



LUÍSA REIS MOREIRA

**EFEITO DA POTÊNCIA E DO TEMPO DE
INTERMITÊNCIA NA SECAGEM INFRAVERMELHA DE
BANANAS ASSISTIDA POR CONVECÇÃO**

**LAVRAS – MG
2023**

LUÍSA REIS MOREIRA

**EFEITO DA POTÊNCIA E DO TEMPO DE INTERMITÊNCIA NA
SECAGEM INFRAVERMELHA DE BANANAS ASSISTIDA POR CONVECÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof.^a Dr.^a Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
Orientadora

Prof.^a Dr.^a Lidja Dahiane Menezes Santos Borel
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

LUÍSA REIS MOREIRA

**EFEITO DA POTÊNCIA E DO TEMPO DE INTERMITÊNCIA NA
SECAGEM INFRAVERMELHA DE BANANAS ASSISTIDA POR CONVECÇÃO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Hugo Perazzini
IRN/UNIFEI

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior
DEG/UFLA

Prof.^a Dr.^a Lidja Dahiane Menezes Santos Borél
DEG/UFLA

Prof.^a Dr.^a Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG
2023**

*Aos meus pais Élio e Rosimar,
À minha irmã Elisa, e
Ao meu namorado Vinícius,
Por todo apoio e amor.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Élio e Rosimar, por todo amor e confiança e por serem minha inspiração de vida. Vocês me ensinam diariamente a ser alguém melhor e estão sempre me motivando a trilhar meu caminho e seguir meus sonhos. À minha irmã, Elisa, que acompanhou de perto toda minha trajetória, obrigada por sempre estar ao meu lado, apoiando e ajudando. Ao meu namorado Vinícius, que trilhou comigo toda trajetória da faculdade, obrigada por ser meu melhor amigo e fazer com que o caminho seja mais leve.

Aos meus amigos da graduação, obrigada por fazerem a faculdade um lugar mais divertido. Um agradecimento especial às minhas amigas, Laura e Júlia, que estiveram comigo desde o início, a Andressa, pelos constantes apoios emocionais e a Melissa, que se tornou minha duplinha nesta reta final.

E por fim, um imenso agradecimento a todos os professores que ao longo da minha jornada acadêmica, desempenharam um papel fundamental na minha formação, em especial a Renata e Lidja, obrigada por todo apoio, ensinamento e paciência.

RESUMO

A banana desempenha um papel de grande relevância econômica no contexto brasileiro. No entanto, devido à sua alta suscetibilidade à deterioração, a comercialização de bananas frescas é um desafio considerável. Para contornar esse problema, a produção de frutas desidratadas surge como uma alternativa viável para aproveitar frutas que não atendem aos padrões de qualidade para o consumo fresco, bem como os excedentes de produção, reduzindo ao máximo o desperdício. A secagem convectiva é um método amplamente utilizado para a produção de frutas desidratadas. No entanto, esse método tem suas desvantagens, como a perda de qualidade devido à exposição prolongada ao ar aquecido, além de uma eficiência energética limitada. Nos últimos anos, têm sido avaliadas técnicas de secagem combinada para produtos agrícolas. Entre essas técnicas, a combinação de radiação infravermelha (IV) com convecção forçada por ar não aquecido tem se destacado como uma opção vantajosa. Isso ocorre porque a radiação intensifica o processo de secagem, enquanto o fluxo convectivo resfria a superfície do material, minimizando perdas de qualidade. Outra abordagem para melhorar a eficiência energética é o uso de secagem intermitente. Durante os períodos de interrupção, a umidade é transferida do centro para a superfície da amostra, o que pode resultar em uma redução do tempo de secagem e na minimização de danos causados pelo calor. Assim, este trabalho objetivou avaliar o processo de secagem de banana prata utilizando radiação infravermelha assistida por convecção forçada com ar não aquecido, tanto de maneira intermitente quanto contínua sobre a cinética de secagem, a umidade final, a cor do produto seco (diferença total de cor e índice de escurecimento), o consumo específico de energia (SEC) e a emissão de dióxido de carbono (qCO_2) durante o processo de secagem usando a função desejabilidade. Os experimentos seguiram um planejamento fatorial 3^2 , em que as variáveis controladas foram a potência da radiação IV (P) (118, 178 e 238 W) e a razão de intermitência (α) (0, 0,333 e 0,667). As amostras de banana, cortadas em rodela de 1,0 cm de espessura, foram dispostas em uma bandeja circular de 16 cm de diâmetro e inseridas em um secador infravermelho equipado com um ventilador axial cuja velocidade do ar foi mantida constante a 1,5 m/s, com as amostras sendo mantidas em um dessecador durante os intervalos de intermitência. Os resultados experimentais mostraram que o uso da intermitência diminuiu o tempo efetivo de secagem em todas as condições avaliadas, tendo a maior redução de tempo (56,59%) em $P = 178$ W e $\alpha = 0,667$. As curvas de secagem indicam que a difusão controlou todo o processo com exceção dos ensaios onde $\alpha = 0,667$, em que ao final da secagem apresentou comportamento constante. A umidade final das amostras variou entre 9,41% até 57,26% em base úmida devido as diferentes condições de secagem. A diferença total de cor variou de 7,93 até 49,41 e o índice de escurecimento variou de 47,54 até 170,58. O consumo específico de energia variou entre 17,72 e 71,15 kWh/kg_{água evaporada} enquanto a emissão de CO_2 variou entre 7,70 e 32,68 g. A condição operacional ótima foi de 178 W e $\alpha = 0,667$, o que resulta em um produto com uma diferença total de cor de 17,09, um índice de escurecimento de 98,21 e uma umidade final de 32,14% (b.u.), consumindo 18,63 kWh/kg_{água evaporada} e emitindo 8,02 g de CO_2 na atmosfera.

Palavras-chave: Fruticultura. Razão de Intermitência. Secagem Combinada. Emissão de CO_2 . Consumo de energia.

ABSTRACT

The banana plays a significant economic role in the Brazilian context. However, due to its high susceptibility to deterioration, the marketing of fresh bananas is a considerable challenge. To address this issue, the production of dehydrated fruits emerges as a viable alternative to make use of fruits that do not meet the quality standards for fresh consumption, as well as surplus production, minimizing waste. Convective drying is a widely used method to produce dehydrated fruits. Nevertheless, this method has its drawbacks, such as quality loss due to prolonged exposure to heated air and limited energy efficiency. In recent years, combined drying techniques for agricultural products have been evaluated. Among these techniques, the combination of infrared radiation (IR) with forced air convection without heating has stood out as an advantageous option. This is because radiation intensifies the drying process, while convective flow cools the material's surface, minimizing quality losses. Another approach to improve energy efficiency is the use of intermittent drying. During interruption periods, moisture is transferred from the center to the surface of the sample, which can result in reduced drying time and minimized heat-related damage. Thus, this study aimed to evaluate the drying process of Prata bananas using infrared radiation assisted by forced convection with unheated air, both intermittently and continuously, on drying kinetics, final moisture content, product color (total color difference and browning index), specific energy consumption (SEC), and carbon dioxide emissions ($q\text{CO}_2$) during the drying process using desirability function. The experiment followed a 3^2 factorial design, where the controlled variables were the IR radiation power (P) (118, 178, and 238 W) and the intermittency ratio (α) (0, 0.333, and 0.667). Banana samples, cut into 1.0 cm thick slices, were placed on a 16 cm diameter circular tray and inserted into an infrared dryer equipped with an axial fan, with an air velocity kept constant at 1.5 m/s, and the samples were kept in a desiccator during intermittent intervals. The experimental results show that the use of intermittency reduced the effective drying time in all evaluated conditions, with the most significant reduction in time (56.59%) at $P = 178$ W and $\alpha = 0.667$. Drying curves indicate that diffusion controlled the entire process except for the trials where $\alpha = 0.667$, which exhibited constant behavior at the end of drying. The final moisture content of the samples ranged from 9.41% to 57.26% on a humid basis due to different drying conditions. The total color difference ranged from 7.93 to 49.41, and the browning index ranged from 47.54 to 170.58. Specific energy consumption varied between 17.72 and 71.15 kWh/kg of evaporated water, while CO_2 emissions ranged from 7.70 to 32.68 g. The optimal operating condition was 178 W and $\alpha = 0.667$, resulting in a product with a total color difference of 17.09, a browning index of 98.21, and a final moisture content of 32.14% (humid basis), consuming 18.63 kWh/kg of evaporated water and emitting 8.02 g of CO_2 into the atmosphere.

Keywords: Fruit farming. Intermittency ratio. Combined drying. CO_2 emissions. Energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama do processo de secagem.	16
Figura 2. Curvas de (a) umidade presente no sólido e (b) da taxa de secagem ou velocidade ao longo do tempo.	17
Figura 3. Espectro eletromagnético com ênfase na localização da radiação infravermelha. ...	19
Figura 4. Bananas passas comercializadas a granel.	23
Figura 5. Escala de maturação de Von Loesecke.	26
Figura 6. Fotografia das amostras de banana in natura cortadas em rodela.	26
Figura 7. (a) Fotografia do protótipo do secador IV assistido por convecção e (b) do dessecador utilizado durante os ensaios com intermitência.	27
Figura 8. Adimensional de umidade (MR) pelo tempo com $\alpha = 0,333$ para (a) 118 W (b) 178 W e (c) 238 W.	37
Figura 9. Adimensional de umidade (MR) pelo tempo com $\alpha = 0,667$ para (a) 118 W (b) 178 W e (c) 238 W.	38
Figura 10. Taxas de secagem pela umidade em base seca parametrizados em “ α ” para (a) $\alpha = 0$ (secagem contínua) (b) $\alpha = 0,333$ (têmpera de 10 min) e (c) $\alpha = 0,667$ (têmpera de 20 min).	40
Figura 11. Taxas de secagem pela umidade em base seca parametrizados em “P” para (a) P = 118 W (b) 178 W e (c) 238W.	41
Figura 12. (a) Superfície de resposta para tempo total de secagem e (b) Superfície de resposta para tempo efetivo de secagem.	44
Figura 13. Amostras de rodela de bananas submetidas à secagem com (a) P = 118W e $\alpha = 0$ e (b) P = 238W e $\alpha = 0$	46
Figura 14. Curva da temperatura em função do tempo parametrizadas em “ α ” para (a) $\alpha = 0$ (b) $\alpha = 0,333$ e (c) $\alpha = 0,667$	48
Figura 15. Superfície de resposta para (a) diferença total de cor e (b) índice de escurecimento.	50
Figura 16. Superfície de resposta para (a) consumo específico de energia e (b) Emissão de CO ₂	53
Figura 17. Condição ótima de operação.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis reais e codificadas do planejamento fatorial 3^2 com duas réplicas no ponto central.	28
Tabela 2. Classificação de desejabilidade.	34
Tabela 3. Média da temperatura do ar ambiente, umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio em base seca para cada ensaio de secagem.	35
Tabela 4. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o tempo total de secagem considerando $p < 0,1$ ($R^2 = 0,93476$).	42
Tabela 5. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o tempo efetivo de secagem considerando $p < 0,1$ ($R^2 = 0,9689$).	42
Tabela 6. Valores da diferença total de cor (ΔE), índice de escurecimento (BI), consumo específico de energia (SEC) e quantidade de CO_2 emitido (qCO_2) para cada ensaio experimental.	45
Tabela 7. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre a ΔE considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,6676$).	47
Tabela 8. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o BI considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,6487$).	47
Tabela 9. Cor média das amostras de rodela de banana.	49
Tabela 10. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o SEC considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,9754$).	51
Tabela 11. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre a Emissão de CO_2 considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,9058$).	52
Tabela 12. Umidade final atingida no tempo total de secagem em cada ensaio e umidade alcançada no tempo efetivo de secagem fixado em 170 min.	55

LISTA DE SÍMBOLOS

MR	Adimensional de umidade	[-]
SEC	Consumo específico de energia	[kWh/kg _{água evaporada}]
x	Coordenada x de cor	[-]
I_{IV}	Corrente da lâmpada infravermelha	[A]
I_{vent}	Corrente do ventilador	[A]
D	Desejabilidade Global	[-]
$d_i(Y_i)$	Desejabilidade individual	[-]
ΔE	Diferença total de cor	[-]
BI	Índice de escurecimento	[-]
$m_{água evaporada}$	Massa de água evaporada	[kg]
a^*	Parâmetro a^* de cor	[-]
b^*	Parâmetro b^* de cor	[-]
L^*	Parâmetro luminosidade de cor	[-]
P	Potência infravermelha	[W]
P_{total}	Potência total	[W]
qCO_2	Quantidade de CO ₂ emitido na atmosfera	[ton]
α	Razão de intermitência	[-]
T_a	Temperatura ambiente	[°C]
t_{off}	Tempo de têmpera para cada ciclo	[min]
$t_{efetivo}$	Tempo efetivo de secagem	[min]
t_{in}	Tempo efetivo no secador para cada ciclo	[min]
t_{total}	Tempo total de secagem	[min]
V_{rede}	Tensão da rede	[V]
X	Umidade	[kg/kg]
X_{cr}	Umidade crítica	[kg/kg]
X_{eq}	Umidade de equilíbrio	[Kg/kg]
X_0	Umidade inicial	[kg/kg]
RH	Umidade relativa do ar	[%]
X_i	Variável codificada	[-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	BANANA	14
2.2	TEORIA DE SECAGEM.....	15
2.2.1	Métodos de secagem.....	18
2.2.2	Secagem híbrida.....	20
2.2.3	Secagem intermitente.....	22
2.3	BANANA PASSA	23
2.4	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	SELEÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS	26
3.2	EQUIPAMENTO DE SECAGEM.....	27
3.3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	27
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA BANANA SECA.....	29
3.4.1	Determinação da Umidade.....	30
3.4.2	Diferença Total de Cor	30
3.4.3	Índice de Escurecimento.....	31
3.4.4	Análise Média da Cor das Amostras	31
3.5	CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO ₂	32
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	CURVAS DE SECAGEM	35
4.2	EFEITO DA POTÊNCIA E RAZÃO DE INTERMITÊNCIA NOS TEMPOS DE SECAGEM TOTAL E EFETIVO.....	42
4.3	EFEITO DA POTÊNCIA E RAZÃO DE INTERMITÊNCIA NA DIFERENÇA TOTAL DE COR E ÍNDICE DE ESCURECIMENTO	45
4.4	CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO ₂	51
4.5	UMIDADE FINAL	54
4.6	DESEJABILIDADE	55
5	CONCLUSÕES.....	57
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
7	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A banana é a fruta mais consumida no Brasil, desempenhando um papel de grande relevância econômica no país, gerando emprego e renda para os agricultores e trazendo riqueza para o campo (SNA, 2023). O faturamento anual dos produtores de banana chega a R\$ 13 bilhões e as exportações somam US\$ 26 milhões (EMBRAPA, 2022). Um dos grandes desafios enfrentados pelos fruticultores é a conservação dos frutos maduros. Infelizmente, uma grande parte da colheita é desperdiçada, estimando-se uma perda de cerca de 40% entre a colheita no campo e a chegada ao mercado consumidor. Esse alto índice de desperdício é responsável por aumentos significativos nos preços da fruta para o consumidor final (ALVES et al., 2011).

A deterioração dos frutos é uma das principais causas de perdas, principalmente devido à alta quantidade de água livre presente nas bananas *in natura*. Portanto, é necessário utilizar métodos de conservação para tornar os alimentos estáveis à deterioração química e microbiana. Existem várias técnicas de conservação disponíveis para os fruticultores, como refrigeração, secagem, congelamento e processamento em conserva. Cada método tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha depende do tipo de fruta e outras condições específicas (MELONI, 2006; EMBRAPA, 2022).

A secagem é um dos processos mais antigos utilizados pelo homem na conservação de alimentos. A secagem artificial é um processo de remoção de umidade, que implica o uso de equipamentos e condicionamento do ar de secagem pelo controle da temperatura e velocidade do ar de secagem (EMBRAPA, 2021). A secagem via convecção forçada com o uso de ar aquecido é a abordagem mais amplamente utilizada nas indústrias alimentícias. Especificamente para a banana, este é o processo majoritariamente utilizado na remoção de umidade do fruto, resultando em um produto conhecido como banana passa, que tem sabor doce e textura mastigável.

Contudo, é importante ressaltar que, embora essa seja uma técnica amplamente empregada, ela apresenta desvantagens consideráveis, sob a perspectiva da eficiência energética, do tempo prolongado necessário para completar o processo de secagem e, como consequência, da possível degradação da qualidade do produto. Esses aspectos desfavoráveis, tornam eminente a necessidade de estudos que busquem por alternativas mais eficientes para a desidratação de alimentos (VISHWANATHAN et al., 2010).

Neste sentido, a combinação de tecnologias para a secagem de alimentos com elevada umidade tem se mostrado eficaz, pois o uso de dois ou mais métodos pode proporcionar um efeito sinérgico positivo. Uma abordagem promissora envolve a combinação da radiação

infravermelha (IV) com a convecção forçada utilizando ar não aquecido (ONWUDE; HASHIM; CHEN, 2016). A radiação infravermelha atinge o material exposto, penetrando-o e posteriormente sendo convertida em calor. Logo, este método de secagem proporciona elevadas taxas de transferência de calor, menor tempo de processamento e menor custo energético (NOWAK & LEWICKI, 2004; VISHWANATHAN et al., 2010). Assim, essa abordagem oferece vantagens significativas, pois a radiação acelera o processo de secagem, enquanto o fluxo convectivo ajuda a resfriar a superfície do material, minimizando perdas de qualidade. Além disso, a eficiência energética pode ser aprimorada por meio da utilização da intermitência. Durante o período de têmpera, a umidade é transferida do núcleo para a superfície da amostra, o que pode resultar na redução do tempo efetivo de secagem e na minimização dos danos causados pelo calor (SHI et al., 2020, SILVA et al., 2019).

Muitos estudos sobre a desidratação de frutas e legumes podem ser encontrados na literatura especializada. Entretanto, a combinação de técnicas de secagem é ainda pouco explorada, mas existem trabalhos que estudaram a secagem híbrida de morangos (ADAK; HEYBELI; ERTEKIN, 2017), batatas (GENG et al., 2023), maçãs (EL-MESERY; MWITHIGA, 2015) e goiaba chilena (PUENTE-DÍAZ et al., 2013).

Assim, o presente trabalho objetivou avaliar o processo de secagem de banana (em rodela) utilizando radiação infravermelha assistida por convecção forçada com ar não aquecido, tanto de maneira intermitente quanto contínua. O efeito da potência IV e da aplicação da intermitência foram avaliados sobre o tempo de secagem, a remoção de umidade, a umidade final, a cor do produto seco (diferença total de cor e índice de escurecimento), o consumo específico de energia (SEC) e a emissão de dióxido de carbono (CO₂) durante o processo de secagem usando a função desejabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BANANA

A banana (*Musa ssp.*) é a fruta fresca mais cultivada no mundo, sendo produzida em mais de 125 países. O Brasil é o 4º maior produtor mundial da fruta e, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária (CNA), são gerados cerca de 500 mil empregos diretos, o que afirma a relevância da bananicultura no Brasil (SEBRAE, 2023; CNA, 2021). A banana é também a fruta mais consumida no país. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023), cada brasileiro consome cerca de 25 quilos de banana por ano.

No Brasil é possível produzir banana em todos os estados durante o ano todo devido às condições climáticas do país e quase toda a produção é destinada ao mercado interno, sendo em torno de 1% exportado. Segundo dados do Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA/IBGE, 2023), o estado de São Paulo é o maior produtor do país, produzindo cerca de 1 milhão de toneladas, seguido pela Bahia, com 878,5 mil toneladas e em terceiro lugar, Minas Gerais com 801,7 mil toneladas (CNA, 2021; IBGE, 2021).

A banana, além de ser um alimento energético, composta principalmente por água e carboidratos, é uma excelente fonte de nutrientes essenciais como o sódio, fósforo, magnésio e sobretudo, potássio. Há também presença de vitamina C, A, B2, B6, entre outras (BORGES et al., 2006).

As variedades de banana mais comuns no Brasil são as destinadas ao consumo direto, como as variedades prata, nanica, maçã e ouro. Cada planta de bananeira gera, de uma única vez, entre 5 e 15 pencas, e cada banana madura tem, em média, um peso de 125 gramas, com uma composição que consiste em cerca de 75% de água e 25% de substâncias sólidas (SNA, 2015).

Na ocasião da compra, os consumidores inicialmente avaliam diversos atributos dos frutos, tais como sua aparência, sabor, aroma e firmeza. Além disso, um fator de extrema relevância para a comercialização dos frutos e a determinação de sua qualidade é a coloração da casca, que serve como referência para determinar seu estágio de maturação. Durante o processo de amadurecimento, a casca dos frutos transita de verde para amarelo, devido à degradação gradual da clorofila pela ação enzimática, permitindo que os carotenoides se tornem mais visíveis. Os métodos empregados para o amadurecimento, seja de forma natural ou induzida, estão diretamente relacionados à coloração da casca, bem como os teores de amido e

açúcar. Portanto, sugere-se o uso da mudança na coloração da casca como um guia para determinar o nível de maturação do fruto (EULEUTERIO et al., 2010).

Uma parcela das bananas cultivadas acaba se perdendo durante as várias etapas da cadeia de suprimento, desde a colheita até a distribuição. Dentre os motivos que contribuem para essas perdas, merecem destaque as práticas inadequadas após a colheita, a realização de colheitas em momento tardio, a utilização de embalagens que não atendem aos padrões necessários, o transporte inadequado e a ausência de refrigeração durante o armazenamento (SARMENTO et al., 2012). Assim, devido ao caráter altamente perecível e a baixa vida útil de prateleira da banana, o uso de técnicas que viabilizem a comercialização dos frutos fora dos padrões de qualidade para consumo *in natura*, mostra-se como uma alternativa para a valorização da produção e redução do desperdício.

2.2 TEORIA DE SECAGEM

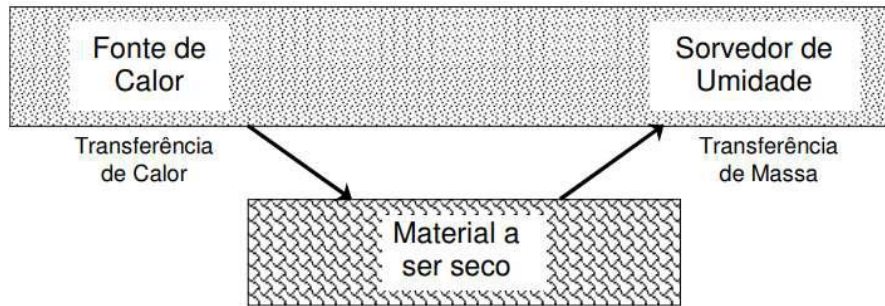
Conforme explicado por McCabe et al. (1991), a operação de secagem envolve a remoção de uma substância volátil (comumente água) de um material, resultando na diminuição de sua massa. Esta técnica é extensivamente empregada na preservação de alimentos, visto que os micro-organismos de decomposição não prosperam na ausência de água. Adicionalmente, muitas enzimas responsáveis pelo escurecimento enzimático também perdem sua atividade em ambientes desprovidos de água.

São inúmeras as vantagens da secagem de alimentos, incluindo a sua preservação por períodos prolongados, a disponibilidade desses produtos durante períodos de entressafra ou escassez de produção, a diminuição dos custos relacionados ao armazenamento e transporte devido à redução do peso e volume do produto, a estabilidade dos componentes aromáticos, a proteção contra a degradação causada por enzimas, e a economia de energia, uma vez que não é necessário utilizar refrigeração para conservar o alimento (TADINI, 2019).

Durante o processo de secagem, é fundamental fornecer calor para eliminar a umidade presente no material, ao mesmo tempo em que é essencial contar com um sorvedor de umidade capaz de remover o vapor de água que se forma na superfície do material, como pode ser observado na Figura 1 (PARK et al., 2014). Nesse processo, dois fenômenos ocorrem concomitantemente: a transferência de calor e a transferência de massa. O calor (energia) transferido a partir de uma fonte é usado para aquecer a superfície do sólido e em seguida o interior, evaporando a água presente nessa região, que se transforma em vapor. Enquanto isso, a transferência de massa, que envolve a umidade, está relacionada com a difusão da água do

interior do sólido em direção à sua superfície e com a convecção, que se caracteriza pelo movimento da água da superfície do material para o ar (MARTINS et al., 2020).

Figura 1. Diagrama do processo de secagem.



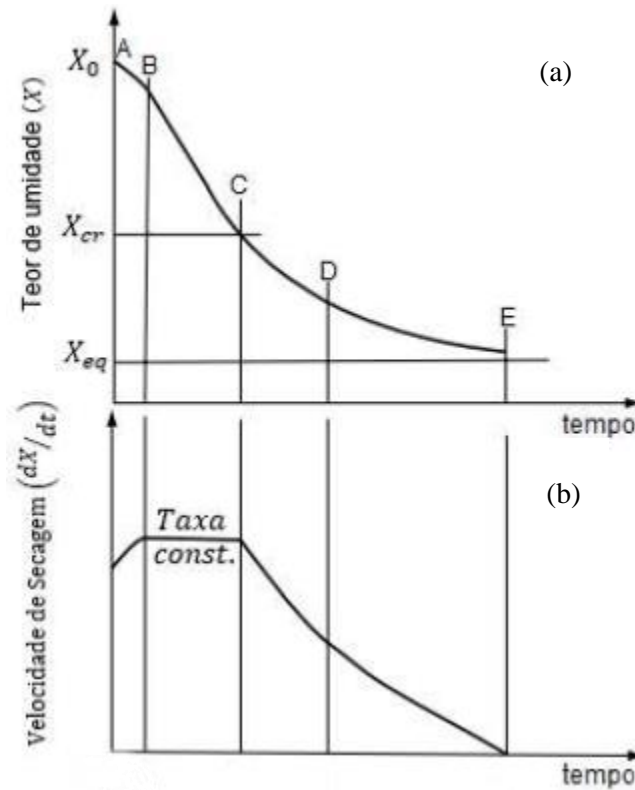
Fonte: Park et al., 2014.

Inúmeros fatores exercem impacto sobre o processo de secagem. Por exemplo, a transferência de calor está intrinsecamente ligada a variáveis como temperatura, umidade, velocidade e pressão do ar de secagem, bem como à área disponível para a evaporação. Por outro lado, a transferência de massa é afetada pela natureza física do material, sua temperatura e umidade (MUJUMDAR, 2014).

A cinética de secagem busca compreender o comportamento do material ao longo do processo e é comumente expressa em termos do adimensional de umidade (MR), que do inglês significa *moisture ratio*, em função do tempo. A cinética de secagem também pode ser analisada por meio de curvas que relacionam a umidade (em base seca) (X) (Figura 2.a) e a taxa de secagem (dX/dt) (Figura 2.b) com o tempo, utilizando dados experimentais (DANTAS, 2010; HENRÍQUEZ et al., 2014).

As curvas de secagem ilustradas na Figura 2, são segmentadas em períodos ou fases, cada uma com características distintas. O trecho AB representa o período de indução, durante o qual o material, inicialmente com uma umidade X_0 , se ajusta às condições do secador. Quando um material é introduzido no secador, geralmente está à temperatura ambiente, o que resulta em uma baixa pressão de vapor na sua superfície, levando a uma taxa inicial de evaporação baixa. O calor fornecido ao material serve para elevar sua temperatura, aumentando, assim, a pressão de vapor e a taxa de secagem. Esse processo continua até que as transferências de calor e massa se equilibrem. A duração desta fase é insignificante e, geralmente, é desconsiderada (PARK et al., 2014; MUJUMDAR, 2014).

Figura 2. Curvas de (a) umidade presente no sólido e (b) da taxa de secagem ou velocidade ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de MUJUMDAR, 2014.

No trecho BC, chamado de "período de taxa constante", a quantidade de água dentro do produto ainda é expressiva. A água evapora como água livre, mantendo uma pressão de vapor constante na superfície, equivalente à pressão de vapor da água pura à temperatura do material. A temperatura deste permanece constante e igual à temperatura de bulbo úmido, indicando um equilíbrio completo entre a transferência de calor e massa. A velocidade de secagem é constante enquanto a migração da água do interior para a superfície do produto é suficiente para compensar a perda por evaporação. O final deste estágio coincide com o nível de umidade crítica (X_{cr}), representado como ponto C (PARK et al., 2014).

É importante notar que para materiais biológicos, o período constante é difícil de ser alcançado, devido às condições operacionais de secagem, que resultam em resistências significativas à transferência de massa dentro do produto. Isso faz com que a taxa de evaporação na superfície seja muito maior do que a taxa de reposição de umidade do interior para a superfície do material (LOURENÇO e FINZER, 2013).

O segmento CE, conhecido como período decrescente, representa a fase de diminuição na taxa de secagem. Essa fase pode ser subdividida em duas etapas de queda na velocidade. A

primeira fase de redução na taxa ocorre no trecho CD, em que a resistência interna à transferência de umidade aumenta, tornando o transporte de água do interior para a superfície do sólido insuficiente para compensar a evaporação. Neste momento, as resistências internas se tornam o principal fator limitante da secagem, uma vez que a transferência de umidade para fora do material ocorre muito mais rapidamente. A partir do ponto D, inicia-se a segunda fase de redução na taxa, que envolve a evaporação da água ligada. A água livre no interior do material foi completamente evaporada, restando apenas a água que está firmemente retida no produto. Nesse estágio, a água não evapora mais da superfície, mas sim de dentro do material. Se o produto permanecer sob condições constantes de temperatura e umidade relativa por tempo suficiente, ele perderá umidade até que a pressão de vapor dentro do produto seja igual à pressão parcial do ar. Neste ponto, diz-se que o sólido e o ar estão em equilíbrio, atingindo a umidade de equilíbrio (X_{eq}) para as condições estabelecidas e concluindo o processo de secagem.

2.2.1 Métodos de secagem

A secagem é um processo que varia de acordo com a maneira pela qual o calor é transferido para o material a ser desidratado. Para desidratar uma substância, a energia necessária para a evaporação da umidade pode ser fornecida de várias formas, como condução, convecção e radiação (como micro-ondas e infravermelho). Essa diversidade de abordagens permite adaptar a secagem às características específicas do material e às metas de qualidade desejadas. Em determinadas situações, uma combinação desses métodos pode ser empregada para otimizar o processo de secagem (MASKAN, 2002).

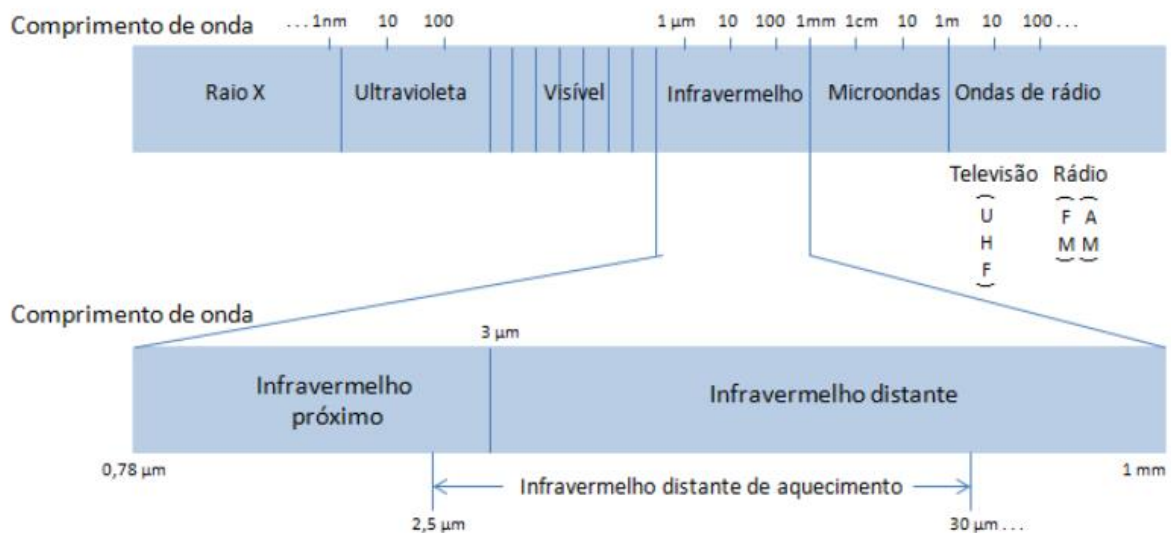
O secador por condução requer um contato indireto da fase fluida aquecida com o sólido a ser seco, no entanto, a transferência de calor ocorre diretamente através de superfícies aquecidas que estão em contato ou próximas do material. Essas superfícies aquecidas, como bandejas, placas, cilindros ou as paredes internas dos secadores, desempenham um papel fundamental no fornecimento do calor necessário para a evaporação da umidade presente no material. Uma característica distintiva desse método de secagem é que ele tende a minimizar as perdas de calor, uma vez que o calor é transmitido diretamente das superfícies aquecidas para o material, e, tendo uma transferência de calor eficiente, as temperaturas atingidas durante o processo de secagem por condução tendem a ser mais elevadas em comparação com aquelas usadas nos secadores convectivos (MELO, 2010).

Na secagem convectiva, uma corrente de ar quente é colocada em contato com o sólido. Há o aquecimento da camada externa do material devido à convecção de calor, enquanto o restante da amostra é aquecido por condução térmica. Durante esse processo, a umidade

presente na superfície do material se transforma em vapor, que é removido pela corrente de ar. Esses secadores têm a capacidade de controlar as taxas de secagem com base em parâmetros como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, o que oferece uma abordagem bastante flexível para a desidratação de materiais (MUJUNDAR, 2014, FU et al., 2015). É importante destacar que uma parcela significativa dos secadores industriais é do tipo convectivo.

A radiação infravermelha, assim como as micro-ondas, é uma forma de energia eletromagnética, a qual é capaz de se propagar no vácuo, não havendo a necessidade de um meio material para isso. A quantidade da radiação que incide em qualquer superfície possui uma dependência espectral, como pode ser observado pela Figura 3, uma vez que a energia emitida por um emissor é composta por diferentes comprimentos de onda.

Figura 3. Espectro eletromagnético com ênfase na localização da radiação infravermelha.



Fonte: Adaptado de NINDO E MWITHIGA (2011).

Os métodos de secagem baseados em micro-ondas são notáveis por sua capacidade de fornecer energia através das ondas eletromagnéticas, que interagem diretamente com o material, gerando calor em seu interior. Isso representa uma vantagem significativa em relação às técnicas convencionais, pois não dependem da condução de calor da superfície para o interior do material. Essa abordagem promissora tem o potencial de acelerar significativamente o processo de secagem e melhorar a qualidade do produto. No entanto, apesar dessas vantagens evidentes, a adoção industrial da secagem por micro-ondas ainda é limitada, principalmente devido ao alto custo associado à sua operação. A implementação dessas tecnologias envolve investimentos significativos em equipamentos especializados e infraestrutura (FUMAGALLI, 2003; MUJUNDAR, 2014).

A radiação infravermelha é uma forma de energia eletromagnética compreendida entre a luz visível (0,38 – 0,78 μm) e a energia de micro-ondas (1 – 1000 mm). No espectro eletromagnético, sua banda abrange comprimentos de onda de 0,78 – 1000 μm , conforme demonstrado na Figura 3. A identificação do comprimento de onda de uma radiação em um espectro específico é influenciada não apenas pela natureza da fonte de calor, mas também pela sua temperatura. Este método de secagem se baseia na utilização de dispositivos geradores de radiação infravermelha, que incluem fontes como lâmpadas elétricas e painéis cerâmicos ou metálicos aquecidos por meio de eletricidade ou gás. É importante destacar que a temperatura dessas fontes desempenha um papel crucial na determinação do comprimento de onda da radiação infravermelha emitida, tornando esse método altamente controlável e eficaz para aplicações de secagem (SAKAI e MAO, 2006; NINDO e MWITHIGA, 2011).

Dado que os alimentos frequentemente possuem um teor significativo de água quando submetidos ao processo de secagem, é crucial considerar a absorção de energia infravermelha pela água como uma variável de grande relevância, a qual tem um impacto direto na dinâmica da secagem. As quatro principais bandas de absorção para água líquida são 3 μm , 4,7 μm , 6 μm e 15,3 μm . Os comprimentos de absorção de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos correspondem a duas faixas: 3 – 4 μm e 6 – 9 μm ; enquanto lipídeos absorvem em três faixas do espectro: 3 – 4 μm , 6 μm e 9 – 10 μm (SANDU, 1986).

A aplicação do aquecimento infravermelho (IV) está ganhando popularidade no processamento de alimentos devido às suas vantagens definitivas sobre o aquecimento convencional. Transferência de calor mais rápida e eficiente, menor custo de processamento, aquecimento uniforme do produto e melhor valor organoléptico e nutricional do material processado são algumas das características importantes da secagem IV. A secagem infravermelha tem sido investigada como um método potencial para a obtenção de alimentos secos de alta qualidade, incluindo frutas, vegetais e grãos (RIADH et al., 2015; ANDRADE, 2017; VISHWANATHAN et al., 2010).

2.2.2 Secagem híbrida

A secagem híbrida é uma abordagem que envolve a combinação simultânea de múltiplos métodos de secagem com o objetivo de aprimorar as transferências de calor e massa, a qualidade do produto final e, ao mesmo tempo, reduzir os custos associados ao processo.

Essa estratégia é frequentemente adotada para otimizar a eficiência da secagem, permitindo que diferentes mecanismos de transferência de calor e umidade atuem em conjunto. Isso pode resultar em taxas de secagem mais rápidas, uma redução no tempo necessário para

concluir o processo e uma melhoria na qualidade do produto final. Além disso, a utilização de métodos de secagem complementares pode muitas vezes levar a economias de energia expressivas, tornando o processo mais econômico e sustentável. Portanto, este tipo de abordagem é uma estratégia valiosa para a indústria, que busca otimizar seus processos de desidratação (SAKARE et al., 2020).

Por ser de interesse para este trabalho, será discutido o processo de secagem que combina o uso de radiação infravermelha (IV) com fluxo de ar não aquecido. Neste tipo de secagem, ocorre um aquecimento rápido dos materiais devido à eficaz penetração da radiação infravermelha, que possui uma alta densidade de calor. Esse aquecimento acelerado tem o efeito de aumentar a taxa de migração da umidade presente nos materiais em direção à superfície. Simultaneamente, o fluxo de ar desempenha um papel fundamental nesse processo. Ele assegura a rápida remoção da umidade da superfície dos materiais, contribuindo para manter o gradiente de umidade, que é a força motriz por trás do processo de secagem. Portanto, essa abordagem combinada permite uma secagem eficiente, na qual a radiação infravermelha aquece o interior dos materiais, incentivando a migração da umidade para a superfície, enquanto a corrente de ar age prontamente para remover a umidade superficial, mantendo o processo de secagem em um ritmo eficaz (VISHWANATHAN et al., 2010).

O aumento na intensidade da radiação IV tem um efeito positivo na redução do tempo necessário para o processo de secagem. No entanto, é importante notar que o aumento na velocidade do ar não aquecido, tende a ter um impacto oposto, aumentando o tempo de secagem e, conseqüentemente, levando a um aumento no consumo de energia. Isso ocorre porque o fluxo de ar desempenha um papel de resfriamento da superfície do material, o que minimiza danos na qualidade, mas prolonga o tempo de processamento. Portanto, encontrar o equilíbrio certo entre a intensidade da radiação IV e a velocidade do ar é crucial para alcançar resultados ideais no processo de secagem. Um aumento excessivo na intensidade da radiação IV pode comprometer a qualidade do produto e até mesmo causar endurecimento superficial. Portanto, é importante ajustar a velocidade do ar de forma adequada para garantir que a secagem seja eficiente sem prejudicar a qualidade do produto. Essa otimização é essencial para um processo de secagem bem-sucedido (RIADH et al., 2015).

Geng et al. (2023) estudaram a influência da temperatura, da velocidade do ar e da potência infravermelha na secagem de batatas em um secador híbrido infravermelho/convectivo. Os autores observaram que o tempo de secagem reduziu com o aumento da potência infravermelha, temperatura e da velocidade do ar.

Souza (2022) estudou a secagem de bananas em um secador híbrido para verificar a influência da potência infravermelha e da velocidade do ar de secagem no produto final e constatou que maiores potências e menores velocidades do ar aceleram o processo de secagem, diminuindo o tempo e permitindo um produto com menores umidades. Neste caso, menores velocidades proporcionaram uma redução no tempo devido ao fato do autor utilizar ar não aquecido, o que acaba resfriando a superfície da amostra.

2.2.3 *Secagem intermitente*

A secagem intermitente tem sido considerada um dos processos de secagem com maior eficiência energética (CHUA et al., 2002b, 2003; KOWALSKI & PAWŁOWSKI, 2011a). No processo de secagem intermitente, a entrega de calor e o fluxo de ar dentro do forno seguem um padrão cíclico. Essa abordagem altera tanto a temperatura quanto a umidade do ar durante o ciclo de secagem. Quando a fonte de calor é desativada durante esse processo intermitente, a temperatura reduz, resultando em uma diminuição na taxa de secagem na superfície do material. Entretanto, é importante destacar que, mesmo durante esse período em que o calor não é fornecido, ocorre um movimento interno de umidade devido à difusão e a outros processos de transporte, preparando-o para uma secagem mais eficiente quando o fornecimento de calor é reiniciado (BAIANI & LANGRISH, 2006).

Em outras palavras, a secagem intermitente permite que o material redistribua a umidade interna durante os períodos de pausa no fornecimento de calor, o que, por sua vez, acelera a taxa de secagem quando o calor é reativado. Esse processo cíclico é uma estratégia eficaz para otimizar a secagem de materiais.

Para que uma comparação adequada entre os processos seja possível, é comum o uso na literatura de um parâmetro conhecido como razão de intermitência (α). A razão de intermitência é definida como a razão entre o período de têmpera, ou seja, o tempo em que a fonte de calor é desativada (t_{off}) e o tempo total do ciclo ($t_{on} + t_{off}$), como apresentado na Equa o 1 (KUMAR et al., 2014).

$$\alpha = \frac{t_{off}}{t_{on} + t_{off}} \quad (1)$$

Assim, quando $\alpha = 0$, tem-se um processo de secagem contínuo e   medida que se aumenta α , tem-se um aumento no período de têmpera.

Silva et al. (2015) fizeram um estudo comparativo da secagem de bananas pelos modos contínuo e intermitente, usando a mesma razão de intermitência ($\alpha = 0,5$) e variando o tempo

de intermitência em 0,5, 1 e 2 h. Com o uso da intermitência, a difusividade mássica efetiva teve o seu valor elevado e o estresse térmico do material foi minimizado. Pereira et al. (2020) e Silva et al. (2019) estudaram e compararam a secagem contínua e intermitente de arroz com casca e maçã, respectivamente, e ambos observaram uma redução do tempo efetivo de secagem utilizando a intermitência, e conseqüentemente, economia de energia no processo.

2.3 BANANA PASSA

A banana passa, obtida através do processo de secagem da fruta fresca, aumenta o valor comercial do produto e desempenha um papel fundamental na redução do desperdício, sendo passível de consumo por até dois anos após sua produção (RABELLO et al., 2021). A secagem por convecção é uma das técnicas mais usuais para desidratar frutas; no entanto, esse procedimento pode levar a uma degradação na qualidade, devido à exposição prolongada das frutas ao ar aquecido, provocando alterações nas propriedades sensoriais (cor, sabor, aroma etc.). No caso da banana passa, observam-se produtos finais com coloração escura, como mostrado na Figura 4, o que dificulta sua aceitação no mercado.

Figura 4. Bananas passas comercializadas a granel.



Fonte: Armazém São Vito (2023)

No processo de fabricação de banana passa, é comum utilizar bananas que estão tipicamente no estágio de maturação 7. Estas bananas são submetidas a uma série de etapas, que incluem lavagem, descasque, seleção, e opcionalmente, corte. Após isso, elas são tratadas com antioxidantes e passam por um processo de desidratação em secadores que utilizam ar quente circulante, operando a uma temperatura de 70°C, até que atinjam uma umidade final de 20% a 25%. Em seguida, as bananas desidratadas são acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados, o que ajuda a uniformizar a umidade. Por fim, elas são embaladas e armazenadas para posterior comercialização (EMBRAPA, 2021).

A banana seca, contém uma quantidade substancial de açúcares e é considerada um alimento de alto valor nutricional que é facilmente absorvido pelo organismo. Em termos de valor energético, ela fornece cerca de 318 calorias por cada 100 gramas, o que significa que o consumo de 125 gramas por dia seria suficiente para atender a cerca de um quarto das necessidades alimentares de um menino de 10 anos em termos de energia, carboidratos, proteínas de origem vegetal, potássio, ferro e magnésio. Além disso, essa quantidade também supriria aproximadamente um oitavo das necessidades diárias de fósforo, cloro, zinco e vitamina C (TRAVAGLINI, 2002).

2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Em muitos experimentos, é necessário investigar os efeitos de dois ou mais fatores simultaneamente. Nesses casos, os planejamentos fatoriais se mostram altamente eficazes. Essa abordagem permite que cada experimento, ou réplica do experimento, seja conduzido considerando todas as combinações possíveis dos níveis de cada fator em estudo (ANSELMO, 2020).

De acordo com Montgomery (2013), os planejamentos fatoriais são particularmente recomendados quando se lida com múltiplos fatores e o objetivo é identificar quais desses fatores têm o maior impacto sobre a resposta desejada. Isso ocorre porque um planejamento fatorial completo é capaz de explorar todo o espaço amostral associado aos experimentos, permitindo uma análise abrangente das interações entre os fatores e a resposta. Essa abordagem torna-se especialmente valiosa quando se busca entender a contribuição relativa de cada fator para os resultados do experimento.

O planejamento fatorial 3^k é um tipo de planejamento experimental que é utilizado para estudar o efeito de vários fatores, cada um com três níveis diferentes, baixo (-1), intermediário (0) e alto (+1), em uma resposta específica. Neste contexto, "k" representa o número de fatores em estudo. Esse tipo de planejamento é uma extensão do planejamento fatorial tradicional, que geralmente lida com fatores em dois níveis. O modelo de regressão de um determinado processo utilizando o planejamento fatorial 3^2 é dada pela Equação 2, que descreve cada variável de interesse (Z) em função das variáveis manipuladas (X e Y) do processo combinadas aos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} , β_{11} e β_{22} .

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_{12} XY + \beta_{11} X^2 + \beta_{22} Y^2 \quad (2)$$

em que β_0 é um termo constante, β_1 e β_2 são os coeficientes dos efeitos lineares, β_{11} e β_{22} são os coeficientes dos efeitos quadráticos e β_{12} é o coeficiente do efeito de interação entre as variáveis de estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO E PREPARO DAS AMOSTRAS

As bananas da variedade Prata utilizadas como matéria-prima neste estudo, foram adquiridas no mercado local da cidade de Lavras, Minas Gerais. Com o objetivo de reduzir qualquer potencial influência dos estágios de maturação da fruta nos resultados de secagem, todas as amostras de banana foram selecionadas no sexto estágio de maturação, de acordo com a escala de *Von Loesecke*. Esta escala classifica o estágio de maturação com base na coloração da casca da fruta, como apresentado na Figura 5 (CEAGESP, 2006).

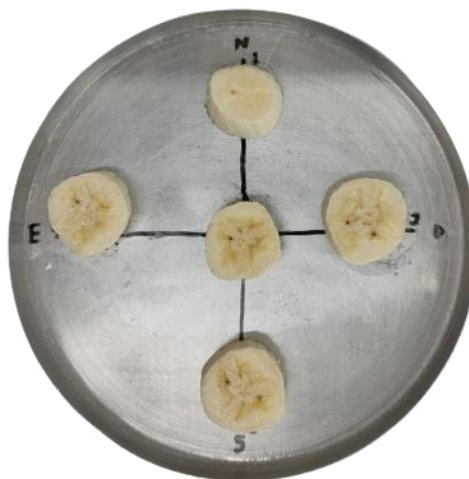
Figura 5. Escala de maturação de Von Loesecke.



Fonte: CEAGESP (2006).

A casca da fruta foi higienizada com um pano úmido e, logo após, descascada. Com o auxílio de uma faca de cozinha e um paquímetro digital, foram cortadas 5 rodelas com espessuras de 1 cm e dispostas em uma bandeja de alumínio de 16 cm de diâmetro, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6. Fotografia das amostras de banana *in natura* cortadas em rodelas.



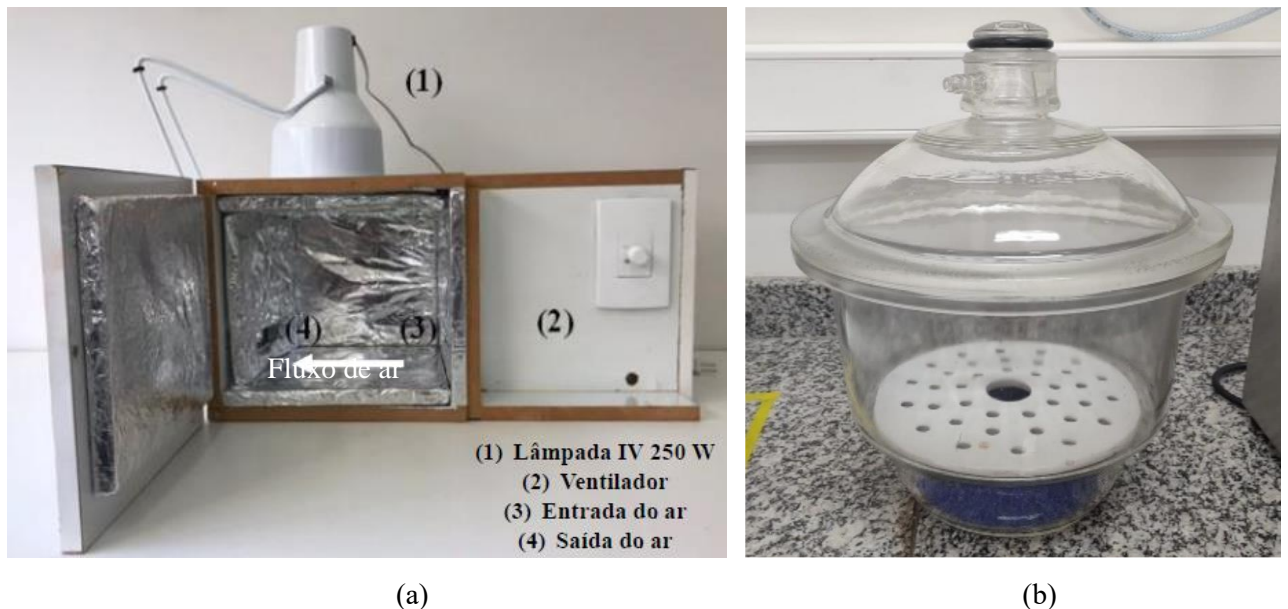
Fonte: Autora (2023).

3.2 EQUIPAMENTO DE SECAGEM

O secador híbrido, ilustrado na Figura 7, foi construído utilizando painéis de MDF com dimensões de 28,0 x 28,0 x 25,0 cm. A câmara de secagem foi isolada com placas de isopor com espessura de 1,5 cm para minimizar a dissipação de calor para o ambiente circundante. Essas placas de isopor foram revestidas com papel alumínio para refletir os raios infravermelhos e aumentar a sua influência sobre a amostra durante o processo de secagem.

Uma lâmpada infravermelha com uma potência de 250 W foi posicionada a uma distância de 23,0 cm acima do centro da amostra, o que coincidia com o centro da base da câmara e com o centro da bandeja de alumínio. Um ventilador era utilizado para direcionar o fluxo de ar de secagem à temperatura ambiente através do interior da câmara, seguindo uma trajetória paralela à superfície da amostra, indo da direita para a esquerda. Na Figura 7(a), é possível visualizar o protótipo do secador infravermelho assistido por convecção e seus respectivos componentes. Nos ensaios com intermitência, durante o período de têmpera a amostra foi transferida do secador híbrido para um dessecador, ilustrado na Figura 7(b).

Figura 7. (a) Fotografia do protótipo do secador IV assistido por convecção e (b) do dessecador utilizado durante os ensaios com intermitência.



Fonte: Autora (2023).

3.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

As amostras foram secas no secador híbrido infravermelho assistido por convecção de ar não aquecido conforme um planejamento fatorial 3^2 com duas réplicas no ponto central, onde

as variáveis manipuladas são a potência (P) do infravermelho variando em 118 W, 178 W e 238 W e a razão de intermitência (α) variando em 0, 0,333 e 0,667. A velocidade superficial do ar permaneceu constante no valor de 1,5 m/s.

Tabela 1. Variáveis reais e codificadas do planejamento fatorial 3^2 com duas réplicas no ponto central.

Ensaio	Variável real		Variável codificada	
	P (W)	α (-)	P'	α'
1	118	0	-1	-1
2	118	0,333	-1	0
3	118	0,667	-1	1
4	178	0	0	-1
5	178	0,333	0	0
6	178	0,667	0	1
7	238	0	1	-1
8	238	0,333	1	0
9	238	0,667	1	1
10 (C)	178	0,333	0	0
11 (C)	178	0,333	0	0

Fonte: Autora (2023).

A umidade relativa do ar foi medida com a ajuda de um termo-higrômetro digital IMPAC (IP-780) no início e ao final da secagem e então feita uma média desses valores. A potência do infravermelho era estabelecida medindo a corrente elétrica com o auxílio de um multímetro digital alicate com termopar KRAD01 (*Kript*), o qual também era utilizado para monitorar a temperatura da amostra, de modo que o sensor do termopar era posicionado na superfície da rodela central. A velocidade do ar de secagem era ajustada utilizando um termoanemômetro TAD-500 da *Instrutherm* e controlada por meio de um potenciômetro manualmente ajustável. Os valores desses parâmetros foram definidos com base em trabalho anterior de nosso grupo de pesquisa (SOUZA, 2022).

Como dito anteriormente, os ensaios com razão de intermitência iguais a zero são caracterizados por uma secagem contínua, de maneira a amostra não é transferida para o dessecador ($t_{\text{off}} = 0$), ficando todo processo de secagem dentro do secador híbrido. Nos ensaios com $\alpha = 0,333$, o período de têmpera foi de 10 min. Assim, a amostra ficava 20 min dentro do secador ($t_{\text{in}} = 20$) e 10 min dentro do dessecador (t_{off}), fechando um ciclo de 30 min. Já para os ensaios com $\alpha = 0,667$, foi utilizado um tempo de intermitência de 20 min. Dessa forma, a amostra ficava 10 min no secador e 20 minutos no dessecador, completando, também, um ciclo de 30 min. Os valores de razão de intermitência utilizados neste trabalho foram selecionados

em concordância com outros trabalhos da literatura (JUMAH, 1995; PAN et al., 1998; YANG et al., 2013; CHIN e LAW, 2010).

Ao longo das secagens, o monitoramento da massa da amostra foi feito com a ajuda de uma balança eletrônica AD4200 (Marte), com precisão de 0,01g em intervalos tempos pré-determinados. Como em alguns casos as amostras não atingiram a umidade de equilíbrio, utilizou-se a Equação 3 para estimá-las. Essa equação retrata um ajuste do modelo de Oswin Modificado às isothermas experimentais de dessecção para bananas e é considerado confiável dentro de um intervalo específico de condições, o qual abrange temperaturas situadas entre 13 e 40 °C e umidades relativas entre 0,5 e 0,8 (PHOUNGCHANDANG; WOODS, 2000).

$$X_{eq} = \frac{16,68 - (0,1212 \cdot T_a)}{\left(\frac{1}{RH} - 1\right)^{1/0,902}} \quad (3)$$

O adimensional de umidade (*moisture ratio* - MR) foi calculado conforme a Equação 4, em que X_0 , é a umidade inicial da amostra, X_{eq} é a umidade de equilíbrio, e X é a umidade de interesse no momento da pesagem.

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (4)$$

A taxa de secagem (*drying rate* - DR) foi encontrada com base na Equação 5, e é a razão entre a diferença de umidade pela diferença de tempo.

$$DR = - \frac{X_{n+1} - X_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (5)$$

Por fim, vale ressaltar que os ensaios apresentados no planejamento experimental foram executados de forma aleatória, a fim de diminuir possíveis influências externas.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA BANANA SECA

É inevitável que a qualidade dos produtos alimentícios sofra alterações durante o processo de secagem, portanto é importante avaliar as características do produto seco para garantir a integridade sensorial e nutricional, garantindo a aceitação do produto no mercado consumidor. Além disso, a avaliação do produto seco orienta para possíveis ajustes necessários no processo de secagem visando assegurar padrões elevados de qualidade.

3.4.1 Determinação da Umidade

A umidade final desempenha um papel significativo na avaliação da estabilidade de um produto, uma vez que a redução do teor de água em um material resulta em menos água disponível para reações que levam à deterioração, causadas por micro-organismos e enzimas. Em outras palavras, quanto menor a umidade de um produto agrícola ou alimentício, menor é a probabilidade de degradação e deterioração, o que pode prolongar a vida útil e manter a qualidade do produto ao longo do tempo. Portanto, controlar e conhecer a umidade final é fundamental para garantir a conservação e a segurança dos produtos agrícolas.

Para a determinação da umidade das amostras de banana passa, utilizou-se o método gravimétrico, no qual, as amostras, depois de secas no secador, são colocadas em uma estufa a 105 ± 3 °C por 24h. As Equações 6 e 7 foram usadas para encontrar a umidade final em base seca ($X_{b.s.}$) e base úmida ($X_{b.u.}$), respectivamente.

$$X_{b.s.}(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f} \cdot 100 \quad (6)$$

$$X_{b.u.}(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (7)$$

em que m_i é a massa úmida logo após a utilização do secador, e m_f é a massa seca depois de 24h na estufa.

3.4.2 Diferença Total de Cor

A diferença total de cor (ΔE) das rodela de banana foi calculada pela Eq. 11. Este parâmetro permite comparar a cor da banana após a secagem no secador híbrido com a cor da fruta *in natura*. Com o uso do *software* Photoshop (Adobe) e a partir de fotos das amostras antes e após as secagens tiradas com um celular Xiaomi Redmi Note 10 Pro, foram obtidos os parâmetros a, b e L.

As amostras foram avaliadas com a escala CIE $L^*a^*b^*$, que contempla três coordenadas de cor. A luminosidade (L^*) varia de 0, para o preto, até 100 para o branco, a^* positivo é uma medida do vermelho e o a^* negativo do verde, o b^* positivo é uma medida do amarelo e o b^* negativo do azul. Os parâmetros médios obtidos através do *software* (a, b e L) foram convertidos para o formato padrão, pelo uso das Equações 8, 9 e 10.

$$L^* = \frac{L}{255} \cdot 100 \quad (8)$$

$$a^* = \frac{240 \cdot a}{255} - 120 \quad (9)$$

$$b^* = \frac{240 \cdot b}{255} - 120 \quad (10)$$

Para o cálculo de ΔE , L_0^* , a_0^* e b_0^* foram os parâmetros obtidos para a amostra *in natura*, enquanto L^* , a^* e b^* são os parâmetros da amostra após o processo de secagem (YAM; PAPADAKIS, 2004).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (11)$$

3.4.3 Índice de Escurecimento

O índice de escurecimento (*Browning index* - BI), que indica a pureza da cor marrom, ou seja, o escurecimento da amostra após a secagem, foi estimado utilizando a Equação 12, em que a coordenada x é encontrada com base na Equação 13 (VISHWANATHAN et al., 2010).

$$BI = \frac{100 \cdot (x - 0,31)}{0,17} \quad (12)$$

$$x = \frac{a^* + (1,75 \cdot L^*)}{(5,645 \cdot L^*) + a^* - (3,012 \cdot b^*)} \quad (13)$$

3.4.4 Análise Média da Cor das Amostras

Para uma análise qualitativa da cor das amostras de banana *in natura* e seca também foi utilizado o *software* Photoshop (Adobe). No entanto, a escala de cor empregada foi a RGB. No modelo de cores RGB, a definição de cada tonalidade depende da presença de vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*) em sua composição. Para facilitar a representação digital, a maioria dos formatos de arquivos atuais adota valores inteiros no intervalo de 0 a 255 para descrever essas quantidades. Nesse contexto, o valor 0 denota a total ausência de intensidade, enquanto o valor 255 representa a intensidade máxima. Essa codificação simplificada permite a representação precisa de uma ampla gama de cores no mundo digital (YAM; PAPADAKIS, 2004).

Utilizando o *software* Microsoft Word na guia Design, Cores e Personalizar Cores foi selecionado o modelo de cores RGB e inserido os valores médios de cada tonalidade (vermelho, verde e azul) obtidos através da análise da imagem no *software* Photoshop. Em posse desses valores, o Microsoft Word devolve a cor desejada.

3.5 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO₂

Para atingir o objetivo de reduzir as emissões de gases que contribuem para o efeito estufa (GEE) em 80-95% até 2050, em comparação com os níveis de 1990, as indústrias têm de melhorar a eficiência energética de seus processos. Melhorar a eficiência energética é considerada a medida mais promissora para mitigar as alterações climáticas, uma vez que o consumo de energia e a emissão de dióxido de carbono na atmosfera estão interligadas (IEA, 2015).

O consumo específico de energia (SEC) estabelece uma relação direta entre a quantidade de energia consumida e a quantidade de umidade que é evaporada durante o processo. Quanto menor o valor do SEC, mais eficiente é o processo de secagem, pois isso indica que menos energia é necessária para remover a umidade dos materiais. Isso é fundamental para a análise e otimização de sistemas de secagem, contribuindo para a redução de custos e o uso eficiente dos recursos energéticos.

Para tal, com o auxílio de um multímetro digital alicate com termopar KRAD01 (Kript), foi medido o valor da tensão da rede e das correntes da lâmpada infravermelha e do ventilador. Então, foi calculado o valor da potência total utilizada no processo de secagem para cada ensaio, conforme a Equação 14, em que se multiplica a tensão da rede (V_{rede}) pela soma das correntes da lâmpada infravermelha (I_{IV}) e do ventilador (I_{vent}).

$$P_{Total} (W) = V_{rede} \cdot (I_{IV} + I_{vent}) \quad (14)$$

De posse dos valores da potência total, calculou-se o SEC, que é a razão da energia consumida, ou seja, a potência multiplicada pelo tempo de secagem, e a massa de água evaporada até o tempo considerado, como exemplificado pela Equação 15.

$$SEC (kWh/kg_{\text{água evaporada}}) = \frac{P_{Total} (kW) \cdot t (h)}{m_{\text{água evaporada}} (kg)} \quad (15)$$

Para o cálculo do consumo específico de energia nos diferentes ensaios de secagem, o tempo de secagem e a massa de água evaporada foram determinados por meio de regressões lineares utilizando-se o *software* Excel para a umidade de 57,26% b.u. (base úmida), que representa a maior umidade final obtida considerando todas as condições experimentais avaliadas.

As emissões de dióxido de carbono para cada ensaio foram calculadas com base na potência total consumida, no tempo de secagem e no fator de emissão de CO₂ relatado pelo

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2022). Os fatores de emissão médios de CO₂ para energia elétrica, usados em inventários, têm o propósito de estimar a quantidade de CO₂ associada a uma produção específica de energia elétrica. Esses fatores realizam uma média das emissões provenientes da geração de eletricidade, considerando todas as usinas que estão envolvidas na produção, não se limitando apenas àquelas em operação no momento. Isso fornece uma visão mais abrangente das emissões ligadas à produção de energia elétrica, abarcando o conjunto de fontes que contribuem para a matriz energética e suas emissões de CO₂ associadas. Essa abordagem considera a complexidade da rede de geração de eletricidade e contribui para análises ambientais mais completas e precisas (GOV, 2023). A Equação 16 fornece o cálculo para quantificar as emissões de CO₂ (em toneladas) utilizando o valor do fator médio anual de 2022, que é 0,0426 ton_{CO_2}/MWh (MINISTÉRIO DA TECNOTOLOGIA E INOVAÇÃO, 2023):

$$qCO_2(ton) = P (MW) \cdot t (h) \cdot 0.0426 \text{ ton}_{CO_2}/MWh \quad (16)$$

De forma similar, o tempo de secagem utilizado para calcular as emissões de CO₂ foi aquele necessário para que as amostras atingissem uma umidade de 57,26% (b.u.).

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Utilizando o *software* Statistica 7.0 e com base no planejamento fatorial 3² com duas réplicas no ponto central (ver Tabela 1), analisou-se a influência da potência infravermelha (P) e da razão de intermitência (α) no processo de secagem e em parâmetros de qualidade da banana seca. A codificação dos valores das variáveis reais potência (118, 178 e 238W) e razão de intermitência (0, 0,333 e 0,667) foi realizada conforme Equação 17, em que ξ_i é a variável real de interesse, $\bar{\xi}_i$ é a média dos valores da variável real e d_i é a diferença entre o valor da variável real máxima e mínima. Os valores das variáveis codificadas (X_i é potência codificada: P' e Razão de intermitência codificada: α') são também apresentados na Tabela 1.

$$X_i = 2 \cdot \frac{\xi_i - \bar{\xi}_i}{d_i} \quad (17)$$

Em adição, a condição ideal de operação foi obtida com um nível de confiança de 90% para tempo total e tempo efetivo e de 95% para ΔE , BI, SEC e qCO_2 , pela função desejabilidade.

Derringer e Suich (1980) encontraram uma das soluções para otimizar várias respostas, desenvolvendo o método de desejabilidade, que se baseia na ideia de que a qualidade de um produto ou processo que tem muitos recursos é completamente inaceitável, se um deles estiver

fora de um limite "desejável". O seu objetivo é conseguir converter as múltiplas variáveis respostas em uma única, combinando as respostas individuais em uma função composta, seguida por sua otimização.

Assim, para cada resposta $Y_i(x)$, uma função de desejabilidade $d_i(Y_i)$ atribui números entre 0 e 1 aos valores possíveis de Y_i , com $d_i(Y_i) = 0$ representando um valor completamente indesejável de Y_i e $d_i(Y_i) = 1$ representando um valor de resposta completamente desejável ou ideal. As desejabilidades individuais são, então, combinadas usando a média geométrica, que dá a desejabilidade global D .

A Equação 18 foi empregada para calcular a desejabilidade individual de cada variável resposta ($Y_i(x)$) a ser minimizada (tempo total e efetivo de secagem, SEC, emissão de CO₂, diferença total de cor e índice de escurecimento).

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } Y_i(x) < T_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - U_i}{T_i - U_i}\right)^s & \text{se } T_i \leq Y_i(x) \leq U_i \\ 0 & \text{se } Y_i(x) > U_i \end{cases} \quad (18)$$

onde L_i , U_i e T_i são os valores mínimo, máximo e ótimo, respectivamente, que são desejados para a resposta Y_i e $s = 1 \forall i$, considerando uma desejabilidade linear.

A Equação 19 foi, então, empregada para o cálculo da desejabilidade global (D), em que N é o número de desejabilidades individuais (CANDIOTI et al., 2014).

$$D = \left[\prod_{i=1}^N d_i(Y_i)\right]^{\frac{1}{N}} \quad (19)$$

A Tabela 2 apresenta a escala de desejabilidade, apresentada por Lazic (2016), que avalia a qualidade do produto em função do valor desse parâmetro.

Tabela 2. Classificação de desejabilidade.

Valor	Desejabilidade
1	Excelente
1 – 0,8	Muito boa
0,8 – 0,63	boa
0,63 – 0,37	Satisfatória
0,37 – 0,2	Ruim
0,2 – 0	Muito ruim

Fonte: Adaptado de Lazic (2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CURVAS DE SECAGEM

A Tabela 3 apresenta os valores médios da umidade relativa do ar (RH) e da temperatura do ar ambiente (T_a) nos dias de realização dos ensaios de secagem. Nesta tabela foram incluídos também os valores da umidade de equilíbrio da banana (X_{eq} em b.s.) obtidos para cada condição estudada. Conforme dito anteriormente, os cálculos de X_{eq} foram estimados pela Equação 3.

Conforme esperado, os ensaios de secagem que resultaram em bananas com maiores valores de X_{eq} foram aqueles em que a umidade relativa do ar ambiente era mais alta e/ou a temperatura do ar ambiente mais baixa. De maneira geral, para maiores valores de umidade relativa, o ar apresenta quantidades maiores de vapor de água e, conseqüentemente, possui uma menor capacidade de absorver umidade. Já o uso de temperaturas do ar mais elevadas, faz com que as moléculas de água se encontrem em um estado mais alto de excitação, havendo redução das forças atrativas entre elas e resultando em uma diminuição da capacidade de sorção do material (MOHAMED et al., 2005).

Tabela 3. Média da temperatura do ar ambiente, umidade relativa do ar e umidade de equilíbrio em base seca para cada ensaio de secagem.

Ensaio	Potência (W)	α (-)	T_a (°C)	RH (%)	X_{eq}
1	118	0	22,0	53,0	0,1601
2	118	0,333	23,0	59,5	0,2128
3	118	0,667	22,5	61,4	0,2344
4	178	0	23,0	54,5	0,1697
5	178	0,333	23,5	57,0	0,1899
6	178	0,667	23,0	59,7	0,2143
7	238	0	24,0	52,5	0,1539
8	238	0,333	22,0	51,5	0,1498
9	238	0,667	22,9	53,1	0,1592
10	178	0,333	23,0	57,0	0,1899
11	178	0,333	23,0	51,0	0,1452

Fonte: Autora (2023).

Os valores de X_{eq} foram, então, utilizados para a determinação dos adimensionais de umidade e as curvas de MR em função do tempo de secagem foram construídas e estão dispostas na Figura 8 para $\alpha = 0,333$ e na Figura 9 para $\alpha = 0,667$, nas quais é possível analisar e comparar o efeito da intermitência e da potência IV no tempo de secagem da banana. As curvas de MR

em função do tempo para a secagem contínua ($\alpha = 0$) foram incluídas nestes gráficos para comparação.

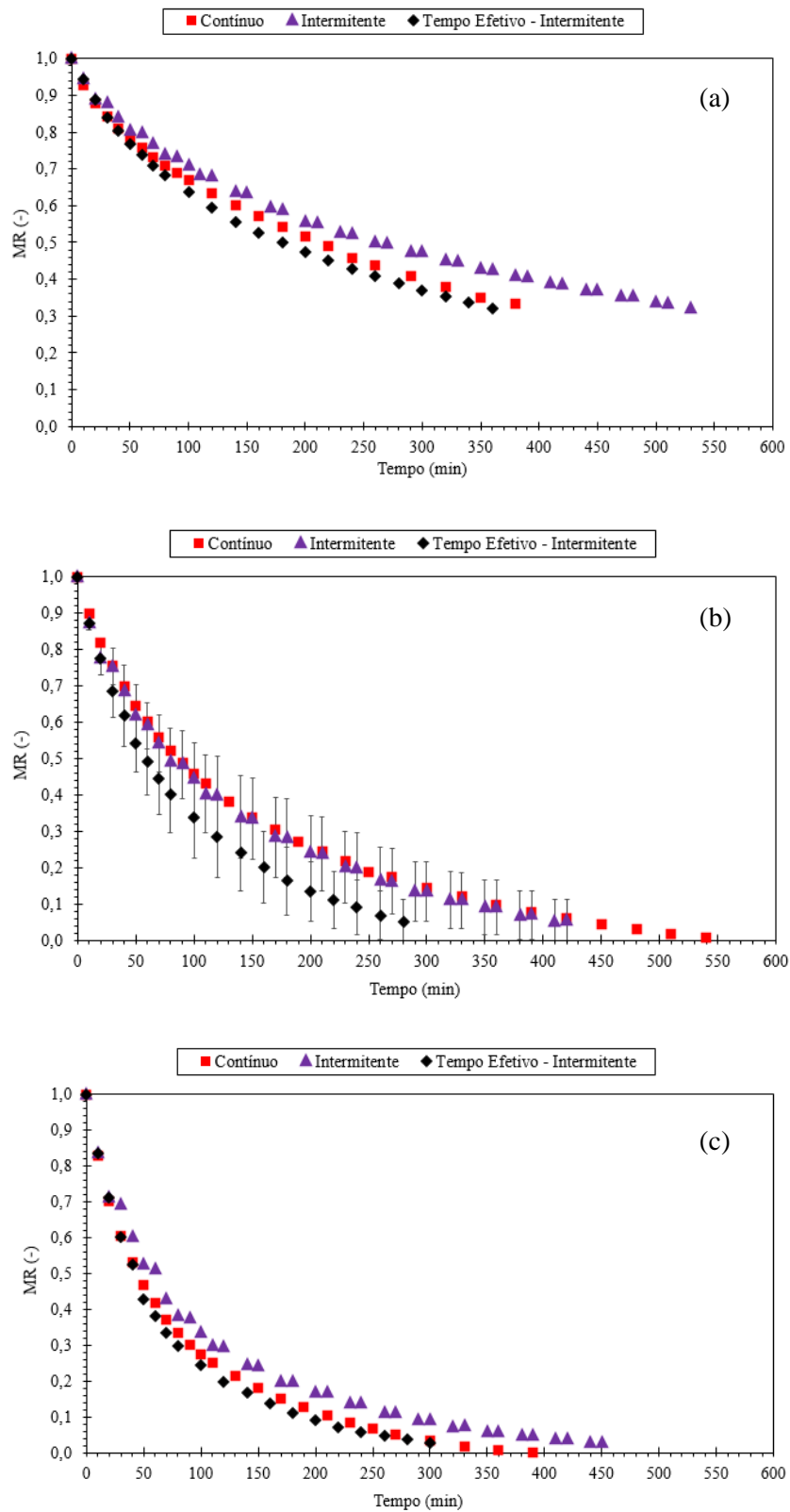
Ao comparar os efeitos da potência IV na secagem contínua ($\alpha = 0$), é claramente perceptível que, à medida que a potência IV aumenta, o tempo de secagem diminui. Uma análise das Figuras 8 (a) e 9 (a) mostra, contudo, que a umidade de equilíbrio não foi alcançada com o uso de $P = 118 \text{ W}$ no tempo do experimento. Entretanto, para atingir uma umidade final de cerca de 16% em base úmida, o tempo necessário foi de 540 min a uma potência de 178 W, e de 340 min com o uso de 238 W, o que representa uma redução de 37% no tempo de secagem.

Uma análise inicial das curvas de MR em função do tempo para as secagens intermitentes (Figuras 8 e 9) mostra que estas curvas exibiram um padrão de comportamento que se assemelha ao obtido no estudo conduzido por Silva et al. (2019) sobre secagem intermitente de pedaços de maçã. De forma similar a essa pesquisa anterior, observa-se que, mesmo durante o período de têmpera da amostra, há uma tendência à perda de uma pequena quantidade de água, embora essa perda seja menos intensa em comparação com o período em que a amostra se encontra no processo de secagem propriamente dito.

Comparando os tempos de secagem do processo intermitente (tempo efetivo) com $\alpha = 0,333$ com a secagem contínua para as amostras de banana atingirem uma umidade de 57,26% (b.u.), temos que, para a potência de 118 W o tempo reduziu de 260,5 min para 228 min, o que significa uma redução de 12,48% no tempo. Para a potência de 178 W, houve redução de 108,55 min para 62,43 min, ou seja, 42,49% e para 238 W o tempo foi de 56,40 para 46,89 min, obtendo uma redução de 16,86%. Já uma comparação entre os tempos de secagem efetivos para o processo intermitente com $\alpha = 0,667$ e o tempo de secagem dos processos contínuos, mostra que para $P = 118 \text{ W}$, o tempo reduziu de 260,5 para 180 min (valor 30,91% menor). Para 178 W, o tempo foi de 108,55 para 47,12 min, atingindo uma redução de 56,59%. Finalizando para 238 W, o tempo efetivo foi reduzido de 56,40 para 47,61 min, obtendo uma diferença de 15,59% no valor.

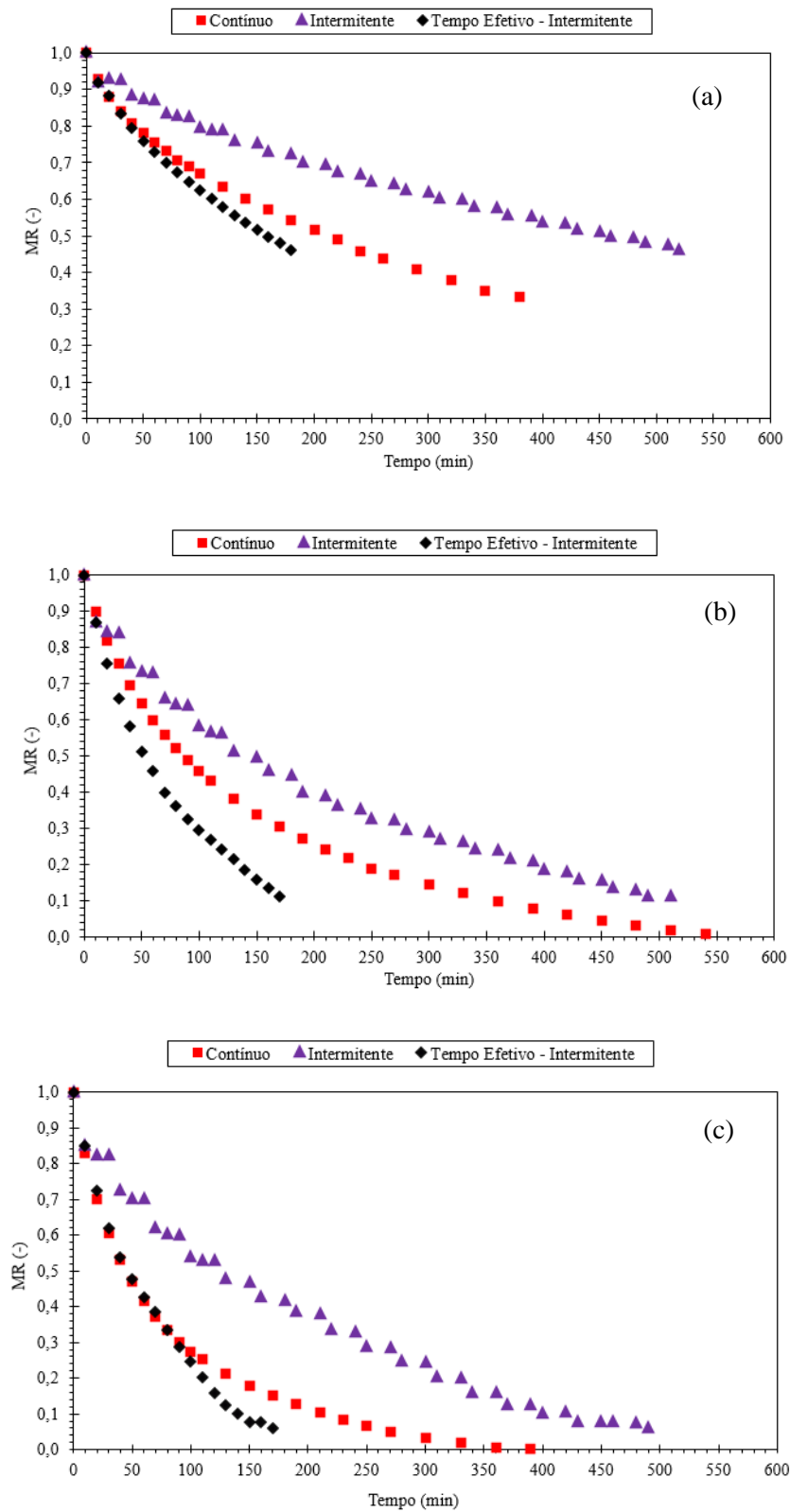
Com base nessas informações, observa-se que as maiores reduções nos tempos de secagem foram obtidas com o uso da potência de 178 W, para ambas as razões de intermitência. No entanto, foi com $\alpha = 0,667$, ou seja, um período de têmpera de 20 minutos, em que se obteve a maior redução de tempo entre as condições investigadas, atingindo 56,59%.

Figura 8. Adimensional de umidade (MR) pelo tempo com $\alpha = 0,333$ para (a) 118 W (b) 178 W e (c) 238 W.



Fonte: Autora (2023).

Figura 9. Adimensional de umidade (MR) pelo tempo com $\alpha = 0,667$ para (a) 118 W (b) 178 W e (c) 238 W.



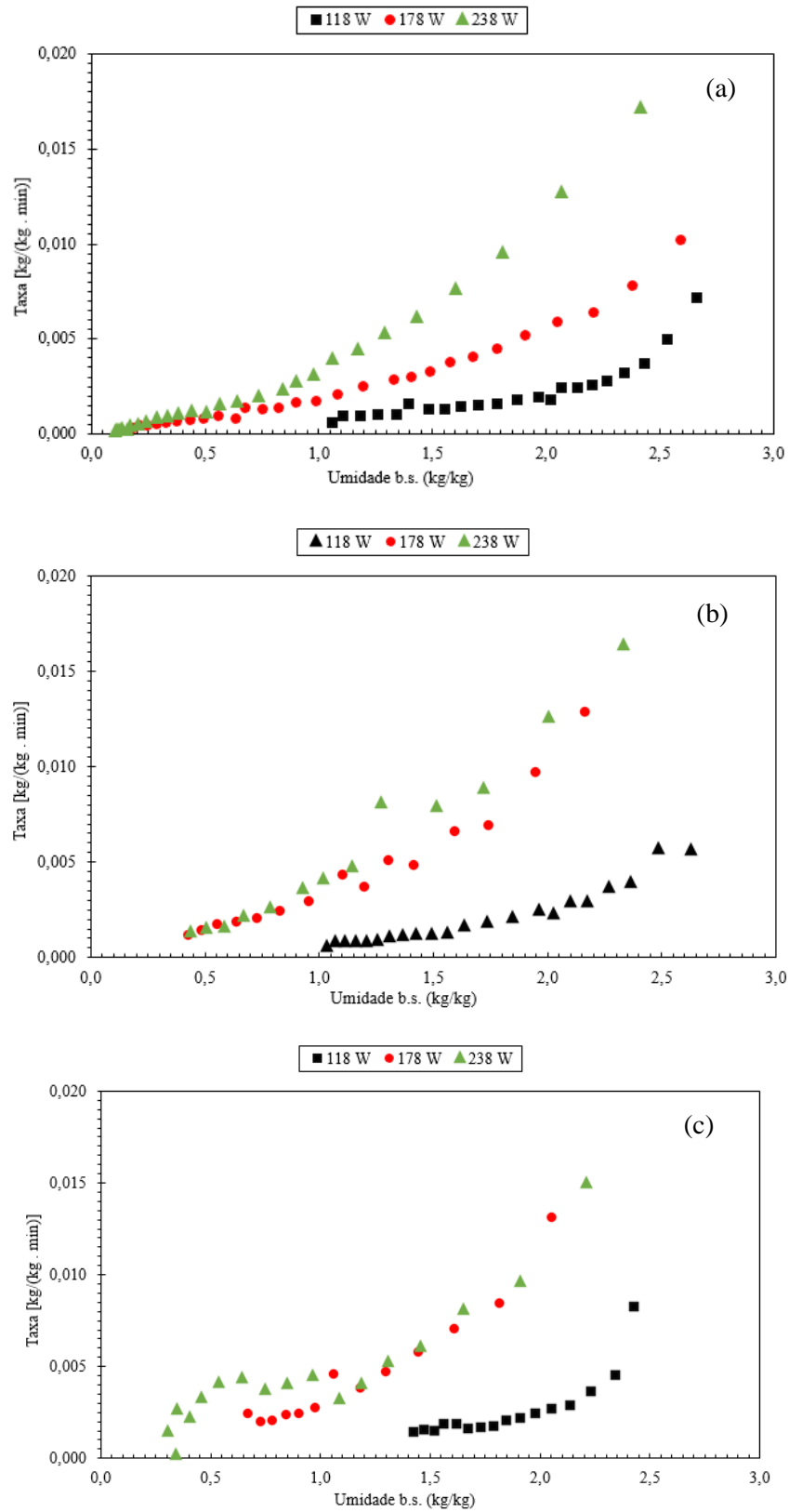
Fonte: Autora (2023).

As taxas de secagem, calculadas pelo uso da Equação 5, foram utilizadas para a construção das curvas de DR em função da umidade (b.s.) da banana ao longo do processo de secagem. Os gráficos obtidos estão dispostos nas Figuras 10 e 11, parametrizados na razão de intermitência e na potência IV, respectivamente. Para os ensaios onde $\alpha = 0,333$ e $\alpha = 0,667$, as taxas foram calculadas considerando o tempo efetivo de secagem, isto é, o tempo real em que as amostras estavam dentro do secador híbrido, desconsiderando o tempo no dessecador.

A Figura 10(a) representa as curvas para os ensaios 1, 4 e 7, em que $\alpha = 0$ (secagem contínua), a Figura 10(b) mostra as curvas para os ensaios 2, 5, 8, 10 e 11, em que $\alpha = 0,337$ e a Figura 10(c) apresenta as curvas para os ensaios 3, 6 e 9, em que $\alpha = 0,667$. Uma análise inicial dessas curvas permite constatar que o período de secagem a taxa decrescente é predominante, o que indica que o mecanismo difusivo controla o processo, ou seja, a difusão da umidade do interior da rodela de banana até sua superfície não compensa a perda de umidade da superfície da banana para o ar.

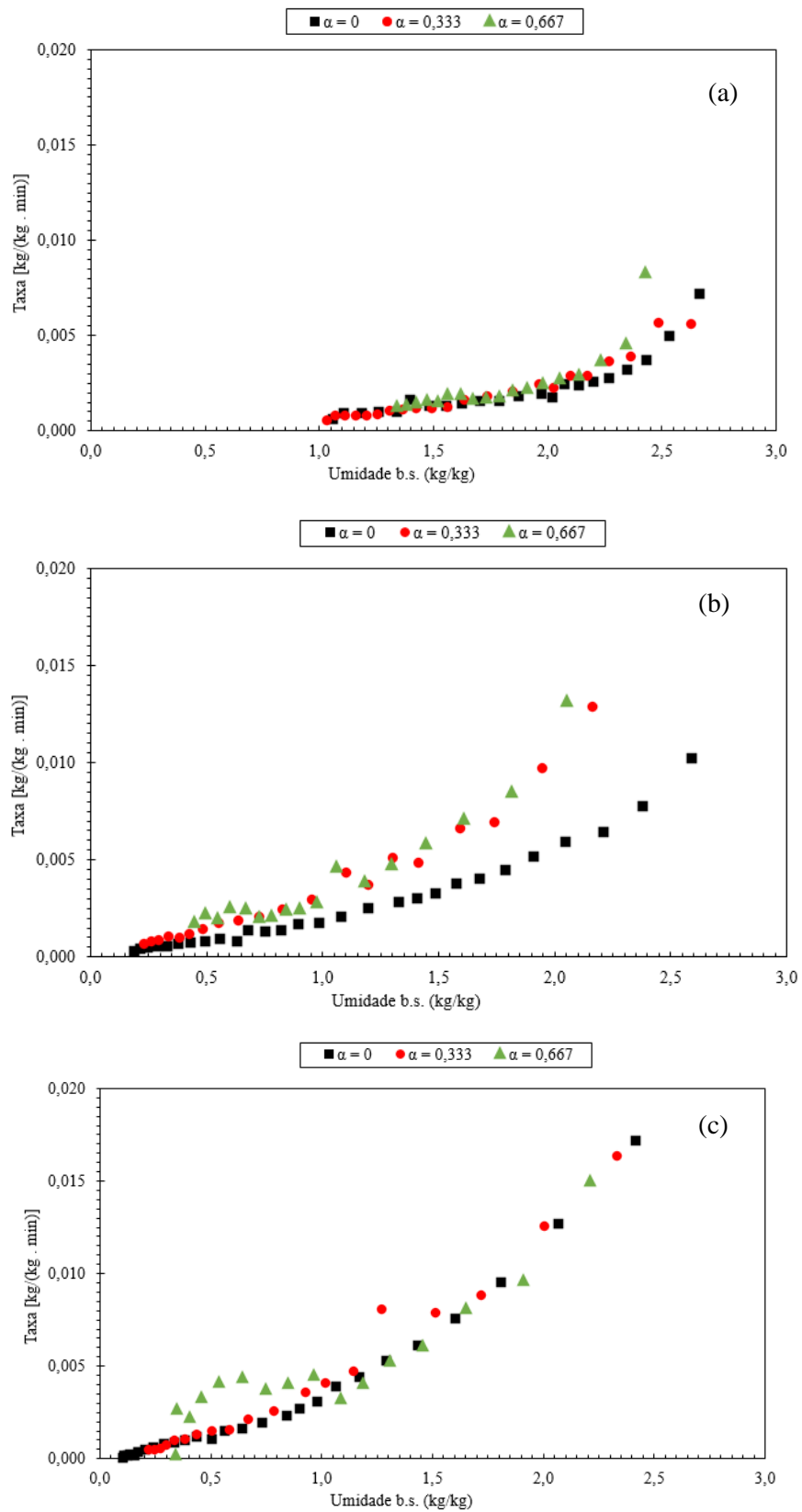
Além disso, é possível verificar a influência da potência do infravermelho nos valores das taxas de secagem, em que para a potência de 238 W foram obtidos os maiores valores de DR, enquanto para a potência de 118 W, os menores. Contudo, a mudança dos períodos de tempera não mostrou influência expressiva nos valores das taxas de secagem, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 10. Taxas de secagem pela umidade em base seca parametrizados em “ α ” para (a) $\alpha = 0$ (secagem contínua) (b) $\alpha = 0,333$ (têmpera de 10 min) e (c) $\alpha = 0,667$ (têmpera de 20 min).



Fonte: Autora (2023).

Figura 11. Taxas de secagem pela umidade em base seca parametrizados em “P” para (a) P = 118 W (b) 178 W e (c) 238W.



Fonte: Autora (2023).

4.2 EFEITO DA POTÊNCIA E RAZÃO DE INTERMITÊNCIA NOS TEMPOS DE SECAGEM TOTAL E EFETIVO

Nas tabelas 4 e 5, estão dispostos os efeitos significativos das variáveis sobre o tempo total e o tempo efetivo de secagem, respectivamente, obtidos aplicando a análise de variância (ANOVA). Foi considerado um nível de confiança de 90%, portanto, fatores para os quais a significância $p > 0,1$ não estão presentes nas tabelas.

Tabela 4. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o tempo total de secagem considerando $p < 0,1$ ($R^2 = 0,93476$).

Fator	Efeito	Desvio	p
Média	185,157	14,944	0,000
P (L)	-289,173	39,319	0,000
P (Q)	-128,309	29,160	0,005
α (L)	115,853	39,319	0,026
P * α	-94,330	48,156	0,098

Fonte: Autora (2023).

Tabela 5. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o tempo efetivo de secagem considerando $p < 0,1$ ($R^2 = 0,9689$).

Fator	Efeito	Desvio	p
Média	113,912	5,667	0,000
P (L)	-172,547	14,910	0,000
P (Q)	-67,983	11,058	0,001
α (L)	-50,253	14,910	0,015
P * α	35,875	18,261	0,097

Fonte: Autora (2023).

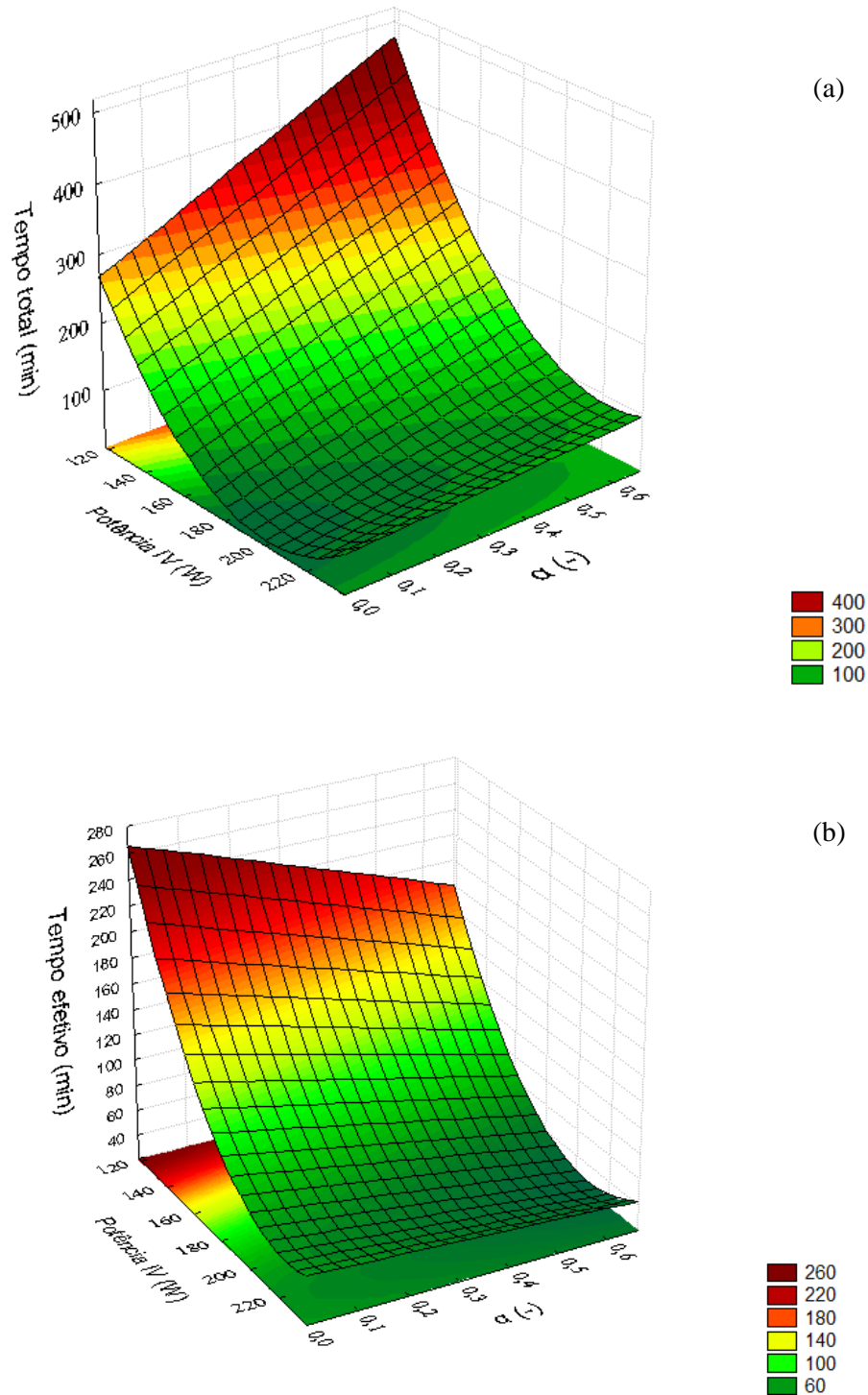
Observa-se que o efeito linear de ambas as variáveis (P e α) foi significativo nos tempos de secagem total e efetivo. O aumento da potência contribuiu para a obtenção de menores valores tanto do tempo total como do tempo efetivo, enquanto o aumento da razão de intermitência resultou em um aumento do tempo total e uma redução do tempo efetivo. Isso acontece, pois, com maiores valores de potência IV, a temperatura no interior da câmara de secagem aumenta e o material se aquece mais, eliminando vapor de água mais facilmente e atingindo o equilíbrio mais rapidamente. Já o aumento do tempo total de secagem com o aumento da razão de intermitência pode ser justificado, pois o uso de maiores valores de α está atrelado a um maior período de têmpera. Como neste período o material fica no dessecador, isto acaba por elevar o tempo total de processo. Contudo, o aumento de α apresentou um

comportamento benéfico sobre o tempo efetivo e isto provavelmente ocorreu pois o tempo efetivo desconsidera o período em que o material fica no dessecador. Silva et al. (2019) secaram de forma intermitente pedaços de maçãs em estufa a 50°C e 70°C em três diferentes períodos de têmpera ($t_{in} = 15$ min e $t_{off} = 30$ min; $t_{in} = 30$ min e $t_{off} = 60$ min; $t_{in} = 60$ min e $t_{off} = 120$ min) e seus melhores resultados, ou seja, os menores tempos efetivos, foram utilizando o menor tempo de intermitência (30 min). A diferença nos resultados deste trabalho com o de Silva et al. pode estar relacionado com os altos períodos de têmpera escolhidos pelos autores, os quais resfriam completamente a amostra, encerrando o processo de secagem que ao retornar para a estufa se inicia novamente.

O efeito de interação ($P * \alpha$) revela uma influência negativa no tempo total, ao passo que se manifesta de forma positiva no tempo efetivo. Em outras palavras, o aumento simultâneo da potência IV e da razão de intermitência resulta em uma diminuição do tempo total e em um incremento do tempo efetivo. Este comportamento pode ser observado na Figura 12, que mostra as superfícies de resposta obtidas tanto para o tempo total quanto para o tempo efetivo. Observa-se que menores tempos totais são atingidos em maiores potências IV e menores valores de α e menores tempos efetivos são obtidos em maiores potências IV e maiores α .

Os modelos gerados para o tempo total e tempo efetivo estão apresentados nas Equações 20 e 21, respectivamente, em função das variáveis codificadas potência IV (P') e razão de intermitência (α').

Figura 12. (a) Superfície de resposta para tempo total de secagem e (b) Superfície de resposta para tempo efetivo de secagem.



Fonte: Autora (2023).

$$t_{Total} = 185,16 - 144,59 \cdot P' - 64,15 \cdot P'^2 + 57,93 \cdot \alpha' - 47,17 \cdot P' \cdot \alpha' \quad (20)$$

$$t_{Efetivo} = 113,91 - 86,27 \cdot P' - 33,99 \cdot P'^2 - 25,13 \cdot \alpha' + 17,94 \cdot P' \cdot \alpha' \quad (21)$$

4.3 EFEITO DA POTÊNCIA E RAZÃO DE INTERMITÊNCIA NA DIFERENÇA TOTAL DE COR E ÍNDICE DE ESCURECIMENTO

A avaliação da cor do produto seco é de extrema importância, visto que a cor é um dos principais elementos sensoriais que os consumidores consideram ao escolher um alimento. Alterações na cor podem indicar variações no produto seco em relação à *in natura*, e isto pode estar relacionado ao uso de temperaturas inadequadas e/ou tempos de secagem excessivos. Portanto, é importante mensurar a influência das condições de secagem na degradação da cor e comparar a coloração do produto *in natura* com o produto seco.

Na Tabela 6, é possível observar os valores de ΔE , calculados pela Equação 11, para cada ensaio executado, sendo que o menor valor foi de 7,93, e foi obtido para o ensaio 1 ($P = 118 \text{ W}$ e $\alpha = 0$), enquanto o maior valor foi 49,41, atingido no ensaio 7 ($P = 238 \text{ W}$ e $\alpha = 0$). Isso significa que as condições experimentais utilizadas no ensaio 1 resultaram em uma menor alteração de cor da banana seca em relação à *in natura*. Ao contrário, para o ensaio 7, o maior valor de ΔE indica uma maior alteração da cor em relação à fruta fresca, o que indica que a potência alta interfere significativamente na cor.

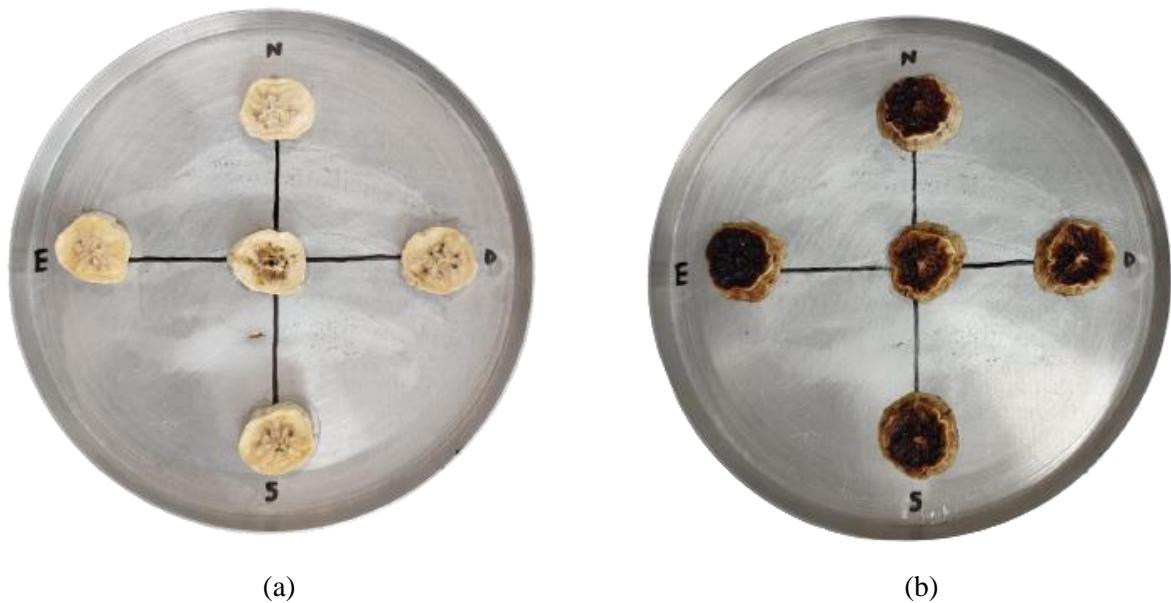
Tabela 6. Valores da diferença total de cor (ΔE), índice de escurecimento (BI), consumo específico de energia (SEC) e quantidade de CO_2 emitido ($q\text{CO}_2$) para cada ensaio experimental.

Ensaio	ΔE	BI	SEC (kWh/kg água evaporada)	$q\text{CO}_2$ (g)
1	7,93	47,54	71,15	32,68
2	11,12	67,14	53,79	28,58
3	8,70	77,70	45,89	22,03
4	18,34	99,30	32,94	17,83
5	19,23	100,02	28,84	15,40
6	10,81	62,57	17,72	7,70
7	49,41	131,87	18,44	11,19
8	31,62	137,74	21,53	10,03
9	34,25	170,58	21,60	9,84
10	35,91	147,99	21,81	8,59
11	32,74	80,72	19,32	7,84

Fonte: Autora (2023).

A Figura 13 mostra as rodelas de banana secas nos ensaios 1 e 7, de modo que é possível realizar uma avaliação qualitativa da cor. Vale ressaltar que os ensaios que resultaram em bananas com menores valores de ΔE , foram também os que a umidade final da amostra foi mais alta.

Figura 13. Amostras de rodela de bananas submetidas à secagem com (a) $P = 118\text{W}$ e $\alpha = 0$ e (b) $P = 238\text{W}$ e $\alpha = 0$.



Fonte: Autora (2023).

Além da diferença total de cor, também se avaliou o índice de escurecimento (BI), cujos valores estão apresentados na Tabela 6, que assim como o ΔE depende dos parâmetros das coordenadas de cor. O menor valor de BI foi 47,54, obtido no ensaio 1 ($P = 118\text{ W}$ e $\alpha = 0$) e o maior valor foi 170,58, atingido no ensaio 9 ($P = 238\text{ W}$ e $\alpha = 0,667$). Assim como para ΔE , nos ensaios em que BI apresentou os menores valores, a umidade final das amostras eram as mais altas, e a potência utilizada foi a menor (118W), enquanto os maiores valores de BI são nos ensaios com potência alta (238W).

Nas Tabelas 7 e 8 estão dispostos os valores dos efeitos significativos das variáveis P e α sobre ΔE e o BI, respectivamente. Foi considerado um nível de confiança de 95%, portanto, fatores em que $p > 0,05$ não estão presentes nas tabelas. Observa-se, tanto para o ΔE quanto para o BI, apenas o efeito linear da potência foi significativo, e que o uso de maiores potências levou à maiores valores de ΔE e BI. Isso está relacionado ao efeito da temperatura na degradação de cor, dado que potências IV mais altas aquecem mais o material a ser seco, como pode ser observado na Figura 14, em que se apresentam as curvas da temperatura da amostra ao longo do processo de secagem, comprovando que as maiores temperaturas foram atingidas na potência de 238W para todas as intermitências. Andrade (2017) estudou a secagem infravermelha de amêndoas de cacau e constatou o aumento de ΔE com o aumento da temperatura - fator dependente do infravermelho - no decorrer do processo. Kumar et al. (2005)

estudou a secagem infravermelha combinada a convecção forçada com ar aquecido de fatias de cebola e constatou o aumento de ΔE e BI com a temperatura.

Tabela 7. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre a ΔE considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,6676$).

Fator	Efeito	Desvio	p
Média	23,642	2,534	0,000
P (L)	29,175	6,862	0,002

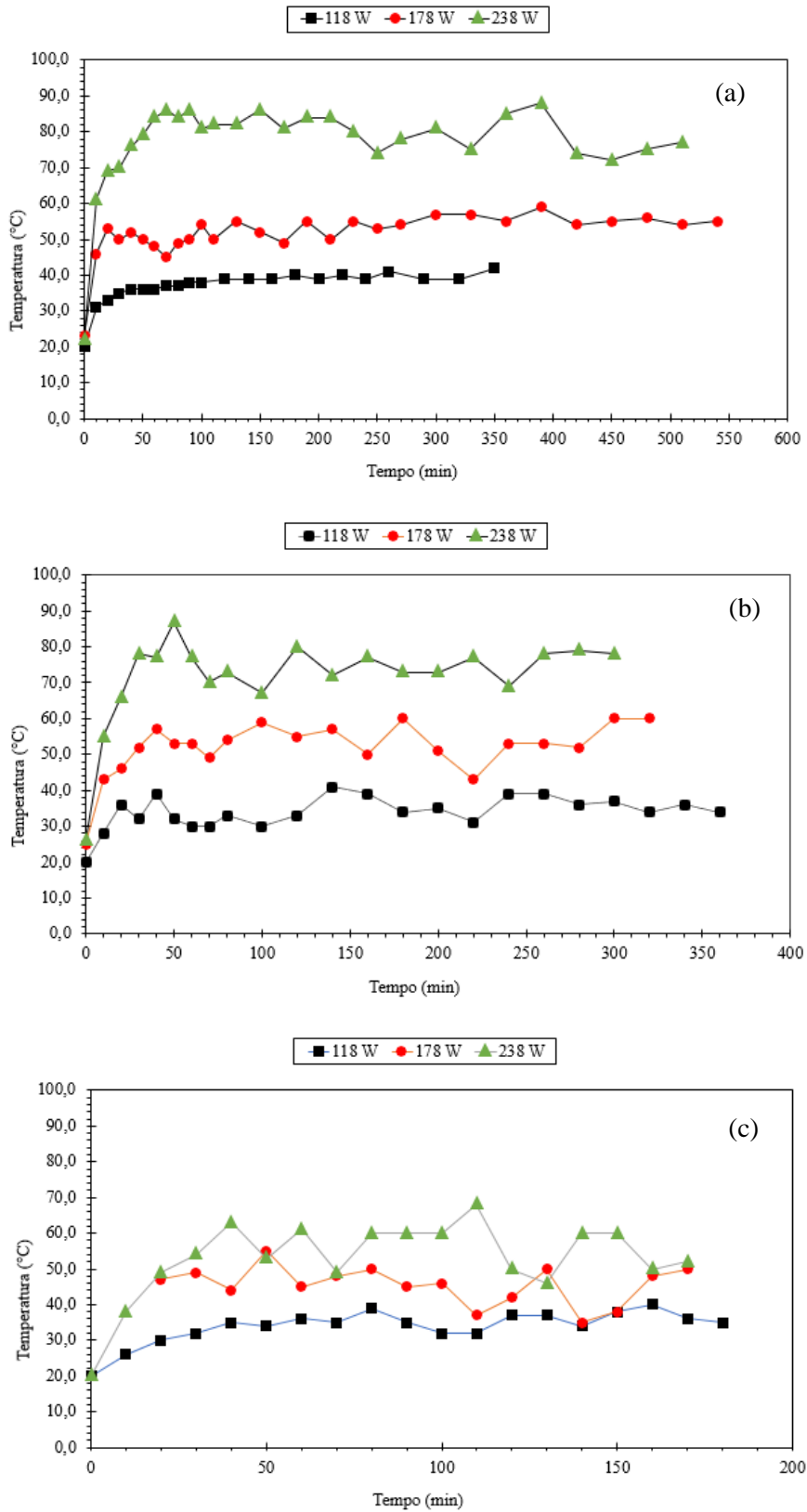
Fonte: Autora (2023).

Tabela 8. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o BI considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,6487$).

Fator	Efeito	Desvio	p
Média	102,106	7,483	0,000
P (L)	82,604	20,264	0,003

Fonte: Autora (2023).

Figura 14. Curva da temperatura superficial da banana em função do tempo parametrizadas em “ α ” para (a) $\alpha = 0$ (b) $\alpha = 0,333$ e (c) $\alpha = 0,667$.





















Fonte: Autora (2023).

O comportamento anteriormente descrito pode ser visualizado na Figura 15, enquanto as Equações 22 e 23 fornecem o modelo gerado em função da variável codificada de potência (P') para ΔE e BI, respectivamente. Em ambas as superfícies de resposta é possível observar que a razão de intermitência não influenciou nos valores de ΔE e BI, o que pode ser explicado pelo fato de que no dessecador a amostra não tem contato com fontes de calor que causam a degradação da cor.

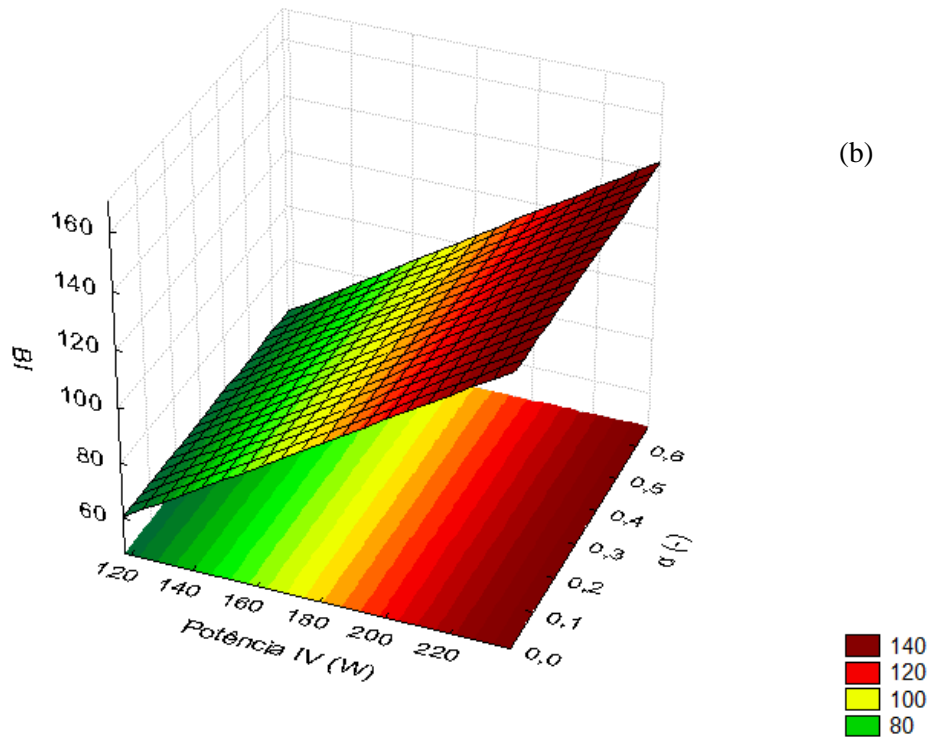
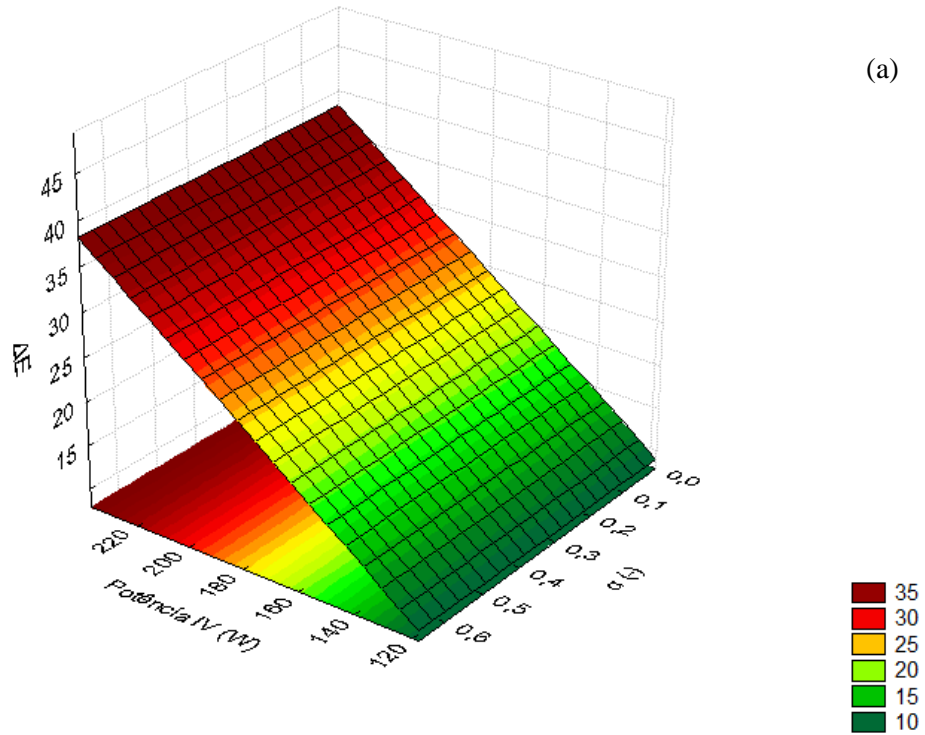
A Tabela 9 contém a cor média das amostras de banana *in natura* e passa, para cada condição avaliada nos experimentos. Nota-se, inicialmente, que existe uma variação de cor entre as bananas *in natura*, o que pode ser justificado pela variabilidade natural, inerente aos produtos biológicos. Além disso, é possível observar que as condições experimentais que resultaram em bananas passa de coloração mais escura foram a com potência IV de 238 W e $\alpha = 0$ (ensaio 7), e a utilizando $P = 238$ W e $\alpha = 0,667$ (ensaio 9). Estes resultados estão em consonância com os maiores valor de ΔE e BI obtidos para as bananas nestas condições. Uma avaliação qualitativa dos resultados permite ainda notar que, para $\alpha = 0,667$, as bananas passas apresentaram uma cor menos escura para as potências de 178 W e 238 W se comparado com as outras condições. Isso pode acontecer devido ao fato de as amostras ficarem menos tempo em contato com a radiação infravermelha, e conseqüentemente havendo menor degradação de cor.

Tabela 9. Cor média das amostras de rodela de banana.

α	0		0,333		0,667	
P (W)	<i>In natura</i>	Passa	<i>In natura</i>	Passa	<i>In natura</i>	Passa
118						
178						
238						

Fonte: Autora (2023).

Figura 15. Superfície de resposta para (a) diferença total de cor e (b) índice de escurecimento.



Fonte: Autora (2023).

$$\Delta E = 23,64 + 14,59 \cdot P' \quad (22)$$

$$BI = 102,11 + 41,30 \cdot P' \quad (23)$$

4.4 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E EMISSÃO DE CO₂

O consumo específico de energia (SEC) e a quantidade de CO₂ emitido (qCO₂) para a atmosfera foram calculados com base nas Equações 15 e 16, respectivamente e seus valores estão dispostos na Tabela 6. Os maiores valores de SEC e qCO₂ foram obtidos no ensaio 1 (SEC = 71,15 kWh/kg_{água evaporada} e qCO₂ = 32,68 g) nas condições em que P = 118 W e $\alpha = 0$ e os menores valores foram atingidos no ensaio 6 (SEC = 17,72 kWh/kg_{água evaporada} e qCO₂ = 7,70 g) nas condições em que P = 178 W e $\alpha = 0,667$.

Souza et al. (2022) avaliaram o SEC no estudo sobre a secagem infravermelha de bananas assistida por convecção de ar não aquecido em diferentes condições experimentais e obtiveram valores entre 56,64 e 12,51 kWh/kg_{água evaporada}, os quais estão dentro da faixa obtida neste trabalho.

As Tabelas 10 e 11 mostram os efeitos significativos das variáveis P e α sobre SEC e qCO₂, respectivamente. Foi considerado um nível de confiança de 95%, portanto, fatores em que $p > 0,05$ não estão presentes nas tabelas. Observa-se um efeito negativo das variáveis linear e quadrática da potência, e linear da razão de intermitência, tanto para SEC quanto para qCO₂. Ou seja, maiores valores de P e maiores valores de α contribuem para menores valores de SEC e qCO₂, o que é o desejado. O fato de o uso de maiores potências conduzirem a menores valores para SEC pode ser explicado devido às maiores quantidades de água evaporada nestas condições. Já o aumento da razão de intermitência está diretamente relacionado ao aumento do tempo de t_{empera} e conseqüente redução do tempo real em que o secador fica ligado. Logo, o uso de maiores razões de intermitência leva a um menor tempo de consumo do secador e, portanto, menor SEC. Em relação a qCO₂, o uso de maiores potências IV resultam em menores tempos de secagem e, conseqüentemente, em menores quantidades de CO₂ emitidas para a atmosfera; enquanto maiores valores de α significam menos tempo do secador ligado, e menores valores de emissão de CO₂.

Tabela 10. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre o SEC considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,9754$).

Fator	Efeito	Desvio	p
Média	33,866	1,103	0,000
P (L)	-36,420	2,903	0,000
P (Q)	-14,606	2,153	0,001
α (L)	-12,443	2,903	0,005
P * α	14,207	3,555	0,007

Fonte: Autora (2023).

Tabela 11. Efeitos das variáveis Potência e Intermitência sobre a Emissão de CO₂ considerando $p < 0,05$ ($R^2 = 0,9058$).

Fator	Efeito	Desvio	p
Média	16,496	0,999	0,000
P (L)	-17,412	2,629	0,000
P (Q)	-7,687	1,950	0,006
α (L)	-7,376	2,629	0,026

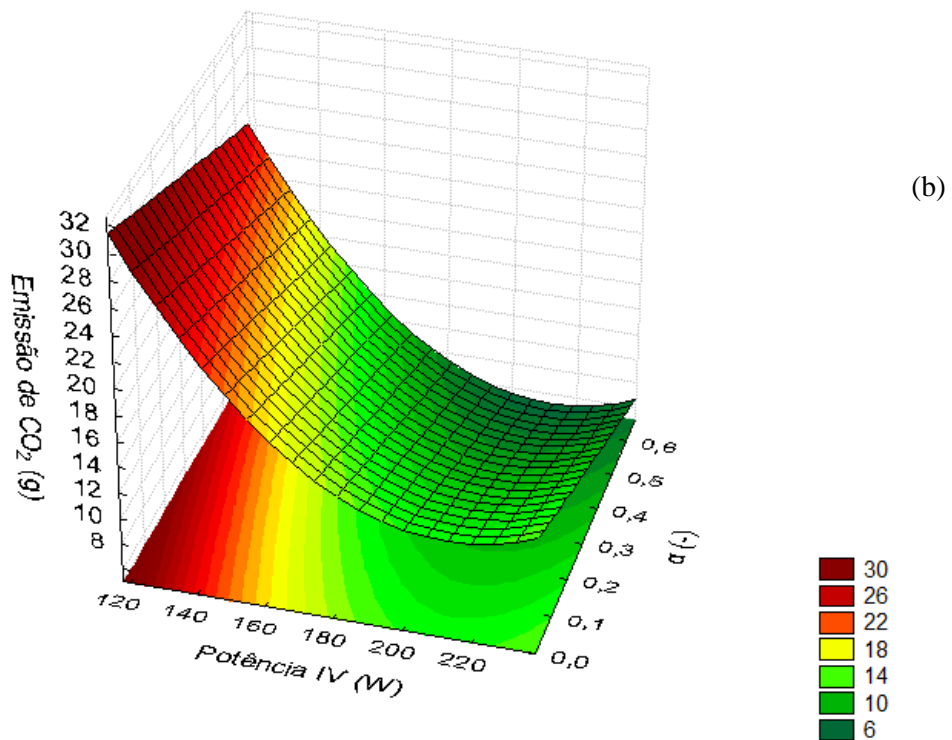
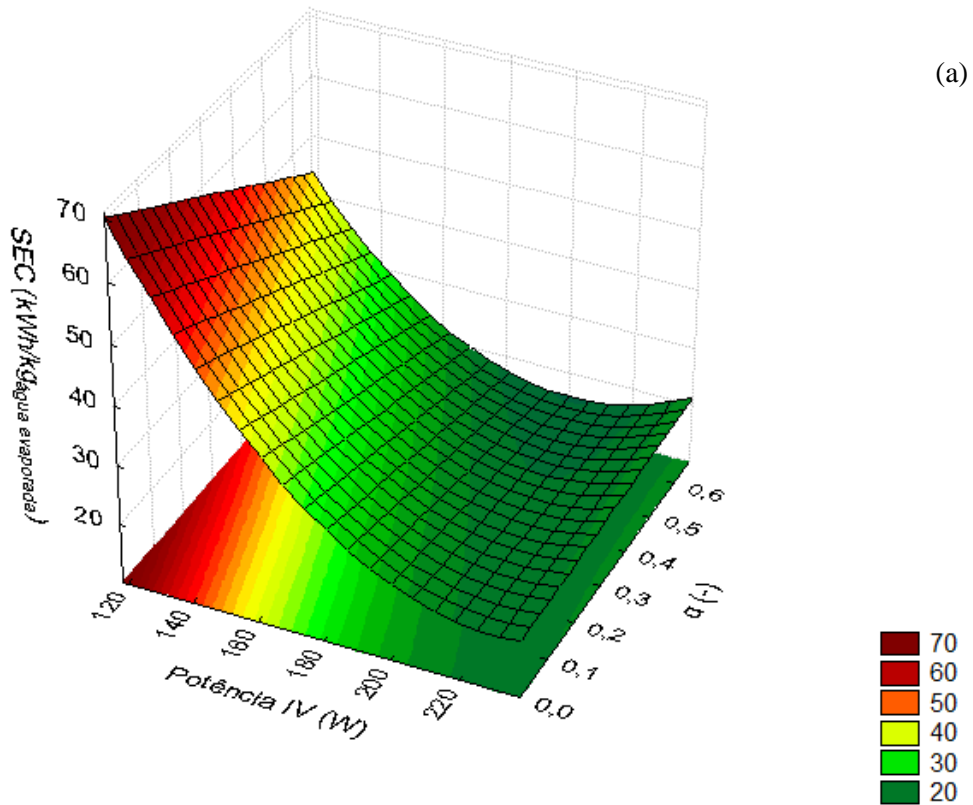
Fonte: Autora (2023).

Cabe ressaltar, entretanto, o efeito positivo da interação ($P * \alpha$) sobre SEC (ver Tabela 10), ou seja, o aumento conjunto da potência e da razão de intermitência causam maior consumo de energia. Isso pode ser atribuído ao fato de o aumento da potência implicar maior aquecimento da amostra, mas o aumento concomitante do tempo de têmpera causar o resfriamento do material quando ele está no dessecador. Ao retornar a amostra para o secador mais energia será necessária para seu aquecimento, aumentando assim o consumo energético.

A Figura 16 ilustra o comportamento anteriormente discutido para SEC e qCO_2 e as Equações 24 e 25 são os respectivos modelos gerados em função das variáveis codificadas da potência (P') e intermitência (α').

As superfícies de resposta mostram que os menores valores desses parâmetros são obtidos utilizando potências e intermitências maiores, mas deve-se atentar em encontrar um equilíbrio entre a condição de secagem e a qualidade do produto final, visto que maiores potências degradam mais a coloração da banana. No entanto, recomenda-se conduzir o processo de secagem de forma a se obter menores SEC e qCO_2 , garantindo uma secagem com maior eficiência energética e menores danos ao meio ambiente.

Figura 16. Superfície de resposta para (a) consumo específico de energia e (b) Emissão de CO₂.



$$SEC = 33,87 - 18,21 \cdot P' - 7,30 \cdot P'^2 - 6,22 \cdot \alpha' + 7,10 \cdot P' \cdot \alpha' \quad (24)$$

$$qCO_2 = 16,50 - 8,71 \cdot P' - 3,84 \cdot P'^2 - 3,69 \cdot \alpha' \quad (25)$$

4.5 UMIDADE FINAL

O processo de secagem tem como principal propósito a redução da umidade presente em um material. Determinar com precisão o nível de umidade residual em um alimento desidratado é de extrema importância, uma vez que isso desempenha um papel fundamental na avaliação da sua durabilidade e aptidão para ser armazenado e comercializado com segurança. Segundo o SEBRAE (2023), frutas desidratadas devem ser comercializadas com uma umidade final inferior a 25%, em base úmida.

Na Tabela 12 estão dispostas as umidades atingidas em cada ensaio experimental, no tempo total e no tempo efetivo de 170 minutos para fins de comparação. Observa-se que as maiores umidades finais foram obtidas quando utilizada a menor potência IV (118 W), independente da razão de intermitência empregada. Para os ensaios utilizando as maiores potências, $P = 178$ e 238 W, foram obtidas bananas passa com umidades que estão dentro da faixa de comercialização, exceto para a potência de 178 W e ensaios com maiores períodos de têmpera. Em adição, vale ressaltar que a menor umidade (9,41% b.u.) foi atingida no ensaio 7 (secagem contínua e com $P = 238$ W).

Para fins comparativos, o tempo efetivo de secagem foi fixado em 170 min para todos os onze ensaios, que foi o menor tempo de processo dentre as condições investigadas, e encontrou-se a umidade final da banana para cada condição ($X_{t=170}$ b.u. %). Apenas para o ensaio 9 foram obtidas bananas passas com umidade final inferior a 25%, (23,42% b.u.). Este ensaio obteve um SEC de 21,60 kWh/kg_{água evaporada}, qCO_2 de 9,84 g, ΔE de 34,25 e BI de 170,58. Esses parâmetros nos mostram que bons valores foram encontrados para SEC e qCO_2 ; no entanto, quando se avalia a coloração, é possível notar que a banana passa apresentou altos ΔE e BI, sendo este último o maior valor alcançado dentre todos os ensaios.

Tabela 12. Umidade final atingida no tempo total de secagem em cada ensaio e umidade alcançada no tempo efetivo de secagem fixado em 170 min.

Ensaio	Potência (W)	α (-)	X_{final} b.u. (%)	$X_{t=170}$ b.u. (%)
1	118	0	51,41	62,47
2	118	0,333	50,87	60,43
3	118	0,667	57,26	57,98
4	178	0	15,94	49,70
5	178	0,333	27,65	46,80
6	178	0,667	31,02	31,02
7	238	0	9,41	36,01
8	238	0,333	18,18	31,98
9	238	0,667	23,42	23,42
10	178	0,333	13,06	32,88
11	178	0,333	12,64	28,94

Fonte: Autora (2023).

4.6 DESEJABILIDADE

A condição ótima de operação foi determinada ao usar as Equações 19 e 20 para calcular a desejabilidade. Esses cálculos levaram em consideração as características desejáveis para o produto, que incluem a minimização da umidade final, do consumo específico de energia (SEC), das emissões de CO₂, da diferença total de cor (ΔE) e do índice de escurecimento (BI). Como indicado na análise dessas variáveis, esses parâmetros desempenham um papel crucial na obtenção da melhor condição de secagem, garantindo a aceitação do produto no mercado, consumindo menos energia e emitindo a menor quantidade possível de CO₂.

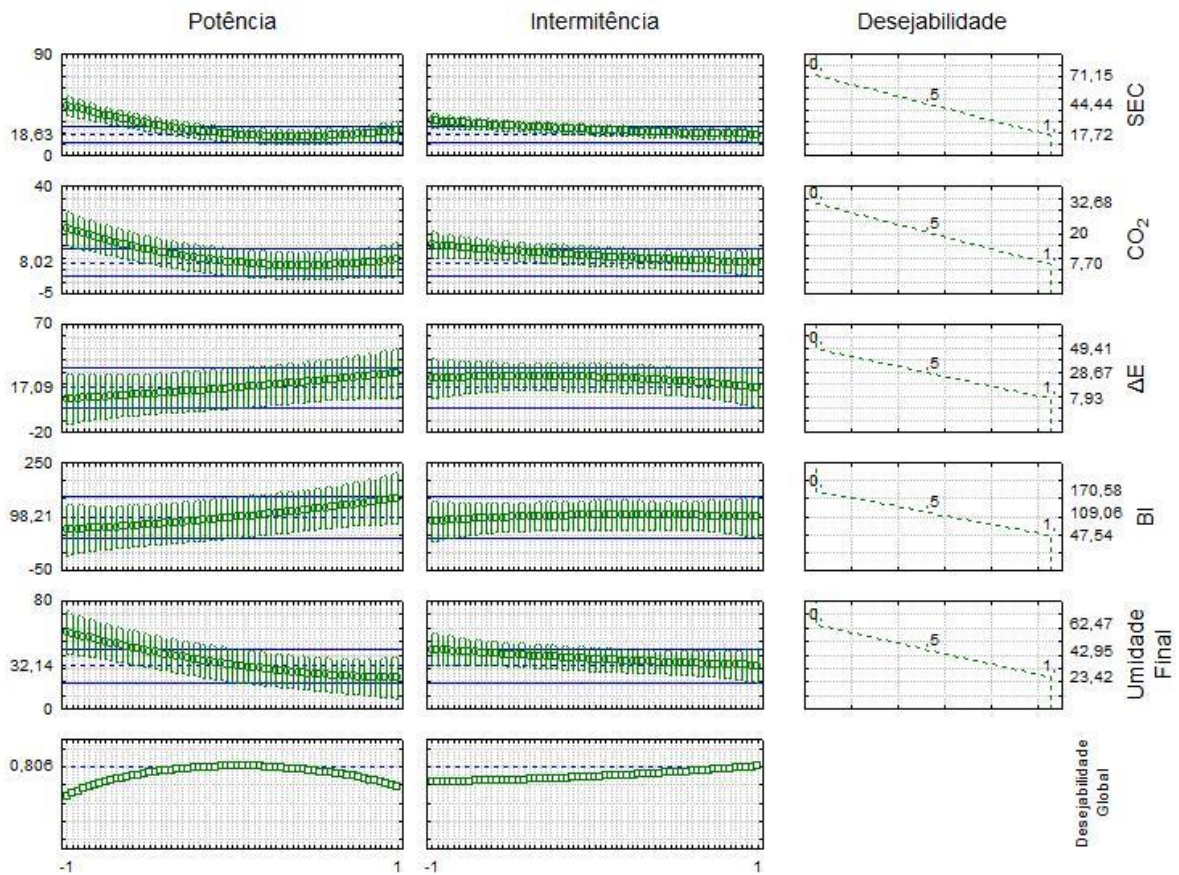
A Figura 17 ilustra a desejabilidade e os valores ideais das características do produto com base nos modelos gerados para cada parâmetro em conformidade com os padrões estabelecidos e atribuídos à condição ótima de operação, obtidos pelo *software* Statistica. Vale ressaltar que os valores da umidade final inseridos no Statistica para a análise dos dados foi fixando o tempo efetivo de 170 min. A desejabilidade global foi estimada em 0,806, o que segundo a Tabela 2 indica um produto de muito boa qualidade e que, segundo Lazic (2026), a condição ótima de operação consegue resultar em um produto de qualidade superior aos disponíveis no mercado.

A melhor condição estudada, respeitando os parâmetros desejados, é utilizando a potência de 178 W e α de 0,667, ou seja, 20 minutos de têmpera. Estes resultados estão de acordo com o previsto pela análise do tempo efetivo, uma vez que as maiores reduções no tempo foram para a potência de 178 W em relação aos três α 's estudados (0; 0,333 e 0,667) e a menor redução do tempo foi utilizando $\alpha = 0,667$. Além disso, o uso da potência de 178 W levou à

produção de bananas passa com valores intermediários de ΔE e BI, os quais não sofreram influência da intermitência. Em adição, foi nessa condição em que se obteve os menores valores de SEC e qCO_2 .

Os valores estimados para as características otimizadas do produto final foram 18,63 kWh/kg água evaporada, 8,02 g de CO_2 emitido, com uma diferença total de cor de 17,09, um índice de escurecimento de 98,21 e uma umidade final de 32,14% em base úmida. Vale ressaltar que o produto otimizado não possui umidade final dentro da faixa de comercialização de frutas desidratadas.

Figura 17. Condição ótima de operação.



Fonte: Autora (2023).

5 CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou a avaliação dos efeitos da potência infravermelha e da duração dos períodos de intermitência na secagem híbrida de bananas utilizando ar convectivo não aquecido. Foram analisados os impactos desses fatores nos parâmetros relacionados à cor do produto seco, bem como nos aspectos do processo de secagem, incluindo o tempo necessário, umidade final, o consumo específico de energia e as emissões de CO₂.

As curvas de adimensional de umidade (MR) pelo tempo de secagem mostram que os ensaios utilizando a potência infravermelha de 118 W não atingiram o equilíbrio. No processo contínuo, a potência de 238 W foi a que apresentou menor tempo de secagem. O uso da intermitência se mostrou benéfico diante dos resultados obtidos. Para todas as potências, o uso da intermitência reduziu o tempo efetivo de secagem, e a maior redução (56,59%) se deu na condição de $\alpha = 0,667$ e $P = 178$ W, conseqüentemente, também foi nessa condição em que se obteve menores valores do consumo específico de energia e de emissões de CO₂.

As curvas de taxa de secagem indicaram que a difusão controlou o processo durante todo o tempo de secagem, com exceção dos ensaios onde $\alpha = 0,667$, os quais no final da secagem tenderam para uma taxa constante, o que indica que a difusão da umidade do interior da amostra para a sua superfície consegue compensar a perda por evaporação.

Todas as respostas analisadas foram influenciadas tanto pela potência quanto pela intermitência, com exceção da diferença total de cor (ΔE) e do índice de escurecimento (BI), os quais são influenciados apenas pela variação da potência infravermelha. Menores valores de ΔE e BI são obtidos em secagem com potências menores, ou seja, onde a temperatura superficial das amostras é mais amena.

Os ensaios 4, 7, 8, 9, 10 e 11 atingiram a umidade inferior a 25% (b.u.) conforme manda a legislação, no entanto, em nenhum ensaio à 118 W atingiu essa umidade, ficando todos superiores a 50% (b.u.). Contudo, se fixar o tempo efetivo como 170 min (menor tempo atingido), apenas o ensaio 9 atingiu uma umidade comercializável (23,42% b.u.).

A condição operacional ótima é utilizando a potência de 178 W e $\alpha = 0,667$ (20 minutos de têmpera), o que resulta em um produto com uma diferença total de cor de 17,09, um índice de escurecimento de 98,21 e uma umidade final de 32,14% (b.u.), consumindo 18,63 kWh/kg_{água evaporada} e emitindo 8,02 g de CO₂ na atmosfera.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se explorar secagens mais longas a fim de que se alcance umidades de equilíbrio experimentais. Também seria interessante utilizar bananas em que estejam fora dos padrões comerciais e comparar suas características com bananas aptas para consumo. Existem estudos, como de Santos et al. (2010) que avalia o efeito de pré-tratamentos na cinética de secagem de bananas da terra e Cardoso et al. (2009) que sugere o pré-tratamento de bananas nanica como forma de melhorar os aspectos sensoriais da banana passa, portanto, seria interessante adicionar o pré-tratamentos das amostras de banana prata na secagem infravermelha assistida por convecção com ar não aquecido e avaliar seus efeitos tanto na cinética de secagem quanto nas características de cor.

7 REFERÊNCIAS

- ADAK, N.; HEYBELI, N.; ERTEKIN, C. Infrared drying of strawberry. **Food Chemistry**, v. 219, p. 109-116, 2017
- ALVES PEREIRA, J. C. et al. Continuous and intermittent drying of rough rice: effects on process effective time and effective mass diffusivity. **Agriculture**, v. 10, n. 7, p. 282, 9 Jul. 2020.
- ANDRADE D. S. **Estudo da secagem infravermelho de amêndoas de cacau nos modos contínuo, intermitente e assistido por convecção**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2017. 132p.
- ANSELMO, B. C. S. **Análise da transferência de calor por convecção natural em dissipadores de calor usando planejamento de experimentos**. Dissertação de doutorado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2020. 134p.
- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. P. **Engenharia de Processos de Separação**. Lisboa: IST Press, 2017.
- Banana é a fruta mais consumida pelos brasileiros – Sociedade Nacional de Agricultura**. Disponível em: <<https://www.sna.agr.br/banana-e-a-fruta-mais-consumida-pelos-brasileiros/>>. Acesso em: 20 set. 2023.
- Banana-passa - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/banana/pos-producao/pos-colheita/processamento/produtos/banana-passa>>. Acesso em: 25 out. 2023.
- BARBOSA, L. S.; MACEDO, J. L.; SANTOS, C. M.; MACHADO, A. V. Estudo da Secagem de Frutos Tropicais do Nordeste. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró (RN), v. 9, n. 1, p. 186-190, jan. 2014.
- BORGES, A. L. et al. A cultura da banana / Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. – 3. ed. rev. e amp. – Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2006. 110 p.: il. – (Coleção Plantar, 56).
- Brasil é o 4º produtor mundial de banana - Sebrae**. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/brasil-e-o-4-produtor-mundial-de-banana,1f00286bf0837810VgnVCM1000001b00320aRCRD>>. Acesso em: 13 ago. 2023.
- CAMELO, R. S. DA S. et al. Kinetics drying of silver banana (*Musa spp.*) in hybrid dryer. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 3, 2019.
- CANDIOTI, L. V. et al. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta**, v. 124, p. 123–138, Jun. 2014.
- CARDOSO, F. F. et al. Produção de banana-passa e avaliação sensorial. **IV Encontro de Jovens Talentos da Embrapa Cerrados**. 2009.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de secagem de alimentos**. Embrapa Cerrados - Documentos (INFOTECA-E), 2010.

CHIN, S. K.; LAW, C. L. Product Quality and Drying Characteristics of Intermittent Heat Pump Drying of *Ganoderma tsugae* Murrill. **Drying Technology**, v. 28, n. 12, p. 1457–1465, 30 Nov. 2010.

CHUA, K. J. et al. On the study of time-varying temperature drying—effect on drying kinetics and product quality. **Drying Technology**, v. 20, n. 8, p. 1559–1577, 17 Sep. 2002.

CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K. Intermittent drying of bioproducts—an overview. **Bioresource Technology**, v. 90, n. 3, p. 285–295, Dec. 2003.

DA SILVA, W. P. et al. Comparison between continuous and intermittent drying of whole bananas using empirical and diffusion models to describe the processes. **Journal of food engineering**, v. 166, p. 230–236, Dec. 2015.

DA SILVA, W. P. et al. Empirical model for describing continuous and intermittent drying kinetics of apple pieces. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, n. 4, p. 1263–1274, Apr. 2019.

DANTAS S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam-mat**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2010. 86p.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, Oct. 1980.

Dia da Banana – Fruta é cultivada em todos os estados | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/noticias/dia-da-banana-fruta-e-cultivada-em-todos-os-estados>>. Acesso em: 4 ago. 2023.

DOS SANTOS, P. et al. Influência de pré-tratamentos na cinética de secagem de banana da variedade terra (*Musa Sapientum*, Linneo). **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 4, n. 2, 17 Dec. 2010.

EL-MESERY, H. S.; MWITHIGA, G. Performance of a convective, infrared and combined infrared convective heated conveyor-belt dryer. **Journal Food Science Technology**, v. 52, p. 2721-2730, 2015.

EL-MESERY, H. S.; REHAM M. KAMEL; ALSHAER, W. G. Thin-layer drying characteristics, modeling and quality attributes of tomato slices dried with infrared radiation heating. **Bioscience Journal**, v. 38, p. e38049, 12 Aug. 2022.

EULEUTERIO, M. et al. Bananas prata (*musa* AAB subgrupo prata) ensacadas em diferentes tipos de materiais. **Revista de Engenharia e Tecnologia v. 2, n. 1, abr., 2010**.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das operações unitárias**. 2a ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 670 p.

FU, B. A.; CHEN, M. Q.; HUANG, Y. W. **Heat transfer characteristics on lignite thin-layer during hot air forced convective drying**. **FUEL**. v. 154, p. 132-139, 2015.

- FUMAGALLI, F. **Secagem de pêra em secador a microondas**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2003. 130p.
- GENG, Z. et al. Thermodynamically analysis and optimization of potato drying in a combined infrared/convective dryer. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 42, p. 102671, Feb. 2023.
- HENRÍQUEZ, C. et al. Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of Apple peel by-products. **Journal of Food Engineering**, v. 143, p. 146-153, 2014.
- IEA (International Energy Agency). **Energy and Climate Change; World Energy Outlook Special Report**; IEA: Paris, France, 2015.
- JINDARAT, W.; SUNGSOONTORN, S.; RATTANADECHO, P. Analysis of energy consumption in a combined microwave–hot air spouted bed drying of biomaterial: coffee beans. **Experimental Heat Transfer**, v. 28, n. 2, p. 107–124, 4 Mar. 2015.
- JINDARAT, W.; SUNGSOONTORN, S.; RATTANADECHO, P. Analysis of energy consumption in a combined microwave–hot air spouted bed drying of biomaterial: coffee beans. **Experimental Heat Transfer**, v. 28, n. 2, p. 107–124, 4 Mar. 2014.
- JUMAH, R.Y. **Flow and drying characteristics of a rotating jet spouted bed**. McGill University (Canada), Canada, p. 207, 1995.
- KOWALSKI, S. J.; PAWŁOWSKI, A. Energy consumption and quality aspect by intermittent drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 50, n. 4, p. 384–390, Apr. 2011.
- LAZIC, Z. R. **Design of experiments in chemical engineering: a practical guide**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.
- LOURENÇO, G. A.; FINZER, J. R. D. Secagem parcial de tomate-cereja em secador de bandejas vibradas com reciclo. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 16, n. 4, p. 334–345, Dec. 2013.
- MACHADO, A. V.; ALVES, F. M. S.; QUEIROGA, K. H. Alimentos produzidos a partir de farinha de caju, obtida por secagem. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 6, n. 3, p. 131–138, 2011. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/754>. Acesso em: 20 set. 2023.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, p.75-97, 2007.
- MARTINS, F. P. et al. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, p. 0600–0607i, 20 Oct. 2020.
- MASKAN, A.; KAYA, S.; MASKAN, M. Hot air and sun drying of grape leather (pestil). **Journal of food engineering**, v. 54, n. 1, p. 81-88, 2002.
- MCCABE, W. SMITH, J.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 5a ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991. 1130 p.

MELO K. P. **Secagem de biomassa de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) em um secador atmosférico condutivo com agitação mecânica: caracterização e avaliação do produto seco como bioadsorvente e complemento nutricional.** Dissertação de doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2010. 136p.

MELONI, P. L. S., Manual de produção de Frutas Desidratadas. **Instituto de Desenvolvimento da Fruticultura e Agroindústria – Frutal** - Sindicato dos Produtores de frutas do Estado do Ceará – Sindifruta, 2006

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>>. Acesso em: 1 out. 2023.

MOHAMED, L. A. et al. Single layer solar drying behaviour of Citrus aurantium leaves under forced convection. **Energy Conversion and Management**, v. 46, p. 1473-1483, 2005.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments.** 8a ed. 2013.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying.** 4. ed. [s.l.] CRC Press, 2014.

NADIAN, M. H. et al. Continuous real-time monitoring and neural network modeling of apple slices color changes during hot air drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 94, p. 263–274, Apr. 2015.

NINDO C.; MWITHIGA G., Infrared Drying. In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. **Infrared Heating for Food and Agricultural Processing.** New York: CRC Press, Cap. 5, p. 89 – 97, 2011.

NOWAK D.; LEWICKI P.P. Secagem infravermelha de fatias de maçã. **Ciência Alimentar Inovadora e Tecnologias Emergentes**, 5:353-360, 2004.

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; CHEN, G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Food Science & Technology**, v. 57, p. 132–145, 2016.

ONWUDE, D. I.; HASHIM, N.; ABDAN, K.; JANIUS, R.; CHEN, G.. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 241, p. 75-87, jan. 2019.

PAN, Y. K.; ZHAO, L. J.; HU, W. B. The effect of tempering-intermittent drying on quality and energy of plant materials. **Drying Technology**, v. 17, n. 9, p. 1795–1812, Sep. 1998.

PARK, K. J. B. et al. Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014.

PBMH & PIF - Programa brasileiro para a modernização da horticultura & produção integrada de frutas. **Normas de Classificação de Banana.** São Paulo: CEAGESP, 2006. (Documentos, 29)

PHOUNGCHANDANG, S; WOODS, J. L. Moisture Diffusion and Desorption Isotherms for Banana. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 4, p. 651-657, 2000.

PRAVEEN KUMAR, D. G. et al. Infrared and hot-air drying of onions. **Journal of food processing and preservation**, v. 29, n. 2, p. 132–150, Apr. 2005.

Produção Agropecuária | IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/banana/br>>. Acesso em: 3 ago. 2023.

RABELLO, A. A. et al. Utilização da radiação infravermelha na secagem de amostras de banana / Use of infrared radiation in drying banana samples. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39317–39330, 15 Apr. 2021.

RIADH, M. H.; AHMAD, S. A. B.; MARHABAN, M. H.; SOH, A. C. Infrared Heating in Food Drying: An Overview. **Drying Technology**. v. 33, n. 3, p. 322-335, 2015.

SAKAI, N; MAO W. Infrared Heating. In: SUN, D. **Thermal Food Processing: New Technologies and Quality Issues**. New York: CRC Press, Cap. 16, p.493 – 522, 2006.

SAKARE, P. et al. Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, v. 12, p. 381-398, 2020.

SANDU, C. Infrared Radiative Drying in Food Engineering: A Process Analysis. **Biotechnology Progress**, v. 2, n.3, p.109 – 119, 1986.

SARMENTO, J. D. A. et al. Qualidade pós-colheita de banana submetida ao cultivo orgânico e convencional. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p.85-93, jan. 2012.

SHI, X. et al. Effects of radiation temperature on dehydration and moisture migration in banana slices during far-infrared radiation drying. **Journal of food processing and preservation**, v. 44, n. 11, Nov. 2020.

SOUZA J. V. B. et al. Secagem infravermelha de bananas assistida por convecção. **XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Out. 2022.

SOUZA J. V. B. **Secagem infravermelha de bananas assistida por convecção**. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2022. 54p.

TADINI, Carmen Cecilia et al. Operações Unitárias na Indústria de Alimentos. Rio de Janeiro: Ltc, 2019.

TRAVAGLINI, D.A., AGUIRRE, J.M., SILVEIRA, E.T.F. **Desidratação de Frutas**. In: AGUIRRE, J.M., GASPARINO FILHO, J. . Campinas: ITAL, 2002. (Manual Técnico). Cap. 3, p.3-1 a 3-19.

VISHWANATHAN, K. H.; HEBBAR, H. U.; RAGHAVARAO, K. S. M. Hot Air Assisted Infrared Drying of Vegetables and Its Quality. **Food science and technology research** v. 16, n. 5, p. 381–388, 2010.

YAM, K. L.; PAPADAKIS, S. E. A simple digital imaging method for measuring and analysing color of food surfaces. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 137-142, 2004.

YANG, Z. et al. A comparative study on intermittent heat pump drying process of Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.ssp) seeds. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n. 4, p. 381–388, Oct. 2013.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison Between Various Methods of Analysis. **Drying Technology**, v. 14, n. 7–8, p. 1543–1573, Jan. 1996.