



JOÃO VICTOR BARBOSA DE SOUZA

**SECAGEM INFRAVERMELHA DE BANANAS ASSISTIDA
POR CONVECÇÃO**

LAVRAS – MG

2022

JOÃO VICTOR BARBOSA DE SOUZA

SECAGEM INFRAVERMELHA DE BANANAS ASSISTIDA POR CONVECÇÃO

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

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
Orientadora

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borel
Coorientadora

LAVRAS – MG

2022

JOÃO VICTOR BARBOSA DE SOUZA

**SECAGEM INFRAVERMELHA DE BANANAS ASSISTIDA POR
CONVECÇÃO**

INFRARED DRYING OF BANANAS ASSISTED BY CONVECTION

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

APROVADA em 18 de abril de 2022.

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa - UFLA

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borel - UFLA

Prof. Dr. Irineu Petri Júnior – UFLA

Prof. Dr. Hugo Perazzini - UNIFEI

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
Orientadora

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borel
Coorientadora

LAVRAS – MG

2022

Ao meu avô, Levindo, por todo apoio e amizade.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ângelo e Patrícia, por tudo que me proporcionaram durante todos esses anos. Essa vitória também é de vocês.

Ao meu irmão, Arthur, pelo apoio e pelas risadas mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos de Lavras, a cidade que me acolheu, e de Resende, minha cidade natal, por todo companheirismo nos momentos de estudo e também de descontração.

Às professoras Renata e Lidja, por toda paciência de ensinar e orientar nestes anos de graduação.

Ao corpo docente de Engenharia Química, pela dedicação em transmitir seu conhecimento para a próxima geração de engenheiros químicos.

Aos demais docentes e técnicos da Universidade Federal de Lavras, pelos ensinamentos repassados durante a graduação.

A Universidade Federal de Lavras, por oferecer um ensino de excelência para seus discentes, contribuindo com a formação de profissionais preparados para os desafios da atualidade.

“ Se eu vi mais longe, foi por estar no ombro de gigantes.”

(Isaac Newton)

RESUMO

A produção brasileira de bananas atingiu uma marca de 6,6 milhões de toneladas em 2020, com apenas 1,5% desse valor sendo destinado à exportação. Por se tratar de um produto sensível e de curta validade, o desperdício da fruta pode atingir até 40% da produção, evidenciando a necessidade de técnicas de preservação, como a secagem. A secagem de bananas resulta em um produto conhecido por banana-passa, cujo mercado consumidor tem se demonstrado promissor. Contudo, devido às condições empregadas em sua produção, as bananas-passas disponíveis no mercado costumam apresentar uma coloração muito escura, que prejudica a aceitação de consumidores, e um processo com elevado consumo energético. Diante da necessidade de obter um produto de maior qualidade, a secagem infravermelha assistida por convecção forçada é vista como uma alternativa ao método convectivo consolidado. Visto isso, o objetivo desse trabalho consiste em estudar a secagem de banana e verificar a influência das condições de secagem no produto final. Para a realização dos experimentos, as bananas foram higienizadas, descascadas e as polpas, cortadas ao meio, no sentido longitudinal, foram dispostas em bandejas de alumínio. As amostras foram submetidas a diferentes potências de radiação infravermelha (118, 178 e 238 W) e velocidades de ar de secagem (1,5, 3,0 e 4,5 m/s), em temperatura ambiente, durante 6 horas. Os resultados experimentais mostraram que o período de taxa decrescente foi o único observado nas curvas de taxa de secagem, indicando que o processo foi controlado pelo mecanismo difusivo. O modelo difusivo de Fick para placa plana semi-infinita não apresentou uma boa representação do processo ($R^2 \geq 0,7981$ e $SQR \leq 0,1872$). A umidade final das amostras variou entre 15,63 % e 61,53% em base úmida, devido às variações das condições de secagem. A diferença total de cor variou entre 6,2 e 50,99, enquanto que o consumo específico de energia variou entre 12,51 e 56,64 kWh/kg_{água evaporada}. Um planejamento fatorial do tipo 3^2 foi utilizado para avaliar a influência da potência infravermelha e da velocidade do ar de secagem na umidade final, consumo específico de energia, diferença total de cor e índice de escurecimento da banana-passa. Observou-se a influência significativa ($p < 0,1$) das variáveis operacionais na umidade final, diferença de cor total, consumo específico de energia e no índice de escurecimento. A condição ótima de operação identificada foi de 238 W e 4,5 m/s, que resultou em bananas-passas com umidade final de 35,96% em base úmida, consumo energético específico de 23,88 kWh/kg_{água evaporada}, 7,43 de diferença total de cor e 92,86 de índice de escurecimento. Verificou-se que, mesmo na condição ótima, o material ainda não atinge a umidade mínima estabelecida por lei, sendo recomendado explorar tempos de secagens maiores que 6 horas, como forma de atingir umidades adequadas para comercialização. Em contrapartida, a diferença total de cor também se demonstrou adequada, com o produto final apresentando uma coloração mais próxima da *in natura* do que as bananas-passa disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Cor. *Musa spp.* Planejamento Fatorial. Consumo Energético. Desejabilidade

ABSTRACT

Brazilian banana production reached a mark of 6.6 million tons in 2020, with only 1.5% of this value being destined for export. Because it is a sensitive product with short validity, fruit waste can reach up to 40% of production, evidencing the need for preservation techniques, such as drying. The drying of bananas results in a product known as banana-pass, whose consumer market has shown promise. However, due to the conditions used in their production, banana raisins available on the market usually have a very dark coloration, which impairs consumer acceptance, and a process with high energy consumption. Given the need to obtain a higher quality product, infrared drying assisted by forced convection is seen as an alternative to the consolidated convective method. Given this, the objective of this work is to study banana drying and verify the influence of drying conditions on the final product. To carry out the experiments, the bananas were sanitized, peeled and the pulps, cut in half, in the longitudinal direction, were arranged in aluminum trays. The samples were submitted to different powers of infrared radiation (118, 178 and 238 W) and drying air velocities (1.5, 3.0 and 4.5 m/s), at room temperature, for 6 hours. The experimental results showed that the decreasing rate period was the only one observed in the drying rate curves, indicating that the process was controlled by the diffusive mechanism. Fick's diffusive model for semi-infinite flat plate did not present a good representation of the process ($R^2 \geq 0.7981$ and $SQR \leq 0.1872$). The final humidity of the samples varied between 15.63% and 61.53% on a wet basis, due to variations in drying conditions. The total color difference varied between 6.2 and 50.99, while the specific energy consumption varied between 12.51 and 56.64 kWh/kg evaporated water. A factorial planning type 3^2 was used to evaluate the influence of infrared power and drying air velocity on final humidity, specific energy consumption, total color difference and banana-raisin darkening index. The significant influence ($p < 0.1$) of the operational variables on the final humidity, total color difference, specific energy consumption and darkening index was observed. The optimum operating condition identified was 238 W and 4.5 m/s, which resulted in banana raisins with final humidity of 35.96% on a humid basis, specific energy consumption of 23.88 kWh/kg_{evaporated water}, 7.43 of total color difference and 92.86 of darkening index. It was found that, even in the optimal condition, the material still does not reach the minimum humidity established by law, being recommended to explore drying times longer than 6 hours, as a way to achieve adequate humidity for commercialization. On the other hand, the total color difference was also adequate, with the final product being coloured closer to fresh than bananas available on the market.

Keywords: Color. *Musa spp.* Factorial Planning. Energy Consumption. Desirability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Banana-passa comercializada em Resende (RJ) (a) e Lavras (MG) (b).....	13
Figura 2 – Ilustração do espectro eletromagnético.....	14
Figura 3 – Curva de umidade em função do tempo (a) e taxa de secagem em função da umidade (b).....	16
Figura 4 – Fotografia ilustrando o estágio de maturação das bananas utilizadas nos experimentos.....	20
Figura 5 – Fotografia da amostra <i>in natura</i>	21
Figura 6 – Fotografia do protótipo do secador infravermelho assistido por convecção.....	22
Figura 7 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘v’ com P = 118 W (a), P = 178 W (b) e P = 238 W (c).....	30
Figura 8 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘P’ com v = 1,5 m/s (a), v = 3,0 m/s (b) e v = 4,5 m/s (c).....	30
Figura 9 – Diagrama de Pareto para difusividade efetiva.....	32
Figura 10 – Superfície de resposta para difusividade efetiva.....	32
Figura 11 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘v’ com P = 118 W (a), P = 178 W (b) e P = 238 W (c), e estimativas obtidas pelo modelo de Fick.....	35
Figura 12 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘P’ com v = 1,5 m/s (a), v = 3,0 m/s (b) e v = 4,5 m/s (c), e estimativas obtidas pelo modelo de Fick.....	35
Figura 13 – Temperaturas parametrizadas em ‘v’ com P = 118 W (a), P = 178 W (b) e P = 238 W (c).....	37
Figura 14 – Temperaturas parametrizadas em ‘P’ com v = 1,5 m/s (a), v = 3,0 m/s (b) e v = 4,5 m/s (c).....	37
Figura 15 – Diagrama de Pareto para umidade final da banana-passa.	38
Figura 16 – Superfície de resposta para umidade final da banana-passa.	39
Figura 17 – Bananas submetidas à potência máxima e velocidade mínima (a) e potência média e velocidade máxima (b).	40
Figura 18 – Diagrama de Pareto para diferença total de cor da banana-passa.	41
Figura 19 – Superfície de resposta para diferença total de cor da banana-passa.	42
Figura 20 – Diagrama de Pareto para índice de escurecimento da banana-passa.	43
Figura 21 – Gráfico de contorno para índice de escurecimento da banana-passa.	44
Figura 22 – Diagrama de Pareto para consumo específico de energia.	45
Figura 23 – Superfície de resposta para consumo específico de energia.	46
Figura 24 – Condição de operação ótima e valores previstos para banana-passa.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de correlação de sorção.....	17
Tabela 2 – Variáveis codificadas e em escala real do planejamento experimental.....	27
Tabela 3 – Difusividade efetiva em função da potência de infravermelho (P) e velocidade do ar de secagem (v).....	31
Tabela 4 – Estimativa das umidades de equilíbrio.....	33
Tabela 5 – Parâmetros de qualidade dos ajustes de MR pelo modelo de Fick.....	34
Tabela 6 – Cor média das amostras de banana.....	42
Tabela 7 – Classificação de desejabilidade.....	47
Tabela 8 – Comparação da cor média da banana-passa “otimizada” com as disponíveis no comércio.....	48

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1.	Banana.....	14
2.2.	Secagem	15
2.2.1.	Fundamentos do processo de secagem	15
2.2.2.	Secagem híbrida	19
2.2.3.	Parâmetros de qualidade do processo de secagem	20
2.3.	Análise estatística.....	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1.	Bananas	22
3.2.	Equipamento de secagem.....	23
3.3.	Ensaio de secagem.....	24
3.4.	Caracterização do produto seco.....	26
3.4.1.	Umidade final.....	26
3.4.2.	Diferença total de cor	26
3.4.3.	Índice de escurecimento	27
3.4.4.	Consumo específico de energia.....	27
3.5.	Análise estatística.....	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1.	Secagem	31
4.2.	Propriedades do produto seco	40
4.2.1.	Umidade final.....	40
4.2.2.	Diferença total de cor	42
4.2.3.	Índice de escurecimento	45
4.2.4.	Consumo específico de energia.....	46
4.3.	Análise de desejabilidade e otimização das condições operacionais	48
5.	CONCLUSÃO	52
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de bananas com uma produção anual de 6,6 milhões de toneladas, em 2020, e o maior consumidor do alimento, visto que a maior parcela da produção é destinada ao consumo interno e apenas 1,5% desse montante é destinado à exportação (EMBRAPA, s.d; IBGE, s.d). Apesar do alto consumo, o desperdício da fruta alcança cerca de 40% da produção devido, principalmente, ao transporte inadequado, comprometendo a qualidade e aparência de um produto sensível e de curta validade (BORGES et al., 2006; NAKNAEN; CHAROENTAHIKIJ; KERDSUP, 2016; ABAFRUTAS, 2021). Isso motiva o desenvolvimento de técnicas de preservação para prolongar a vida de prateleira do alimento e agregar valor ao produto, o que incentiva o aproveitamento consciente do alimento mesmo em estágios avançados de maturação ou com pouca aceitação.

A secagem é uma operação unitária que visa reduzir a umidade de um material sólido, por meio da eliminação da água contida no mesmo, até um valor seguro para armazenamento, prolongando sua vida útil. A redução no peso e volume do produto facilita o manuseio e estocagem, e reduz custos com embalagem e transporte (AZEVEDO; ALVES, 2017). Atualmente, as indústrias exploram a secagem de banana via convecção forçada obtendo um produto com mercado interno promissor conhecido por banana-passa. Contudo, o produto obtido por tal técnica apresenta coloração bem escura, o que reduz a aceitação e, do ponto de vista econômico, apresenta alto custo devido a menor eficiência energética atrelada ao processo (CARDOSO et al., 2009; PEKKE et al., 2013).

Diferentes técnicas de secagem têm sido avaliadas como alternativa ao método consolidado de convecção forçada, de forma a melhorar o rendimento energético do processo. A secagem infravermelha (IV) consiste em irradiar a superfície do alimento com radiação infravermelha, aquecendo-o de forma rápida sem aquecer o ar circundante, o que aumenta o rendimento energético do processo (ADAK; HEYBELI; ERTEKIN, 2017; RABELLO et al., 2021). Ao combinar duas ou mais técnicas de secagem, pode-se alcançar a sinergia entre elas em um processo ainda mais eficiente do que se fosse conduzido de forma isolada, reduzindo não só o tempo de secagem, mas também o consumo energético, como é o caso da secagem IV assistida por convecção forçada (ONWUDE; HASHIM; CHEN, 2016).

Trabalhos atuais têm demonstrado a eficiência da técnica híbrida na desidratação de morangos (ADAK; HEYBELI; ERTEKIN, 2017), maçãs (EL-MESERY; MWITHIGA, 2015), arroz integral (NACHAISIN; JAMRADLOEDLUK; NIAMNUY, 2015) e fruta *longan*

– um tipo de lichia branca - (NUTHONG et al.,2010; NATHAKARANAKULE; JAIBOON; SOPONRONNARIT, 2010). Contudo, poucos estudos dedicados a avaliar a secagem infravermelha de bananas assistida por convecção foram encontrados, podendo-se destacar os realizados por Puangsuwan et al. (2021) com bananas do cultivar Pisang-Awak.

Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar o processo de secagem infravermelha de bananas assistido por convecção forçada e sua influência na qualidade do produto, por meio da variação dos parâmetros de potência infravermelha e velocidade do ar de secagem. O processo será avaliado com base na umidade final, variação de cor e índice de escurecimento do produto, bem como com base no consumo energético específico do processo. Além disso, deseja-se determinar uma correlação, por análise estatística, para descrever a influência dos parâmetros de processo nas propriedades avaliadas e encontrar a condição ótima de operação levando em consideração o quão desejável é cada característica/propriedade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Banana

A banana (*Musa spp.*) é a fruta comestível proveniente da bananeira, pertencente ao gênero *Musa* e família das Musáceas, e que pode ser produzida em todo o território brasileiro. A produção de bananas em Minas Gerais alcançou aproximadamente 831 mil toneladas no ano de 2020, posicionando o estado como o terceiro maior produtor da fruta no país, abaixo apenas dos estados de São Paulo e Bahia, respectivamente (IBGE, [s.d.]; SEAPA, 2021). Devido ao baixo custo de produção, a banana representa mais do que apenas um produto agrícola, é uma importante fonte de vitaminas A, B e C, e minerais, como o potássio (BORGES et al., 2006).

O consumo de banana também fornece uma boa quantidade de carboidratos, como o amido, e fibras (SIDHUR; ZAFAR, 2018). O amido glicêmico é convertido à glicose no trato digestivo, enquanto que o amido resistente não é digerido, mas fermentado no intestino grosso o que ajuda a prevenir inflamações e a formação de células cancerosas no aparelho intestinal (WALTER; SILVA; EMANUELLI, 2005; YUE; WARING, 1998).

O valor nutritivo da banana é derivado, também, de vários compostos bioativos como flavonoides, carotenoides, compostos fenólicos, vitamina C e E, promovendo atividade antioxidante e benefícios à saúde, prevenindo doenças ligadas ao envelhecimento, diabetes, doenças oculares e cardiovasculares, anemia, depressão e alguns tipos de câncer (SINGH et al., 2016; KRINSKY; JOHNSON, 2005).

O brasileiro consome, em média, 30 kg/ano de banana, segundo PBMH & PIF (2006), sendo o maior consumidor da fruta do mundo. O consumo da banana se dá, principalmente, na sua forma *in natura*, mas essa pode ser utilizada em preparos como doces, bolos, vitaminas e acompanhamento de pratos salgados, dentre diversos outros usos culinários, o que demonstra sua presença no dia a dia da população. Diante disso, os aspectos de qualidade e o curto tempo de prateleira do produto, contribuem com o desperdício do alimento, fazendo-se necessário o desenvolvimento de técnicas de preservação, para estender a vida útil da polpa, como a secagem, em que se pode obter a banana-passa.

Independente da forma de consumo, a casca é quase sempre descartada e, nesse caso, tem sido alvo de estudos ligados desde seu consumo, também na forma de preparos, até no tratamento de efluentes, como biossorbente, de forma a contornar esse cenário (MARTINS et al., 2018; NERIS et al., 2018).

A banana-passa é um produto promissor no mercado interno, podendo ser consumido com outras frutas secas, cereais, mingaus ou até mesmo como aperitivo, sendo nesse último caso, vista como uma alternativa aos doces mais tradicionais. Por se tratar de um produto desidratado, seu consumo pode ser feito em até dois anos, a partir de sua produção (RABELLO et al., 2021). Mesmo as bananas *in natura* com pouca aceitação, isto é, com muitas manchas ou de coloração – da casca – bem escura, podem ser submetidas ao processo de secagem e, posteriormente, comercializadas como banana-passa, minimizando o desperdício e agregando valor ao alimento. Atualmente, a produção costuma ser feita em secadores do tipo cabine que utilizam convecção forçada com ar aquecido entre 60 e 80°C para acelerar o processo, o que resulta no produto de coloração escura apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Banana-passa comercializada em Resende (RJ) (a) e Lavras (MG) (b).



Fonte: Do autor (2022).

2.2. Secagem

A secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas na conservação de materiais perecíveis, como cereais, por meio da remoção da umidade (COSTA, 2007). A redução da umidade de um material contribui não só com sua estabilidade, e preservação, minimizando a atividade dos fungos e micro-organismos responsáveis por sua degradação, mas também com a facilidade de manuseio, transporte e armazenamento, haja vista seu menor peso e volume finais (EL-MESERY; MWITHIGA, 2015).

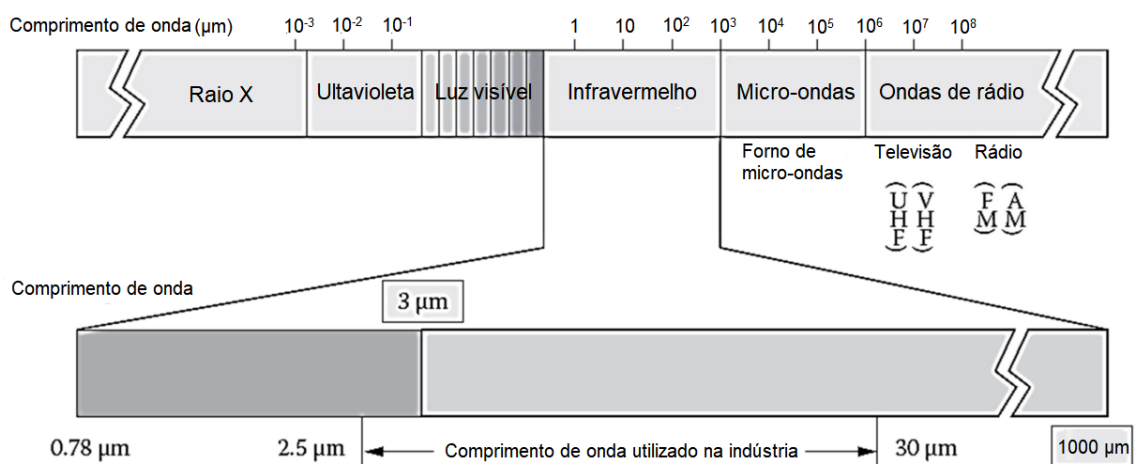
2.2.1. Fundamentos do processo de secagem

A fim de reduzir a umidade do material, o processo de secagem se apoia nos princípios de transferência de calor e de massa. Enquanto que, na secagem convectiva, o ar aquecido promove o aquecimento do material e evaporação da umidade superficial, na secagem

infravermelha, a superfície do material é aquecida em decorrência da irradiação infravermelha, promovendo a migração e redução da umidade (SAKARE et al., 2020).

A radiação infravermelha, assim como as microondas, são ondas eletromagnéticas e, por isso, compõem o espectro eletromagnético, demonstrado na Figura 2. As ondas eletromagnéticas se propagam por irradiação, um mecanismo de transferência de calor que independe de um meio material, propagando-se inclusive no vácuo, e se diferenciam pelo comprimento de onda e pela frequência. Diferentemente da radiação infravermelha (IV) e de uma faixa da radiação ultravioleta (UV), as micro-ondas não se configuram como radiação térmica, uma vez que o aquecimento se dá pela rotação das moléculas de água contidas no material e se estende por todo seu volume (BERGMAN et al., 2014). As micro-ondas têm sido estudadas na secagem de pimentões (LECHTANSKA; SZADZINSKA; KOWALSKI, 2015), kiwi (MASKAN, 2001) e banana (MONTEIRO, 2014).

Figura 2 – Ilustração do espectro eletromagnético.



Fonte: Adaptado de Aboud et al. (2019).

Dependendo do comprimento de onda, o infravermelho pode ser classificado como “próximo” (entre 0,78 e 1,4 μm), médio (entre 1,4 e 3,0 μm) e distante (entre 3,0 e 1000,0 μm), o que influencia diretamente no aquecimento do material, visto que existem faixas apropriadas para cada componente: o infravermelho é absorvido pela água, principalmente, nos comprimentos de 3, 6, 12 e 15 μm , enquanto que a absorção é maior nos comprimentos de 3 e 7 a 10 μm para o açúcar, e de 3 a 4 e 6 a 9 μm para as proteínas (ABOUD et al., 2019).

Rabello et al. (2021) estudaram a secagem infravermelha de banana e verificaram a redução da umidade das amostras de 69,9 g/ 100 g para 21,2 g/ 100 g de banana em 70

minutos. Os autores concluíram que essa metodologia consegue atingir um produto com umidade compatível para comercialização e sem a formação de *hotspots* (pontos de queima).

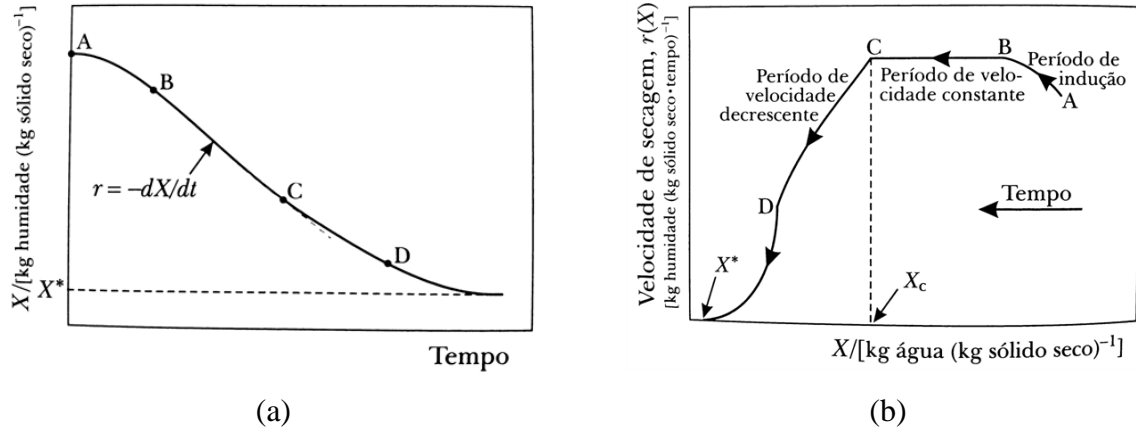
Por se tratar de uma onda eletromagnética, a radiação infravermelha não depende de um meio material para se propagar e, por isso, a transferência de energia/calor costuma ser mais eficiente que a obtida por convecção, já que o ar circundante não é aquecido pelo infravermelho. Com a evaporação da umidade superficial, em ambos os casos, a umidade interna migra para a superfície, favorecida pelo aquecimento do material, evapora e é “arrastada” pelo ar de secagem (no caso da convecção forçada) ou, simplesmente, dispersa no ar circundante (no caso do infravermelho) (SADIN; CHEGINI; KHODADAKI, 2014; HEBBAR; VISHWANATHAN; RAMESH, 2004).

A modelagem matemática é um importante método para descrever os resultados do processo de secagem, bem como o comportamento das variáveis envolvidas, o que torna possível avaliar o processo e propor melhorias ou medidas de controle. A cinética de secagem, que explicita como o processo de secagem é conduzido, pode ser descrita em termos do adimensional de umidade (*moisture ratio* - MR) segundo a Lei de Fick, quando a taxa de secagem é decrescente, ou seja, quando a difusão de umidade do interior do material para a superfície controla/limita o processo (HENRÍQUEZ et al., 2014). A cinética de secagem também pode ser analisada em termos de umidade (X) e taxa de secagem (dX/dt), em função do tempo (t).

A relação entre a umidade e o tempo de secagem pode ser visualizada na Figura 3a, em que se observa a redução da umidade do material até atingir um valor constante equivalente à umidade de equilíbrio (X_{eq} , ou X^*), denotando a umidade final do material quando a pressão parcial da umidade no ar de secagem se iguala à pressão de saturação da umidade no sólido. Enquanto isso, na Figura 3b, demonstra-se a relação entre a taxa de secagem e a umidade, por meio dos períodos de secagem: após um curto período de ajuste de temperatura e taxa crescente, o período de indução (trecho A-B), ocorre o período de taxa constante (trecho B-C), em que a umidade do material é suficiente para formar uma fina película de líquido em sua superfície durante a secagem; quando a umidade do material passa a ser insuficiente, atinge-se o valor de ‘umidade crítica’ (X_c) e a taxa de secagem se torna decrescente (trecho C-E) até alcançar a umidade de equilíbrio. Caso o sólido seja poroso, a umidade se difunde do interior do material para a superfície, mantendo a película líquida e, conseqüentemente, estendendo o período constante, até atingir a umidade crítica e dar início ao período decrescente, em que a difusão de umidade é cada vez mais insuficiente para

compensar a umidade evaporada no processo de secagem, que cessa com a umidade de equilíbrio (AZEVEDO; ALVES, 2017).

Figura 3 – Curvas de umidade (a) e taxa de secagem (b) em função do tempo.



Fonte: Adaptado de Azevedo e Alves (2017).

Geralmente, a umidade de equilíbrio é atingida, na secagem, quando a massa do material se estabiliza em um valor constante. A umidade de equilíbrio depende não só da natureza do material em si, mas também da temperatura e umidade do meio de secagem, isto é, o ar de secagem, e indica a menor umidade que esse material pode atingir nessas condições (AZEVEDO; ALVES, 2017). Na Tabela 1, apresentam-se algumas das correlações de sorção disponíveis na literatura, que possibilitam estimar a umidade de equilíbrio em função da umidade relativa (*relative humidity* - RH) e da temperatura (T) do ar, e dos parâmetros A, B e C. Esses parâmetros são obtidos a partir do ajuste dessas equações aos dados experimentais de desorção (secagem) ou adsorção (hidratação) de um material, numa determinada faixa de umidade e temperatura do ar.

Tabela 1 – Modelos de correlação de sorção.

Modelo	Equação
Henderson Modificado	$X_{eq} = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}}$
Chung-Pfost Modificado	$X_{eq} = \frac{1}{-A} \ln \left[\frac{(T + B) \ln(RH)}{-C} \right]$
Oswin Modificado	$X_{eq} = \frac{A + BT}{\left(\frac{1}{RH} - 1 \right)^{\frac{1}{C}}}$

Fonte: Adaptado de Phoungchandang e Woods (2000).

2.2.2. Secagem híbrida

A combinação da secagem infravermelha com um sistema convectivo resulta em um método híbrido de secagem que é mais eficiente e fica sujeito, em geral, à influência de variáveis como a potência e distância da fonte infravermelha, área superficial (tanto para evaporação, como para irradiação de infravermelho), espessura e outras propriedades físicas do material de secagem, temperatura e umidade ambiente, e velocidade do ar de secagem (SAKARE et al., 2020; CORRÊA et al., 2010).

Sadin, Chegini e Khodadadi (2014) avaliaram os efeitos da potência IV e da distância entre a amostra e a fonte infravermelha, velocidade e temperatura do ar na secagem infravermelha combinada com ar aquecido de fatias de tomate com 5,0 mm de espessura. Os autores observaram que um aumento de potência infravermelha, velocidade e/ou temperatura do ar promoveram uma redução no tempo de secagem. Entretanto, ao aumentar a distância da fonte em relação à amostra, observou-se um aumento no tempo de secagem, atribuído à redução da transferência de calor para o produto.

Wu, Zhang e Li (2019) avaliaram a qualidade do cogumelo *Cordyceps Militaris* submetido à secagem híbrida infravermelha com convecção forçada, em função da potência infravermelha e velocidade do ar. Os autores relataram menores tempos de secagem com o aumento da potência e nenhuma alteração significativa com o aumento da velocidade. Ademais, constatou-se que menores potências favoreceram a manutenção da cor – menor redução do brilho - e retenção de compostos voláteis, bioativos e nutrientes.

Além desses autores, vários outros como, Onwude, Hashim e Chen (2016), Kumar et al. (2005) e Hebbar, Vishwanathan e Ramesh (2004) relataram o aprimoramento do processo de secagem com a utilização de radiação IV assistida por convecção, atribuindo essas melhorias ao efeito sinérgico alcançado por essa combinação.

2.2.3. Parâmetros de qualidade do processo de secagem

A aplicação de uma metodologia híbrida adequada de secagem pode resultar em um produto de sabor, aroma, cor e textura agradáveis (PUANGSUWAN et al., 2021). A degradação da cor costuma ser um dos efeitos da secagem observados em alimentos, cuja intensidade depende, principalmente, da temperatura (LECHTANSKA; SZADZINSKA; KOWALSKI, 2015). Vishwanathan, Hebbar e Raghavarao (2010) relataram que dentre os métodos convectivo, infravermelho e combinado, a secagem híbrida de batata e cenoura apresentou a menor variação de cor. De acordo com os autores, menores tempos de secagem conciliados com menores temperaturas (devido à combinação de métodos) promoveram uma menor degradação de cor.

A secagem pode ser também avaliada em termos do consumo específico de energia (SEC), que é um indicativo da eficiência energética do processo e relaciona a “quantidade” de energia consumida para remover uma determinada massa de umidade. Afzal, Abe e Hikida (1999) constataram menores consumos específicos de energia na secagem convectiva combinada com infravermelho para cevada, quando comparada à secagem puramente convectiva. Os autores atribuíram essa constatação ao menor tempo de secagem obtido com o uso do método combinado. Os autores ainda apontam que o consumo energético aumenta consideravelmente com o aumento da velocidade do ar de secagem.

Puangsuwan et al. (2021) estudaram a influência da temperatura e do método de secagem (convectivo, infravermelho ou híbrido) na desidratação de bananas. Os resultados mostraram a redução do SEC e do tempo de secagem com a utilização da secagem híbrida – infravermelho com convecção de ar aquecido – em relação à aplicação das técnicas individuais. Os autores também reportaram a redução desses valores com o aumento da temperatura de secagem, o que está relacionado à intensificação dos mecanismos de remoção de umidade, como a difusão e a evaporação. Por isso, além de uma análise sistemática do processo de secagem, é necessário avaliar como as condições utilizadas nessa operação influenciam a qualidade do produto.

2.3. Análise estatística

A elaboração de um planejamento experimental é imprescindível para assegurar uma boa análise dos resultados experimentais e, com isso, verificar a influência das variáveis manipuladas no processo como um todo, incluindo o produto final, possibilitando determinar as condições ótimas de operação de acordo com as características desejáveis para o produto.

Um planejamento experimental pode ser elaborado em vários formatos, como o fatorial 3^k . Nesse formato, “k” representa o número de variáveis manipuladas a serem avaliadas em três níveis: baixo (-1), intermediário (0) e alto (+1). Esse tipo de planejamento é destinado a detectar as variáveis de maior influência no processo, por meio de superfícies de respostas (CALADO, 2003). A partir dessas superfícies, é possível obter uma correlação, conforme Equação 1, para descrever cada variável de interesse (Z) em função das variáveis manipuladas (X e Y) do processo combinadas aos parâmetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{12}, \beta_{11}$ e β_{22} .

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 Y + \beta_{12} XY + \beta_{11} X^2 + \beta_{22} Y^2 \quad (1)$$

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.

A determinação da condição ótima de operação depende da otimização do processo por meio de uma função, como a de desejabilidade (*desirability*, em inglês). Essa função leva em consideração que todos os parâmetros de qualidade do produto ou do processo devem estar dentro de um limite adequado, ou seja, todas as variáveis de respostas devem ser compatíveis com os critérios/pesos estabelecidos e, simultaneamente, indicar um valor ótimo. Dessa forma, é possível combinar múltiplas variáveis de resposta em apenas uma, passível de otimização (HEE HAN, 2015; VERA CANDIOTI et al., 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Bananas

As bananas, da variedade prata, utilizadas neste estudo foram adquiridas no mercado local da cidade de Lavras (MG), entre os meses de outubro e novembro de 2021.

A fim de minimizar a influência do estágio de maturação no processo de secagem, as frutas foram selecionadas de acordo com a coloração da casca, seguindo a escala de maturação de Von Loesecke, que classifica subjetivamente os frutos em uma das categorias disponíveis (CEAGESP, 2006). Com isso, as bananas utilizadas no processo se adequavam ao 6º estágio de maturação, caracterizado por uma casca de coloração amarelada sem áreas marrons, conforme Figura 4.

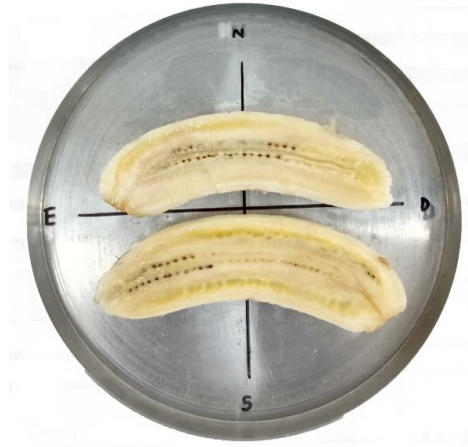
Figura 4 – Fotografia ilustrando o estágio de maturação das bananas utilizadas nos experimentos.



Fonte: Do autor (2021).

A casca do alimento foi higienizada, com pano úmido para a remoção de sujidades e, em seguida, o alimento foi descascado e a polpa cortada ao meio, com uma faca de cozinha, no sentido longitudinal. As espessuras de cada metade foram medidas com paquímetro digital e estão apresentadas na Tabela 3, no formato de espessura média. As metades foram dispostas em uma bandeja de alumínio com 16 cm de diâmetro, conforme Figura 5.

Figura 5 – Fotografia da amostra *in natura*.



Fonte: Do autor (2021).

3.2. Equipamento de secagem

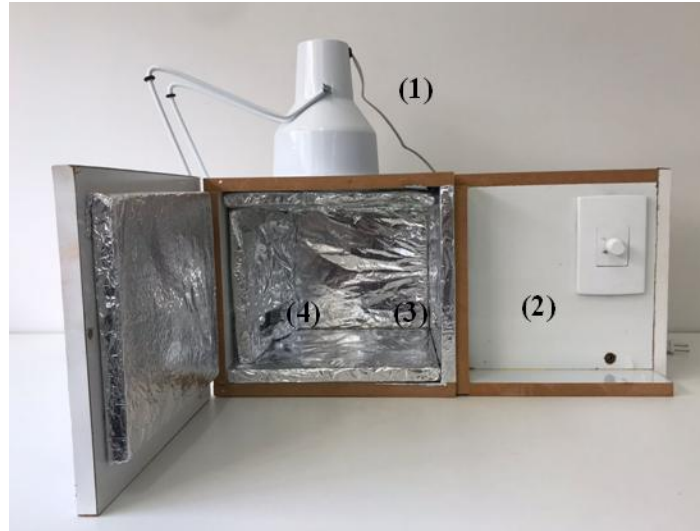
O secador híbrido que combina radiação IV e convecção forçada, apresentado na Figura 6, foi confeccionado em MDF (28,0 x 28,0 x 25,0 cm) e isolado, internamente, com placas de isopor - evitando perdas de calor para o ambiente - revestidas com papel alumínio de forma a refletir os feixes de radiação infravermelha e potencializar seu efeito sobre a amostra.

A lâmpada infravermelha, com 250 W de potência, foi posicionada 23,0 cm acima do centro da amostra, que correspondia também ao centro da base da câmara e ao centro da bandeja de alumínio. Um ventilador forçava a passagem do ar de secagem, em temperatura ambiente, pelo interior da câmara, paralelamente à superfície da amostra, da direita para a esquerda. A velocidade do ar de secagem era medida com um termo-anemômetro TAD-500 (Instrutherm) e regulada por um potenciômetro manual.

O protótipo do secador IV com convecção pode ser visualizado na Figura 6, acompanhada da indicação de cada componente: posição da lâmpada infravermelha (1) (centralizada sobre a amostra), posição do ventilador (dentro do compartimento) (2), entrada do ar de secagem (vindo do compartimento do ventilador) (3) e saída do ar de secagem (4) após escoar sobre a amostra centralizada na base do equipamento.

A temperatura da amostra foi monitorada por meio de um alicate amperímetro com termopar KRAD01 (Kript), cuja “sonda” foi posicionada rente à superfície da amostra.

Figura 6 – Fotografia do protótipo do secador infravermelho assistido por convecção.



Fonte: Do autor (2022).

3.3. Ensaios de secagem

As amostras foram secas no secador híbrido seguindo um planejamento fatorial 3^2 com diferentes velocidades do ar não aquecido (v) variando em 1,5, 3,0 e 4,5 m/s em associação com diferentes potências de radiação infravermelha (P) variando em 118, 178 e 238 W. A potência da lâmpada infravermelha era ajustada medindo a corrente elétrica e a tensão da rede, por um alicate amperímetro com termopar KRAD01 (Kript). A redução da massa, devido à perda de umidade, foi mensurada pela pesagem das amostras em balança eletrônica AD4200 (Marte), com precisão de 0,01 g, em intervalos pré-determinados ao longo de 6 horas: nas primeiras 2 horas, as medições eram feitas a cada 10 minutos e nas últimas 4 horas, as medições eram feitas a cada 30 minutos. A limitação do tempo de secagem em 6 horas se deu por questões operacionais do laboratório onde os experimentos foram conduzidos.

As umidades de equilíbrio foram estimadas por meio da Equação 2, que representa um ajuste do modelo de Oswin Modificado às isotermas experimentais de dessorção de umidade para bananas. O ajuste é confiável para temperaturas entre 13 e 40°C, e umidades relativas entre 0,5 e 0,8. (PHOUNGCHANDANG; WOODS, 2000).

$$X_{eq} = \frac{16,68 - (0,1212 * T)}{\left(\frac{1}{RH} - 1\right)^{0,9020}} \quad (2)$$

O adimensional de umidade (MR) foi calculado pela Equação 3, a partir dos valores de umidade de equilíbrio (X_{eq}), umidade inicial da amostra (X_0) e umidade no momento da pesagem (X).

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (3)$$

O modelo difusivo de Fick, considerando uma placa plana semi-infinita, foi utilizado para ajustar os resultados experimentais de MR, durante o período de taxa decrescente. A solução matemática do modelo, truncada no primeiro termo, está apresentada na Equação 4 e leva em consideração o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}), o instante do tempo de secagem no período decrescente (τ) e o comprimento característico (L), distância percorrida pela umidade no processo de difusão e que, nesse caso, equivale à espessura da amostra, cujos valores estão dispostos na Tabela 3. Na Equação 4, assumiu-se que a umidade migra unidirecionalmente apenas por difusão, distribuição homogênea de umidade na superfície, bem como resistência externa e encolhimento desprezíveis (BRANDÃO et al., 2016).

$$MR = \frac{8}{\pi^2} * exp\left(-\frac{\pi^2 * D_{ef} * \tau}{L^2}\right) \quad (4)$$

A partir da Equação 4, obteve-se o coeficiente de difusão efetivo (D_{ef}) para cada condição avaliada, utilizando o *software* Excel (Microsoft). O coeficiente de determinação (R^2), descrito na Equação 5, e a soma do quadrado dos resíduos (SQR), descrita na Equação 6, foram utilizados para averiguar a qualidade dos ajustes.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

em que y_i é o valor experimental, \bar{y}_i é o valor experimental médio e \hat{y}_i é o valor simulado das variáveis analisadas, como o adimensional de umidade, difusividade efetiva, entre outras.

$$SQR = \sum(MR_{exp} - MR_{pred})^2 \quad (6)$$

em que MR_{exp} é o valor do adimensional de umidade obtido experimentalmente, e MR_{pred} é o valor obtido pelo modelo matemático de Fick.

Em seguida, os coeficientes de difusão D_{ef} foram ajustados com o auxílio do *software* Statistica 7.0 em função da potência de radiação infravermelha (P) e velocidade do ar de secagem (v). O modelo gerado, representado por $D_{ef}(P,v)$ e descrito pela Equação 23, foi incorporado à Equação 4 e resultou na Equação 7.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} * \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} * \frac{D_{ef}(P,v) * \tau}{L^2}\right) \quad (7)$$

A taxa de secagem (*drying rate* - DR) foi calculada com a Equação 8, utilizando-se da diferença de umidade (X) observada em um período de tempo (Δt).

$$DR = -\frac{X_{t+1} - X_t}{\Delta t} \quad (8)$$

3.4. Caracterização do produto seco

3.4.1. Umidade final

A umidade final é um fator importante para verificar a estabilidade de um produto, haja vista que quanto menor a umidade de um material, menor a quantidade de água disponível para reações de deterioração pela ação de micro-organismos e enzimas.

Com isso, a umidade final em base úmida (X_{bu}) e base seca (X_{bs}), foram calculadas pelas Equações 9 e 10, respectivamente, utilizando a massa da amostra após 6 horas de secagem infravermelha assistida por convecção (m_i), e a massa da amostra após 24 horas de secagem a 105°C (m_f) em estufa, conforme método gravimétrico (AOAC, 1990).

$$X_{bu} = \frac{m_i - m_f}{m_i} * 100 \quad (9)$$

$$X_{bs} = \frac{m_i - m_f}{m_f} * 100 \quad (10)$$

3.4.2. Diferença total de cor

A diferença total de cor (ΔE) é um índice utilizado para mensurar a variação da cor de um material em relação ao controle. A amostra foi avaliada com a escala CIE $L^*a^*b^*$ que contempla três coordenadas de cor: luminosidade (L), transição (a) vermelho (+) /verde (-) e transição (b) amarelo (+) /azul (-) (WANYO; SIRIAMORNPNUN; MEESO, 2011).

Esses parâmetros foram quantificados, por meio do *software* Photoshop (Adobe), a partir de fotografias das amostras obtidas com um *smartphone* Motorola® G8 Play. Para o cálculo de ΔE , pela Equação 14, os parâmetros médios fornecidos pelo *software* foram convertidos para o formato padrão pelas Equações 11, 12 e 13, sendo denotados por L^* , a^* e b^* , para a polpa da banana ao final do processo de secagem, e L_0^* , a_0^* e b_0^* para a polpa *in natura* (YAM; PAPADAKIS, 2004; NACHAISIN; JAMRADLOEDLUK; NIAMNUY, 2015).

$$L^* = \frac{L}{255} * 100 \quad (11)$$

$$a^* = \frac{240 * a}{255} - 120 \quad (12)$$

$$b^* = \frac{240 * b}{255} - 120 \quad (13)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (14)$$

3.4.3. Índice de escurecimento

O índice de escurecimento (*browning index* - BI) utiliza das coordenadas de cor L^* , a^* e b^* para indicar a formação da cor marrom e, conseqüentemente, o escurecimento da amostra. Para o cálculo de BI, deve-se obter o valor da coordenada 'x' pela Equação 15 e, em seguida, substituir esse valor na Equação 16 (MASKAN, 2001; VISHWANATHAN; HEBBAR; RAGHAVARAO, 2010).

$$x = \frac{a + (1,75 * L)}{(5,645 * L) + a - (3,012 * b)} \quad (15)$$

$$BI = \frac{100 * (x - 0,31)}{0,17} \quad (16)$$

3.4.4. Consumo específico de energia

O consumo específico de energia (*specific energy consumption* - SEC) é um parâmetro importante para avaliar o quão eficiente são as condições utilizadas no processo de secagem, relacionando a energia consumida com a quantidade de umidade evaporada.

A potência total consumida (P_{total}) representa o consumo energético dos componentes de secagem em que a soma das correntes elétricas na lâmpada infravermelha (I_{IR}) e no ventilador ($I_{convecção}$) é multiplicada pela tensão da rede, conforme Equação 17. Os valores de corrente e tensão foram obtidos com um alicate amperímetro com termopar KRAD01 (Kript).

$$P_{total} = V_{rede} * (I_{IR} + I_{convecção}) \quad (17)$$

O SEC, calculado pela Equação 18, depende do tempo de secagem (t) e da massa de água evaporada correspondente ($m_{\text{água evaporada}}$).

$$SEC = \frac{P_{total} * t}{m_{\text{água evaporada}}} \quad (18)$$

A fim de melhor comparar esse parâmetro e a influência das variáveis de processo, o tempo de secagem e a massa de água evaporada foram determinados por meio de regressões lineares através do *software* Excel (Microsoft) para a umidade de 60,64% b.u. (base úmida), que denota a maior umidade final obtida entre as condições de secagem.

3.5. Análise estatística

Com base em um planejamento fatorial do tipo 3^2 , com duas réplicas no ponto central, avaliou-se a influência da potência IV e da velocidade do ar de secagem nas características da banana-passa, bem como na determinação de uma condição ótima de operação, com um nível de 90% de confiança estatística utilizando o *software* Statística 7.0.

A Tabela 2 apresenta o planejamento fatorial 3^2 e as diferentes combinações de potência de infravermelho (P) e velocidade do ar de secagem (v) que foram executadas em sequência randômica, como forma de minimizar as influências externas. A codificação dessas variáveis se deu por meio da Equação 19, com a variável real (ξ_i), variável real média ($\bar{\xi}_i$) e diferença (d_i) entre o valor da variável real máxima e mínima.

$$V_c = 2 * \frac{\xi_i - \bar{\xi}_i}{d_i} \quad (19)$$

Tabela 2 – Variáveis codificadas e em escala real do planejamento experimental.

Ensaio	Variável codificada (V_c)		Variável em escala real	
	P'	v'	Potência do infravermelho (W)	Velocidade do ar de secagem (m/s)
1	-1	-1	118	1,5
2	-1	0	118	3,0
3	-1	1	118	4,5
4	0	-1	178	1,5
5	0	0	178	3,0
6	0	1	178	4,5
7	1	-1	238	1,5
8	1	0	238	3,0
9	1	1	238	4,5
10	0	0	178	3,0
11	0	0	178	3,0

As Equações 20, 21 e 22 foram utilizadas para determinar a desejabilidade do produto, com base na influência das variáveis manipuladas na umidade final, diferença total de cor, consumo específico de energia e índice de escurecimento. As Equações 20 e 21 calculam a desejabilidade individual das variáveis que devem ser minimizadas e maximizadas, respectivamente, enquanto que a Equação 22 retorna a desejabilidade global (MACIEL, 2017).

$$f(x) = \begin{cases} 1, & y_i < T_i \\ \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - T_i}\right)^{r_i}, & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 0, & y_i > U_i \end{cases} \quad (20)$$

$$f(x) = \begin{cases} 1, & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^{r_i}, & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 0, & y_i > T_i \end{cases} \quad (21)$$

$$D = \left(\prod_{i=1}^N d_i \right)^{\frac{1}{N}} \quad (22)$$

em que, y_i é a variável de resposta, d_i é a desejabilidade individual, U_i é o valor máximo tolerado, L_i é o valor mínimo tolerado e T_i é o valor ótimo. Já D é a desejabilidade global, N é o número de desejabilidades individuais e $r_i = 1 \forall i$, considerando uma desejabilidade linear.

No presente trabalho, a condição operacional ótima foi obtida para um produto com o mínimo de umidade final, consumo específico de energia, diferença total de cor e índice de escurecimento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Secagem

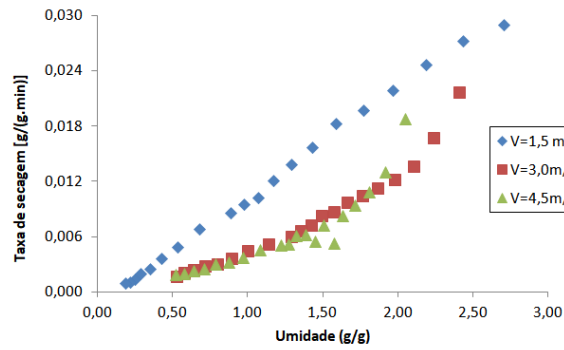
As curvas de taxa de secagem, em função do tempo, parametrizadas na potência de infravermelho (P) e na velocidade do ar de secagem (v) estão disponíveis nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

A partir dos gráficos da Figura 7 e 8, pode-se verificar que o período decrescente se estendeu por todo o tempo de secagem, para todas as condições avaliadas, indicando que o mecanismo difusivo controla o processo, o que se deve ao fato de a difusão de umidade, do interior do material para a superfície, não ser suficiente para compensar a umidade superficial evaporada. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Sacilik e Elicin (2006) e El-Mesery e Mwithiga (2015) com maçãs.

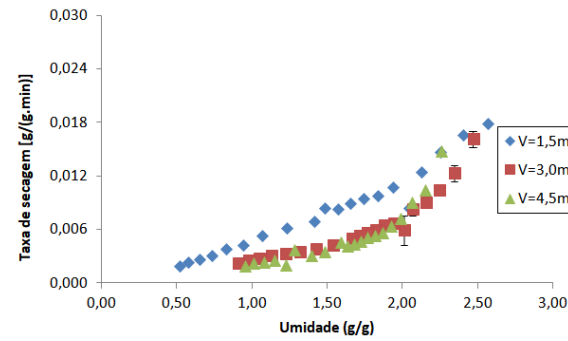
Além disso, fica clara a influência da potência infravermelha e da velocidade do ar nas taxas de secagem. Na Figura 7, nota-se que maiores potências de infravermelho têm efeito positivo no processo de secagem, promovendo taxas mais elevadas. Isso acontece devido às maiores temperaturas atingidas pelo material em razão da maior disponibilidade de energia fornecida pela fonte IV, o que favorece os mecanismos de transferência de calor e massa e, por fim, o processo de secagem. Já na Figura 8, nota-se que as curvas demonstram o comportamento oposto, isto é, maiores velocidades do ar promovem taxas mais brandas. Isso ocorre porque maiores velocidades do ar, em temperatura ambiente, favorecem os mecanismos convectivos de transferência térmica e, com isso, o resfriamento do material aquecido, o que atenua a magnitude da secagem.

Outro ponto a ser destacado é a redução da influência da velocidade a medida que à potência se reduz de 238 para 138 W. Em adição, o efeito da variável potência infravermelha é também minimizado ao aumentar a velocidade do ar de 1,5 para 4,5 m/s (Figura 7c). Nas duas situações extremas (potência mínima e velocidade máxima), observa-se que apesar do aumento da variável parametrizada, a taxa de secagem permanece inalterada, demonstrando implicitamente a influência da temperatura no processo de secagem.

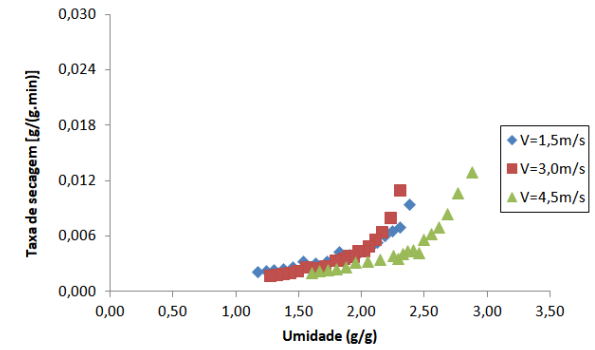
Figura 7 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘v’ com P = 118 W (a), P = 178 W (b) e P = 238 W (c).



(a)



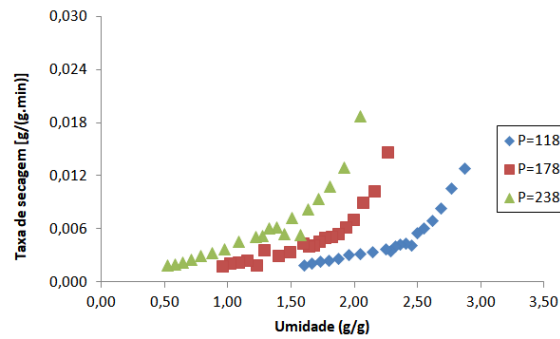
(b)



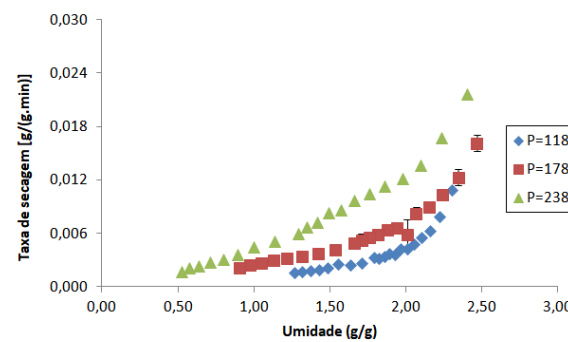
(c)

Fonte: Do autor (2022).

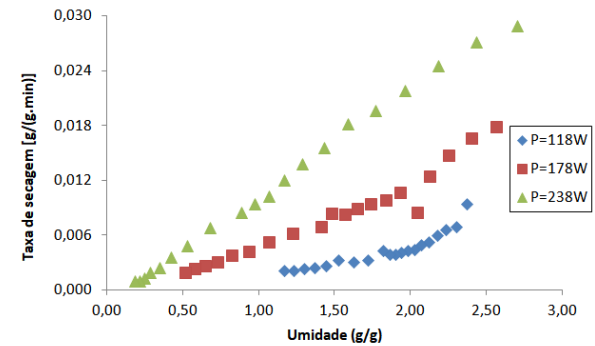
Figura 8 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘P’ com v = 1,5 m/s (a), v = 3,0 m/s (b) e v = 4,5 m/s (c).



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do autor (2022).

Os valores de difusividade efetiva estão dispostos na Tabela 3, juntamente com a espessura média das amostras (L).

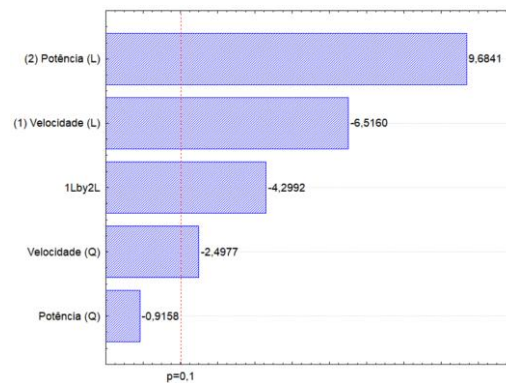
Tabela 3 – Difusividade efetiva em função da potência de infravermelho (P) e velocidade do ar de secagem (v).

Ensaio	P (W)	V (m/s)	L (mm)	D_{ef} (mm ² /min)
1	118	1,5	16,62	0,0548
2	118	3,0	15,37	0,1138
3	118	4,5	13,48	0,1479
4	178	1,5	14,70	0,0443
5	178	3,0	15,00	0,0716
6	178	4,5	14,74	0,1105
7	238	1,5	13,85	0,0547
8	238	3,0	14,47	0,0565
9	238	4,5	13,52	0,0807
10	178	3,0	14,71	0,0650
11	178	3,0	15,87	0,0650

Com base na Tabela 3, pode-se observar o aumento da difusividade efetiva com a potência de infravermelho. Maiores potências de infravermelho intensificam a agitação das moléculas do material e promovem temperaturas mais elevadas, contribuindo com a difusão de umidade não só do interior para a superfície do material, mas também da superfície para o ar de secagem devido à evaporação. Outro ponto a ser observado é a diminuição da difusividade efetiva com o aumento da velocidade, o que se deve ao resfriamento da superfície da amostra - aquecida pelo infravermelho - pelo escoamento do ar de secagem – em temperatura ambiente – o que reduz os efeitos da transferência de calor e massa no processo. A influência da temperatura, que nesse caso é uma relação entre potência de infravermelho e velocidade do ar, na difusividade efetiva foi relatada por Puente-Díaz et al. (2013) durante experimentos de secagem híbrida com murta. Como resultado, foram observados maiores coeficientes de difusividade efetiva de umidade nas condições de maior temperatura. Esse comportamento é corroborado pelo diagrama de Pareto (Figura 9), que descreve a influência

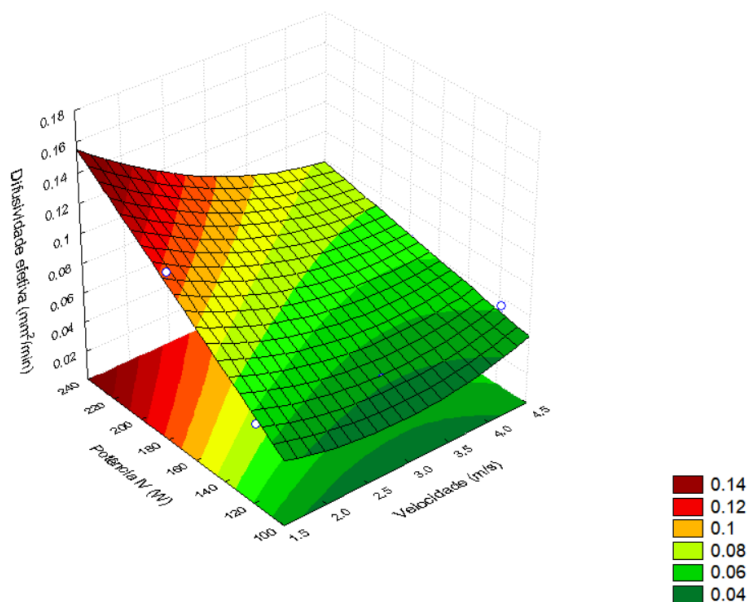
dessas variáveis no coeficiente de difusividade, e pela superfície de resposta (Figura 10), que permite a visualização da relação por meio do modelo gerado ($R^2=0,9654$) e descrito pela Equação 24, também em função da velocidade e potência codificadas, representadas pelas incógnitas v' e P' , respectivamente.

Figura 9 – Diagrama de Pareto para difusividade efetiva.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 10 – Superfície de resposta para difusividade efetiva.



Fonte: Do autor (2022).

$$D_{ef}(P, v) = 0,0802 - 0,0208 * v' - 0,0067 * v'^2 + 0,0309 * P' - 0,0168 * P' * v' \quad (23)$$

A Figura 9 indica que apenas a potência quadrática não apresentou influência significativa no valor da difusividade ($p > 0,1$).

Ainda com base na Tabela 3, pode-se verificar um comportamento que não condiz com as observações anteriores: nos ensaios 2 e 3, apesar do aumento de velocidade, a difusividade aumenta. Sabe-se que a espessura do material tem influência no processo difusivo, devido às alterações na “distância” percorrida pela umidade rumo à superfície do material. Considerando que maiores velocidades, com ar de secagem em temperatura ambiente, contribuem negativamente com a difusividade, é provável que o efeito observado tenha se dado pela diferença de espessura entre as amostras, contribuindo para um maior coeficiente D_{ef} para a amostra com menor espessura.

A Tabela 4 apresenta as umidades de equilíbrio estimadas pela Equação 2, bem como os valores médios de umidade relativa e temperatura do ar ambiente. Conforme esperado, umidades relativas mais elevadas e/ou temperaturas mais baixas promovem o aumento da umidade de equilíbrio, uma vez que, nessas condições, o ar comporta uma quantidade reduzida de umidade.

Tabela 4 – Estimativa das umidades de equilíbrio.

Ensaio	P (W)	V (m/s)	T (°C)	RH (-)	X_{eq} (g/g)
1	118	1,5	23,0	0,765	0,51
2	118	3,0	22,0	0,780	0,57
3	118	4,5	18,5	0,870	1,19
4	178	1,5	21,5	0,710	0,38
5	178	3,0	23,5	0,735	0,43
6	178	4,5	22,0	0,700	0,36
7	238	1,5	22,0	0,770	0,53
8	238	3,0	24,0	0,675	0,31
9	238	4,5	26,0	0,650	0,27
10	178	3,0	23,0	0,705	0,36
11	178	3,0	26,5	0,560	0,18

Quando verificado experimentalmente que, em um determinado instante da secagem, a umidade do material era menor que a umidade de equilíbrio, calculada pela Equação 2,

assumiu-se que a ação do infravermelho era predominante no processo de secagem e $X_e \approx 0$, reduzindo a Equação 3 à Equação 24.

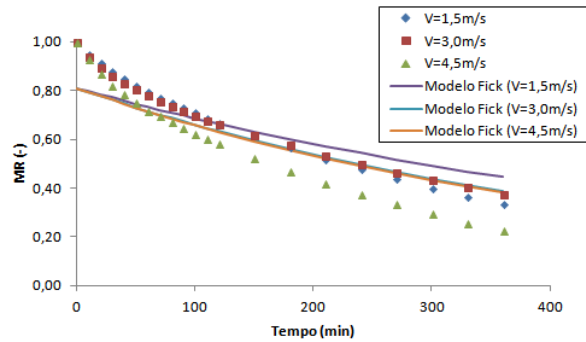
$$MR = \frac{X}{X_0} \quad (24)$$

As curvas experimentais do adimensional de umidade em função do tempo de secagem não foram adequadamente previstas pelo modelo de Fick, alcançando valores de coeficiente de determinação (R^2) $\geq 0,7981$ e soma do quadrado dos resíduos (SQR) $\leq 0,1872$, conforme demonstrado na Tabela 5 e apresentado nas Figuras 11 e 12.

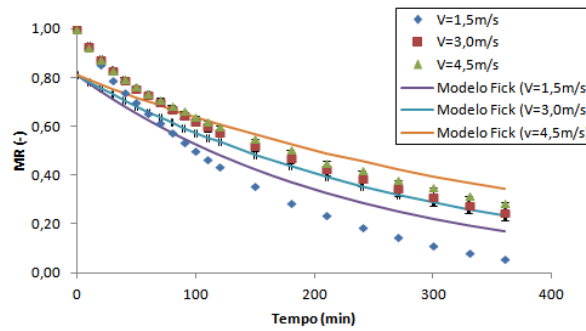
Tabela 5 – Parâmetros de qualidade dos ajustes de MR pelo modelo de Fick.

Ensaio	P (W)	V (m/s)	R^2	SQR
1	118	1,5	0,7981	0,1591
2	118	3,0	0,8293	0,1116
3	118	4,5	0,8128	0,1872
4	178	1,5	0,9000	0,1660
5	178	3,0	0,8939	0,1136
6	178	4,5	0,8911	0,0922
7	238	1,5	0,9454	0,0916
8	238	3,0	0,9421	0,0845
9	238	4,5	0,9096	0,1177
10	178	3,0	0,8659	0,1295
11	178	3,0	0,8460	0,1323

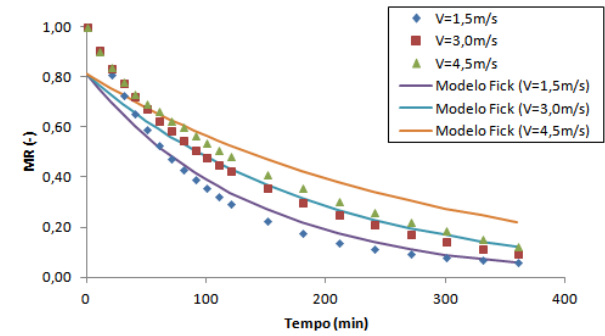
Figura 11 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘v’ com P = 118 W (a), P = 178 W (b) e P = 238 W (c), e estimativas obtidas pelo modelo de Fick.



(a)



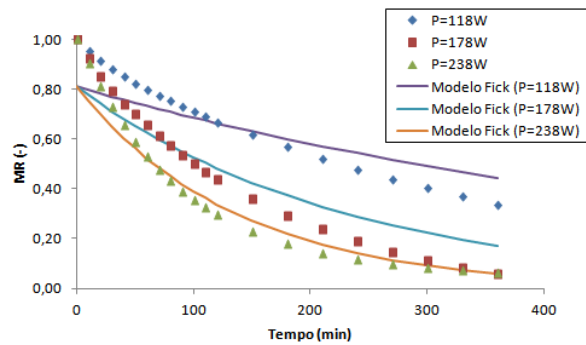
(b)



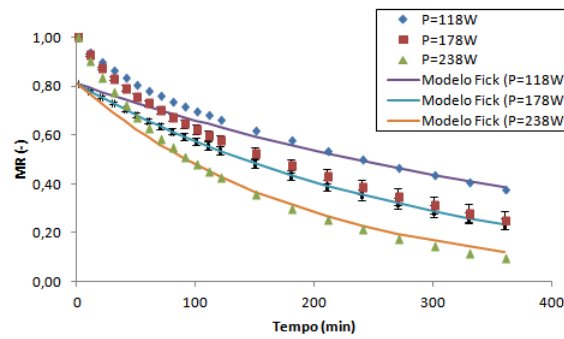
(c)

Fonte: Do autor (2022).

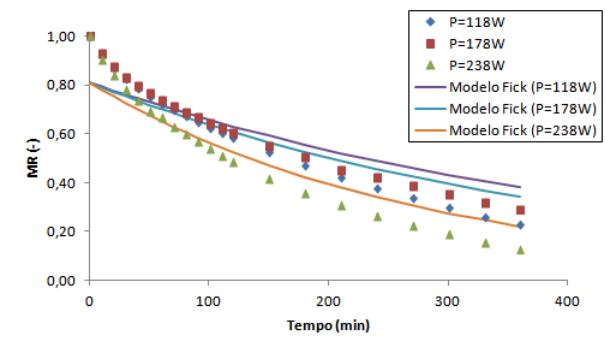
Figura 12 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘P’ com v = 1,5 m/s (a), v = 3,0 m/s (b) e v = 4,5 m/s (c), e estimativas obtidas pelo modelo de Fick.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do autor (2022).

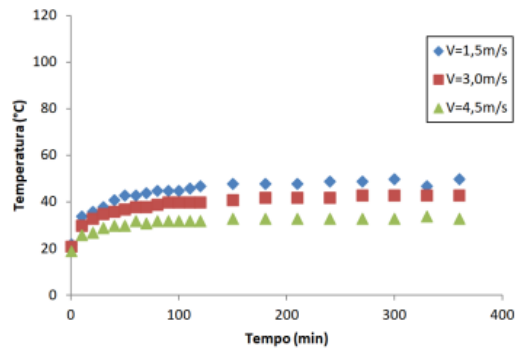
Pelas Figuras 11 e 12, constata-se que a influência da potência infravermelha e da velocidade do ar nas curvas de adimensional de umidade é análoga aos gráficos de taxa de secagem, ambos em função do tempo. A secagem mais rápida, isto é, que atingiu o menor teor de umidade em 6 horas de secagem, ocorreu na condição de maior potência infravermelha e menor velocidade do ar.

Andrade, Prado e Marques (2019) estudaram a influência da potência IV, da velocidade e aquecimento do ar, na desidratação híbrida de resíduos de laranja para utilização como biomassa. Os autores constataram que o tempo de secagem pôde ser reduzido com o aumento da potência e/ou da velocidade, bem como com o aquecimento do ar de secagem, devido à intensificação da transferência de calor e massa.

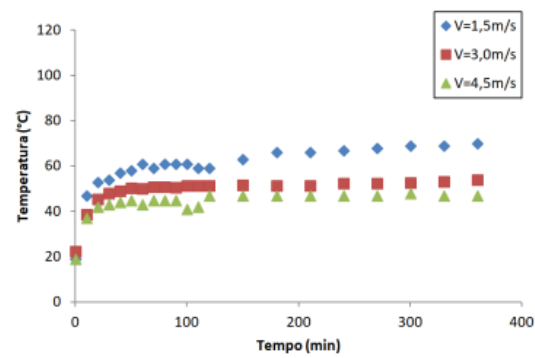
O efeito negativo do aumento da velocidade – no presente estudo - pode ser resultado do uso de ar de secagem não aquecido (ou seja, ar à temperatura ambiente) que contribui em resfriar a amostra e amenizar os mecanismos de secagem de forma mais intensa que acelerar o processo devido seu efeito turbulento.

As Figuras 13 e 14 demonstram a influência da potência infravermelha e da velocidade do ar na temperatura superficial da amostra. Verifica-se que a temperatura aumenta com o aumento da potência do infravermelho e reduz com o aumento da velocidade do ar, em concordância com o que foi dito anteriormente. Hebbar, Vishwanathan e Ramesh (2004) também relataram a redução da temperatura de vegetais com o aumento da velocidade do ar durante um processo de secagem híbrida com infravermelho.

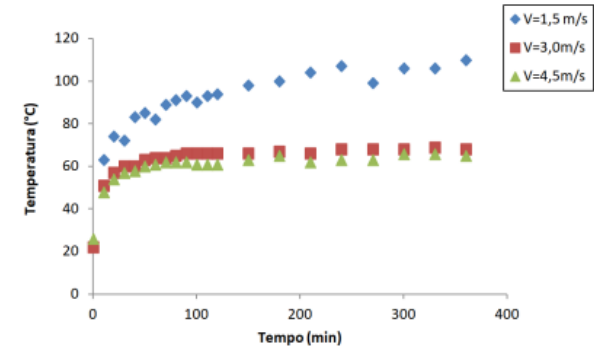
Figura 13 – Temperaturas parametrizadas em ‘v’ com $P = 118\text{ W}$ (a), $P = 178\text{ W}$ (b) e $P = 238\text{ W}$ (c).



(a)



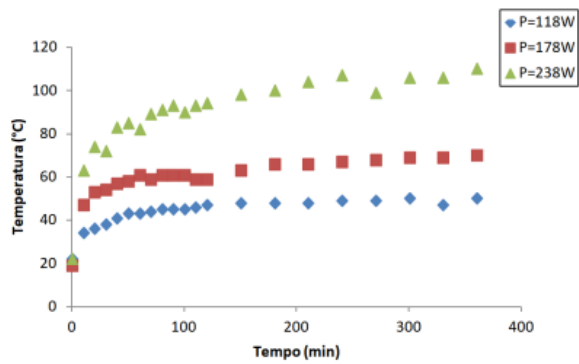
(b)



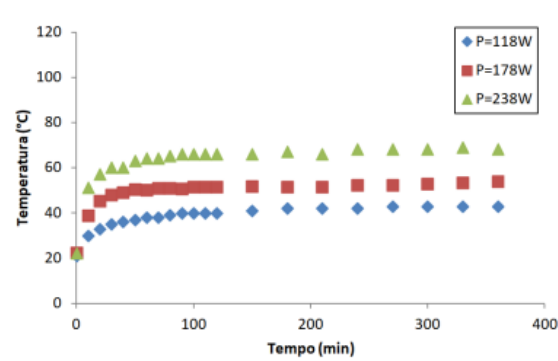
(c)

Fonte: Do autor (2022).

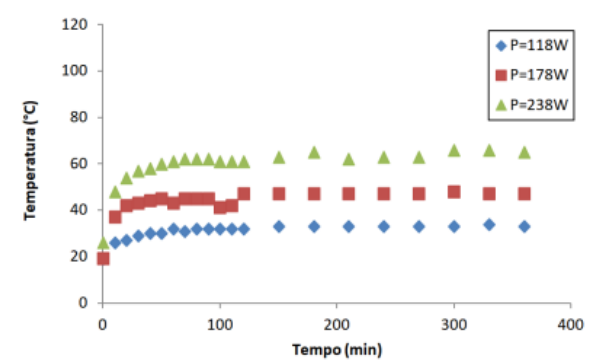
Figura 14 – Temperaturas parametrizadas em ‘P’ com $v = 1,5\text{ m/s}$ (a), $v = 3,0\text{ m/s}$ (b) e $v = 4,5\text{ m/s}$ (c).



(a)



(b)



(c)

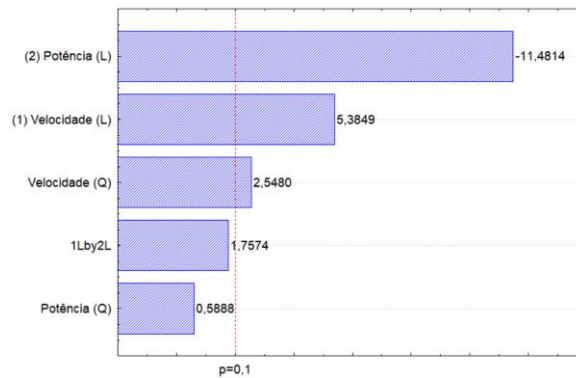
Fonte: Do autor (2022).

4.2. Propriedades do produto seco

4.2.1. Umidade final

A redução da umidade de um material é o principal objetivo da secagem. Com isso, verificar o valor de umidade final de um alimento desidratado, é fundamental para estimar sua estabilidade e adequabilidade para o armazenamento e comercialização. As bananas-passas apresentaram uma umidade final entre 15,63 % e 61,53% (b.u.), nas condições de potência máxima ($P=238$ W) e velocidade mínima ($v=1,5$ m/s), e potência mínima ($P=118$ W) e velocidade máxima ($v=4,5$ m/s), respectivamente. A influência dessas variáveis na umidade final do material pode ser visualizada através da Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de Pareto para umidade final da banana-passa.

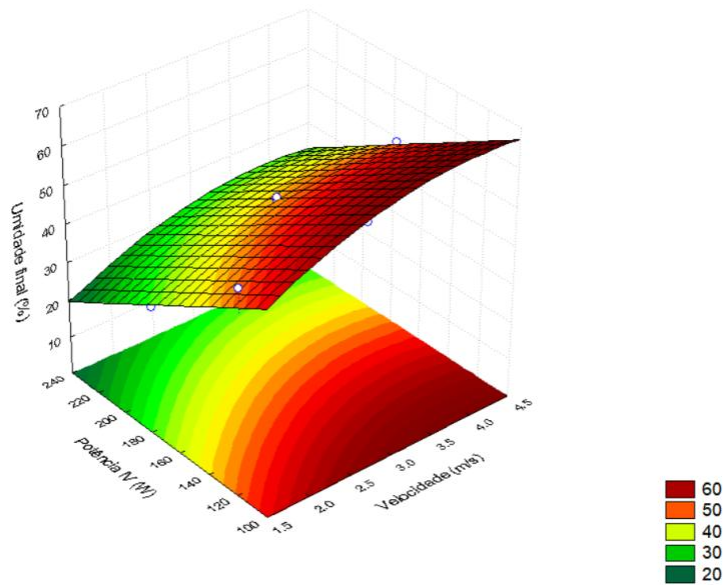


Fonte: Do autor (2022).

Observa-se o efeito linear de ambas as variáveis - potência infravermelha e a velocidade do ar de secagem – e a influência sobre a umidade final: a potência contribui com a redução da umidade final, enquanto que a velocidade contribui com o aumento. As variáveis de potência quadrática e de interação ('1Lby2L') não demonstraram influência significativa ($p > 0,1$).

Corrêa et al. (2010) reportaram, para a secagem convectiva de bananas, que maiores temperaturas e velocidades do ar de secagem diminuem o tempo de secagem necessário para alcançar menores valores de umidade, o que, até uma certa parte, está coerente com o comportamento descrito pelo diagrama de Pareto, na Figura 15. Maiores temperaturas são alcançadas com o aumento da potência infravermelha e, portanto, constata-se seu efeito na redução da umidade. Já para as velocidades, as condições do ar de secagem entre os trabalhos são diferentes – o autor utiliza ar aquecido – o que justifica a divergência observada: ao aumentar a velocidade do ar, em temperatura ambiente, ocorre o resfriamento do material (aquecido pelo infravermelho) o que desfavorece a redução da umidade.

Figura 16 – Superfície de resposta para umidade final da banana-passa.



Fonte: Do autor (2022).

A superfície de resposta, apresentada na Figura 16, indica o efeito da potência e da velocidade do ar, em temperatura ambiente, no valor da umidade final. Fica evidente que as menores umidades não podem ser atingidas em condições de baixa potência, mesmo que combinada com baixas velocidades. Mesmo assim, visualiza-se apenas uma pequena região da superfície que prediz uma umidade final de 20% (b.u.), demandando altas intensidades de radiação infravermelha e baixas velocidades.

A Equação 24 dispõe do modelo gerado para a umidade final ($R^2 = 0,9524$) em função dessas variáveis, no formato codificado, em que v' corresponde à velocidade e P' à potência IV.

$$X_{bu} = 43,0815 + 6,8024 * v' + 2,6295 * v'^2 - 14,5039 * P' \quad (24)$$

A legislação brasileira, por meio da RDC n° 272 de 22 de setembro de 2005, estabelece um teor máximo de umidade de 25% (b.s) – o que corresponde a 20% (b.u.) – para produtos de frutas secas ou desidratadas. Por isso, as condições de secagem devem ser capazes de atingir umidades suficientemente baixas, a fim de respeitar o que estabelece a resolução. Dentre as condições avaliadas, o ensaio com potência de infravermelho máxima ($P=238$ W) e velocidade mínima ($v=1,5$ m/s) foi o único a alcançar a umidade mínima exigida pela RDC.

4.2.2. Diferença total de cor

O processo de secagem tem um impacto direto na cor de um produto e, conseqüentemente, na aceitação dos consumidores. Desta forma, é importante mensurar a influência das condições de secagem na degradação da cor e determinar a diferença total entre a coloração do produto e a fruta *in natura*.

O valor máximo de ΔE , obtido pela Equação 14, foi de 50,99 para a condição de potência infravermelha máxima ($P=238$ W) e velocidade do ar mínima ($v=1,5$ m/s), enquanto o valor mínimo, igual a 6,2, foi obtido na condição de velocidade do ar máxima ($v=4,5$ m/s) e potência infravermelha média ($P=178$ W). Isso indica que a primeira condição ($P=238$ W e $v=1,5$ m/s) apresentou uma maior diferença total de cor em relação à banana *in natura*, enquanto que a segunda condição ($P=178$ W e $v=4,5$ m/s) apresentou uma coloração semelhante.

Vale ressaltar que apesar de algumas condições terem resultado em baixas degradações de cor, a umidade final do produto permaneceu alta, o que condiz com as observações feitas anteriormente. Dessa forma, menores potências de infravermelho com maiores velocidades – condição que favorece a secagem em temperaturas mais amenas - resultam em produtos com menor degradação de cor, mas com teor de umidade mais elevado.

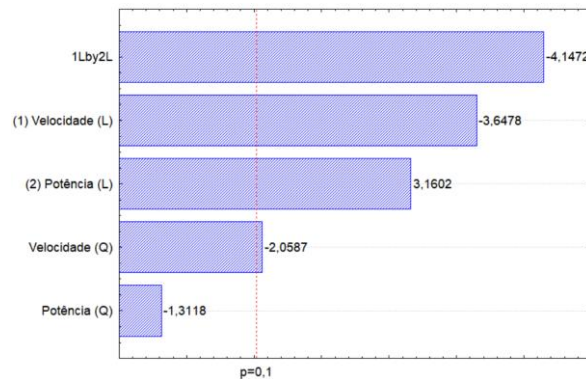
O impacto dessas condições pode ser visualizado na Figura 17, de forma qualitativa, e na Figura 18, baseado nos resultados do diagrama de Pareto.

Figura 17 – Bananas submetidas à potência máxima e velocidade mínima (a) e potência média e velocidade máxima (b).



Fonte: Do autor (2021).

Figura 18 – Diagrama de Pareto para diferença total de cor da banana-passa.



Fonte: Do autor (2022).

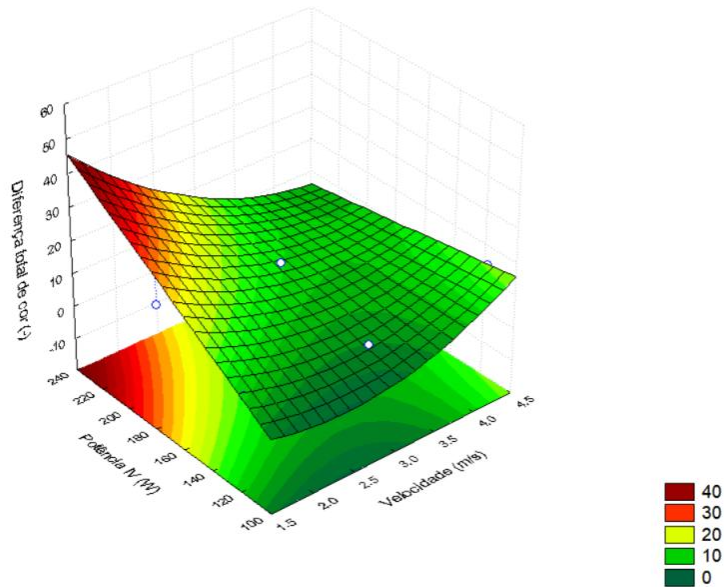
Verifica-se que as variáveis têm efeitos contrários sobre a diferença total de cor da amostra. Isso acontece porque o aumento da temperatura do material, em consequência do aumento da potência do infravermelho, pode provocar alterações físicas e/ou químicas que contribuem com a degradação da cor, enquanto o aumento da velocidade implica na redução da temperatura da amostra e minimização desse processo (NUTHONG et al., 2011).

Adak, Heybeli e Ertekin (2017) relataram que o uso de menores potências de infravermelho, velocidades e temperaturas – considerando ar aquecido – possibilitaram uma menor alteração na cor de morangos submetidos à secagem utilizando infravermelho combinado com convecção. Na secagem infravermelha de limões com pulso de vácuo, Wang et al. (2018) obtiveram um produto com umidade de 3,0%, em base seca, mas com diferentes valores de ΔE , o que foi justificado pelas diferentes temperaturas avaliadas – maiores temperaturas resultaram em uma maior diferença total de cor.

O efeito quadrático da potência sobre a diferença total de cor não foi significativo ($p > 0,1$).

O comportamento descrito anteriormente pode ser visualizado na superfície de resposta em função da potência e da velocidade, na Figura 19. A maior diferença total de cor é obtida nas condições de maior potência combinada com menores velocidades e, com isso, as condições experimentais, em geral, apresentam baixas alterações de cor. O modelo gerado para a diferença total de cor ($R^2 = 0,8743$) é descrito pela Equação 25, em função das variáveis codificadas de velocidade (v') e potência IV (P').

Figura 19 – Superfície de resposta para diferença total de cor da banana-passa.



Fonte: Do autor (2022).

$$\Delta E = 15,5864 - 8,1337 * v' - 4,1324 * v'^2 + 7,0465 * P' - 11,3254 * P' * v' \quad (25)$$

A cor média das bananas, utilizadas nos experimentos, na sua forma *in natura* e passa pode ser visualizada na Tabela 6, para todas as condições de secagem avaliadas. A princípio, é interessante observar a existência de uma variabilidade natural na coloração das bananas *in natura*.

Tabela 6 – Cor média das amostras de banana.

V (m/s)	1,5		3,0		4,5	
P (W)	<i>In natura</i>	Passa	<i>In natura</i>	Passa	<i>In natura</i>	Passa
118						
178						
238						

Fonte: Do autor (2022).

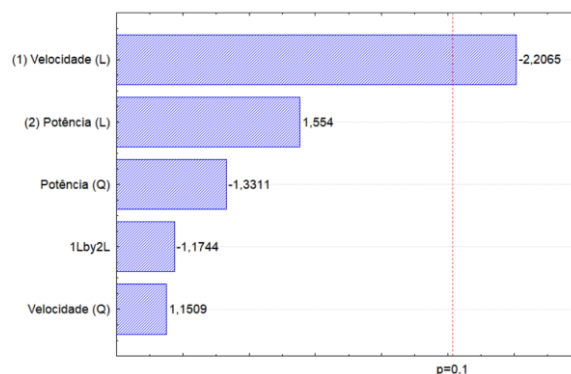
Nota-se, pela Tabela 6, que a cor média final da banana-passa produzida na condição de potência máxima (P=238W) e velocidade mínima (v=1,5 m/s) está de acordo com o que foi dito anteriormente visto que maiores potências e menores velocidades resultam em maiores alterações de cor, em relação às outras condições.

Como as bananas-passas comercializadas costumam apresentar uma coloração muito escura, a produção de banana-passa numa coloração mais próxima da cor *in natura* pode promover não só uma maior aceitação por parte dos consumidores, mas também um grande avanço na produção do alimento.

4.2.3. Índice de escurecimento

Além da diferença total de cor, o produto pode ser avaliado com o índice de escurecimento (BI). Os índices de escurecimento máximo e mínimo foram calculados para as amostras submetidas às condições de potência máxima ($P=238$ W) e velocidade mínima ($v=1,5$ m/s), e potência mínima ($P=118$ W) e velocidade máxima ($v=1,5$ m/s), nos valores de 236,44 e 70,37, respectivamente. Os efeitos dessas variáveis, no índice de escurecimento, estão disponíveis na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de Pareto para índice de escurecimento da banana-passa.



Fonte: Do autor (2022).

O índice de escurecimento depende das coordenadas de cor, também utilizadas para avaliar a diferença total de cor, e por isso, esperava-se que a influência da potência e velocidade do ar fosse semelhante nas duas análises.

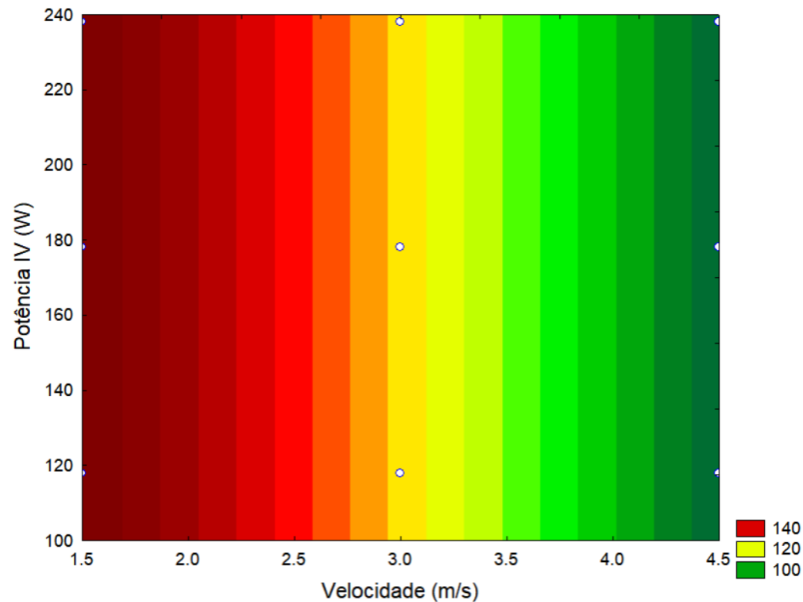
A Figura 20, no entanto, demonstra que apenas o efeito linear da velocidade teve influência significativa nos valores de índice de escurecimento ($p < 0,1$), sendo que o aumento da velocidade do ar levou à menores valores de BI. Esse comportamento converge com os estudos de outros autores, como Kumar et al. (2005), que relatam o aumento do escurecimento da amostra com a temperatura – fator dependente do infravermelho – na secagem de cebolas. No presente trabalho, a redução do escurecimento da amostra pode estar relacionada à redução da temperatura devido ao aumento da velocidade do ar, conforme pode ser visualizado nas Figuras 13 e 14.

A Figura 21 demonstra a relação entre o índice de escurecimento e as variáveis de potência infravermelha e velocidade. Observa-se que o índice de escurecimento não é influenciado pela potência IV e, conforme demonstrado pelo modelo gerado ($R^2=0,3021$) descrito na Equação 26, apenas a velocidade (v') exerce efeito sobre esse parâmetro.

$$BI = 122,7388 - 33,5519 * v' \quad (26)$$

De maneira a minimizar a alteração da cor do produto, em relação à sua forma in natura, é interessante manter o índice de escurecimento num valor mínimo.

Figura 21 – Gráfico de contorno para índice de escurecimento da banana-passa.



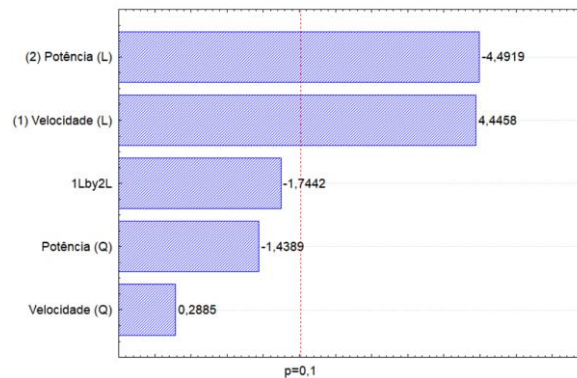
Fonte: Do autor (2022).

4.2.4. Consumo específico de energia

O consumo específico de energia (SEC) relaciona a quantidade de energia consumida com a massa de água evaporada, sendo de grande valor para avaliar e monitorar a eficiência do processo de secagem em função das condições utilizadas. O valor máximo de SEC foi obtido na condição de velocidade máxima ($v=4,5$ m/s) e potência mínima ($P=118$ W) no valor de $56,64$ kWh/kg_{água evaporada}, enquanto o valor mínimo de $12,51$ kWh/kg_{água evaporada} foi alcançado na condição de potência máxima ($P=238$ W) e velocidade mínima ($v=1,5$ m/s). A

Figura 22 fornece as informações necessárias para descrever o impacto dessas variáveis no SEC.

Figura 22 – Diagrama de Pareto para consumo específico de energia.



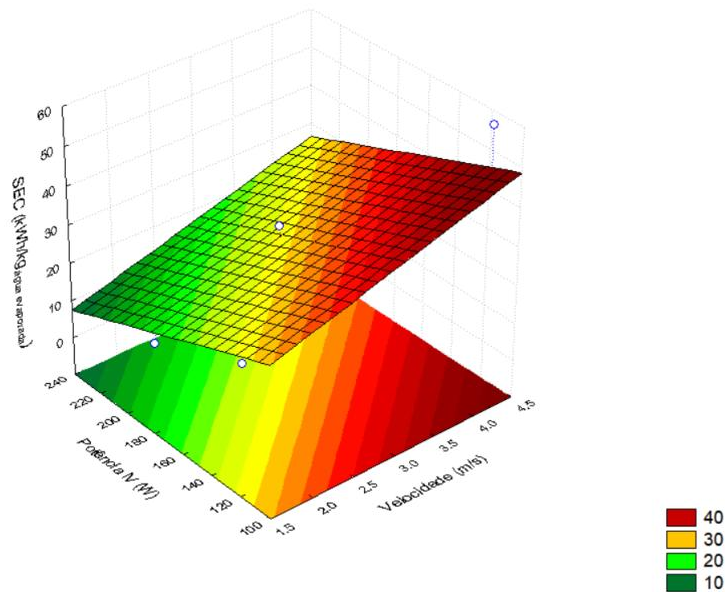
Fonte: Do autor (2022).

Primeiramente, observa-se que os efeitos quadráticos da velocidade e potência, bem como a interação entre potência e velocidade, não foram significativos ao processo ($p > 0,1$). Já os lineares, que foram significativos, possuem magnitudes semelhantes, porém de sinais opostos.

A diminuição do SEC com o aumento da potência infravermelha, bem como o aumento do SEC com o aumento da velocidade do ar, eram esperados e condizem com o reportado por El-Mesery et al. (2019) na secagem de tomates. Ao aumentar a intensidade de infravermelho, eleva-se a temperatura do material, assim como as taxas de secagem, enquanto que ao aumentar a velocidade, aumentam-se as taxas de transferência de calor entre o ar e a amostra, o que resulta no resfriamento do material.

A Figura 23 permite visualizar a relação entre a potência e a velocidade do ar com o valor de SEC. É possível concluir que SEC baixos não podem ser obtidos em condições de alta velocidade e, ainda assim, dependem de potências mais elevadas para fazê-lo. Outro ponto observado é que mesmo na condição de menor magnitude de ambas as variáveis ($P=118$ W e $v=1,5$ m/s), o consumo específico de energia ainda é maior que o observado na mesma velocidade, mas com potência máxima ($P=238$ W), demonstrando a importância do infravermelho no controle e/ou otimização do consumo específico de energia.

Figura 23 – Superfície de resposta para consumo específico de energia.



Fonte: Do autor (2022).

A Equação 27 dispõe do modelo gerado para o consumo específico de energia ($R^2 = 0,7978$) em função da potência (P') e da velocidade do ar (v') codificadas.

$$SEC = 26,8134 + 9,4644 * v' - 9,5625 * P' \quad (27)$$

A condução da secagem deve ser feita, preferencialmente, em condições que apresentem um SEC baixo. Desta forma, assegura-se um processo de maior eficiência e com melhor aproveitamento energético, caracterizado por um menor consumo de energia por quantidade de água removida.

4.3. Análise de desejabilidade e otimização das condições operacionais

A otimização das condições operacionais foi obtida através do cálculo da desejabilidade, pelas Equações 20, 21 e 22, tomando como base as características desejáveis para o produto: valores mínimos de umidade final, consumo específico de energia (SEC), diferença total de cor (ΔE) e índice de escurecimento (BI). Conforme exposto na análise dessas variáveis, esses parâmetros contribuem com a estabilidade, qualidade e aceitação do produto, estendendo seu tempo de prateleira e tornando-o mais atrativo para consumo.

A Figura 24 apresenta os valores preditos para as características do produto e a desejabilidade, obtidos no *software* Statistica 7.0. Vale ressaltar que se denominam como

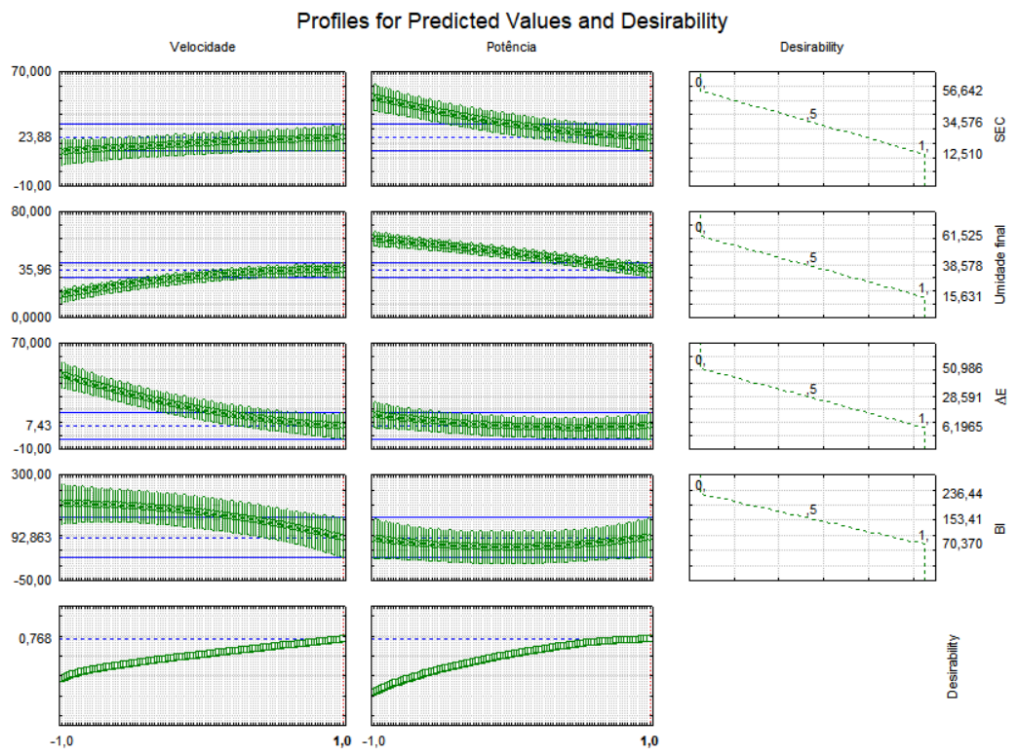
valores preditos, os valores estimados pelo *software*, com base nos modelos gerados para umidade final, diferença total de cor, índice de escurecimento e consumo específico de energia, em conformidade com os critérios estabelecidos e atribuídos à condição ótima de operação. Já a Tabela 7 apresenta a escala de desejabilidade, apresentada por Lazic (2016), que avalia a qualidade do produto em função do valor desse parâmetro.

Tabela 7 – Classificação de desejabilidade.

Valor	Desejabilidade
1,0	Excelente
0,80 - 1,0	Muito boa
0,63 - 0,80	Boa
0,37 - 0,63	Satisfatória
0,20 - 0,37	Ruim
0,0 - 0,20	Muito ruim

Fonte: Adaptado de Lazic (2016).

Figura 24 – Condição de operação ótima e valores previstos para banana-passa.



Fonte: Do autor (2022).

A desejabilidade global foi estimada em 0,768 e denota um produto de boa qualidade, segundo a Tabela 7. Isso aponta que, na escala de 0 (completamente inaceitável) e 1 (qualidade máxima), a condição ótima de operação consegue resultar em um produto aceitável (LAZIC, 2006).

A melhor condição de operação, de forma a respeitar as características desejadas, foi obtida com velocidade do ar de secagem a 4,5 m/s e potência de radiação infravermelha a 238 W. Esses resultados estão de acordo com o previsto na análise de influência dessas variáveis nas características do produto seco. É provável que esse valor de velocidade seja suficiente para amenizar o aquecimento da amostra e evitar a degradação da cor, ao passo que o valor de potência está alinhado à redução da umidade e diminuição do consumo de energia específico.

Os valores preditos, ou seja, estimados para o produto “otimizado” pela função de desejabilidade, para umidade final, consumo específico de energia, diferença total de cor e índice de escurecimento são de 35,96% (b.u.), 23,88 kWh/kg_{água evaporada}, 7,43 e 92,86, respectivamente. Observa-se, contudo, que o valor de umidade não respeita as exigências da RDC n° 272 de 22 de setembro de 2005 e, portanto, não pode ser comercializado. Apesar disso, destaca-se que a cor média do produto “otimizado” se demonstrou mais próxima da *in natura* que as bananas-passa disponíveis no comércio de Lavras (MG) e Resende (RJ), conforme pode ser visualizado na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação da cor média da banana-passa “otimizada” com as disponíveis no comércio.

Produto			
<i>In natura</i>	“Otimizado”	Comércio – Lavras (MG)	Comércio – Resende (RJ)

Fonte: Do autor (2022)

A cor da banana *in natura* e das comercializadas em Resende e Lavras também foram obtidas pela metodologia de Yam e Papadakis (2004). Já a cor “otimizada” foi estimada no *software Excel*, com a ferramenta *solver*, tomando como base a diferença total de cor de 7,43 obtida na análise estatística. Vale ressaltar que a cor média otimizada se baseia em uma previsão de cor e, com isso, a cor do produto real pode sofrer alterações e/ou apresentar diferentes tonalidades, visto que a cor, em si, depende das coordenadas que a compõe.

Diante da análise de desejabilidade, recomenda-se a exploração de tempos maiores de secagem nas mesmas condições empregadas, visto que o presente trabalho se limitou a um período de 6 horas. Dessa forma, é provável a obtenção de um produto com menor umidade final, atendendo o limite estabelecido por lei, ao custo de um aumento da diferença total de cor, consumo específico de energia e índice de escurecimento, em decorrência do maior período de secagem.

5. CONCLUSÃO

Este estudo permitiu elucidar o processo de secagem de bananas em função da potência de radiação infravermelha e da velocidade do ar de secagem não aquecido, aferindo-se a influência das diferentes condições de secagem no produto final.

As curvas de taxa de secagem indicaram que, durante todo o tempo de secagem, a difusão de umidade controlou o processo, visto que o período de taxa decrescente foi o único observado. Determinaram-se então os coeficientes de difusividade efetiva e sua dependência das condições de secagem, em que maiores potências e menores velocidades aumentaram sua magnitude. O modelo difusivo de Fick para placa plana semi-infinita não se demonstrou eficaz na representação da cinética de secagem ($R^2 \geq 0,7981$ e $SQR \leq 0,1872$). Maiores potências de radiação infravermelha e menores velocidades aceleraram o processo de secagem, permitindo a obtenção de menores umidades em menores períodos de tempo.

Todas as variáveis de resposta foram influenciadas pelas condições de secagem, respeitando-se o nível de confiança de 90%, com exceção do índice de escurecimento (BI) influenciado significativamente ($p < 0,1$) apenas pela velocidade do ar. Apenas uma condição de secagem ($P=238$ W e $v=1,5$ m/s) se demonstrou eficaz em atingir umidades inferiores a 20% (b.u.), conforme exige a legislação, verificando-se a redução da umidade final do material com o aumento da potência e diminuição da velocidade. O consumo específico de energia (SEC) apresentou o mesmo comportamento demonstrado para a umidade, ou seja, maiores potências e menores velocidades resultaram em processos mais eficientes – menor quantidade de energia consumida por quilo de umidade evaporada. Maiores velocidades e menores potências de infravermelho – condição que acarreta em temperaturas de secagem mais amenas - resultaram em bananas-passas com menor diferença total de cor (ΔE). Maiores velocidades resultaram em menores valores de índice de escurecimento.

As condições operacionais ótimas são de 4,5 m/s e 238 W, o que resulta num produto com 35,96% (b.u.) de umidade final, com um consumo de energia específico de 23,88 kWh/kg_{água evaporada}, diferença total de cor de 7,43 e índice de escurecimento de 92,86. Apesar da otimização do processo, a umidade final do produto ainda não atende a legislação vigente e, por isso, faz-se necessário avaliar o processo em tempos de secagem mais elevados, visto que as secagens foram limitadas à 6 horas. A cor do produto “otimizado” se demonstrou mais próxima da *in natura* que as disponíveis no mercado de Lavras (MG) e Resende (RJ).

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem trabalhos disponíveis na literatura, como de Cardoso et al. (2014), que sugerem o pré-tratamento de bananas nanica como forma de aprimorar as qualidades sensoriais da banana-passa produzida em estufas. Todavia, não foram encontrados estudos envolvendo o pré-tratamento de bananas na secagem IV ou na secagem híbrida. Portanto, sugere-se a adição de uma etapa de pré-tratamento em futuros estudos, a fim de verificar se resultados semelhantes podem ser obtidos na secagem híbrida, mesmo diante da utilização de maiores temperaturas, o que, de acordo com esse trabalho, resultaria em menores tempos de secagem. Além disso, sugere-se avaliar o efeito da redução da espessura do material, bem como o aquecimento do ar de secagem, tanto na redução do tempo como na qualidade do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAFRUTAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES E EXPORTADORES DE FRUTAS E DERIVADOS. **Novo episódio da série “de lá pra cá” mostra o quanto as frutas são importantes no dia a dia do brasileiro**. Disponível em: <<https://abrafrutas.org/2021/11/novo-episodio-da-serie-de-la-pra-ca-mostra-o-quanto-as-frutas-sao-importantes-no-dia-a-dia-do-brasileiro/>>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- ABOUD, S. A. et al. A comprehensive review on infrared heating applications in food processing. **Molecules**, v. 24, n. 22, artigo n. 4125, 2019.
- ADAK, N.; HEYBELI, N.; ERTEKIN, C. Infrared drying of strawberry. **Food Chemistry**, v. 219, p. 109-116, 2017.
- AFZAL, T. M.; ABE, T.; HIKIDA, Y. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 177-182, 1999.
- ANDRADE, K. S.; PRADO, M. M.; MARQUES, L. G. Estudo da transferência de calor e massa na secagem infravermelho combinada com convecção forçada do resíduo de laranja. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 10, p. 20199-20206, 2019.
- ANVISA. **RDC N°272, DE 22 DE SETEMBRO DE 2005**, 2005.
- AOAC – ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analytical of the Association of Official Analytical Chemists**. 15. ed. Washington, v. 2. 1990.
- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. P. **Engenharia de Processos de Separação**. Lisboa: IST Press, 2017.
- BERGMAN, T. L. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- BRANDÃO, R. J. et al. Heat and mass transfer, energy and product quality aspects in drying processes using infrared radiation. In: DELGADO, J.; BARBOSA DE LIMA, A. (eds). **Drying and Energy Technologies**. v. 63, p. 111-130, 2016.
- BORGES, A. L. et al. **A cultura da banana**. 3. ed. rev. e aum. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- CALADO, V. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. [s.l.] Editora E-papers, 2003.
- CARDOSO, F. F. et al. Produção de banana-passa e avaliação sensorial. **IV Encontro de Jovens Talentos da Embrapa Cerrados**. 2009.
- CORRÊA, J. L. G et al. Secagem de bananas prata e d’água por convecção forçada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, p. 605-612, 2010.
- COSTA, E. N. **Secagem industrial**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2007.
- EL-MESERY, H. S. et al. Evaluation of infrared radiation combined with hot air convection for energy-efficient drying of biomass. **Energies**, v. 12, p. 2818-2833, 2019.
- EL-MESERY, H. S.; MWITHIGA, G. Performance of a convective, infrared and combined infrared-convective heated conveyor-belt dryer. **J Food Sci Technol**, v. 52, p. 2721-2730, 2015.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Banana**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/banana>>. Acesso em: 19 jan. 2022.
- HEBBAR, H. U.; VISHWANATHAN, K. H.; RAMESH, M. N. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 557-563, 2004.
- HEE HAN, H. **Utilização da função desirability na otimização do processo de usinagem da superliga NIMONIC 80A**. 2015. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Estadual Paulista (Campus de Guaratinguetá), 2015.

- 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.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de banana**. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/banana/br> >. Acesso em: 20 jan. 2022.
- KRINSKY, N. I.; JOHNSON, E. J. Carotenoid actions and their relation to health and disease. **Molecular Aspects of Medicine**, v. 26, p. 459-516, 2005.
- KUMAR, D. G. P. et al. Infrared and hot air drying of onions. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 29, p. 132-150, 2005.
- LAZIC, Z. R. **Design of experiments in chemical engineering: a practical guide**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.
- LECHTANSKA, J. M.; SZADZINSKA, J.; KOWALSKI, S. J. Microwave- and infrared assisted convective drying of green pepper: Quality and energy considerations. **Chemical Engineering and Processing**, v. 98, p. 155-164, 2015.
- MACIEL, K. S. **Otimização das condições do processo de secagem do extrato de café em leito de espuma e aplicação em mistura para cappuccino**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.
- MARTINS, B. E. B. et al. Remoção de metais da água utilizando cascas de bananas frescas. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 36806-36817, 2021.
- MASKAN, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v. 48, p. 169-175, 2001.
- MONTEIRO, R. L. **Secagem de banana (var. Prata) em campo de micro-ondas com vácuo contínuo ou intermitente**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.
- NACHAISIN, M.; JAMRADLOEDLUK, J.; NIAMNUY, C. Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice. **Journal of Food Process Engineering**, v. 39, p. 306-318, 2016.
- NAKNAEN, P.; CHAROENTHAIKIJ, P.; KERDSUP, P. Physicochemical properties and nutritional compositions of foamed banana powders (*Pisang Awak*, *Musa sapientum* L.) dehydrated by various drying methods. **Walaiak Journal of Science and Technology**, v. 13, n. 3, p. 177–191, 2016.
- NATHAKARANAKULE, A.; JAIBOON, P.; SOPONRONNARIT, S. Far-infrared radiation assisted drying longan fruit. **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 4, p. 662-668, 2010.
- NERIS, T. S. et al. Avaliação físico-química da casca de banana (*Musa spp.*) *in natura* e desidratada em diferentes estádios de maturação. **Ciência e Sustentabilidade – CeS**, Juazeiro do Norte, v. 4, n. 1, p. 5-21, 2018.
- NUTHONG, P. et al. Kinetics and modeling of whole longan with combined infrared and hot air. **Journal of Food Engineering**, v. 102, p. 233-239, 2011.
- ONWUDE, D.I.; HASHIM, N.; CHEN, G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops. **Trends in Food Science & Technology**, v. 57, p. 132–145, 2016.
- PBMH & PIF – PROGRAMA BRASILEIRO PARA MODERNIZAÇÃO DA HORTICULTURA & PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS. **Normas de Classificação de Banana**. São Paulo: CEAGESP, 2006. (Documentos, 29).
- PEKKE, M. A. et al. Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 6, n. 3, p. 58-70, 2013.
- PHOUNGCHANDANG, S; WOODS, J. L. Moisture Diffusion and Desorption Isotherms for Banana. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 4, p. 651-657, 2000.

- PUANGSUWAN, K. et al. Hybrid infrared with hot air drying of Pisang-Awak banana: Kinetics and shrinkage quality. **Journal of Food Process Engineering**, e13827, 2021.
- PUENTE-DÍAZ, L. et al. Combined infrared-convective drying of murta (*Ugni molinae* Turcz) berries: kinetic modeling and quality assessment. **Drying Technology**, v. 31, n. 3, p. 329-338, 2013.
- RABELLO, A. A. et al. Utilização de radiação infravermelha na secagem de amostras de banana. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 4, p. 39317-39330, 2021.
- SACILIK, K.; ELICIN, A. K. The thin layer drying characteristics of organic apple slices. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 281-289, 2006.
- SADIN, R.; CHEGINI, G. R.; KHODADAKI, M. Development and performance evaluation of a combined infrared and hot air dryer. **Journal of Biological and Environmental Sciences**, v. 8, p. 11-18, 2014.
- SAKARE, P. et al. Infrared drying of food materials: Recent advances. **Food Engineering Reviews**, v. 12, p. 381-398, 2020.
- SEAPA – SECRETARIA DE ESTADO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Balanço do Agronegócio de Minas Gerais. Disponível em: <<https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/divulgado-balanco-do-agronegocio-de-minas-gerais-2020>>. Acesso em: 14 mar. 2022. 2021.
- SIDHUR, J. S.; ZAFAR, T. A. Bioactive compounds in banana fruits and their health benefits. **Food Quality and Safety**, v. 2, p. 183-188, 2018.
- SINGH, B. et al. Bioactive compounds in banana and their associated health benefits – A review. **Food Chemistry**, v. 206, p. 1-11, 2016.
- VERA CANDIOTI, L. et al. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta**, v. 124, p. 123–138, 2014.
- VISHWANATHAN, K. H.; HEBBAR, H. U.; RAGHAVARAO, K. S. M. S. Hot air assisted infrared drying of vegetables and its quality. **Food Sci. Technol. Res.**, v. 16, n. 5, p. 381-388, 2010.
- WALTER, M.; SILVA, L. P.; EMANUELLI, T. Amido resistente: características físico-químicas, propriedades fisiológicas e metodologias de quantificação. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 974-980, 2005.
- WANG, J. et al. Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices. **Journal of Food Engineering**, v. 224, p. 129-138, 2018.
- WANYO, P.; SIRIAMORNPNUN, S.; MESSO, N. Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, p. 22-30, 2011.
- WU, X.; ZHANG, M.; LI, Z. Influence of infrared drying on the kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps Militaris*. **LWT – Food Science and Technology**, v. 111, p. 790-798, 2019.
- 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.
- YUE, P.; WARING, S. Resistant starch in food applications. **Cereal Food World**, v. 43, n. 9, p. 690-695, 1998.