome apenas parte dessa matéria orgânica para gerar calor, preservando o restante do material residual.

Segundo Jewell & Cummings [55], a biossecagem é um processo aeróbio em duas etapas que combina digestão aeróbia termofílica de alta taxa com secagem, utilizando baixo consumo de energia. O manejo eficiente do substrato, água, energia e ar — tanto para a utilização microbiana quanto para a secagem — resulta na oxidação parcial da matéria orgânica por microrganismos mesofílicos e termofílicos. A reação exotérmica de oxidação do substrato fornece energia suficiente para elevar a temperatura do reator até condições termofílicas (acima de 43°C), aquecendo o ar de secagem e reduzindo a necessidade de fontes externas de energia.

Frei et al. [56] estudaram o que chamaram de um novo modelo de secagem, utilizando aeração forçada através de uma matriz porosa de biomassa composta por resíduos da indústria papelreira. De acordo com os autores, o processo de biossecagem tende a oferecer vantagens econômicas, como a economia de

combustível devido ao aumento do valor calórico do material seco, redução do uso de combustíveis auxiliares (geralmente gás natural e/ou óleo), eliminação ou redução da disposição dos resíduos em aterros sanitários e diminuição nas emissões de gases de efeito estufa, considerando-se que a queima de biomassa pode ser considerada neutra em relação ao CO₂.

Biossecadores têm sido aplicados com sucesso no tratamento de resíduos sólidos orgânicos, como a secagem de esterco em fazendas leiteiras [21], resíduos sólidos urbanos [10,11,14,19,57–59] e resíduos orgânicos industriais [3,16,25,60–63]. Esses estudos foram realizados sob condições de biossecagem contínua, ou seja, sem qualquer tipo de descontinuidade nas condições do processo ao longo do tempo. A literatura sobre biossecagem indica que a tecnologia atual ainda precisa ser aprimorada em termos de projeto, operação e escalonamento industrial.

Maia et al. [3] estudaram a biossecagem de resíduos sólidos de laranja utilizando um leito fixo, comparando a operação convencional com dois modos intermitentes de operação. Os autores concluíram que, apesar dos indícios promissores quanto ao uso dessa estratégia, a tecnologia de biossecagem ainda exige estudos mais aprofundados para garantir que o aumento de temperatura no leito — gerado pela ação dos microrganismos — não seja comprometido pelo resfriamento evaporativo causado pela passagem de ar seco por meio poroso úmido. Os autores utilizaram a intermitência como um aumento súbito da vazão de ar no sistema em intervalos fixos.

Além disso, a secagem intermitente é uma técnica promissora que pode melhorar o desempenho da secagem em relação à operação em regime permanente. A secagem intermitente consiste em uma série de ciclos, cada um composto por um período de secagem ativa seguido de um período de repouso (ou temperagem) [64]. Essa técnica pode ser aplicada controlando a entrada de energia térmica por meio da variação da vazão de ar, da temperatura, da umidade ou da pressão de operação. Também é possível variar o modo de entrada de energia (ex.: convecção, condução, radiação ou micro-ondas) para alcançar a intermitência desejada.

A forma mais comum de intermitência descrita na literatura é aquela obtida por variações nas condições do ar de secagem [65–68]. Mais recentemente, a aplicação de intermitência na entrada de calor tem sido bem-sucedida em métodos combinados de secagem, como micro-ondas, radiofrequência [69–73] e ultrassom [74]. Diferentes

tipos de intermitência afetam a qualidade do produto e a eficiência energética de formas distintas. Por isso, a intermitência não deve ser aplicada de forma arbitrária, mas sim fundamentada na física do processo de secagem. Caso contrário, não se atingirão os ganhos esperados em eficiência energética e qualidade do produto final [75].

2.4 MICROORGANISMOS NATIVOS DO BAGAÇO DE LARANJA

Conforme mencionado anteriormente, o processo de biossecagem apresenta muitas semelhanças com o processo de compostagem, especialmente em suas fases iniciais [55]. Enquanto o objetivo principal do biossecagem é a remoção de água, a compostagem visa a oxidação completa da matéria orgânica. Embora os objetivos finais sejam distintos, ambos os processos se iniciam sob condições semelhantes no que diz respeito ao desenvolvimento de microrganismos nativos.

Van Heerden et al. [76] realizaram um estudo detalhado dos aspectos físicos, químicos e biológicos da compostagem de resíduos cítricos. Os autores investigaram a compostagem utilizando uma pilha de resíduos de 3 m², com coleta de material para análise em profundidades de 0,05 m e 0,3 m a partir da superfície.

De acordo com os autores, a biomassa cítrica foi predominantemente colonizada por leveduras mesofílicas, mas também continha pequenas quantidades de bactérias termofílicas e fungos filamentosos, como *Bacillus licheniformis*, *B. stearothermophilus*, *Aspergillus fumigatus* e *Talaromyces thermophilus*, além de alguns *actinomicetos* mesofílicos. Os autores também observaram que o início da fase térmica foi caracterizado por um aumento na população de organismos termofílicos, especialmente bactérias nas camadas mais profundas e anaeróbias, e fungos mais próximos da superfície. No entanto, as bactérias foram o grupo microbiano termofílico dominante no composto maduro.

Considerando que a biossecagem é um processo predominantemente oxidativo, pode-se supor que as condições do biossecador são muito semelhantes às condições externas da pilha de compostagem estudada pelos autores, ou seja, com predominância de fungos filamentosos termofílicos.

Além das espécies já mencionadas, os fungos filamentosos termofílicos isolados durante o processo incluíram *Absidia corymbifera*, *Emericella nidulans*,

Penicillium diversum, *Paecilomyces variotii*, *Rhizomucor pusillus*, *Thermomyces lanuginosus* e *T. ibananensis*, enquanto as bactérias termofílicas incluíram *Bacillus macerans*, *Enterobacter cloacae*, *Serratia marcescens* e espécies do gênero *Coryneform*. Os autores também destacam que os microrganismos *B. brevis* e *Staphylococcus saprophiticus* foram isolados apenas nos estágios iniciais da compostagem, enquanto *Alcaligenes denitrificans*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas aeruginosa*, *P. fluorescens* e *Serratia marcescens* foram encontrados apenas no produto final maduro.

Embora as espécies de microrganismos que colonizam a biomassa cítrica possam variar, de maneira geral é possível considerar que os biossecadores desenvolvem os mesmos grupos microbianos, especialmente aqueles mais adaptados às condições aeróbias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 BIOMASSA DE RESÍDUO SÓLIDO DE LARANJA

A biomassa de resíduo sólido de laranja (BRSL) proveniente da produção de suco de laranja, composta por cascas, bagaço, galhos e sementes, foi fornecida pela empresa Sucocítrico Cutrale (Araraquara, SP, Brasil) [3]. A BRSL apresentava um teor de umidade inicial (X_0) de $3,0 \pm 0,1$ (kg de água/kg de resíduo seco), ou seja, em base seca (b.s.), e continha $2,9 \pm 0,2$ de cinzas, $19,3 \pm 0,9$ de extrativos em solvente, $38,5 \pm 1,5$ de celulose, $33,1 \pm 2,0$ de holocelulose, $24,0 \pm 2,0$ de hemicelulose e $2,9 \pm 0,5$ de lignina (kg/kg de resíduo seco), também em base seca (b.s.) [3].

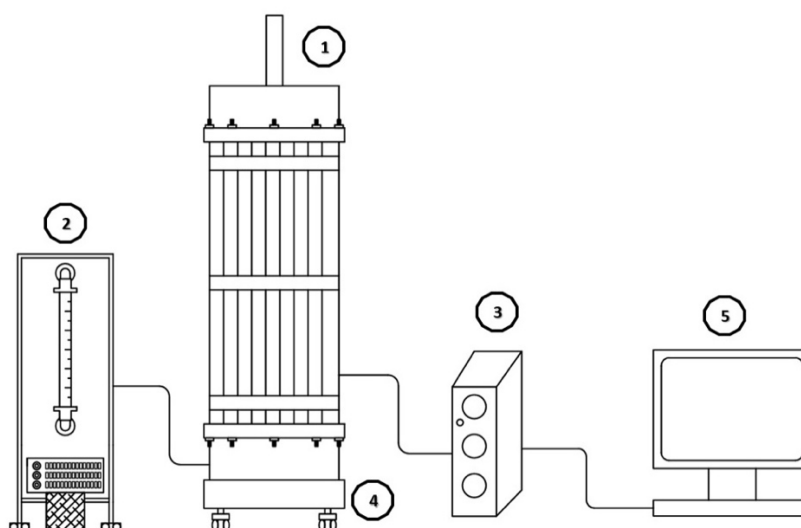
3.2 EQUIPAMENTO DE BIOSSECAGEM, OPERAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS

Um diagrama do equipamento de biossecagem é apresentado na Figura 3 para referência. O corpo do biossecador foi construído em PVC e é composto por três seções distintas: a base, o cilindro central e o topo. Uma manta cerâmica foi aplicada na parte externa do secador com a finalidade de isolamento térmico. O cilindro central possuía um diâmetro interno de 0,30 m e uma altura de 0,62 m, com volume máximo

de trabalho de aproximadamente $0,04 \text{ m}^3$ [3]. O equipamento foi projetado e construído no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (Brasil).

O leito era composto por 5,0 kg de biomassa, com 0,3 m de diâmetro e 0,3 m de altura. Um espaço livre de 0,32 m acima do leito foi utilizado para facilitar o processo de homogeneização e minimizar a condensação de vapor imediatamente após o leito. A biomassa foi disposta sobre uma placa perfurada que atuava tanto como suporte quanto como distribuidora do fluxo de ar. A homogeneização do leito foi realizada manualmente de forma semelhante à descrita por Van Heerden et al. [76] para uma pilha de compostagem de resíduos cítricos. Em momentos específicos do experimento, o equipamento era momentaneamente retirado do sistema de leitura e de controle da vazão de ar, sendo cuidadosamente deitado para possibilitar a homogeneização manual do leito. A rotação era iniciada a partir de um ponto fixo, no sentido horário, de modo que a biomassa em contato direto com a placa inferior fosse deslocada para o topo e, simultaneamente, a porção superior fosse conduzida para a base. Esse processo era repetido continuamente por cerca de cinco minutos, até que o leito estivesse completamente homogeneizado. A homogeneização do leito era realizada de modo a evitar o contato direto do operador com a biomassa, prevenindo a contaminação cruzada do meio.

Figura 3 - Diagrama do equipamento de biossecagem e do sistema de aquisição de dados: 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.

A temperatura era obtida por sensores calibrados (modelo Ds18b20, Dallas Semiconductor, Estados Unidos), compatíveis com a plataforma Arduino e com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. O fluxo de ar era regulado por um rotâmetro calibrado (modelo INF-R-P-200, Indflow Ind. Solutions, Brasil). O sistema de aquisição de massa foi construído com três placas de aquisição (modelo Hx711, Avia Semiconductor Co. Ltd., China), com limite de massa de 2000 ± 5 g cada [3].

O bioprocesso foi monitorado por um sistema supervisório desenvolvido pela LabVIEW (National Instruments Corp, Estados Unidos). De forma geral, a cada 10 segundos o sistema supervisório lê a porta serial conectada ao microcontrolador e recebe uma corrente única que atualiza todos os valores dos sensores conectados ao processo. Essa corrente é decodificada e todas as variáveis são atualizadas nos indicadores gráficos do *software* e salvas no disco rígido do computador. Por sua vez, o microcontrolador opera da seguinte maneira: para leitura de temperatura, calcula-se a média de 5 medições realizadas com intervalos de 1s entre cada amostra; para conversão do sinal digital, são utilizadas as bibliotecas DallasTemperature.h e OneWire.h. A cada 3 segundos, o microcontrolador lê a massa das células de carga utilizando a biblioteca HX711.h. Ao final da aquisição e processamento, o microcontrolador compila os dados em uma corrente única e envia essa informação à porta serial a cada 10 s. O *software* SuperSys Drying foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos (Brasil) pelo Prof. Dr. Antonio Carlos Luperni Horta, especificamente para aquisição de dados durante experimentos de biossecagem.

3.3 CONFIGURAÇÃO DA BIOSSECAGEM INTERMITENTE

Um número significativo de bioprocessos é conduzido em operações que utilizam a mobilidade da fase fluida. No entanto, isso representa um desafio importante na operação de biossecadores. O movimento contínuo do leito pode aumentar significativamente o tempo necessário para que os microrganismos aqueçam o sistema, resultando em tempos operacionais mais longos. Para minimizar esse efeito, recomenda-se promover a homogeneização intermitente em vez do movimento contínuo. Um período intermitente de homogeneização do leito, intercalado com períodos de estagnação, pode favorecer os mecanismos de transferência de massa,

garantir melhor distribuição da fase gasosa no leito, maximizar a remoção de umidade e proporcionar menor impacto sobre a geração de calor no sistema.

Um planejamento experimental do tipo delineamento composto central (DCC) foi utilizado para desenvolver um conjunto de experimentos, nos quais as variáveis analisadas foram a vazão de ar e o período de homogeneização do leito. O DCC foi planejado utilizando valores mínimos e máximos de 0,15 e 0,8 m³/h para a vazão de ar (Q), respectivamente. O período de homogeneização do leito (BHP) foi planejado para ter intervalos de 19 a 53 horas variando conforme cada experimento. A matriz do DCC juntamente com o esquema de biossecagem intermitente é apresentada na Tabela 2. Em todos os experimentos, o biossecador foi preenchido com 5,0±0,1 kg de BRSL e o processo teve duração de 96 horas.

Tabela 2 - DCC rotacional dos experimentos de biossecagem realizados com BRSL, variando a vazão de ar (Q) e o período de homogeneização do leito (BHP).

Experimento (#)	Fluxo de Ar(Q)		BHP	
	Código	Configuração (m ³ /h)	Código	Configuração (h)
1	-1	0,30±0,01	-1	24
2	-1	0,30±0,01	+1	48
3	+1	0,80±0,01	-1	24
4	+1	0,80±0,01	+1	48
5	- α	0,15±0,01	0	36
6	+ α	0,85±0,01	0	36
7	0	0,55±0,01	- α	19
8	0	0,55±0,01	+ α	53
9(C)	0	0,55±0,01	0	36
10(C)	0	0,55±0,01	0	36

Fonte: Autoria Própria.

Como variável de resposta a ser analisada, o ganho de temperatura (ΔT) é definido como a diferença entre a temperatura do leito de biossecagem e a temperatura do ar de alimentação. As temperaturas mínimas (T_{min}), média (T_{med}) e máxima (T_{max}), assim como os ganhos de temperatura mínimo (ΔT_{min}), médio (ΔT_{med}) e máximo (ΔT_{max}) também foram utilizados como variáveis de resposta para o DCC.

A análise das variáveis de resposta por meio de testes estatísticos foi realizada utilizando o software Statistica, e os resultados foram expressos em gráficos de Pareto e superfícies de resposta.

3.4 ANÁLISE ELEMENTAR

Na análise elementar (ou análise última), a quantidade de C, H, N e S é determinada a partir dos produtos da combustão completa: o oxigênio pode ser determinado diretamente, mas é mais comumente calculado por diferença, de acordo com a Equação 1 [77].

$$O = 100 - (C + H + S + N) - M_s - a \quad (1)$$

Nessa equação, O, C, H, S e N representam, respectivamente, as porcentagens de oxigênio, carbono, hidrogênio, enxofre e nitrogênio em base seca (b.s.). M_s é o teor de umidade da amostra e “a” é a porcentagem de cinzas em base seca. A análise elementar foi realizada em triplicata utilizando um analisador elementar CHNS da Fisons (modelo EA-1108, Thermo Scientific, Estados Unidos). As amostras enviadas para a análise de CHNS foram previamente secas e seladas a vácuo, de forma que M_s fosse zero em todas as análises realizadas.

3.5 MISTURA FINAL, TEOR DE CINZAS E ANÁLISE HHV

Antes e depois do processo de biossecagem, as amostras de BRSL foram submetidas a um período de secagem de 24 horas a uma temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$ em uma estufa de secagem convectiva (modelo MA033/1, Marconi Equipamentos para Laboratório LTDA, Brasil) para determinação do teor de umidade. A análise de cinzas foi realizada de acordo com Marshal et al. [78]. Segundo os autores, o conhecimento básico sobre as características dos diferentes procedimentos de incineração e tipos de equipamentos é essencial para garantir resultados confiáveis. Dois principais tipos de incineração são utilizados: incineração a seco, usada principalmente para a composição imediata e alguns tipos de análise mineral

específica; e incineração úmida (oxidação), utilizada como preparo para análise de minerais específicos. Para o procedimento de incineração da biomassa de resíduo sólido de laranja, foi utilizada a incineração a seco, conforme as orientações dos autores, utilizando uma mufla (modelo G318M24, Quimis, Brasil) [78]. Os experimentos foram conduzidos em triplicata [78].

O Poder Calorífico Superior (HHV) é definido como a quantidade total de calor disponível na biomassa, incluindo o calor latente de vaporização da água presente no combustível e nos produtos da reação [3]. Para determinar o HHV, foi utilizada a correlação proposta por Yin [79], baseada na análise elementar. O autor comparou os resultados do cálculo do HHV para doze correlações propostas por outros autores e concluiu que a correlação proposta em seu trabalho apresentou simplicidade de cálculo e maior precisão do que as demais quando aplicada para prever o HHV em biomassa. A correlação para cálculo do HHV [MJ/kg] é apresentada na Equação 2.

$$HHV = 0.2949C + 0.825H \quad (2)$$

Onde C e H representam, respectivamente, as porcentagens de carbono e hidrogênio em base seca (b.s.). A partir do consumo de carbono ($\Delta C = C_0 - C_f$) na biomassa, é possível calcular o consumo de oxigênio (O_c) e a produção de dióxido de carbono (CO_{2p}) durante o processo de biossecagem. Nesse caso, C_0 é a porcentagem de carbono antes do processo de biossecagem e C_f é a porcentagem de carbono após o processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

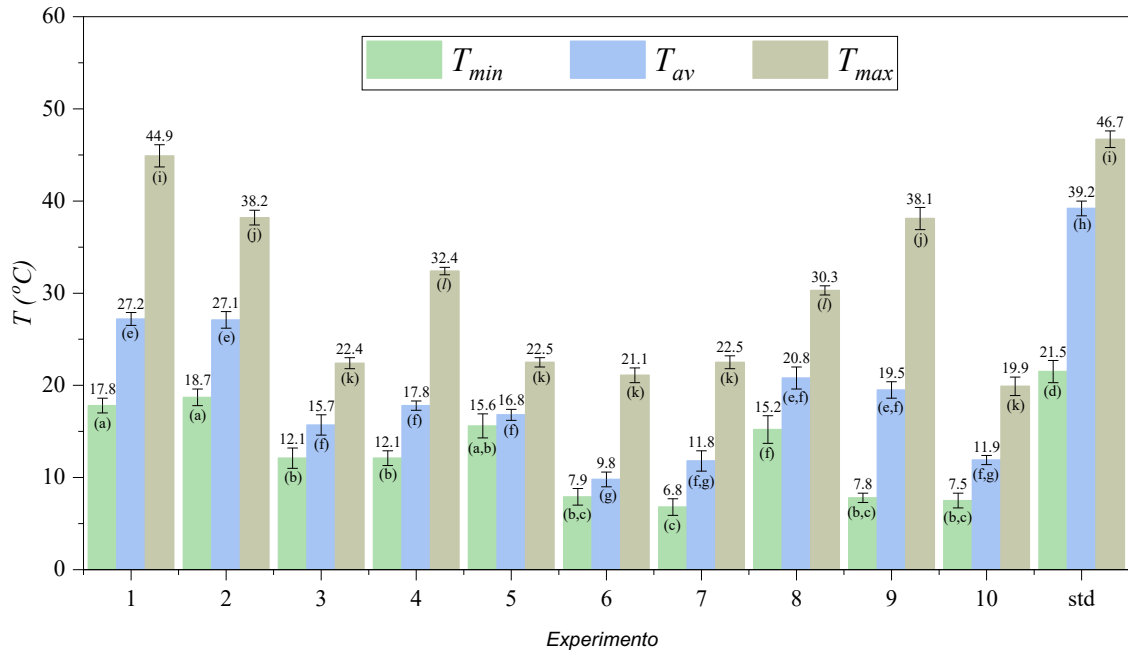
4.1 PERFIS DE TEMPERATURA DA BIOSSECAGEM INTERMITENTE

As variáveis testadas resultantes do delineamento composto central (DCC) são apresentadas nas Figuras 4 e 5. O ensaio experimental padrão (std) consistiu na avaliação da temperatura e do teor de umidade final em um biossecagem de leite fixo com a mesma massa utilizada nos testes 1 a 10, porém sem fluxo de ar e sem homogeneização do leite.

As maiores temperaturas foram observadas nos experimentos #1, #2, #4, #8 e #9. Em comparação com o ensaio padrão (std), apenas o experimento #1 atingiu níveis de temperatura semelhantes. Uma observação importante obtida a partir da análise do comportamento térmico do ensaio (std) mostra que a ausência de fluxo de ar e homogeneização do leite favoreceu a atividade microbiana, já que foram registradas as temperaturas mais elevadas. Isso pode ser explicado ao observar o comportamento da compostagem de resíduos cítricos descrito por Van Heerden et al. [76]. Os autores relatam um aumento de temperatura nas regiões da pilha de resíduos mais afastadas da superfície, onde predomina o crescimento de bactérias anaeróbias. No entanto, apesar da maior temperatura, essa não é uma condição adequada para o processo de biossecagem, uma vez que a formação de zonas anaeróbias está relacionada à má distribuição de oxigênio no leite.

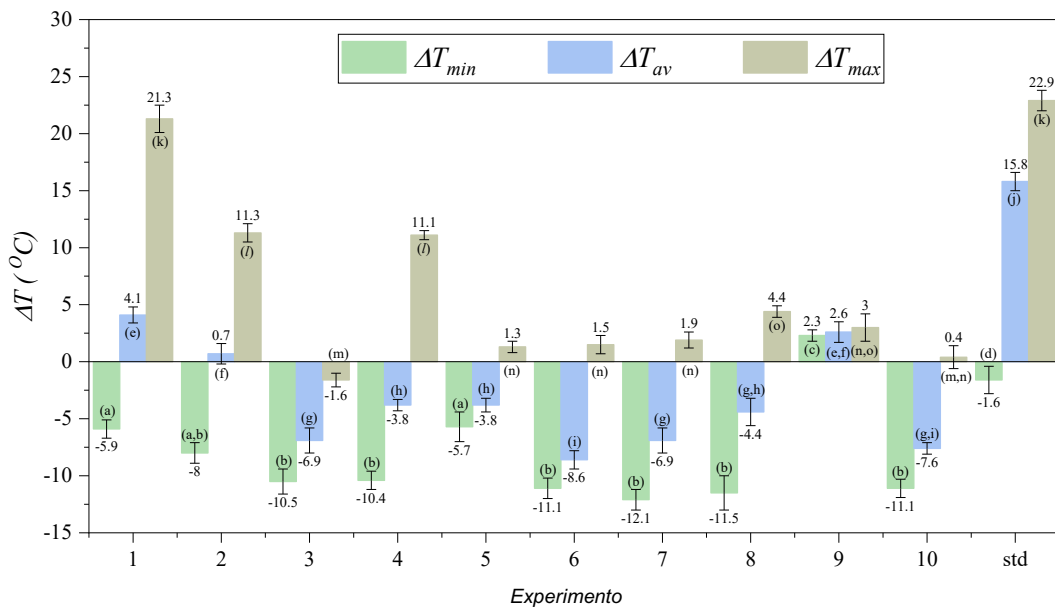
Portanto, a diferença entre a temperatura mínima e máxima durante o experimento padrão (std) indica que o nível de atividade biológica do leite permaneceu elevado ao longo de todo o experimento, diferentemente do observado nos experimentos #1, #2, #4, #8 e #9. Essa análise também pode ser confirmada pelo ganho de temperatura mostrado na Figura 5. Em termos percentuais, a temperatura aumentou em 79,6%, 52,8%, 29,6%, 22% e 52,4% nos experimentos #1, #2, #4, #8 e #9, respectivamente.

Figura 4 - Temperatura mínima, média e máxima (T), durante a biossecagem do BRSL, no delineamento composto central (DCC), variando a vazão de ar e a homogeneização do leito, com os arranjos de biossecagem (padrão - std).



Fonte: Autoria Própria.

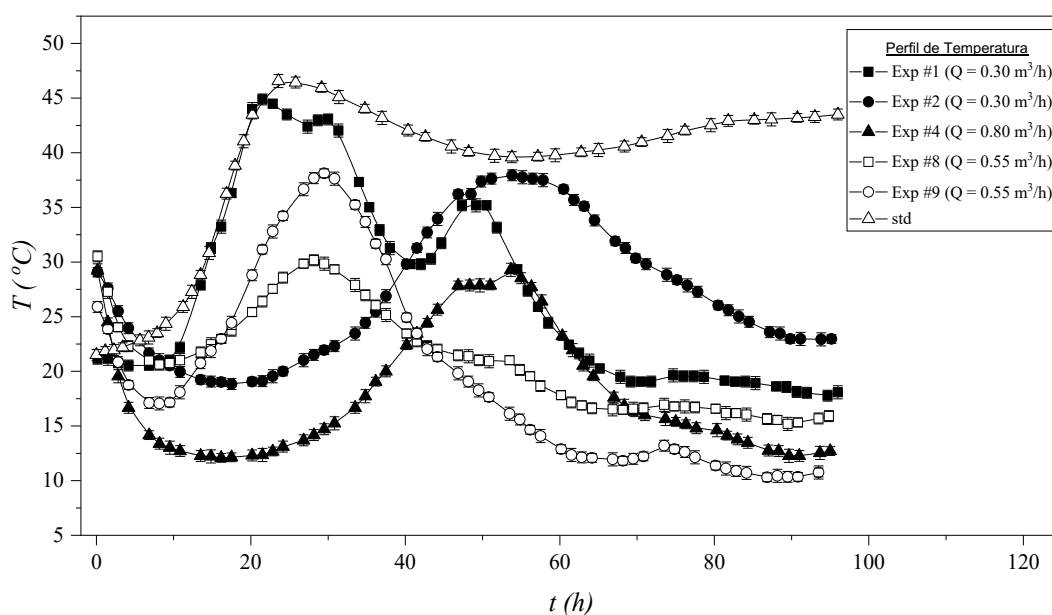
Figura 5 – Ganhos de temperatura mínima, média e máxima (ΔT), durante a biossecagem do BRSL, no delineamento composto central (DCC), variando a vazão de ar e a homogeneização do leito, com os arranjos de biossecagem (padrão - std).



Fonte: Autoria Própria.

Embora tenha sido observado um aumento de temperatura nas configurações destacadas, também é importante analisar a diferença entre os valores mínimo, médio e máximo. Utilizando o experimento #1 como exemplo, as temperaturas mínima, média e máxima são individualmente diferentes daquelas do experimento padrão. Nessa configuração, a temperatura mínima foi de 17,8°C, a temperatura média foi de 27,2°C e a temperatura máxima foi de 44,9°C, resultando em uma diferença de 27,1°C entre as temperaturas mínima e máxima. Além das altas temperaturas alcançadas nesses experimentos, a distribuição térmica ao longo da operação foi menos homogênea. O comportamento térmico dessas configurações experimentais é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Perfil de temperatura durante o processo de biossecagem do BRSL nas configurações em que o aumento de temperatura foi relevante (experimentos #1, #2, #4, #8, #9 e padrão – std)



Fonte: Autoria Própria.

Esse comportamento se repete nas demais configurações destacadas e pode ser confirmado pela observação do padrão de temperatura apresentado na Figura 6. Nos experimentos destacados, observa-se a formação de picos de temperatura máxima que posteriormente caem para valores próximos ou até mesmo abaixo da temperatura ambiente, como evidenciado na Figura 4. Considerando que a temperatura é uma propriedade decisiva para o sucesso do processo de secagem,

não é suficiente que o sistema apresente picos de temperatura; é necessário que ele consiga manter a temperatura elevada pelo maior tempo possível durante a operação.

De modo geral, os perfis de temperatura obtidos nos experimentos destacados estão de acordo com aqueles encontrados na literatura para diferentes processos de biossecagem de resíduos sólidos orgânicos, como a biossecagem de resíduos sólidos urbanos [11,13–15,17,19], a mistura de polpa de papel e lodo [16] e esterco [21]. Especificamente para o processo com resíduos de laranja, foram encontrados estudos que descrevem um comportamento térmico semelhante ao observado nos experimentos destacados. Van Heerden et al. [76] atingiram 45°C em cerca de 96 horas em seu processo de compostagem de resíduos cítricos. Os autores alcançaram uma temperatura máxima superior a 70°C após 20 dias de operação. Vázquez et al. [18], em seu processo de biossecagem em pilhas de resíduos de laranja, alcançaram temperatura de cerca de 45°C nas primeiras 96 horas, com temperatura máxima de 67°C atingida aproximadamente no 15º dia de operação. No entanto, apesar das temperaturas elevadas, ambos os processos ocorrem em um período superior a 60 dias.

Visando intensificar o processo de biossecagem da biomassa de resíduo sólido de laranja, Maia et al. [3] obtiveram uma temperatura máxima de 47°C entre 15 e 24 horas de operação. Os autores destacam que um dos principais obstáculos a serem superados na operação de biossecadores é a redução do tempo de operação. Assim, mesmo que temperaturas mais elevadas possam ser obtidas com maior tempo de operação, a redução de 60 dias para 96 horas pode ser considerada um ganho substancial na intensificação do processo, mesmo que a homogeneização do leito não tenha promovido o efeito desejado.

Por outro lado, no presente trabalho, embora os experimentos destacados tenham demonstrado uma atividade metabólica capaz de gerar o calor necessário para o aumento da temperatura, isso ocorre de forma pontual e não durante todo o tempo de operação do biossecador. Além disso, é possível observar, no comportamento térmico do sistema, que a interrupção da operação para a homogeneização do leito provoca um resfriamento do sistema, que demora a se recuperar termicamente — como observado no experimento #1, em que a primeira homogeneização do leito ocorre em 24 horas. Após a homogeneização, a temperatura do leito diminui, e o sistema só se recupera termicamente por volta de $t = 48$ horas. A

formação de dois picos de temperatura ocorre apenas no experimento #1. Nas demais configurações, foi observado apenas um pico de temperatura. É importante destacar que as temperaturas mínimas observadas estão fortemente relacionadas ao resfriamento evaporativo [3].

De forma semelhante à análise de aumento de temperatura, a análise de ganho de temperatura ajuda a compreender o aumento térmico do leite com base na temperatura ambiente. Essa análise permite uma observação mais precisa dos efeitos do resfriamento evaporativo no leite. De acordo com a Figura 4, apenas o experimento #9 apresentou um perfil de temperatura superior à temperatura ambiente ao longo do tempo. Embora as temperaturas do leite tenham sido modestas em comparação com as demais configurações operacionais, o experimento #9 foi o único a apresentar a mesma tendência observada no experimento padrão.

4.2 DIAGRAMAS DE PARETO

Os dados obtidos a partir do perfil de temperatura do biossecador, nas condições experimentais adotadas, foram resumidos considerando as temperaturas mínima, média e máxima, juntamente com os ganhos de temperatura mínimo, médio e máximo, em relação à vazão de ar (Q) e ao período de homogeneização do leite (BHP). A Figura 7 apresenta os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados e as superfícies de resposta obtidas a partir da análise do delineamento composto central (DCC).

Por meio da análise dos gráficos de Pareto, foi possível observar que nenhuma das variáveis analisadas afetou significativamente o comportamento térmico do biossecador, seja de forma individual ou combinada. Quando nenhum dos efeitos lineares ou quadráticos é significativo, a principal conclusão é que nenhuma das variáveis analisadas apresentou efeito estatisticamente significativo sobre a variável de resposta. No entanto, essa interpretação pode ser aprofundada e melhor elaborada, considerando que estudos da literatura concluem que a vazão de ar desempenha um papel crucial no desenvolvimento do perfil de temperatura em processos de biossecagem [3,13,14,16,17,62].

No que diz respeito à vazão de ar (Q), seus possíveis efeitos sobre a temperatura do meio estão principalmente relacionados ao resfriamento evaporativo — que tende a reduzir a temperatura do leite à medida que a vazão aumenta — e à

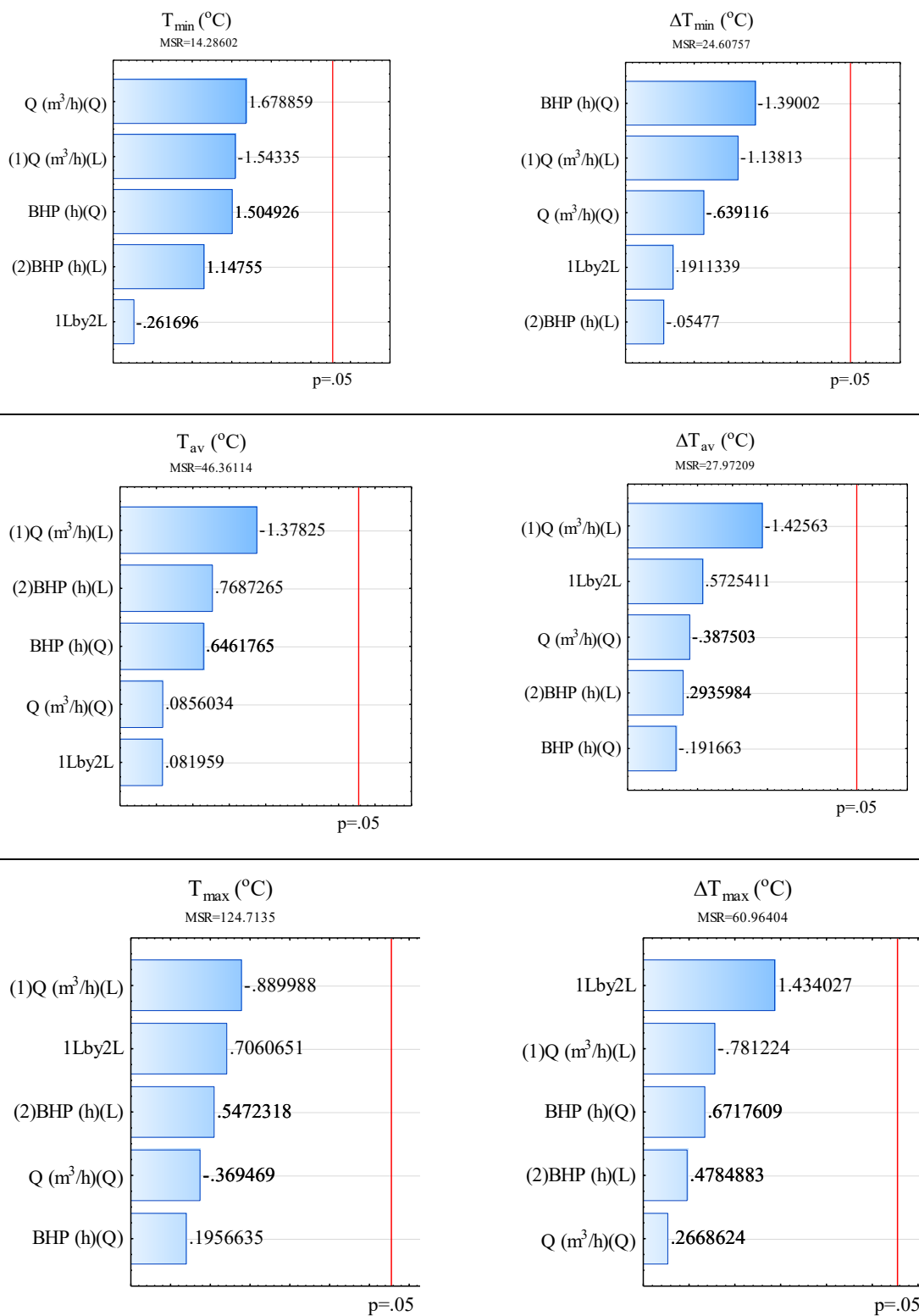
oxigenação do sistema, promovendo melhores condições para o desenvolvimento de microrganismos aeróbios e, conseqüentemente, o aumento da temperatura.

Como a vazão de ar não foi identificada como uma variável estatisticamente significativa no processo de biossecagem analisado neste estudo, essa ausência de significância pode indicar a presença de um alto nível de variabilidade ou ruído no sistema, capaz de mascarar os efeitos reais das variáveis. Tal variabilidade pode estar relacionada à composição da microbiota presente no leite, a qual pode ter sido influenciada pelas diferentes características das amostras utilizadas. As coletas foram realizadas diversas vezes ao longo do ano, em diferentes épocas e condições climáticas, e foram provenientes de distintas safras de laranja. Como cada ensaio exigia aproximadamente 5 kg de biomassa e o material se degradava ao longo dos dias, novas coletas foram necessárias, sendo todas realizadas junto à empresa Cutrale. Uma vez que os processos de biossecagem são frequentemente projetados para operar com microrganismos nativos [11–16,19–21,62], no caso de um resíduo originalmente de origem asséptica [3] — e, portanto, com poucos microrganismos nativos — o efeito da vazão de ar sobre o comportamento térmico do sistema pode estar relacionado ao fato de que diferentes experimentos apresentaram diferentes populações microbianas. Assim, a vazão de ar não atuaria de forma idêntica nas diferentes configurações, mesmo tratando-se de experimentos repetidos, como o experimento #9 e o experimento #10.

Além de ser estatisticamente insignificante, a vazão de ar apresentou um efeito negativo sobre as variáveis do processo, reforçando o fato de que a presença de aeração no sistema é um fator-chave para permitir o metabolismo oxidativo dos microrganismos nativos da RBSL, mas que, em valores mais elevados, pode intensificar o resfriamento evaporativo, tornando a determinação de uma taxa de aeração adequada um desafio e aumentando o impacto no termo quadrático.

Há diversos bioprocessos que operam em condições microaeradas, como é o caso da produção de xilitol utilizando a levedura *Candida guilliermondii* [80, 81]. No entanto, a otimização da operação em condições microaeradas dependerá dos microrganismos utilizados, o que torna ainda mais importante a caracterização aprofundada dos microrganismos nativos da BRSL, a fim de possibilitar uma avaliação mais precisa dessa variável.

Figura 7 - Gráficos de Pareto dos efeitos padronizados para os resultados de temperatura mínima, média e máxima (T) e dos ganhos de temperatura (ΔT) provenientes do delineamento composto central (DCC) para a biossecagem da BRSL.



Fonte: Autoria Própria.

4.3 SUPERFÍCIE DE RESPOSTA DAS TEMPERATURAS E GANHO DE TEMPERATURA

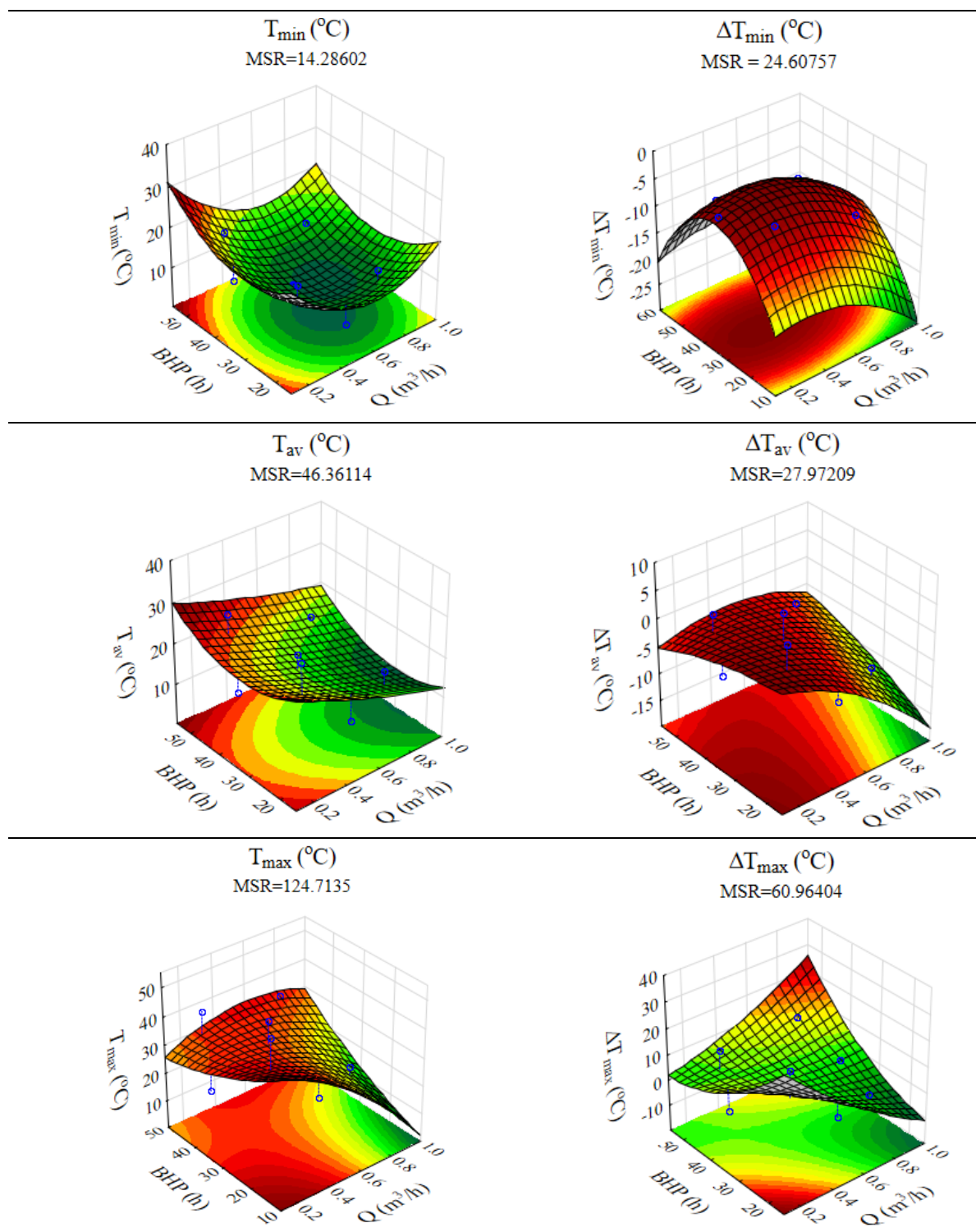
As superfícies de resposta geradas pelo modelo estatístico ajustado aos dados experimentais são apresentadas na Figura 8. Um dos principais objetivos da utilização do delineamento composto central (DCC) nos experimentos de biossecagem da BRSL foi identificar as condições operacionais ideais para promover a intensificação do processo. Como mencionado anteriormente, um dos maiores desafios do processo de biossecagem é compreender a relação entre o fluxo de ar de entrada e a queda de temperatura provocada por sua passagem através de um meio poroso úmido.

Além disso, processos de secagem convencionais são particularmente beneficiados pela homogeneização do leite, tanto em processos estáticos quanto contínuos [64,65,67,74,75,82]. Dessa forma, o uso de uma solução técnica já testada e reconhecida como eficiente em processos de secagem poderia indicar um caminho onde as variáveis do processo estudadas convergiriam para uma configuração operacional otimizada.

No entanto, no que se refere à obtenção de uma temperatura máxima de operação resultante da combinação entre vazão de ar e período de homogeneização do leite (BHP), nenhuma das configurações testadas se mostrou adequada, conforme evidenciado na Figura 8. Pelo contrário, as superfícies de resposta indicam pontos de temperatura mínima ao se utilizarem as condições experimentais propostas neste trabalho.

Uma das hipóteses para esse comportamento está relacionada tanto à queda natural de temperatura causada pela passagem do fluxo de ar pelo leite quanto à dificuldade de recuperação térmica do sistema após a homogeneização. Apesar de ser uma estratégia eficiente em processos de secagem convencionais, a homogeneização do leite parece desempenhar um papel prejudicial no processo de biossecagem, ao menos no que diz respeito ao desempenho térmico do sistema.

Figura 8 - Superfície de resposta para os resultados de temperatura mínima, média e máxima (T) e dos ganhos de temperatura (ΔT) provenientes do delineamento composto central (DCC) para a biossecagem da BRSL.



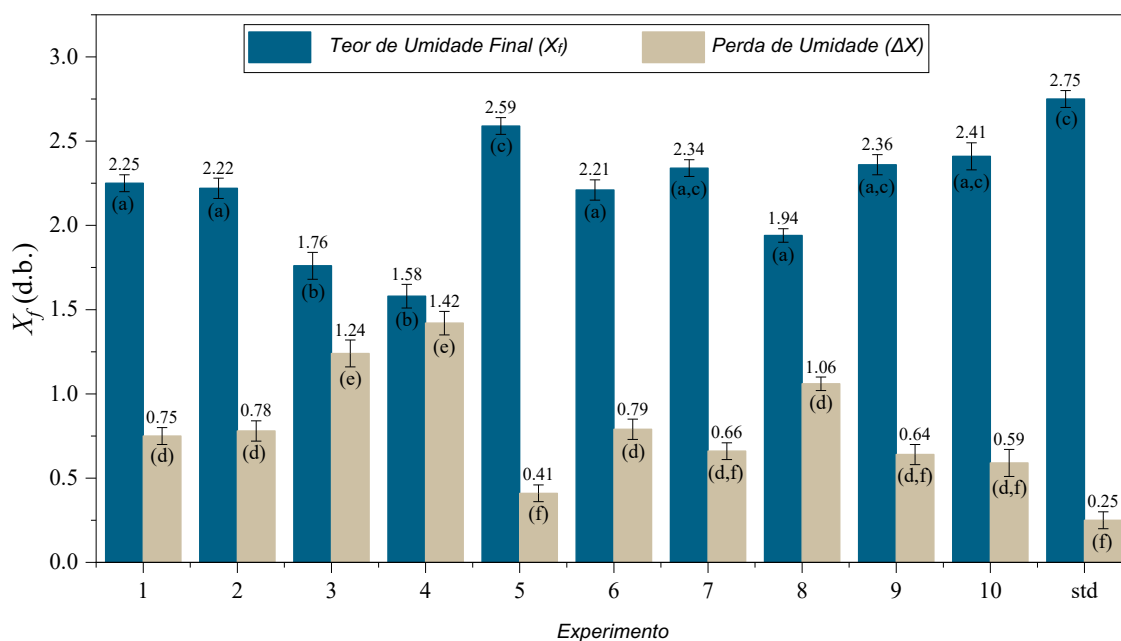
Fonte: Autoria Própria.

Por meio das superfícies de resposta, foi possível concluir que o sistema se comporta termicamente de forma mais adequada ao processo de biossecagem — seja em termos de temperaturas mínima, média e máxima, ou dos respectivos ganhos de temperatura — quando o período de homogeneização do leite (BHP) é mais longo ou ausente, e a vazão de ar é mais baixa.

4.4 CONTEÚDO FINAL DA MISTURA DA BIOSSECAGEM INTERMITENTE E PERDA DE MASSA

O teor de umidade final (X) e a perda de umidade ($\Delta X = X_0 - X_f$), onde X_0 é a umidade inicial de 3,0 (b.s.), para as diferentes configurações de biossecagem, são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Teor de umidade final (X_f) e perda de umidade (ΔX) do delineamento composto central (DCC) da biossecagem da BRSL, variando a vazão de ar e a homogeneização do leite.



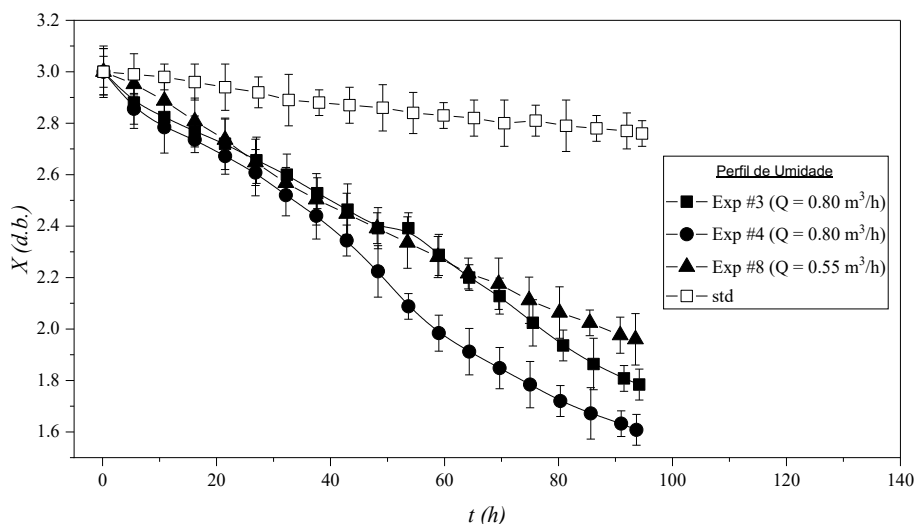
Fonte: Autoria Própria.

Como a vazão de ar é o principal mecanismo responsável pela remoção de água do sistema, espera-se que a maior perda de umidade esteja associada às maiores vazões de ar. Essa informação é corroborada pela análise da Figura 9, onde a maior perda de umidade — e, conseqüentemente, o menor teor de umidade final —

está associada aos experimentos #3 e #4, nos quais $Q = 0,80 \text{ m}^3/\text{h}$. No entanto, ao analisar o comportamento térmico dos experimentos #3 e #4, observa-se que não há elevação de temperatura que favoreça o processo de secagem, de modo que apenas os efeitos convectivos atuam diretamente na remoção de umidade do meio.

Para que ocorra um processo de biossecagem, é necessário que estejam presentes tanto os mecanismos de transporte térmico quanto de massa — condição atendida apenas no experimento #8. A secagem convectiva não térmica é conhecida por sua baixa eficiência [83], pois envolve apenas um dos dois mecanismos de transporte responsáveis pela remoção de água. Da mesma forma, a secagem apenas térmica também é ineficiente, uma vez que o aumento de temperatura por si só não garante a remoção de água do meio particulado. Isso pode ser observado no experimento #1, que apresentou o maior valor de temperatura máxima entre as configurações adotadas, mas apresentou uma redução de umidade inferior àquela observada nos experimentos #3 e #4. O perfil de umidade dos experimentos destacados no processo de biossecagem é apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Perfis de umidade durante o processo de biossecagem da BRSL nas configurações em que a remoção de água foi relevante (experimentos #3, #4, #8 e padrão – std).



Fonte: Autoria Própria.

Com um tempo total de operação de 96 horas, observou-se que a configuração utilizada no experimento #4 apresentou o menor teor de umidade final entre os experimentos destacados. Esse resultado é coerente com o fato de que maiores vazões de ar tendem a remover mais água, mesmo nos casos em que o perfil de

temperatura não se desenvolve de maneira efetiva. Considerando que o experimento #4 foi conduzido com vazão de ar de 0,80 m³/h e apresentou um ganho de temperatura máximo de 11°C, justifica-se seu melhor desempenho na remoção de umidade em comparação às demais configurações destacadas, que apresentaram ganhos térmicos inferiores. Por outro lado, a baixa remoção de umidade apresentada pela configuração padrão (std) é justificada pelo fato de não haver, em nenhum momento da operação, fluxo de ar percolando pelo sistema. Esse comportamento ressalta a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a complexa relação entre o fluxo de ar e o ganho de temperatura do sistema.

Comparando com dados disponíveis na literatura, a perda de umidade observada no experimento #4 apresenta valores promissores quanto ao potencial do processo de biossecagem para esse tipo de resíduo. Vázquez et al. [18] obtiveram um teor de umidade de 70% em base úmida, o que corresponde a aproximadamente 2,1 b.s., valor superior ao encontrado nos experimentos #3, #4 e #8. Os autores alcançaram um teor de umidade final de 15% (aproximadamente 0,45 b.s.) em 70 dias de operação. Já Maia et al. [3] atingiram um teor de umidade final de 1,58 b.s., equivalente a cerca de 53% de umidade, em apenas 48 horas. Os autores destacam que esse nível de remoção de umidade, quando combinado a um pré-tratamento de secagem, possui um grande impacto positivo na sustentabilidade do processo.

4.5 ANÁLISE DOS DIAGRAMAS DE PARETO E DAS SUPERFÍCIES DE RESPOSTA PARA A MISTURA FINAL

A análise estatística do comportamento da umidade final em função da vazão de ar e do período de homogeneização do leito (BHP) é apresentada na Figura 11, utilizando o gráfico de Pareto e a metodologia de superfície de resposta.

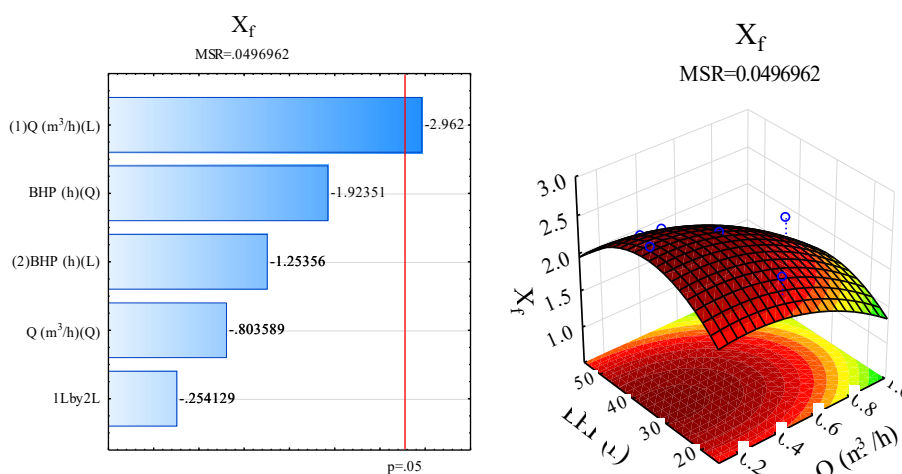
Observa-se que a vazão de ar é estatisticamente significativa como fator que influencia o teor de umidade final da biomassa. Esse resultado era esperado, considerando que a vazão de ar atua diretamente no aprimoramento do mecanismo de transporte de água do leito de biomassa para o ambiente externo do sistema. No entanto, ao não considerar a influência do BHP como estatisticamente significativa, pode-se concluir que, embora a homogeneização do leito promova uma melhor

distribuição de umidade, ela não contribui efetivamente para a remoção de água do sistema.

Estabelecida como uma etapa de intensificação capaz de promover tanto a distribuição da fase gasosa percolando pelo leito quanto a remoção de água ao favorecer os mecanismos de transporte, a homogeneização do leito, segundo a análise estatística, não contribui para a intensificação do processo. Esse resultado contraria o que seria esperado com base na análise de processos de secagem convectiva, nos quais a mobilidade do leito desempenha papel importante não apenas nos mecanismos de transferência de calor e massa, mas também na homogeneidade e na qualidade dos produtos finais obtidos nesses processos.

Contudo, sob o ponto de vista da biossecagem, a mobilidade do leito interfere na forma como os microrganismos presentes no sistema atuam, afetando a geração de calor e, muitas vezes, tornando o processo inviável [83].

Figura 11 – Pareto e superfície de resposta de umidade durante o processo de biossecagem da BRSL nas configurações em que a remoção de água foi relevante (experimentos #3, #4, #8 e padrão – std).



Fonte: Autoria Própria.

Devido ao seu baixo resíduo, a superfície de resposta gerada pelo modelo é confiável e fornece uma boa predição da resposta experimental. No entanto, a superfície não apresenta pontos de mínima umidade final, o que seria o objetivo desejado nesse caso. Apesar da ausência desses pontos, a superfície apresenta bom desempenho em altas vazões de ar, o que também é coerente com o comportamento esperado em processos de secagem puramente convectivos, sem considerar o efeito

térmico. O efeito negativo observado no termo (1) Q está em conformidade com o comportamento esperado desse parâmetro em processos de secagem. Assim, quanto maior o valor de Q, menor será o Xf.

4.6 ANÁLISE ELEMENTAR, TEOR DE CINZAS E HHV

Considerando que nem todas as configurações experimentais adotadas no presente estudo atingiram as condições necessárias para representar efetivamente um processo de biossecagem, foram selecionadas três operações para a análise do poder calorífico superior (HHV) após o processo: uma operação predominantemente térmica, representada pelo experimento #1; uma operação predominantemente convectiva, representada pelo experimento #4; e uma operação mista, com características de biossecagem, representada pelo experimento #8.

Além dessas configurações experimentais, foram realizadas análises elementares, determinação do teor de cinzas e cálculo do HHV também para a amostra de biomassa de laranja antes do processo de biossecagem. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise elementar, teor de cinzas e poder calorífico superior (HHV) da BRSL após a biossecagem.

<i>Amostra</i>	<i>C (%)</i>	<i>N (%)</i>	<i>H (%)</i>	<i>O (%)</i>	<i>Cinzas (%)</i>	<i>HHV (Mj/Kg)</i>
Exp #1	42,2±0,5 ^a	2,8±0,1 ^e	3,3±0,1 ^{g,h}	45,9±0,5 ^j	5,7±0,1 ⁿ	15,2±0,3 ^q
Exp #4	48,3±0,3 ^b	2,7±0,1 ^{e,f}	3,2±0,1 ^g	40,8±0,8 ^k	5,0±0,1 ^{o,p}	16,9±0,2 ^r
Exp #8	45,9±0,4 ^c	3,3±0,3 ^{e,f}	2,3±0,1 ⁱ	43,3±0,9 ^l	5,2±0,1 ^o	15,4±0,2 ^q
Fresco	49,1±0,5 ^b	3,4±0,1 ^f	3,7±0,1 ^h	38,9±0,9 ^k	5,0±0,1 ^p	17,5±0,3 ^s
Padrão	38,9±0,4 ^d	3,0±0,1 ^{e,f}	3,2±0,1 ^g	48,6±0,6 ^m	4,9±0,1 ^p	14,1±0,2 ^t

Fonte: Autoria Própria.

Como esperado, o experimento #1 apresentou uma perda de 2,3 MJ/kg no poder calorífico superior (HHV), indicando o consumo de matéria orgânica para a geração do calor necessário ao aquecimento do sistema. Em contraste, o experimento #4, que operou sob condições de secagem predominantemente convectiva, apresentou uma perda de apenas 0,6 MJ/kg no HHV. Já o experimento #8, que

apresentou condições típicas de biossecagem, registrou uma perda de HHV compatível com a do experimento #1.

A partir dessas observações, pode-se concluir que, mesmo nos casos em que ocorre consumo de matéria orgânica para geração de calor, o processo de biossecagem é capaz de manter o HHV do sistema suficientemente elevado para conservar seu potencial energético. Isso também pode indicar que os compostos lignocelulósicos presentes no resíduo mantêm sua integridade estrutural, possibilitando sua extração em etapas subsequentes de processamento.

Também é possível relacionar a perda de carbono durante o processo de biossecagem à produção de CO₂. Esse cálculo considera que toda a perda de carbono nas amostras foi convertida em CO₂, em decorrência da ação oxidativa das bactérias presentes no meio. Essa consideração é apropriada, uma vez que zonas com baixa aeração foram eliminadas pela homogeneização constante do leite. Tanto a produção de CO₂ quanto o consumo de oxigênio estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo de O₂ (O_{2c}), produção de CO₂ (CO_{2p}), teor de carbono final (C_f), teor de carbono inicial (C₀), porcentagem de carbono perdido (ΔC) e massa de carbono perdida (C_m) nos experimentos destacados de biossecagem da BRSL.

<i>Amostra</i>	<i>C_f (%)</i>	<i>C₀ (%)</i>	<i>ΔC (%)</i>	<i>C_m (kg)</i>	<i>O_{2c} (kg)</i>	<i>CO_{2p} (kg)</i>
Exp #1	42,2±0,5 ^a	49,1±0,5 ^e	6,9±0,9 ^f	0,087±0,01 ^j	0,231±0,03 ^k	0,318±0,04 ^l
Exp #4	48,3±0,3 ^b	49,1±0,5 ^e	0,8±0,8 ^g	0,010±0,01 ^j	0,028±0,03 ^k	0,037±0,04 ^l
Exp #8	45,9±0,4 ^c	49,1±0,5 ^e	3,2±0,8 ^h	0,041±0,01 ^j	0,108±0,03 ^k	0,149±0,04 ^l
Padrão	38,9±0,4 ^d	49,1±0,5 ^e	10,2±0,7 ⁱ	0,128±0,01 ^j	0,340±0,02 ^k	0,468±0,03 ^l

Fonte: Autoria Própria.

Conforme observado, o consumo de oxigênio e a consequente produção de CO₂ estão diretamente relacionados à atividade metabólica do sistema e contribuem para a liberação de calor pelos microrganismos, promovendo o aumento da temperatura. O experimento #1, que apresentou o maior consumo de oxigênio e produção de CO₂, também foi o que atingiu as temperaturas mais elevadas, enquanto o experimento #4 apresentou o comportamento oposto.

A manutenção da atividade microbiológica no leite de biomassa é essencial para que as condições de biossecagem sejam eficientes. A energia gerada pelos

microrganismos não apenas atua como compensação térmica para as perdas provocadas pelo resfriamento evaporativo, mas também contribui para um aumento real de temperatura que favorece a remoção de umidade do meio.

5 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a temperatura aumentou significativamente em algumas das configurações experimentais adotadas, com ganho térmico real em relação à temperatura ambiente e à perda de energia causada pelo resfriamento evaporativo. No entanto, não foi possível observar uma correlação entre as variáveis BHP (período de homogeneização do leite) e Q (vazão de ar) que otimizasse o comportamento térmico do meio. Também foi possível concluir que valores mais baixos de BHP tendem a afetar negativamente o comportamento térmico do sistema.

Em relação à remoção de água, foi possível concluir que valores elevados de Q favorecem a perda de umidade, mas não foi possível otimizar o sistema de forma a promover, simultaneamente, a maximização da temperatura e a remoção de umidade. Nos experimentos em que a atividade microbiológica foi capaz de gerar calor suficiente para aquecer o sistema, observou-se preservação do poder calorífico superior (HHV), produção de CO₂ e consumo de O₂.

Por fim, embora a homogeneização do leite seja uma estratégia reconhecidamente eficaz em processos de secagem convencionais, nas condições adotadas neste estudo, essa técnica não deve ser utilizada, pois pode comprometer o processo de biossecagem ao favorecer perdas térmicas e dificultar a manutenção das condições aeróbias ideais. No entanto, o desenvolvimento tecnológico de alternativas que permitam a mobilidade do leite faz parte de um esforço importante para a intensificação do processo, visando sua implementação em modo de operação contínua, e deve ser estudado em configurações diferentes das estabelecidas neste trabalho. Para estudos futuros, recomenda-se a investigação de métodos de inoculação controlada de microrganismos no bagaço de laranja, com o objetivo de padronizar sua atividade biológica e reduzir a variabilidade entre os ensaios — uma das principais limitações identificadas neste estudo. A inoculação poderia contribuir para a criação de um substrato mais uniforme em termos de reatividade e potencial de geração de calor, viabilizando análises comparativas mais consistentes e favorecendo a reprodutibilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS

- [1] JIMÉNEZ-CASTRO, M. P.; BULLER, L. S.; SGANZERLA, W. G.; FORSTER-CARNEIRO, T. Bioenergy production from orange industrial waste: a case study. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.2128>.
- [2] CYPRIANO, D. Z.; SILVA, L. L. da; TASIC, L. High value-added products from the orange juice industry waste. **Waste Management**, v. 79, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.028>.
- [3] MAIA, G. D. et al. From the conventional to the intermittent biodrying of orange solid waste biomass. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 188, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109361>.
- [4] BARBOSA, A. M. et al. Alternative drying of orange bagasse in vibrofluidized bed for use in combustion. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, v. 152, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107941>.
- [5] PERAZZINI, H. et al. Modeling and cost analysis of drying of citrus residues as biomass in rotary dryer for bioenergy. **Renewable Energy**, v. 175, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.144>.
- [6] PINHEIRO, C. L.; TARANTO, O. P.; TOMAZ, E. Study of volatile organic compounds (VOCs) emitted by orange bagasse drying process. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 114, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.11.013>.
- [7] SÁNCHEZ-SÁENZ, C. M. et al. Mathematical modeling of the drying of orange bagasse associating the convective method and infrared radiation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1178-1184>.

- [8] PHUON, V. et al. Assessment of the impact of drying processes on orange peel quality characteristics. **Journal of Food Process Engineering**, v. 45, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13794>.
- [9] DENG, L. Z. et al. Hot air impingement drying kinetics and quality attributes of orange peel. **Journal of Food Process Preservation**, v. 44, 2020. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14294>.
- [10] ADANI, F.; TAMBONE, F.; GOTTI, A. Biostabilization of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 24, p. 775–783, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.03.007>.
- [11] SUGNI, M.; CALCATERRA, E.; ADANI, F. Biostabilization-biodrying of municipal solid waste by inverting air-flow. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 1331–1337, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.11.016>.
- [12] REIS, R. F. dos et al. The biodrying process of sewage sludge – a review. **Drying Technology**, v. 38, p. 1247–1260, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1629689>.
- [13] ZAWADZKA, A. et al. Biodrying of organic fraction of municipal solid wastes. **Drying Technology**, v. 28, p. 1220–1226, 2010. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.483034>.
- [14] BILGIN, M.; TULUN, Ş. Biodrying for municipal solid waste: Volume and weight reduction. **Environmental Technology**, v. 36, p. 1691–1697, 2015. <https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1006262>.
- [15] ZAWADZKA, A.; KRZYSZEK, L.; LEDAKOWICZ, S. Autothermal biodrying of municipal solid waste with high moisture content. **Chemical Papers**, v. 64, p. 265–268, 2010. <https://doi.org/10.2478/s11696-009-0118-3>.

- [16] NAVAE-ARDEH, S.; BERTRAND, F.; STUART, P. R. Emerging biodrying technology for the drying of pulp and paper mixed sludges. **Drying Technology**, v. 24, p. 863–878, 2006. <https://doi.org/10.1080/07373930600734026>.
- [17] ADANI, F. et al. The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 173–179, 2002.
- [18] VÁZQUEZ, T. D. D. et al. Management of orange (*Citrus sinensis*) wastes from agroindustrial activities using sustainable biodrying and composting processes. 2017.
- [19] 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.004>.
- [20] VELIS, C. A. et al. Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 2747–2761, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.026>.
- [21] WRIGHT, P. Biodrying Manure on a Dairy Farm. Animal Residuals Management Conference, Water Environment Federation, Kansas City, 2000.
- [22] SILVA, D. I. S. et al. Heat and mass transfer of fruit residues in a fixed bed dryer: Modeling and product quality. **Drying Technology**, v. 37, p. 1321–1327, 2019. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1498509>.
- [23] WANG, Z. H.; CHEN, G. Heat and mass transfer in fixed-bed drying. **Chemical Engineering Science**, v. 54, p. 4233–4243, 1999.
- [24] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Brazilian Energy Balance: year 2015.

Rio de Janeiro: EPE, 2016. 292 p. Disponível em:

https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf.

[25] VAKKILAINEN, E.; KUPARINEN, K. Large industrial users of energy biomass. 2013. 55 p.

[26] BACELOS, M. S.; JESUS, C. D. F.; FREIRE, J. T. Modelling and drying of carton packaging waste in a rotary dryer. *Drying Technology*, v. 27, p. 927–937, 2009.

[27] SEABRA, J. E. A. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil. 2008. 274 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

[28] SILVA, W. R. et al. Management of de-oiled coffee beans biomass through pyrolysis process: Towards a circular bioeconomy. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 168, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105763>.

[29] PENG, F.; PENG, P.; XU, F.; SUN, R. C. Fractional purification and bioconversion of hemicelluloses. *Biotechnol Adv*, v. 30, p. 879–903, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.018>.

[30] SILVA, C. M. S. da et al. Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2426–2432, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.095>.

[31] ACHARYA, B.; DUTTA, A.; MINARET, J. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. *Sustain Energy Technol Assess*, v. 12, p. 26–37, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.08.003>.

[32] AGÇAM, E.; AKYILDYS, A. A Study on the Quality Criteria of Some Mandarin

Varieties and Their Suitability for Juice Processing. *Journal of Food Processing*, 2014.

[33] SAINI, S. et al. Valorization of rice straw biomass for co-production of bioethanol, biopesticide and biofertilizer following an eco-friendly biorefinery process. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 173, p. 823-836, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.044>.

[34] CARVALHO, M. S. L.; SILVA, M. G. C. Infectious hospital waste: evaluation of a tray dryer for volume and microbiological load reduction. *Drying Technology*, v. 24, p. 517–522, 2006.

[35] PERAZZINI, H. et al. Drying Kinetics prediction of solid waste using semi-empirical and artificial neural network models. *Chemical Engineering and Technology*, v. 36, p. 1193–1201, 2013.

[36] PERAZZINI, H. et al. Prediction of residence time distribution of solid wastes in a rotary dryer. *Drying Technology*, v. 32, p. 428–436, 2014.

[37] WANG, W.; CHEN, G.; MUJUMDAR, A. S. Physical interpretation of solids drying: an overview on mathematical modeling research. *Drying Technology*, v. 25, p. 659–668, 2007.

[38] BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

[39] McCORMICK, P. Y. Solids drying fundamentals. In: PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Chemical Engineering Handbook*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1983. sec. 20-4.

[40] MUJUMDAR, A. S. Principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). *Handbook of Industrial Drying*. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 3–29.

- [41] DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A. S. Indirect Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). Handbook of Industrial Drying. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 127–137.
- [42] PINACHO, P. A. et al. Study of drying systems for the utilization of biodegradable municipal solids waste as animal feed. Waste Management, v. 26, p. 495–503, 2005.
- [43] ZABANIOTOU, A. A. Simulation of forestry biomass drying in a rotary dryer. Drying Technology, v. 18, p. 1415–1431, 2000.
- [44] SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of foodstuffs. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). Handbook of Industrial Drying. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 521–544.
- [45] PANG, S.; XU, Q. Drying of woody biomass for bioenergy using packed moving bed dryer: Mathematical modeling and optimization. Drying Technology, v. 28, p. 702–709, 2010.
- [46] MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. Spouted Beds. 1. ed. New York: Academic Press, 1974.
- [47] FREIRE, J. T. et al. Drying of Solutions, Slurries, and Pastes. In: EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. (ed.). Spouted and Spout-Fluid Beds. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. p. 206–221.
- [48] SILVA, V. M. Study of drying in a fixed bed and in a spouted bed dryer of industrial wastes of citrus plant. 2007. Dissertação (Mestrado) – Unicamp, Campinas,

2007.

[49] AMOS, W. A. Report on biomass drying technology. Colorado: NREL, 1988.

[50] MARCUS, R. D. et al. Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach. 1. ed. Powder Technology Series. Edmondsbury Press, 2009.

[51] SOSA-ARNAO, J. H. et al. Sugar cane bagasse drying – a review. In: International Drying Symposium (IDS 2004), São Paulo, Brasil. Proceedings. 2004. p. 990–997.

[53] LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Fluidized bed dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). Handbook of Industrial Drying. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. p. 161–189.

[53] MORENO, R. et al. Drying characteristics of forest biomass particles of pinus radiata. Biosystems Engineering, v. 88, p. 105–115, 2004.

[54] JIMÉNEZ-CASTRO, M. P. et al. Bioenergy production from orange industrial waste: a case study. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, v. 14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.2128>. Acesso em: 18 maio 2025.

[55] JEWELL, W. J.; CUMMINGS, R. J. Apple Pomace Energy and Solids Recovery. *Journal of Food Science*, v. 49, p. 407–410, 1984.

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

[57] RADA, E. C. et al. Lower heating value dynamics during municipal solid waste bio-drying. *Environmental Technology*, v. 28, p. 463–469, 2007.

<https://doi.org/10.1080/09593332808618807>.

[58] RADA, E. C. et al. Bio-drying role in changeable scenarios of Romanian MSW management. **Waste Biomass Valorization**, v. 1, p. 271–279, 2010.

<https://doi.org/10.1007/s12649-010-9023-9>.

[59] RAGAZZI, M. et al. Bio-drying of Romanian municipal solid waste: An analysis of its viability. 2009. <https://www.researchgate.net/publication/235425774>.

[60] CAI, L. et al. Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying. **Bioresource Technology**, v. 117, p. 13–19, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.092>.

[61] GONZÁLEZ, D. et al. Filling in sewage sludge biodrying gaps: Greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions. **Bioresource Technology**, v. 291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121857>.

[62] HUILIÑIR, 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. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.046>.

[63] LI, Q. et al. Sewage sludge drying method combining pressurized electro-osmotic dewatering with subsequent bio-drying. **Bioresource Technology**, v. 263, p. 94–102, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.110>.

[64] VAN ENGELAND, C. et al. Comprehensive analysis of intermittent drying. A theoretical approach. **Food and Bioproducts Processing**, v. 131, p. 86–101, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.10.009>.

[65] CHIN, S. K.; LAW, C. L. Product quality and drying characteristics of intermittent heat pump drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. **Drying Technology**, v. 28, p. 1457–

1465, 2010. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.482707>.

[66] CHUA, K. J. et al. Cyclic air temperature drying of guava pieces: Effects on moisture and ascorbic acid contents. **Food and Bioproducts Processing**, v. 78, p. 72–78, 2000. <https://doi.org/10.1205/096030800532761>.

[67] CHUA, K. J. et al. On the study of time-varying temperature drying – Effect on drying kinetics and product quality. **Drying Technology**, v. 20, p. 1559–1577, 2002. <https://doi.org/10.1081/DRT-120014052>.

[68] HO, J. C. et al. Analytical study of cyclic temperature drying: effect on drying kinetics and product quality. **Journal of Food Engineering**, v. 51, p. 65–75, 2002. www.elsevier.com/locate/jfoodeng.

[69] AHRNÉ, L. M. et al. Microwave convective drying of plant foods at constant and variable microwave power. **Drying Technology**, v. 25, p. 1149–1153, 2007. <https://doi.org/10.1080/07373930701438436>.

[70] 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, p. 304–311, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.08.009>.

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

[72] ESTURK, O. et al. Drying of sage (*Salvia officinalis* L.) inflorescences by intermittent and continuous microwave-convective air combination. **Research on Crops**, v. 12, p. 607–615, 2011. <https://www.researchgate.net/publication/260310083>.

[73] SOYSAL, Y. et al. Intermittent microwave-convective drying of red pepper:

Drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. **Biosystems Engineering**, v. 103, p. 455–463, 2009.

<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.05.010>.

[74] 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, p. 103–110, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.018>.

[75] KUMAR, C.; KARIM, M. A.; JOARDDER, M. U. H. Intermittent drying of food products: A critical review. **Journal of Food Engineering**, v. 121, p. 48–57, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>.

[76] VAN HEERDEN, I. et al. Microbial, chemical and physical aspects of citrus waste composting. **Bioresource Technology**, v. 81, p. 71–76, 2002.

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

[78] MARSHALL, M. R. Ash Analysis. In: NIELSEN, S. S. (ed.). **Food Analysis**. 4. ed. Springer, 2010. p. 105–115. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1478-1_7.

[79] YIN, C.-Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, v. 90, p. 1128–1132, 2011.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.031>.

[80] FARIA, L. F. F. et al. Influence of Oxygen Availability on Cell Growth and Xylitol Production by **Candida guilliermondii**. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 458, p. 449, 2002.

[81] CARVALHO, W. et al. Xylitol production from sugarcane bagasse hydrolysate:

Metabolic behaviour of *Candida guilliermondii* cells entrapped in Ca-alginate. *Biochemical Engineering Journal*, v. 25, p. 25–31, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.03.006>.

[82] YI, J. et al. Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review. *Drying Technology*, v. 38, p. 2039–2054, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1628772>.

[83] KUDRA, T. Energy Performance of Convective Dryers. *Drying Technology*, v. 30, p. 1190–1198, 2012. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.690803>.

APÊNDICE A – Quadros de dados experimentais

Quadro A1. Dados experimentais sobre o comportamento térmico do leite

Exp 1		Exp 2		Exp 3		Exp 4		Exp 5		Exp 6		Exp 7		Exp 8		Exp 9		Exp 10	
t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)	t (h)	T (°C)
0.17	21.15	0.17	29.11	0.17	22.53	0.17	29.24	0.17	22.39	0.17	21.24	0.17	22.53	0.17	30.52	0.17	25.90	0.17	23.19
1.50	21.15	1.50	27.59	1.50	20.62	1.50	24.49	1.50	21.99	1.50	17.64	1.50	21.38	1.50	27.28	1.50	23.86	1.50	21.99
2.83	20.75	2.83	25.51	2.83	18.08	2.83	19.55	2.83	21.02	2.83	14.13	2.83	19.15	2.83	24.04	2.83	20.84	2.83	19.60
4.17	20.53	4.16	23.95	4.17	16.13	4.17	16.67	4.16	20.09	4.16	11.82	4.16	17.69	4.16	22.30	4.17	18.75	4.16	17.60
6.83	20.53	6.83	21.64	6.83	14.22	6.83	14.17	6.83	18.70	6.83	10.20	6.83	15.46	6.83	20.98	6.83	17.11	6.83	14.79
8.16	20.71	8.16	21.02	8.16	13.82	8.17	13.38	8.17	18.39	8.17	10.15	8.17	14.84	8.17	20.62	8.16	17.07	8.17	14.13
9.50	21.07	9.50	20.53	9.50	13.69	9.50	13.02	9.50	18.04	9.50	10.07	9.50	14.26	9.50	20.75	9.50	17.16	9.50	13.47
10.83	22.17	10.83	19.95	10.83	13.20	10.84	12.71	10.83	17.60	10.83	9.62	10.83	13.73	10.83	21.02	10.83	18.08	10.83	12.93
13.50	27.86	13.50	19.24	13.50	12.71	13.50	12.27	13.50	17.02	13.50	9.18	13.50	13.20	13.50	21.73	13.50	20.75	13.50	12.35
14.83	31.28	14.83	19.06	14.83	12.71	14.83	12.22	14.84	16.67	14.83	9.48	14.84	13.16	14.83	22.48	14.83	21.86	14.83	12.13
16.17	33.24	16.17	19.02	16.17	12.49	16.17	12.09	16.17	16.62	16.17	8.96	16.17	13.11	16.17	22.97	16.17	22.97	16.17	11.82
17.50	36.30	17.50	18.84	17.50	12.40	17.50	12.13	17.50	16.62	17.50	8.89	17.50	12.93	17.50	23.73	17.50	24.44	17.50	11.86
20.17	43.99	20.17	19.06	20.17	12.18	20.17	12.31	20.17	16.80	20.17	9.50	20.16	12.71	20.17	25.42	20.17	28.80	20.17	12.13
21.50	44.88	21.50	19.11	21.50	12.22	21.50	12.35	21.50	17.07	21.50	10.07	21.50	12.27	21.50	26.39	21.50	31.15	21.50	12.35
22.84	44.48	22.84	19.55	22.84	12.27	22.83	12.67	22.84	17.16	22.83	10.72	22.83	12.09	22.84	27.55	22.84	32.80	22.83	12.53
24.67	43.50	24.17	20.00	24.33	12.71	24.17	13.11	24.17	17.38	24.17	10.58	24.17	11.86	24.17	28.57	24.17	34.21	24.17	12.44
27.33	42.39	26.84	21.02	27.00	13.60	26.84	13.69	26.83	17.60	26.84	9.82	26.83	11.51	26.83	29.86	26.84	36.66	26.84	12.71
28.67	42.97	28.17	21.51	28.33	13.60	28.17	14.17	28.17	17.64	28.17	9.39	28.17	11.29	28.17	30.17	28.17	37.68	28.17	12.76
30.00	43.06	29.50	21.95	29.66	13.47	29.50	14.71	29.50	17.64	29.50	9.37	29.50	11.29	29.50	29.86	29.50	38.12	29.50	12.71
31.33	42.03	30.84	22.30	31.00	13.25	30.83	15.24	30.84	17.73	30.84	9.16	30.84	11.20	30.84	29.33	30.84	37.63	30.84	12.58
34.00	37.33	33.51	23.46	33.67	13.11	33.51	16.67	33.51	17.60	33.51	9.22	33.50	10.84	33.51	27.91	33.50	35.24	33.50	12.22
35.34	35.01	34.84	24.44	35.00	12.71	34.84	17.73	34.84	17.38	34.84	8.55	34.84	10.80	34.84	26.97	34.84	33.68	34.84	12.00
36.67	32.93	36.17	25.46	36.33	12.84	36.17	19.06	36.17	17.02	36.67	8.84	36.17	10.80	36.17	26.03	36.17	31.68	36.17	12.00
38.00	31.28	37.50	26.88	37.67	12.31	37.50	20.00	37.50	16.81	38.00	9.19	38.67	11.24	37.51	25.15	37.50	30.26	37.50	11.73
40.67	29.81	40.17	29.81	40.34	12.22	40.17	22.39	40.16	16.58	40.67	8.82	41.33	11.29	40.17	23.46	40.17	24.93	40.16	11.24
42.00	29.81	41.51	31.28	41.67	12.13	41.51	23.46	41.50	16.35	42.00	9.61	42.67	11.24	41.51	22.75	41.50	23.46	41.50	11.29
43.34	30.30	42.84	32.71	43.00	12.18	42.84	24.44	42.83	16.53	43.33	9.17	44.00	11.24	42.84	22.30	42.83	22.04	42.83	11.29

44.67	31.73	44.17	33.94	44.34	12.27	44.17	25.64	44.17	16.62	44.67	8.79	45.33	11.24	44.17	21.99	44.16	21.33	44.17	11.42
47.34	35.19	46.84	36.22	47.00	12.76	46.84	27.86	46.83	16.62	47.33	9.68	48.00	11.33	46.84	21.47	46.83	19.82	46.83	11.69
49.16	35.19	48.50	36.22	48.33	15.37	48.33	27.86	48.17	16.62	48.67	10.52	49.33	11.24	48.17	21.38	48.17	19.06	48.17	11.82
50.50	35.19	49.83	37.37	49.66	15.69	49.66	27.86	49.50	16.62	50.00	10.59	50.67	11.20	49.51	21.02	49.50	18.26	49.50	11.73
51.83	33.15	51.17	37.63	51.00	16.13	51.00	27.86	50.83	16.62	51.34	10.12	52.00	11.02	50.84	20.93	50.83	17.64	50.83	11.86
54.50	29.33	53.83	37.94	53.67	16.84	53.66	29.29	53.50	16.49	54.00	9.45	54.67	10.84	53.50	21.02	53.50	16.13	53.50	11.42
55.83	27.37	55.17	37.76	55.00	17.02	55.00	28.53	54.83	16.26	55.34	9.04	56.00	11.11	54.83	20.13	54.84	15.60	54.83	11.33
57.17	25.90	56.50	37.63	56.33	17.56	56.33	27.73	56.17	16.13	56.67	9.05	57.34	10.75	56.17	19.55	56.17	14.66	56.17	11.24
58.50	24.44	57.83	37.50	57.67	17.86	57.67	26.39	57.50	16.13	58.00	9.27	58.66	10.75	57.50	18.66	57.50	14.08	57.50	11.11
61.17	22.44	60.50	36.66	60.34	18.44	60.33	23.24	60.17	15.77	60.67	9.08	61.33	10.39	60.17	17.82	60.17	12.89	60.17	10.75
62.50	21.64	61.83	35.68	61.67	18.57	61.67	21.95	61.50	15.64	62.00	9.89	62.66	10.31	61.50	17.16	61.50	12.35	61.50	10.57
63.84	20.98	63.17	35.10	63.00	18.57	63.00	20.53	62.84	15.69	63.34	9.11	64.00	10.35	62.83	16.89	62.84	12.13	62.84	10.62
65.17	20.26	64.50	33.81	64.34	18.62	64.34	19.55	64.17	15.64	64.67	9.35	65.33	10.31	64.17	16.62	64.17	12.09	64.17	10.62
67.84	19.51	67.17	31.90	67.00	18.57	67.00	17.60	66.84	15.73	67.34	10.06	68.33	10.39	66.83	16.53	66.84	11.95	66.84	10.48
69.17	19.06	68.50	31.28	68.34	18.57	68.33	16.84	68.17	15.82	68.67	10.19	69.67	10.62	68.16	16.49	68.17	11.82	68.17	10.71
70.50	19.06	69.84	30.35	69.67	18.57	69.67	16.35	69.50	16.04	70.00	10.27	71.17	10.48	69.50	16.58	69.50	12.00	69.50	10.75
71.84	19.06	71.17	29.81	71.00	18.57	71.00	16.00	70.84	16.09	71.34	10.22	72.50	10.48	70.83	16.62	70.84	12.22	70.84	10.84
74.67	19.64	73.84	28.84	74.17	21.51	73.67	15.64	73.83	16.18	74.50	10.02	76.33	10.39	73.50	16.93	73.50	13.20	74.50	11.64
76.00	19.55	75.17	28.35	75.50	20.98	75.00	15.37	75.17	16.13	75.83	9.98	77.66	10.39	74.84	16.80	74.83	12.89	75.83	11.46
77.33	19.55	76.50	27.86	76.83	20.53	76.34	15.15	76.50	16.22	77.17	10.12	79.00	10.17	76.17	16.80	76.16	12.62	77.17	11.33
78.67	19.51	77.83	27.28	78.16	20.26	77.67	14.79	77.83	16.18	78.50	9.99	80.33	9.82	77.50	16.71	77.50	12.13	78.50	11.24
81.33	19.15	80.50	26.03	80.83	19.55	80.34	14.62	80.50	16.04	81.17	9.44	83.00	9.78	80.17	16.58	80.17	11.37	81.17	11.02
82.67	19.06	81.84	25.60	82.17	18.97	81.67	14.13	81.83	16.09	82.50	9.22	84.33	9.78	81.50	16.18	81.50	11.11	82.50	10.88
84.00	19.06	83.17	25.02	83.50	18.30	83.00	13.78	83.16	15.91	83.84	8.92	85.67	9.78	82.84	16.18	82.84	10.88	83.84	10.80
85.34	18.93	84.51	24.53	84.83	17.82	84.34	13.47	84.50	15.77	85.17	8.63	87.00	9.78	84.17	16.04	84.17	10.71	85.17	10.75
88.00	18.62	87.17	23.59	87.50	16.67	87.00	12.76	87.17	15.69	87.83	8.36	89.67	9.78	86.83	15.64	86.83	10.31	87.83	10.48
89.33	18.57	88.51	23.46	88.84	16.26	88.34	12.71	88.50	15.82	89.17	8.37	91.00	9.56	88.17	15.55	88.17	10.44	89.17	10.39
90.67	18.13	89.84	22.97	90.17	15.73	89.67	12.27	89.84	15.73	90.50	8.76	92.34	9.60	89.50	15.20	89.50	10.35	90.50	10.66
92.00	18.04	91.17	22.97	91.50	15.33	91.01	12.27	91.17	15.86	91.84	9.14	93.67	10.04	90.84	15.33	90.83	10.35	91.84	10.66
94.67	17.78	93.84	22.93	94.17	15.06	93.67	12.53	93.84	16.13	94.50	9.22	93.67	10.04	93.51	15.69	93.50	10.75	94.50	11.15
96.00	18.08	95.17	22.97	95.50	15.11	95.01	12.71	93.84	16.13	95.84	10.37	93.67	10.04	94.84	15.91	93.50	10.75	94.50	11.15

Quadro A2. Dados experimentais sobre o ganho de temperatura do leite

Exp 1		Exp 2		Exp3		Exp 4		Exp 5		Exp 6		Exp 7		Exp 8		Exp 9		Exp 10	
t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)	t (h)	ΔT (°C)
0.17	-0.55	0.17	4.31	0.17	-1.58	0.17	6.64	0.17	1.09	0.17	1.54	0.17	1.73	0.17	6.02	0.17	5.70	0.17	2.99
1.50	-2.75	1.50	1.59	1.50	-3.18	1.50	2.19	1.50	0.89	1.50	-1.66	1.50	0.98	1.50	0.98	1.50	4.16	1.50	2.19
2.83	-3.35	2.83	-0.49	2.83	-5.62	2.83	-2.45	2.83	0.12	2.83	-4.87	2.83	-1.05	2.83	-2.16	2.83	1.34	2.83	-0.01
4.17	-3.47	4.16	-2.05	4.17	-7.37	4.17	-5.14	4.16	-0.52	4.16	-6.88	4.16	-2.31	4.16	-3.70	4.17	-0.45	4.16	-1.80
5.50	-3.37	5.50	-3.10	5.50	-8.28	5.50	-6.60	5.50	-0.90	5.50	-7.71	5.50	-3.21	5.50	-4.19	5.50	-1.26	5.50	-3.16
6.83	-3.27	6.83	-3.96	6.83	-8.79	6.83	-7.33	6.83	-1.50	6.83	-8.00	6.83	-4.04	6.83	-4.43	6.83	-1.59	6.83	-4.11
8.16	-2.89	8.16	-4.38	8.16	-8.88	8.17	-7.92	8.17	-1.61	8.17	-7.75	8.17	-4.46	8.17	-4.48	8.16	-1.34	8.17	-4.57
9.50	-2.34	9.50	-4.67	9.50	-8.71	9.50	-8.18	9.50	-1.76	9.50	-7.53	9.50	-4.84	9.50	-4.05	9.50	-0.85	9.50	-4.93
10.83	-1.03	10.83	-5.05	10.83	-8.80	10.84	-8.39	10.83	-2.00	10.83	-7.78	10.83	-5.17	10.83	-3.58	10.83	0.38	10.83	-5.27
12.17	1.10	12.17	-5.25	12.17	-8.77	12.17	-8.34	12.17	-2.35	12.17	-7.95	12.17	-5.24	12.17	-3.07	12.17	1.95	12.17	-5.39
13.50	5.26	13.50	-5.26	13.50	-8.69	13.50	-8.64	13.50	-2.58	13.50	-8.32	13.50	-5.80	13.50	-2.37	13.50	3.15	13.50	-5.95
14.83	8.88	14.83	-5.34	14.83	-8.39	14.83	-8.58	14.84	-3.24	14.83	-8.42	14.84	-6.15	14.83	-1.62	14.83	3.76	14.83	-6.67
16.17	10.84	16.17	-5.59	16.17	-8.31	16.17	-8.71	16.17	-3.78	16.17	-9.34	16.17	-6.39	16.17	-1.33	16.17	4.37	16.17	-7.48
17.50	13.80	17.50	-6.36	17.50	-8.30	17.50	-8.87	17.50	-4.28	17.50	-9.91	17.50	-6.67	17.50	-1.07	17.50	5.24	17.50	-7.94
18.84	18.26	18.84	-6.76	18.83	-8.78	18.83	-8.95	18.84	-4.74	18.84	-9.85	18.84	-6.90	18.84	-0.76	18.83	6.68	18.83	-8.37
20.17	20.69	20.17	-7.34	20.17	-9.33	20.17	-9.39	20.17	-5.00	20.17	-10.10	20.16	-6.89	20.17	0.02	20.17	8.50	20.17	-8.17
21.50	21.28	21.50	-8.00	21.50	-9.88	21.50	-9.65	21.50	-4.84	21.50	-9.63	21.50	-7.24	21.50	0.49	21.50	10.65	21.50	-8.05
22.84	20.48	22.84	-7.95	22.84	-10.34	22.83	-9.44	22.84	-4.65	22.83	-8.88	22.83	-7.31	22.84	1.35	22.84	12.40	22.83	-7.87
24.67	19.10	24.17	-7.81	24.33	-9.59	24.17	-8.99	24.17	-4.32	24.17	-8.82	24.17	-7.34	24.17	2.27	24.17	13.91	24.17	-7.76
26.00	18.03	25.50	-6.87	25.66	-9.69	25.50	-8.59	25.50	-3.90	25.50	-9.77	25.50	-7.37	25.50	3.03	25.50	15.54	25.50	-7.44
27.33	18.09	26.84	-6.08	27.00	-9.70	26.84	-8.41	26.83	-3.70	26.84	-9.18	26.83	-7.39	26.83	3.56	26.84	16.76	26.84	-7.09
28.67	18.97	28.17	-5.39	28.33	-9.60	28.17	-7.83	28.17	-3.46	28.17	-9.31	28.17	-7.52	28.17	4.07	28.17	18.18	28.17	-6.85
30.00	19.26	29.50	-4.65	29.66	-9.53	29.50	-7.20	29.50	-3.16	29.50	-9.03	29.50	-7.42	29.50	4.16	29.50	18.92	29.50	-6.59
31.33	18.53	30.84	-4.00	31.00	-9.46	30.83	-6.56	30.84	-2.87	30.84	-8.94	30.84	-7.51	30.84	3.93	30.84	18.83	30.84	-6.42
32.67	16.48	32.17	-3.02	32.33	-9.20	32.17	-5.70	32.17	-2.76	32.17	-8.16	32.17	-7.57	32.17	3.64	32.17	18.26	32.17	-6.26
34.00	14.43	33.51	-2.14	33.67	-8.99	33.51	-4.94	33.51	-2.50	33.51	-8.28	33.50	-7.66	33.51	3.11	33.50	17.24	33.50	-6.18
35.34	12.51	34.84	-0.86	35.00	-9.09	34.84	-3.67	34.84	-2.52	34.84	-8.65	34.84	-7.71	34.84	2.37	34.84	16.18	34.84	-6.10
36.67	10.73	36.17	0.46	36.33	-8.66	36.17	-2.14	36.17	-2.78	36.67	-8.26	36.17	-7.71	36.17	1.83	36.17	14.48	36.17	-6.20
38.00	9.38	37.50	2.08	37.67	-8.89	37.50	-1.01	37.50	-3.59	38.00	-8.01	38.67	-7.26	37.51	1.15	37.50	12.76	37.50	-6.47
39.33	8.70	38.84	3.75	39.00	-8.69	38.84	0.39	38.83	-4.08	39.33	-9.08	40.00	-7.36	38.84	0.45	38.83	9.24	38.83	-7.19

40.67	8.31	40.17	5.01	40.34	-8.48	40.17	1.49	40.16	-4.73	40.67	-9.28	41.33	-7.42	40.17	-0.54	40.17	6.43	40.16	-7.96
42.00	8.11	41.51	6.08	41.67	-8.67	41.51	2.36	41.50	-5.35	42.00	-8.99	42.67	-7.56	41.51	-1.65	41.50	4.26	41.50	-8.42
43.34	8.20	42.84	6.91	43.00	-9.03	42.84	3.04	42.83	-5.57	43.33	-9.93	44.00	-7.86	42.84	-2.60	42.83	2.34	42.83	-8.92
44.67	9.13	44.17	7.44	44.34	-9.44	44.17	3.74	44.17	-5.48	44.67	-10.71	45.33	-7.86	44.17	-3.41	44.16	1.23	44.17	-9.08
46.00	10.49	45.51	8.05	45.67	-9.72	45.51	4.68	45.50	-5.38	46.00	-10.32	46.67	-7.62	45.50	-4.39	45.50	0.33	45.50	-8.86
47.34	11.49	46.84	8.72	47.00	-10.15	46.84	5.26	46.83	-5.28	47.33	-9.82	48.00	-7.57	46.84	-4.74	46.83	-0.38	46.83	-8.72
49.16	11.29	48.50	10.43	48.33	-8.43	48.33	8.67	48.17	-4.98	48.67	-8.78	49.33	-7.56	48.17	-5.02	48.17	-0.94	48.17	-8.48
50.50	11.19	49.83	9.77	49.66	-8.12	49.66	7.99	49.50	-4.78	50.00	-8.61	50.67	-7.41	49.51	-5.08	49.50	-1.54	49.50	-8.27
51.83	9.15	51.17	10.03	51.00	-7.67	51.00	7.70	50.83	-4.48	51.34	-8.78	52.00	-7.48	50.84	-4.97	50.83	-1.96	50.83	-7.94
53.17	7.48	52.50	10.13	52.33	-7.17	52.33	7.29	52.17	-4.18	52.67	-8.51	53.34	-7.38	52.17	-5.07	52.17	-2.46	52.17	-7.77
54.50	5.73	53.83	10.74	53.67	-6.56	53.66	7.19	53.50	-4.01	54.00	-8.85	54.67	-7.36	53.50	-4.18	53.50	-2.87	53.50	-7.78
55.83	3.97	55.17	10.76	55.00	-6.18	55.00	6.63	54.83	-3.94	55.34	-8.96	56.00	-6.99	54.83	-4.87	54.84	-3.01	54.83	-7.57
57.17	2.80	56.50	10.93	56.33	-5.45	56.33	6.13	56.17	-3.77	56.67	-8.65	57.34	-7.15	56.17	-5.15	56.17	-3.64	56.17	-7.36
58.50	1.64	57.83	11.10	57.67	-4.84	57.67	5.09	57.50	-3.57	58.00	-8.13	58.66	-6.95	57.50	-5.84	57.50	-3.92	57.50	-7.29
59.83	0.73	59.17	10.96	59.00	-4.42	59.00	3.80	58.84	-3.70	59.34	-8.20	60.00	-7.27	58.83	-5.85	58.83	-4.19	58.83	-7.31
61.17	0.14	60.50	10.86	60.34	-3.86	60.33	2.54	60.17	-4.13	60.67	-7.92	61.33	-7.71	60.17	-6.18	60.17	-4.71	60.17	-7.35
62.50	-0.36	61.83	10.18	61.67	-3.43	61.67	1.55	61.50	-4.66	62.00	-7.21	62.66	-8.20	61.50	-6.75	61.50	-5.45	61.50	-7.83
63.84	-0.73	63.17	9.60	63.00	-3.23	63.00	0.33	62.84	-5.02	63.34	-8.39	64.00	-8.35	62.83	-6.91	62.84	-6.17	62.84	-8.28
65.17	-1.44	64.50	8.21	64.34	-3.09	64.34	-0.65	64.17	-5.36	64.67	-8.75	65.33	-8.60	64.17	-7.38	64.17	-6.71	64.17	-9.85
66.50	-2.13	65.83	6.65	65.67	-3.28	65.67	-2.03	65.50	-5.46	66.00	-8.38	66.67	-8.47	65.50	-7.78	65.50	-7.48	65.50	-9.60
67.84	-2.80	67.17	5.20	67.00	-3.53	67.00	-3.50	66.84	-5.47	67.34	-8.94	68.33	-8.51	66.83	-8.37	66.84	-7.85	66.84	-9.82
69.17	-3.64	68.50	3.88	68.34	-4.13	68.33	-4.76	68.17	-5.28	68.67	-9.21	69.67	-8.18	68.16	-9.01	68.17	-8.28	68.17	-9.80
70.50	-4.14	69.84	2.35	69.67	-4.63	69.67	-5.75	69.50	-5.06	70.00	-9.23	71.17	-8.12	69.50	-9.33	69.50	-8.20	69.50	-9.85
71.84	-4.95	71.17	1.31	71.00	-5.23	71.00	-6.50	70.84	-4.82	71.34	-9.18	72.50	-7.92	70.83	-9.78	70.84	-7.88	70.84	-9.66
73.33	-4.36	72.50	0.63	72.83	-2.89	72.33	-7.06	72.50	-4.77	73.17	-8.81	73.83	-7.84	72.17	-9.94	72.17	-6.90	73.16	-8.98
74.67	-4.36	73.84	0.24	74.17	-2.99	73.67	-7.06	73.83	-4.53	74.50	-8.98	76.33	-7.51	73.50	-9.57	73.50	-6.40	74.50	-8.56
76.00	-4.45	75.17	-0.05	75.50	-3.53	75.00	-7.23	75.17	-4.37	75.83	-8.82	77.66	-7.31	74.84	-9.60	74.83	-6.41	75.83	-8.54
77.33	-4.25	76.50	-0.34	76.83	-3.77	76.34	-7.35	76.50	-3.98	77.17	-8.38	79.00	-7.33	76.17	-9.40	76.16	-6.28	77.17	-8.37
78.67	-4.10	77.83	-0.62	78.16	-3.84	77.67	-7.51	77.83	-3.93	78.50	-8.21	80.33	-7.48	77.50	-9.29	77.50	-6.47	78.50	-8.26
80.00	-3.98	79.17	-0.72	79.50	-3.91	79.00	-7.39	79.17	-3.77	79.83	-8.19	81.66	-5.51	78.84	-9.18	78.83	-6.53	79.83	-8.19
81.33	-4.15	80.50	-1.27	80.83	-4.05	80.34	-7.09	80.50	-3.66	81.17	-8.26	83.00	-7.22	80.17	-8.93	80.17	-6.53	81.17	-8.08

82.67	-3.94	81.84	-1.31	82.17	-4.23	81.67	-7.37	81.83	-3.42	82.50	-8.28	84.33	-6.61	81.50	-9.03	81.50	-6.59	82.50	-8.12
84.00	-3.74	83.17	-1.58	83.50	-4.60	83.00	-7.42	83.16	-3.49	83.84	-8.38	85.67	-6.65	82.84	-8.73	82.84	-6.62	83.84	-8.01
85.34	-3.67	84.51	-1.87	84.83	-4.88	84.34	-7.53	84.50	-3.73	85.17	-8.57	87.00	-6.34	84.17	-8.56	84.17	-6.80	85.17	-8.05
86.67	-3.70	85.84	-1.97	86.17	-5.29	85.67	-7.50	85.83	-3.97	86.50	-8.78	88.33	-7.24	85.50	-8.72	85.50	-7.51	86.50	-8.40
88.00	-3.59	87.17	-2.41	87.50	-5.44	87.00	-7.75	87.17	-4.52	87.83	-9.54	89.67	-12.05	86.83	-8.66	86.83	-8.00	87.83	-9.12
89.33	-3.73	88.51	-2.64	88.84	-5.64	88.34	-7.89	88.50	-4.68	89.17	-9.93	91.00	-9.74	88.17	-9.05	88.17	-8.46	89.17	-9.71
90.67	-4.48	89.84	-3.53	90.17	-6.27	89.67	-8.64	89.84	-5.07	90.50	-10.04	92.34	-9.90	89.50	-9.91	89.50	-9.05	90.50	-9.84
92.00	-4.86	91.17	-4.13	91.50	-7.07	91.01	-9.04	91.17	-5.04	91.84	-10.06	93.67	-9.46	90.84	-10.47	90.83	-9.45	91.84	-10.44
93.33	-5.45	92.50	-4.53	92.84	-7.75	92.34	-9.55	92.50	-4.76	93.17	-10.50	94.50	-9.53	92.17	-10.76	92.17	-9.53	93.17	-10.52
94.67	-5.83	93.84	-4.68	94.17	-8.44	93.67	-9.87	93.84	-4.57	94.50	-10.28	95.02	-9.41	93.51	-11.22	93.50	-9.25	94.50	-10.25
96.00	-5.72	95.17	-4.53	95.50	-8.90	95.01	-10.09	96.00	-5.25	95.84	-9.03	95.80	-9.85	94.84	-11.39	93.50	-9.25	95.20	-10.15

Quadro A3. Dados experimentais sobre a perda de umidade do leite.

Exp 1		Exp 2		Exp 3		Exp 4		Exp 5		Exp 6		Exp 7		Exp 8		Exp 9		Exp 10	
t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)	t (h)	m (kg)
0.17	-0.01	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17	-0.01	0.17	-0.01	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00
1.50	-0.04	1.50	-0.03	1.50	-0.07	1.50	-0.09	1.50	-0.02	1.50	-0.05	1.50	-0.04	1.50	-0.01	1.50	-0.03	1.50	-0.01
2.83	-0.04	2.83	-0.04	2.83	-0.09	2.83	-0.13	2.83	-0.02	2.83	-0.08	2.83	-0.05	2.83	-0.03	2.83	-0.02	2.83	-0.03
4.17	-0.06	4.16	-0.05	4.17	-0.12	4.17	-0.16	4.16	-0.03	4.16	-0.11	4.16	-0.07	4.16	-0.04	4.17	-0.02	4.16	-0.04
5.50	-0.07	5.50	-0.07	5.50	-0.15	5.50	-0.18	5.50	-0.04	5.50	-0.13	5.50	-0.08	5.50	-0.06	5.50	-0.03	5.50	-0.06
6.83	-0.07	6.83	-0.08	6.83	-0.16	6.83	-0.21	6.83	-0.05	6.83	-0.14	6.83	-0.09	6.83	-0.09	6.83	-0.05	6.83	-0.07
8.16	-0.09	8.16	-0.08	8.16	-0.19	8.17	-0.24	8.17	-0.05	8.17	-0.16	8.17	-0.10	8.17	-0.11	8.16	-0.05	8.17	-0.09
9.50	-0.10	9.50	-0.11	9.50	-0.20	9.50	-0.25	9.50	-0.05	9.50	-0.18	9.50	-0.12	9.50	-0.14	9.50	-0.07	9.50	-0.09
10.83	-0.13	10.83	-0.11	10.83	-0.22	10.84	-0.27	10.83	-0.06	10.83	-0.20	10.83	-0.13	10.83	-0.14	10.83	-0.08	10.83	-0.12
12.17	-0.13	12.17	-0.13	12.17	-0.24	12.17	-0.30	12.17	-0.08	12.17	-0.22	12.17	-0.14	12.17	-0.18	12.17	-0.09	12.17	-0.12
13.50	-0.15	13.50	-0.14	13.50	-0.26	13.50	-0.30	13.50	-0.08	13.50	-0.22	13.50	-0.16	13.50	-0.20	13.50	-0.09	13.50	-0.14
14.83	-0.16	14.83	-0.14	14.83	-0.28	14.83	-0.33	14.84	-0.08	14.83	-0.23	14.84	-0.17	14.83	-0.23	14.83	-0.11	14.83	-0.15
16.17	-0.17	16.17	-0.16	16.17	-0.29	16.17	-0.33	16.17	-0.09	16.17	-0.26	16.17	-0.19	16.17	-0.24	16.17	-0.13	16.17	-0.16
17.50	-0.19	17.50	-0.17	17.50	-0.30	17.50	-0.36	17.50	-0.10	17.50	-0.26	17.50	-0.19	17.50	-0.27	17.50	-0.15	17.50	-0.17
18.84	-0.20	18.84	-0.17	18.83	-0.32	18.83	-0.36	18.84	-0.12	18.84	-0.28	18.84	-0.22	18.84	-0.30	18.83	-0.16	18.83	-0.19
20.17	-0.22	20.17	-0.19	20.17	-0.32	20.17	-0.39	20.17	-0.12	20.17	-0.28	20.16	-0.24	20.17	-0.31	20.17	-0.18	20.17	-0.20
21.50	-0.24	21.50	-0.20	21.50	-0.35	21.50	-0.41	21.50	-0.12	21.50	-0.30	21.50	-0.25	21.50	-0.33	21.50	-0.20	21.50	-0.20
22.84	-0.26	22.84	-0.20	22.84	-0.36	22.83	-0.42	22.84	-0.12	22.83	-0.31	22.83	-0.27	22.84	-0.36	22.84	-0.23	22.83	-0.22
24.67	-0.28	24.17	-0.22	24.33	-0.40	24.17	-0.44	24.17	-0.15	24.17	-0.32	24.17	-0.27	24.17	-0.38	24.17	-0.25	24.17	-0.23
26.00	-0.31	25.50	-0.22	25.66	-0.41	25.50	-0.47	25.50	-0.15	25.50	-0.34	25.50	-0.29	25.50	-0.42	25.50	-0.26	25.50	-0.23
27.33	-0.31	26.84	-0.24	27.00	-0.43	26.84	-0.49	26.83	-0.15	26.84	-0.35	26.83	-0.30	26.83	-0.44	26.84	-0.28	26.84	-0.25
28.67	-0.33	28.17	-0.25	28.33	-0.45	28.17	-0.51	28.17	-0.16	28.17	-0.37	28.17	-0.30	28.17	-0.47	28.17	-0.32	28.17	-0.26
30.00	-0.35	29.50	-0.26	29.66	-0.47	29.50	-0.54	29.50	-0.16	29.50	-0.38	29.50	-0.32	29.50	-0.49	29.50	-0.33	29.50	-0.26
31.33	-0.37	30.84	-0.28	31.00	-0.50	30.83	-0.56	30.84	-0.17	30.84	-0.40	30.84	-0.32	30.84	-0.52	30.84	-0.35	30.84	-0.28
32.67	-0.38	32.17	-0.29	32.33	-0.50	32.17	-0.60	32.17	-0.19	32.17	-0.40	32.17	-0.35	32.17	-0.54	32.17	-0.37	32.17	-0.29
34.00	-0.39	33.51	-0.31	33.67	-0.53	33.51	-0.62	33.51	-0.19	33.51	-0.43	33.50	-0.35	33.51	-0.56	33.50	-0.38	33.50	-0.30
35.34	-0.42	34.84	-0.32	35.00	-0.56	34.84	-0.65	34.84	-0.19	34.84	-0.43	34.84	-0.35	34.84	-0.58	34.84	-0.39	34.84	-0.30
36.67	-0.43	36.17	-0.34	36.33	-0.57	36.17	-0.67	36.17	-0.19	36.67	-0.44	36.17	-0.38	36.17	-0.61	36.17	-0.41	36.17	-0.32
38.00	-0.44	37.50	-0.35	37.67	-0.59	37.50	-0.70	37.50	-0.23	38.00	-0.46	38.67	-0.39	37.51	-0.62	37.50	-0.41	37.50	-0.32

39.33	-0.45	38.84	-0.38	39.00	-0.61	38.84	-0.74	38.83	-0.23	39.33	-0.46	40.00	-0.40	38.84	-0.64	38.83	-0.42	38.83	-0.34
40.67	-0.45	40.17	-0.39	40.34	-0.64	40.17	-0.77	40.16	-0.24	40.67	-0.48	41.33	-0.41	40.17	-0.66	40.17	-0.43	40.16	-0.34
42.00	-0.47	41.51	-0.41	41.67	-0.66	41.51	-0.80	41.50	-0.24	42.00	-0.50	42.67	-0.42	41.51	-0.67	41.50	-0.45	41.50	-0.36
43.34	-0.48	42.84	-0.43	43.00	-0.67	42.84	-0.82	42.83	-0.26	43.33	-0.50	44.00	-0.43	42.84	-0.69	42.83	-0.46	42.83	-0.36
44.67	-0.49	44.17	-0.43	44.34	-0.70	44.17	-0.86	44.17	-0.26	44.67	-0.50	45.33	-0.43	44.17	-0.71	44.16	-0.49	44.17	-0.36
46.00	-0.50	45.51	-0.45	45.67	-0.72	45.51	-0.89	45.50	-0.26	46.00	-0.53	46.67	-0.45	45.50	-0.72	45.50	-0.50	45.50	-0.39
47.34	-0.52	46.84	-0.47	47.00	-0.75	46.84	-0.92	46.83	-0.28	47.33	-0.53	48.00	-0.46	46.84	-0.74	46.83	-0.52	46.83	-0.39
49.16	-0.52	48.50	-0.49	48.33	-0.76	48.33	-0.97	48.17	-0.29	48.67	-0.54	49.33	-0.46	48.17	-0.76	48.17	-0.54	48.17	-0.39
50.50	-0.55	49.83	-0.50	49.66	-0.76	49.66	-1.02	49.50	-0.28	50.00	-0.56	50.67	-0.48	49.51	-0.79	49.50	-0.54	49.50	-0.42
51.83	-0.56	51.17	-0.53	51.00	-0.76	51.00	-1.07	50.83	-0.30	51.34	-0.56	52.00	-0.49	50.84	-0.80	50.83	-0.56	50.83	-0.41
53.17	-0.56	52.50	-0.52	52.33	-0.76	52.33	-1.11	52.17	-0.30	52.67	-0.59	53.34	-0.51	52.17	-0.82	52.17	-0.57	52.17	-0.42
54.50	-0.58	53.83	-0.55	53.67	-0.76	53.66	-1.14	53.50	-0.31	54.00	-0.59	54.67	-0.51	53.50	-0.83	53.50	-0.59	53.50	-0.44
55.83	-0.58	55.17	-0.58	55.00	-0.80	55.00	-1.18	54.83	-0.31	55.34	-0.61	56.00	-0.51	54.83	-0.85	54.84	-0.60	54.83	-0.44
57.17	-0.60	56.50	-0.60	56.33	-0.83	56.33	-1.21	56.17	-0.32	56.67	-0.62	57.34	-0.54	56.17	-0.86	56.17	-0.61	56.17	-0.45
58.50	-0.62	57.83	-0.61	57.67	-0.86	57.67	-1.24	57.50	-0.33	58.00	-0.64	58.66	-0.56	57.50	-0.89	57.50	-0.61	57.50	-0.46
59.83	-0.63	59.17	-0.63	59.00	-0.89	59.00	-1.27	58.84	-0.33	59.34	-0.65	60.00	-0.57	58.83	-0.90	58.83	-0.63	58.83	-0.47
61.17	-0.64	60.50	-0.63	60.34	-0.92	60.33	-1.30	60.17	-0.34	60.67	-0.66	61.33	-0.58	60.17	-0.93	60.17	-0.64	60.17	-0.47
62.50	-0.65	61.83	-0.65	61.67	-0.95	61.67	-1.31	61.50	-0.34	62.00	-0.67	62.66	-0.59	61.50	-0.94	61.50	-0.65	61.50	-0.48
63.84	-0.66	63.17	-0.67	63.00	-0.98	63.00	-1.33	62.84	-0.35	63.34	-0.68	64.00	-0.60	62.83	-0.96	62.84	-0.66	62.84	-0.49
65.17	-0.66	64.50	-0.67	64.34	-1.00	64.34	-1.36	64.17	-0.35	64.67	-0.69	65.33	-0.61	64.17	-0.98	64.17	-0.67	64.17	-0.49
66.50	-0.67	65.83	-0.69	65.67	-1.03	65.67	-1.38	65.50	-0.36	66.00	-0.70	66.67	-0.61	65.50	-0.99	65.50	-0.68	65.50	-0.52
67.84	-0.69	67.17	-0.71	67.00	-1.05	67.00	-1.40	66.84	-0.37	67.34	-0.72	68.33	-0.62	66.83	-1.00	66.84	-0.70	66.84	-0.52
69.17	-0.69	68.50	-0.72	68.34	-1.07	68.33	-1.42	68.17	-0.37	68.67	-0.72	69.67	-0.64	68.16	-1.01	68.17	-0.71	68.17	-0.53
70.50	-0.69	69.84	-0.74	69.67	-1.09	69.67	-1.44	69.50	-0.38	70.00	-0.73	71.17	-0.64	69.50	-1.03	69.50	-0.72	69.50	-0.55
71.84	-0.71	71.17	-0.74	71.00	-1.11	71.00	-1.46	70.84	-0.39	71.34	-0.74	72.50	-0.66	70.83	-1.04	70.84	-0.74	70.84	-0.55
73.33	-0.76	72.50	-0.76	72.83	-1.16	72.33	-1.48	72.50	-0.40	73.17	-0.77	73.83	-0.66	72.17	-1.06	72.17	-0.74	73.16	-0.57
74.67	-0.77	73.84	-0.79	74.17	-1.19	73.67	-1.49	73.83	-0.42	74.50	-0.78	76.33	-0.71	73.50	-1.08	73.50	-0.76	74.50	-0.58
76.00	-0.78	75.17	-0.80	75.50	-1.22	75.00	-1.52	75.17	-0.43	75.83	-0.79	77.66	-0.73	74.84	-1.11	74.83	-0.77	75.83	-0.59
77.33	-0.80	76.50	-0.82	76.83	-1.24	76.34	-1.53	76.50	-0.43	77.17	-0.80	79.00	-0.73	76.17	-1.11	76.16	-0.78	77.17	-0.60
78.67	-0.81	77.83	-0.82	78.16	-1.26	77.67	-1.55	77.83	-0.43	78.50	-0.82	80.33	-0.75	77.50	-1.14	77.50	-0.79	78.50	-0.61
80.00	-0.82	79.17	-0.82	79.50	-1.29	79.00	-1.58	79.17	-0.43	79.83	-0.83	81.66	-0.76	78.84	-1.14	78.83	-0.80	79.83	-0.62

81.33	-0.83	80.50	-0.85	80.83	-1.33	80.34	-1.60	80.50	-0.44	81.17	-0.84	83.00	-0.77	80.17	-1.17	80.17	-0.81	81.17	-0.62
82.67	-0.84	81.84	-0.86	82.17	-1.34	81.67	-1.61	81.83	-0.45	82.50	-0.86	84.33	-0.77	81.50	-1.17	81.50	-0.82	82.50	-0.64
84.00	-0.85	83.17	-0.86	83.50	-1.37	83.00	-1.63	83.16	-0.46	83.84	-0.87	85.67	-0.78	82.84	-1.19	82.84	-0.82	83.84	-0.65
85.34	-0.85	84.51	-0.89	84.83	-1.39	84.34	-1.65	84.50	-0.46	85.17	-0.89	87.00	-0.78	84.17	-1.21	84.17	-0.84	85.17	-0.65
86.67	-0.86	85.84	-0.89	86.17	-1.42	85.67	-1.66	85.83	-0.46	86.50	-0.90	88.33	-0.80	85.50	-1.22	85.50	-0.85	86.50	-0.67
88.00	-0.88	87.17	-0.89	87.50	-1.43	87.00	-1.68	87.17	-0.47	87.83	-0.90	89.67	-0.80	86.83	-1.24	86.83	-0.86	87.83	-0.67
89.33	-0.88	88.51	-0.92	88.84	-1.46	88.34	-1.70	88.50	-0.48	89.17	-0.93	91.00	-0.81	88.17	-1.26	88.17	-0.87	89.17	-0.68
90.67	-0.89	89.84	-0.93	90.17	-1.46	89.67	-1.71	89.84	-0.49	90.50	-0.93	92.34	-0.82	89.50	-1.26	89.50	-0.88	90.50	-0.69
92.00	-0.91	91.17	-0.93	91.50	-1.49	91.01	-1.71	91.17	-0.49	91.84	-0.94	93.67	-0.83	90.84	-1.28	90.83	-0.89	91.84	-0.71
93.33	-0.91	92.50	-0.95	92.84	-1.51	92.34	-1.74	92.50	-0.50	93.17	-0.94	94.50	-0.83	92.17	-1.29	92.17	-0.90	93.17	-0.71
94.67	-0.91	93.84	-0.96	94.17	-1.52	93.67	-1.74	93.84	-0.52	94.50	-0.96	95.02	-0.84	93.51	-1.30	93.50	-0.91	94.50	-0.71
96.00	-0.94	95.17	-0.98	95.50	-1.54	95.01	-1.76	95.02	-0.53	95.84	-0.97	95.80	-0.85	94.84	-1.31	95.00	-0.92	95.20	-0.72