



RAYANE SOARES DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA BANANA PASSA
PRODUZIDA POR SECAGEM INFRAVERMELHO
ASSISTIDA POR CONVECÇÃO**

**LAVRAS – MG
2023**

RAYANE SOARES DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA BANANA PASSA PRODUZIDA POR
SECAGEM INFRAVERMELHO 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.

Profa. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél
Orientadora

Profa. Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa
Coorientadora

**LAVRAS – MG
2023**

RAYANE SOARES DE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA BANANA PASSA PRODUZIDA POR
SECAGEM INFRAVERMELHO ASSISTIDA POR CONVECÇÃO**

**EVALUATION OF THE QUALITY OF BANANA PRODUCED BY CONVECTIVE
ASSISTED INFRARED DRYING**

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. Irineu Petri Júnior
DEG/UFLA

Iaramarum de Jesus Falcão
PPGEAL/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**

AGRADECIMENTOS

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, gostaria de expressar minha sincera gratidão. Agradeço, em especial:

Aos meus pais, Alex Sandro e Adriana, e ao meu irmão Douglas, por não medirem esforços em investir na minha educação e pelo incentivo incondicional que serviu de alicerce para as minhas realizações. Essa vitória também é de vocês.

Aos meus amigos, especialmente, à Maria Rosa, pelos conselhos úteis, sorrisos e, às vezes, até puxões de orelha. Agradeço também ao Pablo, Rafael e Melissa pelos momentos que compartilhamos. Vocês tornaram essa trajetória extraordinária.

Às minhas orientadoras, Profa. Dra. Lidja Dahiane e Profa. Dra. Renata de Aquino pela dedicação e paciência. Seus valiosos conhecimentos foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório e técnicos da Universidade Federal de Lavras, pelo apoio e disposição inestimáveis durante esta etapa de pesquisa.

Ao corpo docente de Engenharia Química e à Universidade Federal de Lavras, pela excelência e qualidade do ensino oferecido, desempenhando um papel crucial na formação e no desenvolvimento de profissionais excepcionais.

RESUMO

O Brasil se destaca como o quarto maior produtor mundial de banana (*Musa ssp.*), tendo cultivado cerca de 6,8 milhões de toneladas em 2022. Esta fruta é reconhecida pelo seu elevado valor nutricional, apresentando em sua composição quantidades significativas de carboidratos, minerais, vitaminas do complexo A, B e C, além de compostos bioativos como flavonoides e ácidos fenólicos, os quais são considerados antioxidantes naturais. No entanto, a banana possui rápida deterioração após o amadurecimento, dificultando sua comercialização no estado *in natura*. Nesse contexto, técnicas de preservação como a secagem surgem como uma alternativa promissora para o desenvolvimento de novos produtos como a banana passa. A secagem, especialmente utilizando a tecnologia infravermelha (IV) assistida por convecção forçada se destaca como uma solução que não apenas prolonga a vida útil do produto final, mas também mantém suas propriedades nutritivas. Dessa forma, o presente trabalho objetivou caracterizar a banana passa desidratada por secagem infravermelho combinada com convecção forçada usando ar não aquecido, e compará-la com a banana *in natura*, a fim de avaliar o efeito da potência IV (118, 178W e 238 W) e da velocidade do ar de secagem (0,5, 1,0, e 1,5 m/s) sobre as propriedades do produto seco. Para isso, análises físico-químicas como teor de umidade, cinzas, pH, acidez total titulável, sólidos solúveis em °Brix, atividade de água e determinações de flavonoides totais foram efetuadas tanto na banana passa, como na fruta *in natura*. Além disso, o processo de secagem também foi avaliado com base no consumo específico de energia (*specific energy consumption* - SEC) e na emissão de CO₂. Os resultados experimentais indicam que, a secagem híbrida de bananas ocorreu no período de taxa decrescente para todas as condições avaliadas, indicando que o processo é controlado pelo mecanismo difusivo. A umidade final da banana passa produzida esteve na faixa de 12,32% a 38,47% em base úmida. O consumo específico de energia variou entre 10,23 e 67,04 kWh/kg_{água evaporada}, enquanto as taxas de emissão foram compreendidas no intervalo de $1,70 \cdot 10^{-5}$ a $7,77 \cdot 10^{-5}$ toneladas de CO₂. O teor de sólidos solúveis em ° Brix variou entre 45,64 e 68,97, e o pH entre 4,23 e 4,64. A acidez total titulável em porcentagem de ácido málico em 100 g de fruta apresentou valor mínimo e máximo de 0,43 e 1,48, respectivamente. O maior índice de atividade de água registrado foi de 0,8419 e o menor no valor de 0,3786. O teor de cinzas esteve na faixa de 2,92% a 19,01%. A diferença total de cor e o índice de escurecimento variaram de 9,95 a 49,99 e 44,08 a 165,67, respectivamente. O custo total foi de R\$38,07/Kg_{banana passa}. Também foi observada a influência significativa de ambas as variáveis operacionais no consumo específico de energia, emissão de CO₂, pH e índice de escurecimento com 90% de confiança e atividade de água com 95% de confiança. Ademais, verificou-se que na condição ótima de operação, o produto final atinge o teor de umidade mínimo estabelecido pela legislação e pode ser classificado como uma banana passa de boa qualidade.

Palavras-chaves: Secagem híbrida. Qualidade. Consumo energético.

ABSTRACT

Brazil stands out as the fourth-largest global producer of bananas (*Musa* spp.), cultivating around 6.8 million tons in 2022. This fruit is recognized for its high nutritional value, containing significant amounts of carbohydrates, minerals, vitamins A, B, and C, as well as bioactive compounds such as flavonoids and phenolic acids, considered natural antioxidants. However, bananas rapidly deteriorate after ripening, making their fresh sale challenging. In this context, preservation techniques like drying emerge as a promising alternative for the development of new products such as banana pass. Drying, especially using infrared (IR) technology assisted by forced convection, stands out as a solution that not only extends the shelf life of the final product but also preserves its nutritional properties. Thus, this study aimed to characterize dehydrated banana pass produced through infrared drying combined with forced convection using non-heated air and compare them with fresh bananas to evaluate the effect of IR power (118, 178 W, and 238 W) and drying air velocity (0.5, 1.0, and 1.5 m/s) on the properties of the dried product. For this purpose, physical-chemical analyses such as moisture content, ashes, pH, total titratable acidity, soluble solids in °Brix, water activity, and total flavonoid determinations were performed on both banana pass and fresh fruit. Additionally, the drying process was evaluated based on specific energy consumption (SEC) and CO₂ emissions. Experimental results indicate that hybrid drying of bananas occurred during the decreasing rate period for all evaluated conditions, suggesting a process controlled by diffusive mechanisms. The final moisture content of the produced banana pass ranged from 12.32% to 38.47% on a wet basis. Specific energy consumption varied between 10.23 and 67.04 kWh/kg_{evaporated water}, while emission rates ranged from $1,70 \cdot 10^{-5}$ e $7,77 \cdot 10^{-5}$ tons of CO₂. Soluble solids in °Brix varied between 45.64 and 68.97, and pH ranged from 4.23 to 4.64. Total titratable acidity, expressed as a percentage of malic acid in 100g of fruit, showed minimum and maximum values of 0.43 and 1.48, respectively. The highest water activity index recorded was 0.8419, and the lowest was 0.3786. Ash content ranged from 2.92% to 19.01%. Total color difference and darkening index varied from 9.95 to 49.99 and 44.08 to 165.67, respectively. The total cost was R\$38.07 per kilogram of dried banana. Furthermore, the significant influence of both operational variables on specific energy consumption, CO₂ emissions, pH, and darkening index was observed with 90% confidence, while water activity showed a significant influence with 95% confidence. Additionally, it was found that under optimal operating conditions, the final product meets the minimum moisture content established by regulations and can be classified as high-quality banana pass.

Keywords: Hybrid Drying. Quality. Energy Consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação numérica dos estágios de maturação de bananas.	13
Figura 2 – Espectro de ondas eletromagnéticas.	15
Figura 3 – Curvas de (a) umidade e (b) taxa de secagem em função do tempo.	18
Figura 4 – Estrutura química dos ácidos orgânicos.	20
Figura 5 – Relação entre a_w e ocorrência de reações e crescimento de micro-organismos em alimentos.	21
Figura 6 – Banana (a) <i>in natura</i> no estágio de maturação 6; (b) <i>in natura</i> no formato de rodela, e (c) seca na potência IV de 178 W e velocidade do ar de 1,0 m/s.	24
Figura 7 – Protótipo do secador infravermelho (IV) assistido por convecção.	25
Figura 8 – Superfície de resposta para o tempo de secagem.	32
Figura 9 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘P’ com (a) $v = 0,5$ m/s, (b) $v = 1,0$ m/s e (c) $v = 1,5$ m/s.	33
Figura 10 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘v’ com (a) $P = 118$ W, (b) $P = 178$ W e (c) $P = 238$ W.	34
Figura 11 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘P’ com (a) $v = 0,5$ m/s, (b) $v = 1,0$ m/s e (c) $v = 1,5$ m/s.	36
Figura 12 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘v’ com (a) $P = 118$ W, (b) $P = 178$ W e (c) $P = 238$ W.	36
Figura 13 – Superfície de resposta para (a) o consumo específico e para (b) a emissão de CO_2	39
Figura 14 – Superfície de resposta para o pH.	43
Figura 15 – Superfície de resposta para a atividade de água (a_w).	46
Figura 16 – banana (a) <i>in natura</i> , (b) seca em $P = 178$ W e $v = 0,5$ m/s, (c) <i>in natura</i> e (d) seca em $P = 238$ W e $v = 0,5$ m/s,	48
Figura 17 – Superfície de resposta para o índice de escurecimento (BI).	50
Figura 18 – Condição de operação ótima e valores previstos para a banana passa.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição da banana prata em relação ao seu valor nutritivo.....	13
Tabela 2 – Propriedades físico-químicas da banana passa.	22
Tabela 3 – Variáveis codificadas e em escala real do planejamento do experimento.....	26
Tabela 4 – Tempo de secagem e correspondentes valores de SEC e E _{CO2} para as condições analisadas.....	31
Tabela 5 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o tempo de secagem.	32
Tabela 6 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o SEC.....	38
Tabela 7 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre a emissão de CO ₂	38
Tabela 8 – Propriedades físico-químicas da banana in natura e para as condições analisadas.....	40
Tabela 9 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o pH das amostras.	42
Tabela 10 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre a atividade de água.....	46
Tabela 11 – ΔE e BI para a banana passa nas diferentes condições analisadas.	47
Tabela 12 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o BI.	49
Tabela 13 – Classificação de desejabilidade.	51
Tabela 14 – Bandeira tarifária da CEMIG.....	52
Tabela 15 – X _{B,U.} , consumo de energia e custo operacional para a produção de 1 kg de banana passa.	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1. Banana	12
2.2. Secagem.....	14
2.3. Cinética de Secagem.....	17
2.4. Análise de desempenho do processo	18
2.5. Propriedades físico-químicas.....	19
2.6. Análise estatística	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. Material.....	24
3.2. Equipamento.....	25
3.3. Processo de Secagem.....	25
3.3.1. Consumo específico de energia (SEC)	27
3.3.2. Emissão de CO ₂	27
3.4. Caracterização da matéria-prima e do produto seco.....	27
3.4.1. Umidade.....	27
3.4.2. Cinzas.....	28
3.4.3. Sólidos Solúveis Totais (SST)	28
3.4.4. Potencial Hidrogeniônico (pH).....	29
3.4.5. Acidez Total Titulável (ATT).....	29
3.4.6. Atividade de água (a _w)	29
3.4.7. Diferença total de cor (ΔE).....	29
3.4.8. Índice de escurecimento (BI).....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Aspectos de desempenho do processo.....	31
4.2. Caracterização do produto seco.....	39
4.3. Análise de desejabilidade e otimização das condições operacionais	50
5 CONCLUSÃO	54
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

No cenário mundial, o volume de exportação de bananas foi de 19,1 milhões de toneladas em 2022, de acordo com a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO). Sendo que, os principais países exportadores são Equador e Filipinas, e os maiores importadores são União Europeia e Estados Unidos (FAO, 2023). Embora o Brasil seja um dos maiores produtores da fruta, exporta menos de 5% de sua produção, sendo a maior parte destinada ao mercado interno do país (EMBRAPA, 2021).

A banana é conhecida por seu alto valor nutricional, porém enfrenta desafios relacionados à rápida deterioração após o amadurecimento, o que pode dificultar sua comercialização no estado *in natura* (BORGES et al., 2010). Além disso, a perda excessiva de frutos após a colheita representa um grande desafio, uma vez que parte da produção não atende aos padrões mínimos exigido para exportação e não pode ser armazenada por longos períodos. Nesse contexto, técnicas de preservação como a secagem surgem como uma alternativa econômica e promissora para o desenvolvimento de novos produtos a partir da banana. A banana em pó, por exemplo, pode ser empregada em diversas indústrias, como a de formulações alimentares, bebidas lácteas, bolos, biscoitos, sucos entre outros (NAKNAEN; CHAROENTHAIKIJ; KERDSUP, 2016).

Nos últimos anos, observa-se no Brasil um aumento considerável da comercialização de frutas desidratadas, também conhecidas como passas, em casas de produtos naturais e na sua utilização em barras nutritivas. De acordo o Instituto Brasileiro de Pesquisa de Frutas (IBRAF), em 2007, as importações de frutas desidratadas foram de cerca de 43 mil toneladas, equivalente a um montante de 100 mil dólares (GERMER et al., 2012). Além disso, a técnica de secagem não apenas atende a essa demanda de mercado, mas também contribui para a redução do volume e do peso dos alimentos, o que resulta em economias significativas nos custos de transporte e armazenamento (FELLOWS, 2006).

A convecção forçada é um método de secagem amplamente utilizado em produtos alimentícios, pois promove a redução de atividade enzimática e a preservação da qualidade do produto final. No entanto, é válido ressaltar que esse método geralmente apresenta baixa eficiência energética (NASCIMENTO et al., 2018). Sendo assim, tecnologias como a secagem por radiação infravermelha (IV) ganham destaque devido aos benefícios que oferecem, incluindo a capacidade de evidenciar o teor de compostos bioativos, reduzir custos de energia e a facilitar a integração com outras técnicas de aquecimento como, condução, convecção e micro-ondas (DA SILVA NETO et al., 2014).

A secagem híbrida, por sua vez, envolve a combinação de dois métodos em um único processo e tem demonstrado ser uma abordagem promissora, pois aumenta a taxa de secagem, diminui o consumo de energia e minimiza a degradação do produto, tornando-o comercialmente viável (SANTOS, 2009). Trabalhos recentes têm se concentrado em utilizar a radiação IV combinada com a convecção no processo de secagem com a finalidade de avaliar os parâmetros de qualidade em diversos alimentos, como o quiabo (EL-MESERY et al., 2023), a maçã (EL-MESERY; KAMEL; EMARA, 2021), o arroz (NANVAKENARI; MOVAGHARNEJAD; LATIFI, 2022) e a banana (DE SOUZA, 2022). Todavia, poucos estudos destinados a avaliar o teor de compostos bioativos e parâmetros físico-químicos de frutas, especialmente bananas, provenientes de secagem híbrida foram encontrados. Uma pesquisa relevante nesse campo foi conduzida por Malakar et al. (2023) para o abacaxi.

Portanto, o objetivo geral do presente trabalho foi investigar o efeito da potência IV e da velocidade do ar de secagem sobre a qualidade da banana passa produzida por secagem infravermelho (IV) combinada com convecção forçada usando ar não aquecido.

A proposta intitulada “Avaliação da qualidade da banana passa produzida por secagem infravermelho assistida por convecção” apresenta como objetivos específicos:

- Caracterização da banana *in natura* e da banana passa por meio de análises físico-químicas como teor de umidade, cinzas, pH, acidez total titulável, sólidos solúveis em °Brix e atividade de água;
- Determinação do consumo específico de energia (*specific energy consumption - SEC*), cor e índice de escurecimento do produto em cada condição experimental;
- Estimativa das emissões de CO₂ decorrentes do processo de secagem.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Banana

Originária no sudeste da Ásia e no Pacífico Ocidental, as bananas (*Musa spp.*) foram uma das primeiras plantas frutíferas a serem cultivadas pelo homem. Posteriormente, foi difundida na África, nas Américas e no sul do Pacífico, onde adquiriu elevada relevância econômica (VALMAYOR et al., 2001).

Trata-se de uma fruta de extrema importância no setor produtivo e comercial, contribuindo para o desenvolvimento das regiões envolvidas em seu cultivo. Além disso, a banana é um alimento complementar da dieta da população e desempenha um papel social significativo, sendo responsável pela geração de postos de trabalho e pelo aumento da renda das comunidades locais (FIORAVANÇO et al., 2003).

A banana é uma fruta climatérica cultivada, principalmente, em países de climas tropicais e subtropicais. Nesse contexto, o Brasil se destaca como o quarto maior produtor mundial de banana, ficando atrás apenas da Índia, da China e da Indonésia (PIO, 2023). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção nacional atingiu cerca de 6,8 milhões de toneladas em 2022. O estado de Minas Gerais produziu aproximadamente 842 mil toneladas de bananas neste mesmo ano, se posicionando como o segundo maior produtor brasileiro da fruta, abaixo apenas do estado de São Paulo (IBGE, 2022).

Existem inúmeras variedades de banana, dentre elas destaca-se a ‘Prata’, sendo uma das mais produzida e consumida no Brasil. Classificada como um alimento que possui elevado valor nutricional, a banana prata é uma excelente fonte de energia e apresenta em sua composição carboidratos como o amido, minerais como o potássio e vitaminas do complexo A, B e C conforme apresentado pela Tabela 1 (BORGES et al., 2006). Além disso, a fruta possui boa aceitação e está fortemente presente na dieta da população devido às suas propriedades sensoriais (MATSUURA; COSTA; FOLEGATTI, 2004).

Os cultivares de banana também possuem quantidades significativas de polifenóis, incluindo flavonoides e ácidos fenólicos, os quais são considerados antioxidantes naturais. Essas substâncias desempenham um papel importante na proteção contra os radicais livres, que podem causar uma série de doenças, como câncer, diabetes e problemas cardiovasculares (MOKBEL e HASHINAGA, 2005).

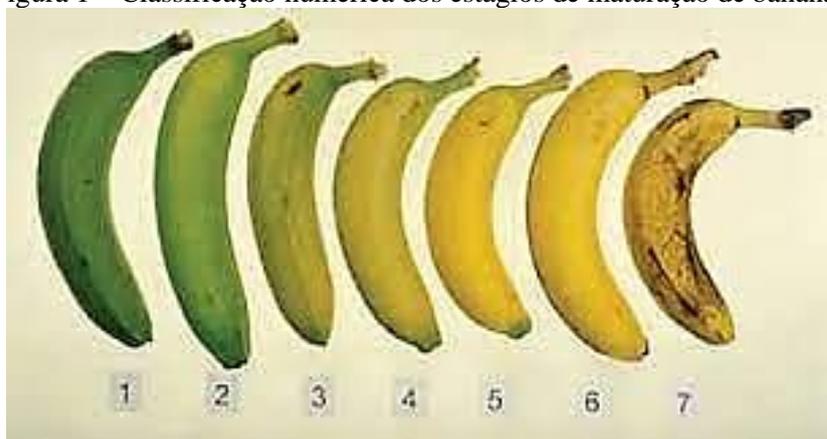
Tabela 1 – Composição da banana prata em relação ao seu valor nutritivo.

Nutriente	Quantidade/100 g de material comestível
Proteína	1,3 g
Lipídeo	0,1 g
Carboidrato	26 g
Fibra Alimentar	2 g
Cinzas	0,8 g
Cálcio	8 mg
Magnésio	26 mg
Fósforo	22 mg
Potássio	358 mg
Riboflavina	0,02 mg
Vitamina C	21,6 mg

Fonte: Adaptado de UNICAMP (2011).

Tantos as propriedades nutricionais como as sensoriais das bananas sofrem alterações durante o processo de amadurecimento. Sendo assim, a avaliação do grau de maturação da fruta é comumente realizada por meio de uma escala composta por sete etapas, conforme demonstrado pela Figura 1. Nas etapas iniciais, a fruta apresenta sabores adstringentes e um teor de amido considerável. Por outro lado, nas etapas finais, que vão da etapa 6 a 7, a fruta está madura, tornando-se mais doce e macia (AURORE *et al*, 2009; PEREIRA, 2012).

Figura 1 – Classificação numérica dos estágios de maturação de bananas.



Fonte: PEREIRA (2012).

Com base nos dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares do IBGE, é possível afirmar que o consumo médio de banana por habitante no Brasil é de 25 kg por ano (IBGE, 2017-2018). Sua comercialização ocorre, majoritariamente, na forma *in natura*. No entanto, a fruta ainda pode ser submetida a processos industriais, configurando-se como uma alternativa para aproveitar os excedentes de produção e os frutos que não atendem aos padrões de qualidade necessários para o consumo *in natura* (JESUS *et al.*, 2005). Dessa forma, a banana pode ser

comercializada como fruta em calda, produtos desidratados, geleias ou até mesmo como farinhas (ARAUJO, 2000).

De acordo com Castro Júnior & Arenillo (2016), o escurecimento da banana torna-se visível em poucos minutos após o descascamento e o corte, devido à ação da enzima polifenoloxidase, que catalisa a oxidação dos fenóis presentes na polpa. Isso resulta na formação de quinonas, que, por sua vez, se condensam e geram melanina, responsável pelos pigmentos escuros. Nesse contexto, a industrialização da banana por meio da desidratação prolonga sua vida útil nas prateleiras e agrega valor ao produto, uma vez que contribui para a melhoria de aspectos sensoriais como a cor (JESUS et al., 2005).

A banana passa pode ser obtida mediante secagem natural ou artificial da fruta madura (CANO-CHAUCA et al., 2004). O processo de desidratação é uma técnica eficaz de preservação de alimentos em virtude da redução de umidade, que favorece o aumento da concentração de nutrientes e reduz o volume para o transporte (BATISTA et al., 2014). Por se tratar de um produto desidratado, a banana passa pode ser consumida com segurança por até dois anos após a produção, e esse mercado está em crescente expansão (RABELLO et al., 2021).

2.2. Secagem

A secagem é uma operação unitária amplamente empregada na preservação de alimentos, sendo reconhecida como um dos métodos mais econômicos disponíveis (PARK et al., 2004). É também uma das operações mais complexas, devido à dificuldade em se descrever matematicamente os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa. Além do setor alimentício, o processo de secagem também é utilizado em indústrias têxteis, agrícolas, cerâmicas, químicas, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros (Menon e Mujumdar, 1987).

De acordo com Kee (1972), a secagem consiste na remoção de uma substância volátil, comumente a água, de determinado produto. Dessa forma, é necessário fornecer calor para evaporar a umidade do material e um sorvedouro para retirar o vapor de água formado a partir da superfície do material a ser seco. Além disso, para a preservação dos alimentos, a operação de secagem destaca-se como um dos métodos mais simples e mais econômicos. (PARK et al., 2004).

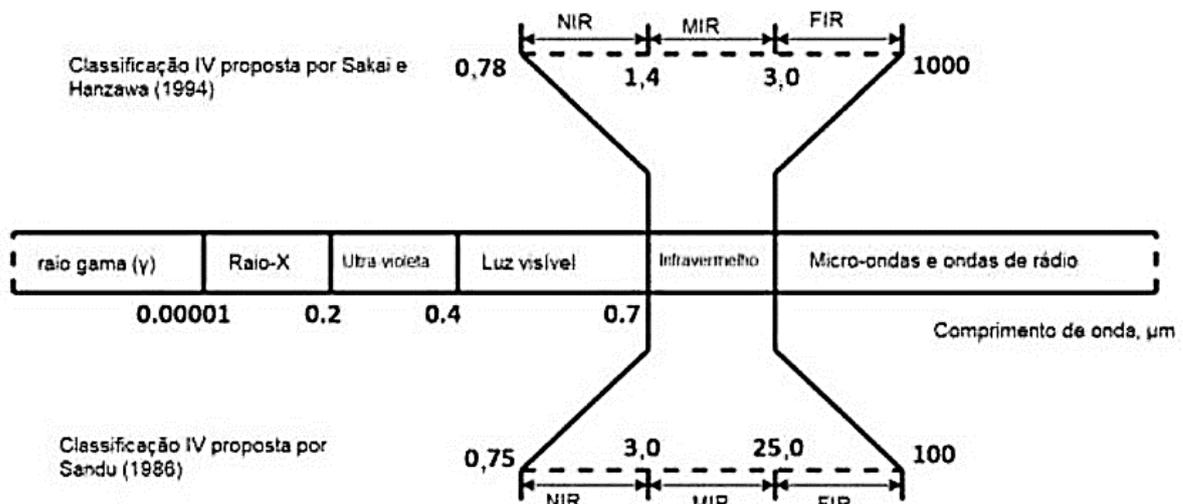
O processo de secagem pode ocorrer em batelada, em que o material permanece dentro do equipamento por um certo período de tempo, ou contínuo, em que o produto é inserido e

removido constantemente, sem que haja interrupção do processo. Já a transferência de calor pode decorrer devido à condução, à convecção ou à radiação (MARTINS et al., 2020).

Existem diversos métodos de secagem, cuja aplicação depende da natureza do produto a ser processado. Na indústria de alimentos, a secagem convectiva é a mais amplamente empregada. No entanto, devido à transferência de calor ocorrer de forma indireta, a eficiência energética desta operação é baixa, resultando em custos operacionais mais elevados (NASCIMENTO; BIAGI; OLIVEIRA, 2015). Já o aquecimento por radiação micro-ondas apresenta limitações como o aquecimento não uniforme, degradação da textura e penetração limitada das ondas no material, além de baixa conversão da energia elétrica em radiação (MOTEBALI e TABATABAEE KOLOOR, 2017; VALARMATHI et al., 2017).

A radiação térmica também pode ser utilizada nos processos de secagem através da energia eletromagnética dos comprimentos de onda do infravermelho (IV) (SALAGNAC et al., 2004). De acordo com Sakai e Hanzawa, (1994), os comprimentos de onda de infravermelho frequentemente utilizados são classificados 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). No entanto, para Sandu (1986) a classificação é feita da seguinte forma: “próximo” (entre 0,75 e 3,0 μm), médio (entre 3,0 e 25,0 e 3,0 μm) e distante (entre 25,0 e 100,0 μm). A Figura 2 apresenta ambas as classificações do espectro eletromagnético. Desse modo, os comprimentos de onda podem ser ajustados no processo de secagem de alimentos para manter as condições mais próximas da faixa predominante de absorção de água (pouco acima de 3 μm) ou para evitar o aquecimento superficial do material e alterações colorimétricas (ERDOGDU et al., 2015).

Figura 2 – Espectro de ondas eletromagnéticas.



Fonte: Adaptado de Sakare et al. (2020).

As vantagens da radiação infravermelha são inúmeras, o que tem contribuído para o seu crescente uso na indústria. Por meio desta fonte de tratamento térmico, a energia é transmitida diretamente para o produto. Os equipamentos são mais simples e fáceis de serem manipulados e a rápida resposta transiente resulta em economias significativas do tempo de processamento e dos custos com energia (SANDU, 1986). Diversos estudos têm explorado o uso da radiação infravermelha, incluindo a secagem de sementes de melancia (OLIVEIRA, 2019), do melão (BRANDÃO, 2021) e do café (GUEDES e MOREIRA, 2019).

Rabello et al. (2021) construíram um protótipo para a secagem de bananas prata a partir dos resultados obtidos por simulação computacional. As amostras foram submetidas à radiação infravermelho durante 70 minutos e a massa foi estabilizada a partir de 50 minutos. O teor de umidade inicial da banana *in natura* era 69,9 g/100 g, após a secagem esse valor reduziu para 21,2 g/100 g, atendendo aos padrões adotados para a comercialização da banana desidratada.

Recentemente, o processo de secagem híbrido que combina a radiação (IV) e a convecção vêm sendo alvo de inúmeras pesquisas devido ao fato de que essa abordagem pode aumentar a eficiência energética e as taxas de transferência de massa, reduzir o tempo de secagem e preservar a qualidade do material pelo efeito sinérgico entre os dois modos. Além disso, esse método oferece a vantagem da facilidade de adaptação do secador e da incorporação do aquecimento infravermelho (JATURONGLUMLERT e KIATSIRTOAT, 2010; HEBBAR et al., 2004). Estudos sobre a secagem híbrida vêm sendo desenvolvidos em alimentos, a citar o coco (SAHARI, 2023), o abacaxi (MALAKAR et al., 2023) e os grãos de *Moringa oleifera* Lam (NASCIMENTO, 2014).

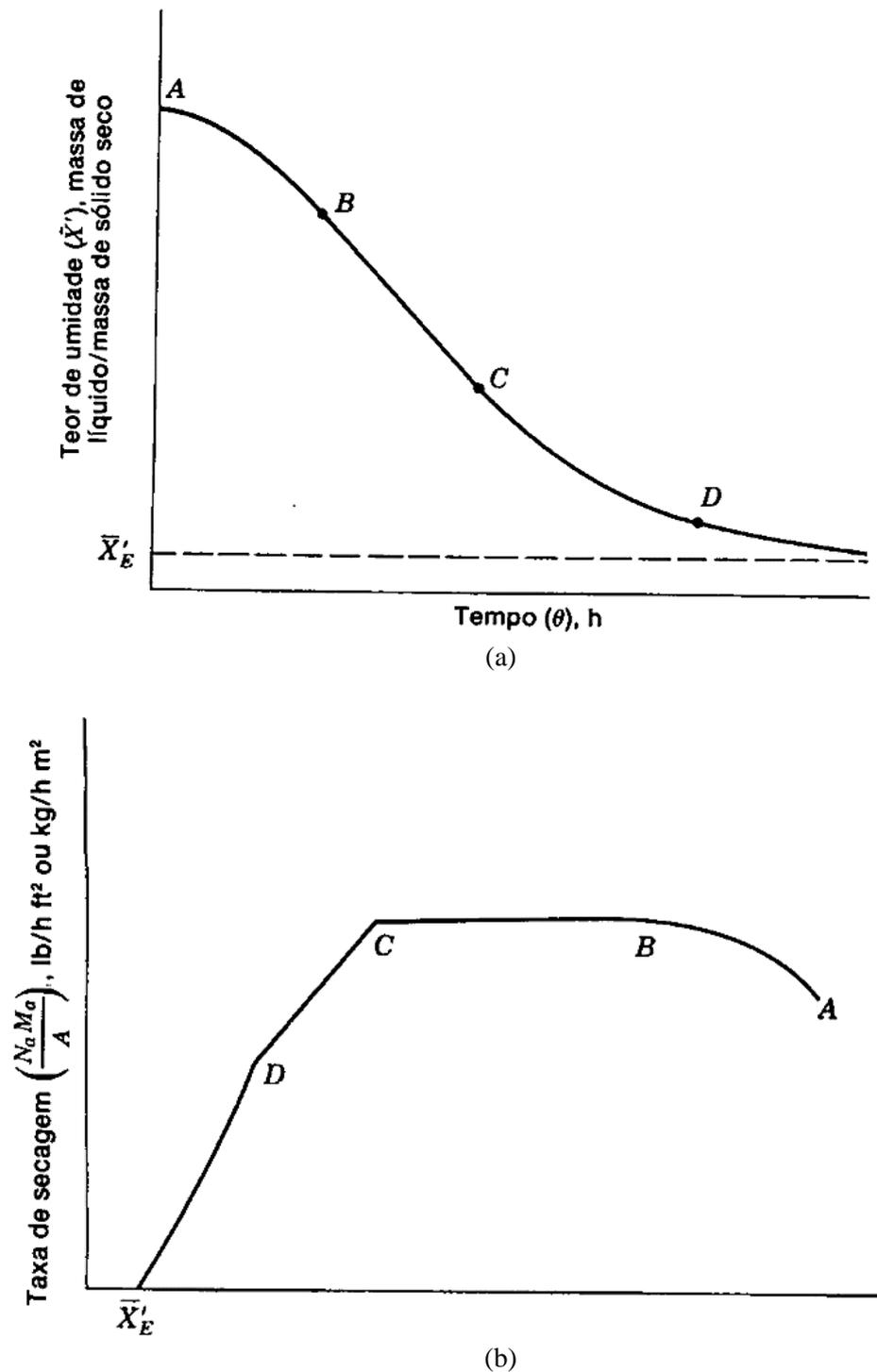
Andrade, Do Prado e Marques (2019) avaliaram a secagem híbrida de infravermelho com a convecção forçada para resíduos de laranja. Os resultados obtidos pelos autores indicam que para a menor temperatura da fonte IV (80 °C), o aumento da velocidade do ar aquecido e não aquecido favorece a taxa de secagem. Além disso, verificaram também que o aquecimento do ar exerceu maior influência para a menor velocidade (0,4 m/s) e temperatura da fonte IV.

De Souza (2022) estudou o efeito da potência IV (118, 178, 238W) e da velocidade do ar (1,5, 3,0, 4,5 m/s) não aquecido no processo de secagem de bananas durante seis horas. O autor concluiu que o consumo específico de energia (SEC) foi menor para elevadas potências e menores velocidades do ar. Em contrapartida, bananas-passas com menor diferença total de cor foram obtidas a partir de elevadas velocidades e menores potências de infravermelho. Além disso, foi observado no estudo que maiores velocidades do ar não aquecido favorecem o resfriamento do material durante a secagem, o que provoca taxas de secagem mais brandas.

2.3. Cinética de Secagem

A cinética de secagem fornece informações sobre o comportamento da transferência de calor e massa e pode ser descrita por modelos matemáticos, os quais são fundamentais para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de secadores, bem como para estimar o tempo necessário para a redução do teor de água de um material. A cinética de secagem pode ser representada pelas curvas de umidade (X) e taxa de secagem (dX/dt) em função do tempo (MAIA, 2020). A secagem também pode ser expressa por modelos teóricos, puramente empíricos ou semi-empíricos (MADAMBA, 2003). Os modelos teóricos, obedecem à segunda Lei de Fick e descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido, comumente, considerando a difusão como mecanismo principal. Já os modelos semi-empíricos, fundamentam-se na segunda Lei de Newton para o resfriamento, enquanto os empíricos estabelecem uma relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem (MARTINAZZO et al., 2007). A Figura 3 (a) apresenta uma curva típica de secagem baseada no teor de umidade em função do tempo. Já a Figura 3 (b) mostra uma curva de taxa de secagem ao longo do tempo. Nas duas figuras observa-se que ao final do processo, quando a pressão de vapor sobre o sólido iguala-se a pressão parcial do vapor no gás secante o menor teor de umidade possível é atingido, ou seja, atinge-se a umidade de equilíbrio (X_{eq}) nas condições em que o sólido está submetido. O período A-B representado na Figura 3 (a) e 3 (b) indica o regime transiente do processo, no qual o período de secagem é crescente. O período de taxa constante refere-se ao trecho B-C, em que toda a superfície exposta do sólido está saturada de água e a secagem ocorre como a evaporação de uma massa de líquido sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. No ponto C, atinge-se a umidade crítica (X_c) do sólido, que é a mínima para suprir a totalidade da superfície. Entre o trecho C-D e até alcançar a umidade de equilíbrio, encontra-se o período de taxa decrescente, no qual o mecanismo difusivo ocorre de maneira muito lenta se comparado ao mecanismo convectivo (FOUST et al., 1982).

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



Fonte: FOUST et al. (1982).

2.4. Análise de desempenho do processo

O consumo específico de energia (SEC) é uma medida que avalia a eficiência energética de máquinas, processos industriais, sistemas de transporte, entre outros. Nesse contexto, Sahari et al. (2023) determinaram o SEC para um secador que operava em três modos distintos:

puramente convectivo, com radiação infravermelha (IV) e de forma híbrida, combinando convecção com infravermelho. Com base nos resultados obtidos pelos autores, o menor valor foi encontrado para a secagem híbrida em comparação com a convectiva pura. No entanto, a secagem IV apresentou o menor valor para o consumo de energia se comparada com o modelo híbrido.

Já a pegada de carbono é um indicador que surgiu com o objetivo de quantificar as emissões de gases de efeito estufa e uma das inúmeras formas de mensurar os impactos ambientais (VASCONCELLOS; BELTRÃO; PONTES, 2016). Na secagem, a emissão de CO₂ pode ser determinada a partir do consumo de energia gasta para a operação dos equipamentos. Leite et al. (2017) observaram que a pegada de carbono associada a um secador elétrico é maior do que a associada a um secador solar. Em 2021, a Organização das Nações Unidas (ONU) reuniu-se na 26^a Conferência das Partes (COP26) com o objetivo de combater as mudanças climáticas. Dentre os principais temas discutidos, cita-se a neutralização completa das emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2050. Nesse contexto, enfatiza-se a importância de se investigar e fomentar o desenvolvimento de energias renováveis e da eficiência energética nos processos industriais. Tal iniciativa, exerce papel fundamental para que a meta estabelecida seja atingida, as emissões minimizadas e práticas industriais mais sustentáveis promovidas (DELGADO, 2021).

2.5. Propriedades físico-químicas

As principais motivações para o desenvolvimento de tecnologias de secagem híbrida consistem na minimização da degradação dos nutrientes encontrados nos alimentos e na melhora dos parâmetros de qualidade, os quais podem ser avaliados por meio de análises físico-químicas, bem como pela preservação de compostos bioativos, como os flavonoides e fenólicos totais (CHOU e CHUA, 2001).

Os sólidos solúveis contidos nos alimentos são responsáveis pelo sabor e pela consequente aceitação dos consumidores. Esses compostos são a soma de todos os sólidos dissolvidos na água, incluindo o açúcar, sais, proteínas e ácidos orgânicos e trata-se de um parâmetro utilizado como indicador da qualidade de alimentos frescos ou oriundos de processamento industrial (PINHEIRO et al., 1984).

A acidez, assim como os sólidos solúveis, é responsável por conferir sabor ácido ou azedo aos frutos, representado pela presença de ácidos orgânicos, os quais impedem à deterioração por bactérias (PASCHOALINO, 1997). Os ácidos orgânicos são encontrados em

diversas frutas, tais como o ácido cítrico no mamão e na laranja, o ácido málico na banana, maçã e coco, o tartárico nas uvas e o pirúvico no alho (CHITARRA e CHITARRA, 2005). A Figura 4 ilustra a estrutura química de alguns dos ácidos orgânicos citados.

Figura 4 – Estrutura química dos ácidos orgânicos.



Fonte: CAMEIRA e VILELA (2017).

As cinzas, por sua vez, representam o conteúdo total de minerais presentes nos alimentos, cuja determinação pode ser alvo de estudos relacionados às propriedades nutricionais, bem como à segurança alimentar (MOREIRA et al., 2021). Feitosa et al. (2019) avaliaram a qualidade físico-química de cinco resíduos agroindustriais e registraram um teor de cinzas para os resíduos *in natura* da manga, abacaxi, acerola, goiaba e graviola no valor de 0,96, 0,53, 0,64, 0,83 e 0,45%, respectivamente. De acordo com os resultados obtidos por De Souza (2022), a banana prata *in natura*, oriunda do comércio local de Murici, Alagoas, apresenta um teor de cinzas do valor de $1,3 \pm 0,1\%$.

O potencial hidrogeniônico (pH) refere-se à concentração de íons H^+ e desempenha um papel de fundamental importância na limitação dos diferentes microrganismos capazes de se desenvolver no alimento. Em alimentos pouco ácidos ($pH > 4,5$), as condições são propícias para o crescimento da maioria das bactérias, inclusive as patogênicas, bolores e leveduras (HOFFMANN, 2001). Entretanto, valores de pH abaixo de 5,5 podem enfraquecer o esmalte dos dentes e, após insultos repetidos, resultar na formação de cáries dentárias (SADLER et al., 2019).

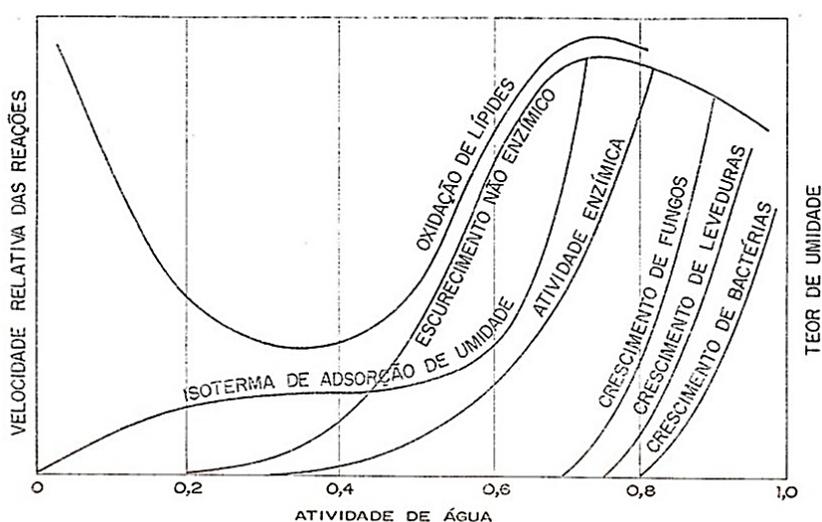
Silva et al. (2023) determinaram os sólidos solúveis tanto na banana *in natura* quanto na banana passa e constataram que este parâmetro é maior na fruta desidratada, devido à concentração dos açúcares e ácidos orgânicos e à perda de água. De acordo com os autores, o teor de cinzas e a acidez titulável também aumentam após o processo de secagem, demonstrando uma concentração dos sais minerais e evidenciando o sabor da fruta,

respectivamente. No entanto, não houve diferença estatisticamente significativa no potencial hidrogeniônico (pH) da banana em ambas os modos.

A atividade de água (a_w) é um parâmetro importante para verificar o potencial de deterioração dos alimentos, pois representa a disponibilidade de água para a ocorrência de reações bioquímicas (oxidação lipídica, reações enzimáticas, entre outras) e para o crescimento de microrganismos (MOTARJEMI, 1988). A atividade de água é definida pela razão entre a pressão parcial de água do alimento em equilíbrio com ar e a pressão parcial de saturação de água em equilíbrio com ar na mesma temperatura. Durante o processo de secagem, ocorre a diminuição da a_w , justificada pela redução da pressão parcial de água no alimento devido à perda de umidade (CANO-CHAUCA et al., 2004).

A Figura 5 apresenta a velocidade relativa de algumas reações em função da atividade de água. Dessa forma, em faixa de atividade de água entre 0,9 e 1, o alimento possui elevado potencial para sofrer contaminação microbiológica. Para valores de a_w entre 0,4 e 0,8, reações químicas e enzimáticas são favorecidas. Já para a_w menor que 0,6, o crescimento de microrganismos passa a ser limitado. Por fim, para a_w inferior a 0,3 não há dissolução dos componentes do alimento pela água, o que reduz a velocidade das reações, exceto para a oxidação lipídica, a qual também pode ocorrer em baixa a_w .

Figura 5 – Relação entre a_w e ocorrência de reações e crescimento de micro-organismos em alimentos.



Fonte: Adaptado de LABUZA e TANNENBAUM (1972).

As bactérias são normalmente mais exigentes quanto à disponibilidade de água livre, seguidas pelos bolores e leveduras. A maioria das bactérias se desenvolve em a_w mínima de 0,91; as leveduras, em 0,88 e os bolores, em 0,80 (HOFFMANN, 2001). Nunes et al. (2017) avaliaram a influência da secagem nos parâmetros físico-químicos do resíduo de abacaxi e

observaram que a atividade de água no produto seco é consideravelmente menor se comparado com a fruta *in natura*.

A cor desempenha um papel crucial na avaliação da qualidade dos alimentos secos, refletindo diretamente na aceitação pelos consumidores. A degradação da cor é sensivelmente influenciada pelos métodos e parâmetros de secagem, como a temperatura e o tempo de exposição ao calor. Em um estudo conduzido por Malakar et al. (2023), foi observado que menores tempos de secagem contribuem para menores variações de cor. Além disso, Sahari et al. (2023) reportaram que o método de secagem híbrido combinando radiação infravermelha e convecção, resultou na mínima variação de cor quando comparado com métodos que utilizam exclusivamente convecção ou radiação IV.

Valores de propriedades físico-químicas para a banana passa encontradas em trabalhos disponíveis na literatura estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físico-químicas da banana passa.

Parâmetro	Valor
$X_{B.U.}$	20,54 (BATISTA et al., 2014)
	12,96 ± 0,8 (DE SOUZA, 2022)
Cinzas (%)	2,63 (BATISTA et al., 2014)
	2,78 ± 1,3 (DE SOUZA, 2022)
pH	4,55 (BATISTA et al., 2014)
	4,9 ± 0,1 (DE SOUZA, 2022)
Acidez Total Titulável (% ácido málico)	2,6 (ALMEIDA et al., 2020)
	1,61 (BATISTA et al., 2014)
Sólidos Solúveis Totais (°Brix)	57,66 (BATISTA et al., 2014)
	65,5 ± 0,5 (DE SOUZA, 2022)
Atividade de água	0,479 (DE GOUVEIA, 2004)

Fonte: Do autor (2023).

2.6. Análise estatística

O planejamento experimental baseado em princípios estatísticos pode fornecer o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. Com ele é possível atingir os objetivos mais rapidamente, a um custo menor e sem que as propriedades do produto final deixem de satisfazer suas especificações (BARROS; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

Existem diversos tipos de planejamento de experimentos, em que se pode ter diferentes níveis e número de variáveis a serem manipuladas. O planejamento fatorial 3^k consiste em avaliar 3 níveis distintos sendo: (-1) o nível mais baixo, (0) o nível intermediário e (+1) o nível mais alto. O número de variáveis a serem manipuladas é indicado pela letra “k”. Esse tipo de planejamento é empregado quando se está interessado em detectar uma curvatura na função resposta e a regressão do modelo pode ser descrita pela Equação 1 (CALADO; MONTGOMERY, 2003). As variáveis manipuladas são representadas por x_1 e x_2 e os parâmetros do processo por β_0 , β_1 , β_2 , β_{12} , β_{11} e β_{22} .

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 \quad (1)$$

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 partir do modelo obtido pelo planejamento experimental é possível definir a melhor combinação de parâmetros do processo que fornecem uma condição ótima de operação e, conseqüentemente, uma melhor qualidade do produto. O modelo irá indicar como os fatores influenciam nas características de interesse, bem como a melhor combinação entre os níveis que maximizam ou minimizam a variável resposta (GODOY, 2014). A otimização possibilita uma abordagem mais sistemática e imparcial das variáveis, reduzindo assim a ocorrência de pré-julgamentos, os quais nem sempre são precisos (BREITKREITZ; SOUZA; POPPI, 2014).

Para determinar a desejabilidade do produto final com base na influência das variáveis manipuladas, podem ser empregadas as Equações 2, 3 e 4. As Equações 2 e 3 se referem à desejabilidade individual das variáveis que devem ser minimizadas e maximizadas, respectivamente. Já a Equação 4 calcula a desejabilidade global.

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - T_i}\right)^{r_i^1}, & y_i < T_i \\ \left(\frac{U_i - y_i}{U_i - T_i}\right)^0, & T_i \leq y_i \leq U_i \\ 0, & y_i > U_i \end{cases} \quad (2)$$

$$d_i = \begin{cases} \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^{r_i^0}, & y_i < L_i \\ \left(\frac{y_i - L_i}{T_i - L_i}\right)^1, & L_i \leq y_i \leq T_i \\ 1, & y_i > T_i \end{cases} \quad (3)$$

$$D = \left(\prod_{i=1}^N d_i \right)^{\frac{1}{N}} \quad (4)$$

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, T_i é o valor ótimo, D é a desejabilidade global, N é o número de desejabilidades individuais e $r_i = 1 \forall i$, considerando uma desejabilidade linear.

3. MATERIAL E MÉTODOS

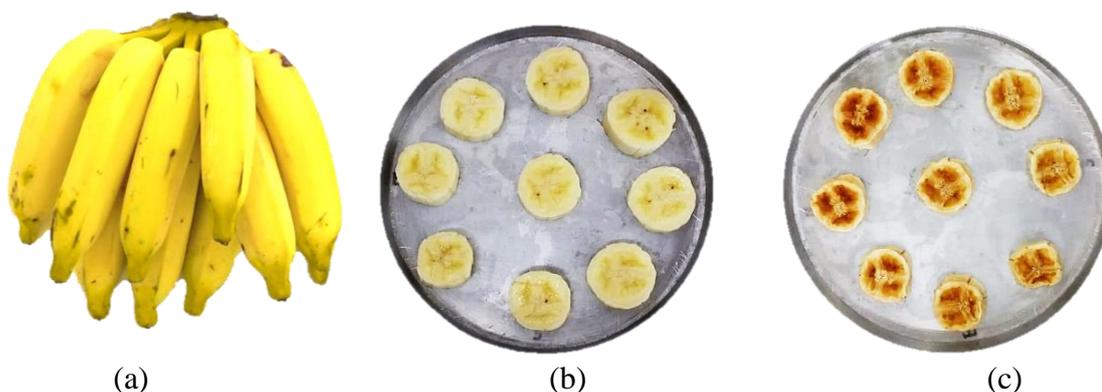
3.1. Material

As amostras de banana *Musa sapientum* cultivar prata *in natura* foram adquiridas no mercado local no município de Lavras, no estado de Minas Gerais (FIGURA 6.a) e selecionadas no estágio de maturação entre 5 e 6 de acordo com a escala proposta por Aurore et al. (2009), a qual varia de 1 a 7 a depender da coloração da casca (FIGURA 1).

Todas as amostras foram higienizadas e descascadas. Em seguida, parte das bananas *in natura* foram trituradas em processador e submetidas a análises físico-químicas como teor de umidade, cinzas, pH, acidez total titulável em porcentagem de ácido málico, sólidos solúveis em °Brix, flavonoides totais e atividade de água.

A outra parcela foi cortada em rodela de, aproximadamente, 1,0 cm de espessura, conforme mostrado na Figura 6 (b) e destinada ao processo de secagem infravermelho (IV) assistida por convecção. Posteriormente, o produto seco (FIGURA 6.c) passou pelas mesmas análises físico-químicas citadas anteriormente.

Figura 6 – Banana (a) *in natura* no estágio de maturação 6; (b) *in natura* no formato de rodela, e (c) seca na potência IV de 178 W e velocidade do ar de 1,0 m/s.



Fonte: Do autor (2023).

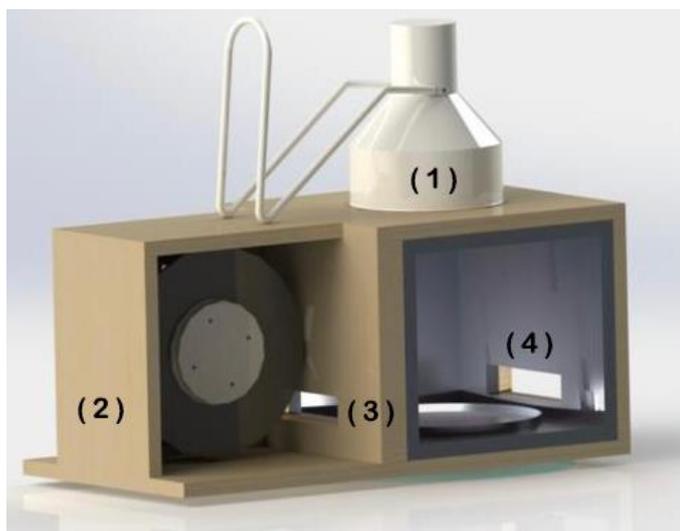
3.2. Equipamento

O processo de secagem foi realizado em um secador híbrido que combina radiação IV e convecção forçada como ilustrado na Figura 7. O equipamento foi construído em MDF nas dimensões (28,0 x 28,0 x 25,0 cm) e isolado com o auxílio de placas de isopor revestidas com papel alumínio, a fim de se evitar perdas de calor pelo sistema e potencializar o efeito da radiação infravermelha sobre a amostra através de sua reflexão.

A lâmpada infravermelha (250 W) foi posicionada 23,0 cm acima do centro da amostra. Já o ventilador foi posicionado na lateral esquerda da câmara e era responsável por forçar a passagem de ar não aquecido paralelamente à superfície da amostra.

Na Figura 7, pode-se visualizar o protótipo detalhado da câmara de secagem, em que (1) refere-se à posição da lâmpada infravermelha centralizada sobre a amostra, (2) à posição do ventilador, (3) à entrada do ar não aquecido e (4) à saída do ar não aquecido.

Figura 7 – Protótipo do secador infravermelho (IV) assistido por convecção.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

3.3. Processo de Secagem

O processo de secagem ocorreu nas potências de radiação infravermelha (IV) de 118 W, 178 W e 238 W e com ar escoando nas velocidades de 0,5 m/s, 1,0 m/s e 1,5 m/s seguindo o planejamento fatorial do tipo 3^2 , com duas réplicas no ponto central, conforme descrito pela Tabela 3. As variáveis foram codificadas através da Equação 5, da variável real (ξ_i), da variável real média ($\bar{\xi}_i$) e da diferença entre o valor da variável real máxima e mínima (d_i).

$$V_c = 2 \cdot \frac{\xi_i - \bar{\xi}_i}{d_i} \quad (5)$$

Tabela 3 – Variáveis codificadas e em escala real do planejamento do experimento.

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

Fonte: Do autor (2023).

As potências IV foram aferidas com o auxílio de um alicate amperímetro digital (KRIPT, modelo KRAD01) e as velocidades com um termo-anemômetro (INSTRUTHERM, modelo TAD-500). Além disso, a fim de se mensurar a redução de massa ao longo do processo, as amostras foram pesadas em balança analítica (EVEN, BL-6200AS-BI) a cada 10 minutos durante as duas primeiras horas de secagem e a cada 20 minutos nos períodos subsequentes.

O adimensional de umidade (MR) foi determinado pela Equação 6, a partir dos valores de umidade de equilíbrio (X_{eq}), umidade inicial da amostra (X_0) e umidade no momento da pesagem (X).

$$MR = \frac{X - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad (6)$$

A taxa de secagem (*drying rate* - DR) foi determinada por meio da razão entre a diferença de umidade (X) em um período de tempo (Δt), conforme descrito pela Equação 7.

$$DR = - \frac{X_{t+1} - X_t}{\Delta t} \quad (7)$$

3.3.1. Consumo específico de energia (SEC)

Para se determinar o consumo específico de energia (*specific energy consumption* – SEC) é necessário calcular previamente a potência total consumida (P_{total}) durante o processo de secagem. Tal grandeza é dada pelo produto entre a tensão da rede (V_{rede}) e a soma das correntes elétricas na lâmpada infravermelha (I_{IV}) e no ventilador ($I_{convecção}$), conforme descrito pela Equação 8.

$$P_{total} = V_{rede} \cdot (I_{IV} + I_{convecção}) \quad (8)$$

Com a potência total calculada, o tempo de secagem (t) e a massa de água evaporada ($m_{\text{água evaporada}}$), determinou-se o SEC através da Equação 9.

$$SEC = \frac{P_{total} \cdot t}{m_{\text{água evaporada}}} \quad (9)$$

3.3.2. Emissão de CO₂

A emissão de CO₂ (E_{CO_2}) pode ser calculada a partir da expressão descrita pela Equação 10, em que o produto entre a potência total (P_{total}), tempo (t) e o fator de emissão pela geração de energia elétrica no valor de 0,0426 toneladas de CO₂ por MW·h resulta na emissão em toneladas de CO₂ equivalente. O valor do fator de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica foi obtido a partir do Inventário Corporativo de 2022, fornecido pelo Sistema Interligado Nacional do Brasil (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2022).

$$E_{CO_2} = P \cdot t \cdot 0,0426 \quad (10)$$

3.4. Caracterização da matéria-prima e do produto seco

3.4.1. Umidade

Os ensaios de umidade foram efetuados de acordo com o procedimento detalhado pela

norma 4.5.1 do Instituto Adolfo Lutz (1985). Uma massa conhecida da amostra foi levada para a estufa (SOLAB, modelo SL-102) a 105 ± 3 °C por 24 horas. Em seguida, a amostra foi resfriada em dessecador e pesada em balança analítica (WEBLABOR, modelo M254Ai). O teor de umidade em base úmida foi determinado por meio a Equação 11.

$$X_{BU} (\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \quad (11)$$

em que X_{BU} é a umidade em base úmida da amostra, m_0 a massa da cápsula de porcelana vazia, m_1 a massa da amostra antes de ir para a estufa e m_2 a massa da amostra após ser retirada da estufa.

3.4.2. Cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada de acordo com a norma 4.8 do Instituto Adolfo Lutz (1985), com algumas adaptações. As amostras foram previamente secas em estufa a 105 ± 3 °C por 24 horas e, logo após, incineradas em mufla ZEZIMAQ a 550 °C durante seis horas. Passado este período, as cápsulas de porcelana contendo as amostras foram resfriadas e pesadas. A porcentagem de cinzas foi calculada através da Equação 12 e em relação ao material seco.

$$Cinzas (\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \quad (12)$$

em que: m_0 refere-se a massa da cápsula de porcelana vazia com tampa, m_1 a massa da amostra antes de ir para a mufla e m_2 a massa da amostra incinerada.

3.4.3. Sólidos Solúveis Totais (SST)

Para a determinação de sólidos solúveis totais (SST) em °Brix, uma quantidade específica da amostra triturada foi diluída em água deionizada na proporção de 1 g de amostra para 10 g de água. Em seguida, essa solução foi depositada no prisma de um refratômetro portátil (INSTRUTHERM, RTA-50) para a realização das leituras. As análises foram feitas em triplicata e em temperatura ambiente.

3.4.4. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico foi aferido em um pHmetro SANXIN, modelo MP521 utilizando a mesma solução preparada para a determinação de sólidos solúveis.

3.4.5. Acidez Total Titulável (ATT)

A acidez total titulável foi determinada seguindo a norma 4.7.1 do Instituto Adolfo Lutz (1985). A solução contendo a amostra foi titulada com NaOH 0,1 M utilizando como indicador de viragem a fenolftaleína 1%. Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido málico por 100 g de fruta por meio da Equação 13.

$$ATT (\%, \text{ácido málico}) = \frac{f \cdot v_{NaOH} \cdot C_{NaOH} \cdot MM_{\text{ác. málico}}}{c \cdot m_{\text{amostra}} \cdot n_{\text{ác. málico}}} \quad (13)$$

em que, f refere-se ao fator de correção da solução de NaOH 0,1 M, V_{NaOH} ao volume da base gasto na titulação, C_{NaOH} a concentração molar de NaOH no valor de 0,1 M, $MM_{\text{ác. málico}}$ à massa molar do ácido málico no valor de 134 g/mol, c ao fator de correção para conversão em % de ácido málico em 100 g de fruta no valor de 10, m_{amostra} a massa de amostra utilizada na titulação e $n_{\text{ác. málico}}$ ao coeficiente estequiométrico do NaOH na reação entre ácido málico e a base no valor de 2.

3.4.6. Atividade de água (a_w)

A atividade de água foi determinada com o auxílio do aparelho Aqualab, modelo 4TE, de leitura direta. As medições foram feitas em triplicata à temperatura de, aproximadamente, 25 °C.

3.4.7. Diferença total de cor (ΔE)

A diferença total de cor (ΔE) é um parâmetro utilizado para avaliar a qualidade do produto final e para quantificar a variação da cor de um material em relação à um controle. As amostras cortadas em rodela e dispostas em bandeja circular foram fotografadas e analisadas digitalmente pelo *software* Adobe Photoshop. O programa possui uma ferramenta de histograma capaz de converter as imagens para o sistema CIELAB (Associação Internacional da Cor), o qual é composto pelas coordenadas de cor $L^*a^*b^*$. O eixo L^* é um indicador da luz medido do preto ($L^* = 0$) para o branco ($L^* = 100$), a^* determina a cor na dimensão do vermelho

($a^* > 0$) e verde ($a^* < 0$), e b^* representa a cor no amarelo ($b^* > 0$) e na dimensão do azul ($b^* < 0$) (FERREIRA et al., 2020).

A partir das Equações 14, 15 e 16 é possível determinar o formato padrão das coordenadas de cor, sendo denotados por L_0^* , a_0^* e b_0^* , para a banana *in natura* e L^* , a^* e b^* para o produto seco. Os parâmetros médios L , a e b foram fornecidos pelo *software*. Por fim, o cálculo de ΔE é obtido pela aplicação da Equação 17.

$$L^* = \frac{L}{255} \cdot 100 \quad (14)$$

$$a^* = \frac{240 \cdot a}{255} - 120 \quad (15)$$

$$b^* = \frac{240 \cdot b}{255} - 120 \quad (16)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (17)$$

3.4.8. Índice de escurecimento (BI)

O índice de escurecimento (*browning index* - BI) reflete a formação da coloração amarronzada e escurecimento do produto seco em relação a fruta *in natura*. O cálculo da coordenada 'x' expresso pela Equação 18, leva em consideração os parâmetros L^* , a^* e b^* . Já o cálculo de BI está descrito pela Equação 19 (FONTES et al., 2009).

$$x = \frac{a + (1,75 \cdot L)}{(5,645 \cdot L) + a - (3,012 \cdot b)} \quad (18)$$

$$BI = \frac{100 \cdot (x - 0,31)}{0,17} \quad (19)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Aspectos de desempenho do processo

Neste trabalho investigou-se o emprego da secagem híbrida para a produção de banana passa. A fruta utilizada neste estudo apresentou teor de umidade inicial médio de $74,24 \pm 2,68$ %_{B.U.}. Na Tabela 4 são apresentados os valores do tempo de processo necessários nas diferentes condições experimentais investigadas para se atingir $X = 38,47$ %_{B.U.}. São apresentados também os valores de SEC e emissão de CO₂ correspondentes à remoção de umidade do material.

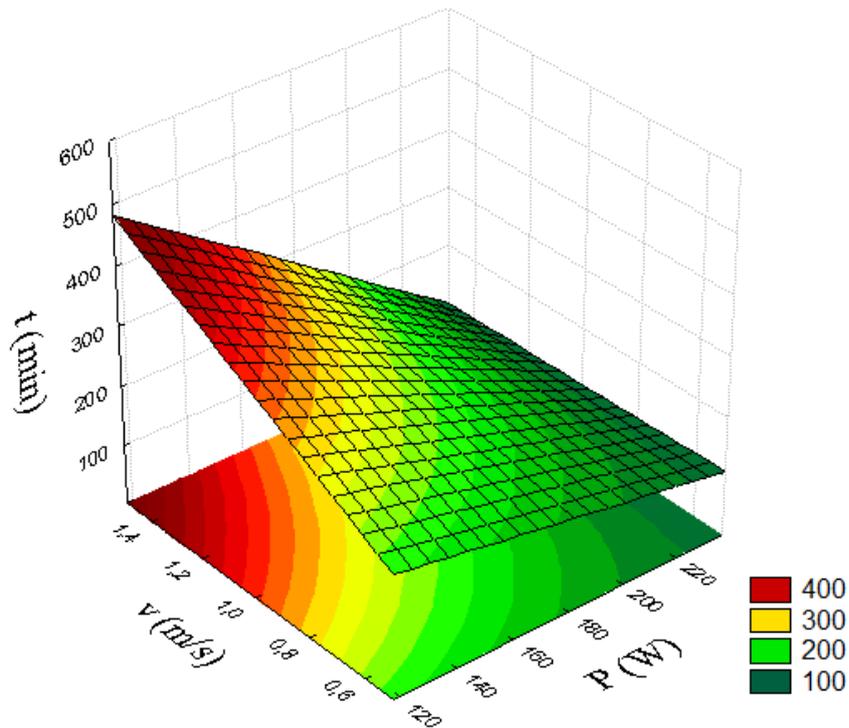
Tabela 4 – Tempo de secagem e correspondentes valores de SEC e E_{CO2} para as condições analisadas.

P (W)	v (m/s)	t (min)	SEC (kWh/kg _{água} evaporada)	E _{CO2} ($\cdot 10^5$ ton CO ₂)
118	0,5	219,29	20,96	2,59
118	1,0	307,38	29,51	3,87
118	1,5	560,00	67,04	7,77
178	0,5	189,20	20,92	3,02
178	1,0	235,83	24,25	3,94
178	1,5	189,76	20,15	3,33
238	0,5	84,56	10,23	1,70
238	1,0	135,22	21,33	2,95
238	1,5	141,67	18,81	3,18
178	1,0	222,83	24,25	3,77
178	1,0	180,27	19,32	3,05

Fonte: Do autor (2023).

Realizando-se uma análise estatística dos efeitos da potência IV e da velocidade do ar sobre o tempo de processo com grau de confiança de 95% construiu-se a superfície de resposta ($R^2 = 0,847$) apresentada na Figura 8 e a Tabela 5 com os coeficientes dos efeitos significativos. A correspondente equação ajustada é também apresentada (Equação 20).

Figura 8 – Superfície de resposta para o tempo de secagem.



Fonte: Do autor (2023).

$$t(\text{min}) = 224,182 - 120,871 \cdot P' + 66,398 \cdot v' - 70,900 \cdot P' \cdot v' \quad (20)$$

Tabela 5 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o tempo de secagem.

Fator	Coefficiente	Desvio	P
Média	224,182	17,726	0,000
P (L)	-120,871	24,001	0,001
v (L)	66,398	24,001	0,028
P · v (L)	-70,900	29,395	0,047

Fonte: Do autor (2023).

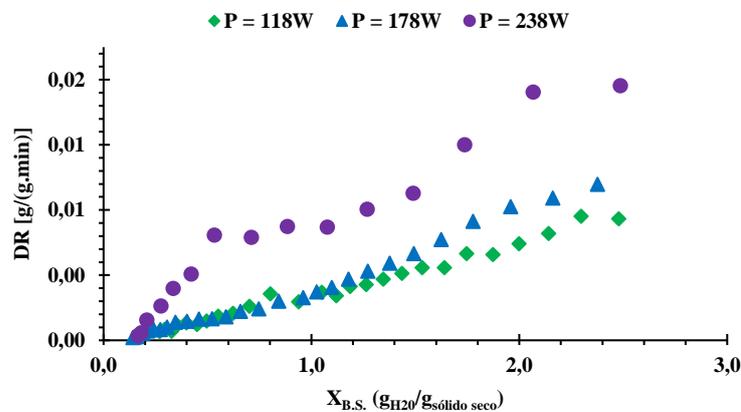
A partir da Figura 8, nota-se que a utilização de maiores potências IV resulta em menores tempos de secagem, enquanto maiores velocidades de escoamento do ar elevam o tempo do processo. No entanto, de acordo com a Tabela 5, o efeito de interação entre as variáveis é negativo, isto é, ao aumentar simultaneamente potência e velocidade, o tempo é reduzido, evidenciando a predominância do efeito da potência IV sobre a velocidade do ar. Os resultados obtidos por Jaturonglumlert e Kiatsiriroat (2010) sobre a secagem híbrida corroboram positivamente com os resultados apresentados no contexto deste estudo, pois

ambos os trabalhos indicam que o aumento da potência do infravermelho (IV) propicia tempos de secagens mais curtos.

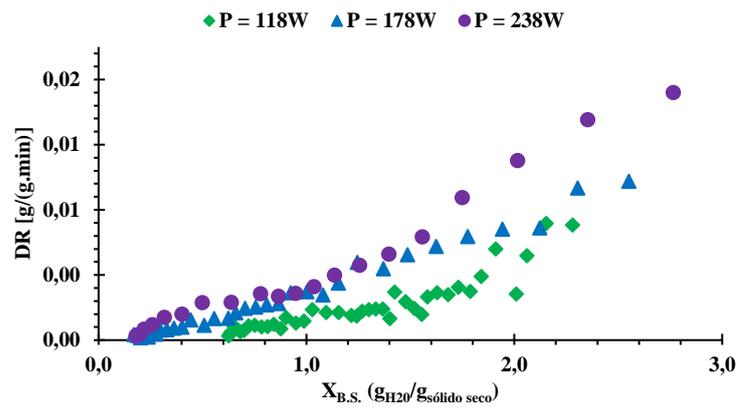
Além disso, tais observações concordam com o que se pode notar através das curvas da taxa de secagem, em função da umidade do sólido em base seca ($X_{B.S.}$), parametrizadas na potência IV mostradas na Figura 9. Fica evidente o efeito positivo da potência IV sobre o processo de secagem, já que maiores potências resultaram em taxas de secagem mais elevadas. Isso ocorre pois o aumento da potência IV propicia um aumento na temperatura do material e a absorção direta da radiação pelos componentes dos alimentos. Sendo assim, a vibração das moléculas favorece os mecanismos de transferência de calor e massa, e conseqüentemente, o processo de secagem.

Em contrapartida, também se pode perceber nas curvas de secagem parametrizadas na velocidade de escoamento do ar e apresentadas na Figura 10, que a variação na velocidade de escoamento do ar não promove grandes alterações nas taxas de secagem, exceto para a potência de 238 W (Figura 10.c), cujos valores de taxa de secagem são menores para as maiores velocidades de escoamento. Por se tratar de um ar de não aquecido, velocidades mais elevadas podem favorecer o resfriamento do material devido ao mecanismo convectivo de transferência de calor, uma vez que, a fase fluida, possivelmente, se encontra em uma temperatura inferior a temperatura da fase sólida. No estudo conduzido por De Souza (2022) também foi constatado que o material aquecido pela potência IV foi resfriado pelo escoamento do ar, em temperatura ambiente, provocando taxas de secagem mais brandas à medida que a velocidade do ar aumentava. No entanto, o resfriamento do material observado no presente trabalho é notavelmente menos acentuado, devido às menores velocidades do ar empregadas.

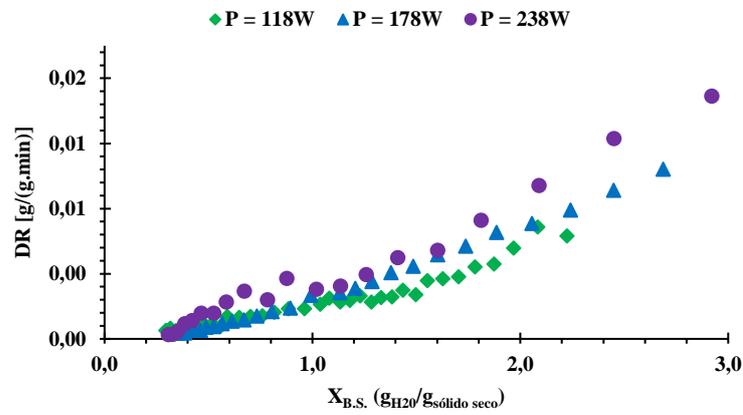
Figura 9 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘P’ com (a) $v = 0,5$ m/s, (b) $v = 1,0$ m/s e (c) $v = 1,5$ m/s.



(a)



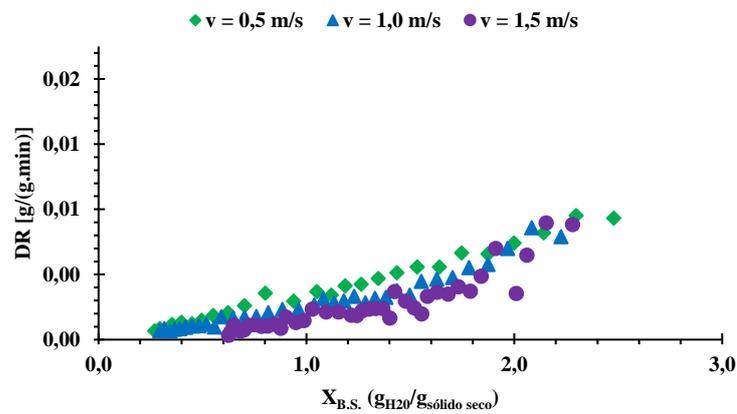
(b)



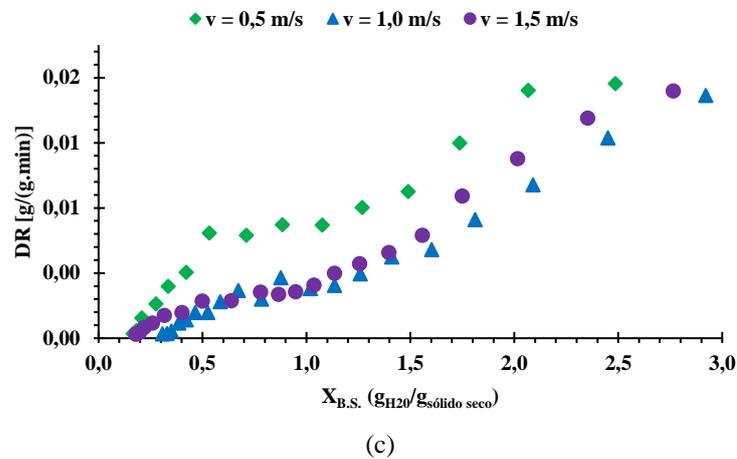
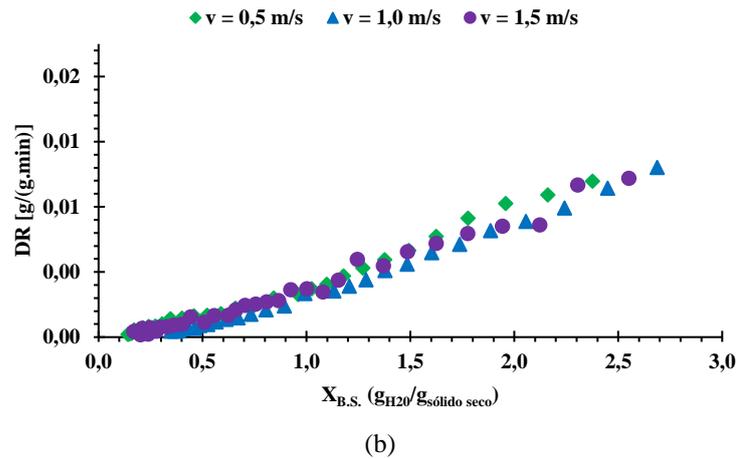
(c)

Fonte: Do autor (2023).

Figura 10 – Taxas de secagem parametrizadas em ‘v’ com (a) P = 118 W, (b) P = 178 W e (c) P = 238 W.



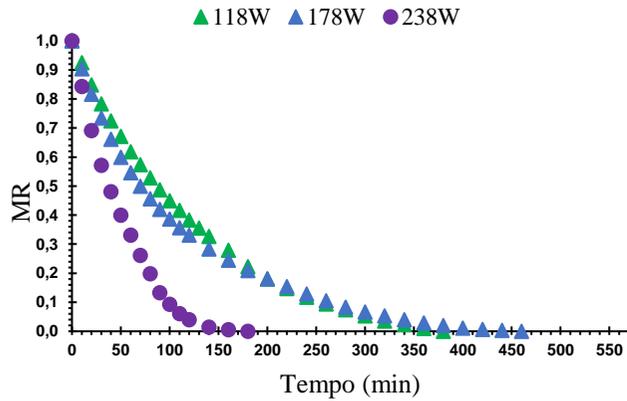
(a)



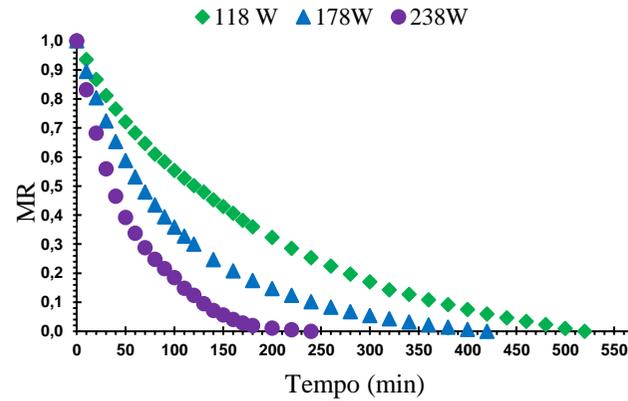
Fonte: Do autor (2023).

As curvas de adimensional de umidade, em função do tempo, parametrizadas na potência IV e na velocidade de escoamento do ar são apresentadas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. A partir delas, observa-se que a influência das condições operacionais é similar ao observado anteriormente através das curvas de taxa de secagem. A condição de secagem de maior potência do infravermelho e menor velocidade do ar (238 W e 0,5 m/s) levou cerca de três horas de duração para atingir $14,24 \pm 0,84$ % B.U., sendo a mais rápida dentre as analisadas.

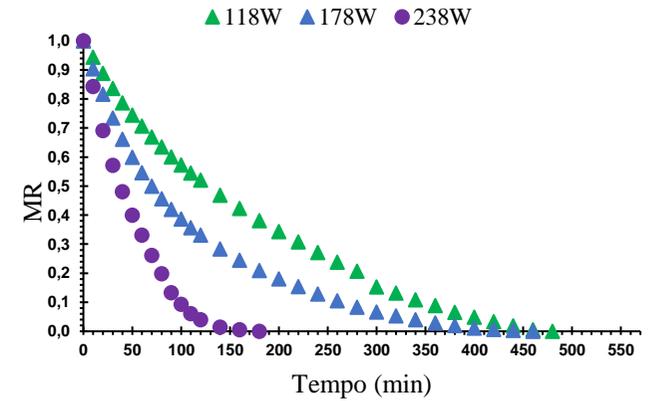
Figura 11 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘P’ com (a) $v = 0,5$ m/s, (b) $v = 1,0$ m/s e (c) $v = 1,5$ m/s.



(a)



(b)

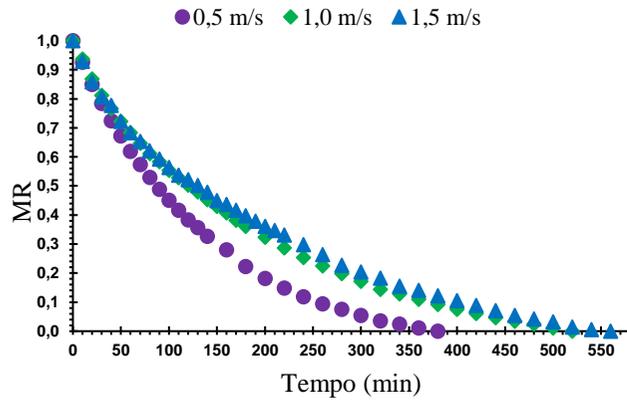


(c)

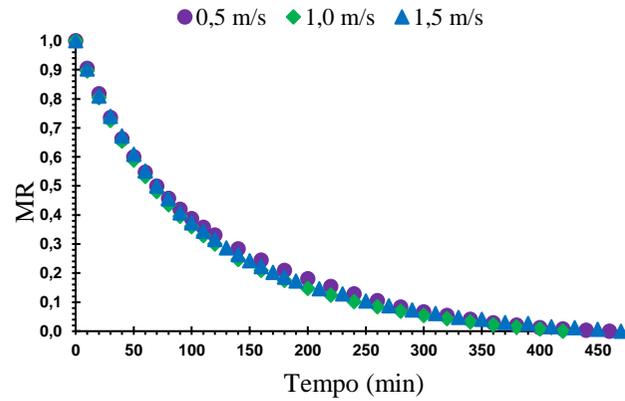
(c)

Fonte: Do autor (2023).

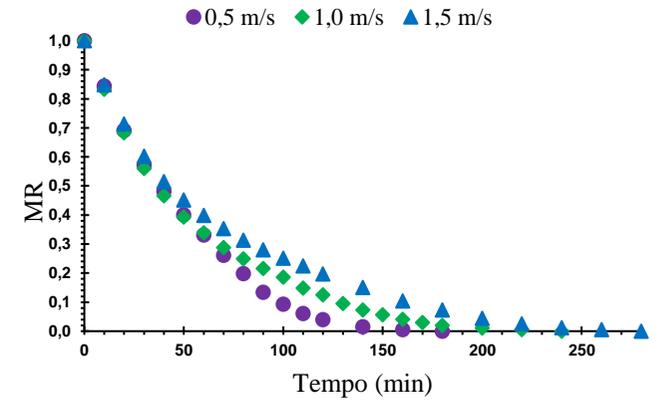
Figura 12 – Adimensional de umidade parametrizado em ‘v’ com (a) $P = 118$ W, (b) $P = 178$ W e (c) $P = 238$ W.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Do autor (2023).

O consumo específico de energia (SEC) foi determinado como forma de avaliar a eficiência do processo de secagem em função das condições analisadas. O maior SEC foi obtido para a potência mínima ($P = 118 \text{ W}$) e velocidade máxima ($v = 1,5 \text{ m/s}$) no valor de $67,04 \text{ kWh/kg}_{\text{água evaporada}}$, resultando em um produto final com teor de umidade igual a $38,47\%$ (b.u.). Já o menor SEC foi encontrado para a potência máxima ($P = 238 \text{ W}$) e velocidade mínima ($v = 0,5 \text{ m/s}$) no valor de $10,23 \text{ kWh/kg}_{\text{água evaporada}}$, para uma banana passa com umidade final de $14,24\%$ (b.u.). Estes resultados são coerentes com a faixa reportada por De Souza (2022), que obteve um SEC de $12,51 \text{ kWh/kg}_{\text{água evaporada}}$, na condição de potência máxima ($P = 238 \text{ W}$) e velocidade mínima ($v = 1,5 \text{ m/s}$), resultando em um produto seco com teor de umidade em $15,63\%$ (b.u.) e o SEC máximo de $56,64 \text{ kWh/kg}_{\text{água evaporada}}$, para a potência mínima ($P = 118 \text{ W}$) e velocidade máxima ($v = 4,5 \text{ m/s}$), na qual obteve-se banana passa com teor de umidade de $61,53\%$ (b.u.).

A determinação da emissão de CO_2 configura uma maneira de mensurar o impacto ambiental provocado pelo processo de secagem. Assim como no consumo específico de energia, o menor valor de emissão de CO_2 foi encontrado para a maior potência ($P = 238 \text{ W}$) e menor velocidade de escoamento do ar ($v = 0,5 \text{ m/s}$), resultando em $1,70 \cdot 10^{-5}$ toneladas de emissão de CO_2 . O valor máximo, por sua vez, foi obtido para a menor potência ($P = 118 \text{ W}$) e maior velocidade do ar ($1,5 \text{ m/s}$), emitindo cerca de $7,77 \cdot 10^{-5}$ toneladas de CO_2 . De acordo com a tabela de coeficientes de impacto ambiental (pegadas de carbono, hídrica e ecológica) para cada 100 g de alimentos, desenvolvida por Garzillo et al. (2019), a produção de frutas secas ou desidratadas emite cerca de $72 \text{ gCO}_{2\text{eq}}$ e a produção de uva passa cerca de $85 \text{ gCO}_{2\text{eq}}$, correspondendo a $7,2 \cdot 10^{-5} \text{ tonCO}_{2\text{eq}}$ e $8,5 \cdot 10^{-5} \text{ tonCO}_{2\text{eq}}$, respectivamente. Nesse contexto, quando comparados os valores de emissão de CO_2 neste trabalho com a literatura, nota-se que os resultados obtidos podem ser considerados baixos, justificado pelo fato da matriz energética brasileira ser majoritariamente renovável e apresentar um baixo coeficiente de emissão.

As superfícies de resposta apresentadas pela Figura 13, evidenciam comportamento semelhante ao encontrado para o tempo de secagem (FIGURA 8), uma vez que, menores valores de SEC e emissão de CO_2 podem ser obtidos em condições de secagem com maiores potências de infravermelho, enquanto maiores velocidades propiciam maiores emissões e valores de consumo específico de energia. Tal comportamento pode ser explicado pelas Equações 9 e 10, já que o SEC e a emissão de CO_2 refletem o tempo de processo.

Em um estudo conduzido por Sahari et al. (2023), foi observada uma redução no consumo específico de energia (SEC) à medida que a potência infravermelha aumentava devido à elevação da temperatura da amostra, da taxa de secagem, e, portanto, diminuição do tempo

do processo, o qual exerce uma forte influência sobre o SEC. Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho estão condizentes com o esperado e indicam a importância do infravermelho para aprimorar a eficiência do processo de secagem. Além disso, os autores identificaram, um valor mínimo de SEC de 17,78 kWh/kg_{água evaporada} para a secagem puramente infravermelha na temperatura de 70 °C. Para a secagem híbrida, o menor valor de SEC foi de 61,25 kWh/kg_{água evaporada} na mesma temperatura de 70 °C. Diante do exposto, constata-se que a secagem infravermelha assistida por convecção para as bananas apresenta um SEC reduzido.

As Equações 21 e 22, descrevem o modelo para o consumo específico de energia ($R^2 = 0,7390$) e para a emissão de CO₂ ($R^2 = 0,7798$), respectivamente. Ambos os modelos estão em função da potência IV (P') e da velocidade do ar (v') codificadas. As Tabelas 6 e 7, apresentam os coeficientes dos efeitos significativos, com grau de 90% de confiança para o SEC e emissão de CO₂, respectivamente.

Tabela 6 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o SEC.

Fator	Coefficiente	Desvio	P
Média	25,161	2,698	0,000
P (L)	-11,190	3,653	0,018
V (L)	8,983	3,653	0,044
P · v (L)	-9,376	4,474	0,074

Fonte: Do autor (2023).

Tabela 7 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre a emissão de CO₂.

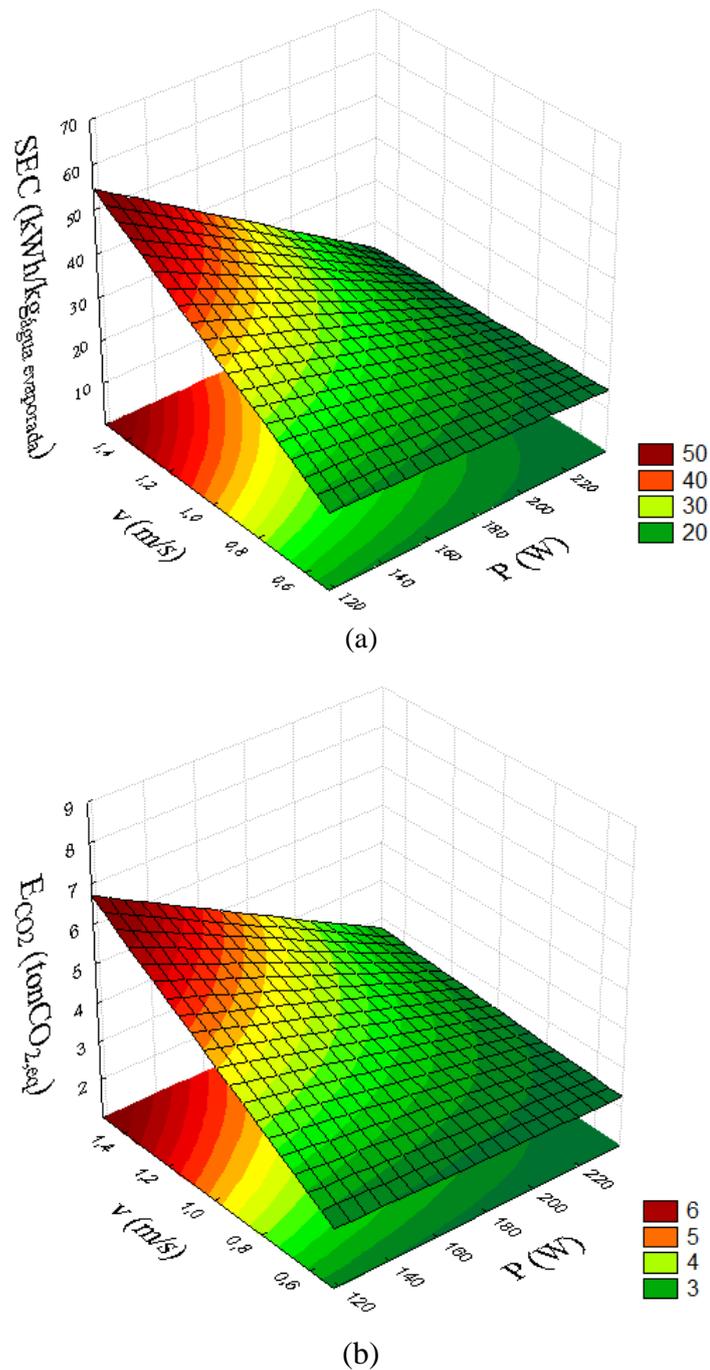
Fator	Coefficiente ($\cdot 10^5$)	Desvio ($\cdot 10^5$)	P
Média	3,6	0,3	0,000
P (L)	-1,1	0,4	0,019
V (L)	1,2	0,4	0,013
P · v (L)	-0,9	0,4	0,068

Fonte: Do autor (2023).

$$SEC = 25,1608 - 11,1900 \cdot P' + 8,9827 \cdot v' - 9,3760 \cdot P' \cdot v' \quad (21)$$

$$E_{CO_2} = 3,56 - 1,07 \cdot P' + 1,16 \cdot v' - 0,928 \cdot P' \cdot v' \quad (22)$$

Figura 13 – Superfície de resposta para (a) o consumo específico e para (b) a emissão de CO₂.



Fonte: Do autor (2023).

4.2. Caracterização do produto seco

As bananas-passas produzidas pela secagem IV assistida por convecção foram caracterizadas quanto ao teor de umidade final, teor de cinzas, teor de sólidos solúveis totais, potencial hidrogeniônico, acidez total titulável, atividade de água, diferença total de cor e índice de escurecimento. Os valores determinados para a banana *in natura* e para as diferentes

condições de secagem realizadas, bem como a umidade relativa do ar (UR) estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físico-químicas da banana *in natura* e para as condições analisadas.

P (W)	v (m/s)	UR (%)	X _{B.U.} (%)	Cinzas (%)	pH	ATT (% ác. málico)	SST (°Brix)	a _w
<i>in natura</i>			74,2 ± 2,7	4,0 ± 0,4	4,44 ± 0,02	0,18 ± 0,01	15,64 ± 5,00	0,968 ± 0,004
118	0,5	57,30	21,2 ± 0,1	12,9 ± 0,3	4,44 ± 0,09	0,5 ± 0,03	45,64 ± 5,00	0,428 ± 0,032
118	1,0	41,16	22,7 ± 0,5	11,2 ± 0,2	4,52 ± 0,14	0,47 ± 0,01	47,23 ± 5,77	0,723 ± 0,003
118	1,5	41,71	38,5 ± 2,2	19,0 ± 2,7	4,64 ± 0,01	0,43 ± 0,06	47,23 ± 5,77	0,842 ± 0,012
178	0,5	58,61	12,3 ± 1,0	7,5 ± 2,4	4,44 ± 0,26	0,61 ± 0,07	62,31 ± 10,41	0,383 ± 0,003
178	1,0	60,07	25,8 ± 0,5	10,1 ± 1,9	4,33 ± 0,01	0,45 ± 0,04	62,31 ± 2,89	0,410 ± 0,006
178	1,5	41,96	14,5 ± 0,3	8,3 ± 2,4	4,38 ± 0,02	0,56 ± 0,07	55,64 ± 5,00	0,397 ± 0,003
238	0,5	61,96	14,2 ± 0,8	3,4 ± 0,2	4,50 ± 0,12	0,75 ± 0,10	50,56 ± 10,00	0,433 ± 0,019
238	1,0	58,95	23,5 ± 0,1	11,0 ± 0,8	4,29 ± 0,03	0,53 ± 0,05	67,31 ± 11,55	0,467 ± 0,014
238	1,5	47,39	15,3 ± 0,3	5,1 ± 0,9	4,23 ± 0,01	1,48 ± 0,04	68,97 ± 10,41	0,492 ± 0,042
178	1,0	56,05	17,6 ± 0,3	12,3 ± 0,9	4,35 ± 0,10	0,63 ± 0,06	47,23 ± 5,77	0,379 ± 0,009
178	1,0	62,97	28,8 ± 0,1	2,9 ± 0,5	4,40 ± 0,02	0,51 ± 0,07	57,31 ± 5,77	0,379 ± 0,012

Fonte: Do autor (2023).

Segundo a RDC nº 272, de 22 de setembro de 2005, publicada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), produtos de frutas secos ou desidratados devem possuir um teor máximo de umidade em base seca no valor de 25%, o que corresponde a 20% em base úmida, a fim de atender devidamente aos padrões de qualidade referentes ao seu armazenamento e comercialização. Os teores de umidade final da banana passa produzida ficaram entre 12,32% e 38,47%_{B.U.}, nas condições de potência média (P = 178 W) e velocidade mínima (v = 0,5 m/s), e potência mínima (P = 118 W) e velocidade máxima (v = 1,5 m/s), respectivamente. Ao comparar o teor de umidade da fruta *in natura* (74,2 ± 2,7 %_{B.U.}) com o valor médio (21,31 ± 7,77 %_{B.U.}) obtido após a secagem nas diferentes condições analisadas, é possível afirmar com confiança estatística que houve redução da umidade em virtude da secagem.

Além disso, observou-se que os teores de umidade final da banana passa são fortemente influenciados pela umidade relativa do ar (UR). Na condição de potência e velocidade intermediária (178 W e 1,0 m/s) a umidade final da banana foi de $X_{B.U.} = 25,8 \pm 0,5\%$, com uma umidade relativa do ar de $UR = 60,07\%$. Já para a condição de potência intermediária e velocidade máxima (178 W e 1,5 m/s), a umidade final foi reduzida para $X_{B.U.} = 14,5 \pm 0,3\%$, com uma umidade relativa do ar de $UR = 41,96\%$. Era esperado um aumento no teor da umidade final, justificado pelo aumento da velocidade, entretanto, isso não ocorre devido à menores umidades relativas do ar de secagem favorecerem o processo.

A determinação do teor de cinzas é um indicativo da concentração de sais minerais presentes na composição dos alimentos. De acordo com os dados experimentais apresentados pela Tabela 3, tem-se que o valor médio para o teor de cinzas nas diferentes condições analisadas foi de $9,43 \pm 4,69$ e para a banana *in natura* de $4,0 \pm 0,4$. Dessa forma, afirma-se com confiança estatística que a secagem favorece o aumento do teor deste parâmetro. Silva et al. (2022) registraram um teor de cinzas de $2,78 \pm 1,3 \%$ para a banana passa obtida por secagem em estufa na temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1,3 \pm 0,1 \%$ para a fruta *in natura*, indicando que a desidratação provoca um aumento no teor de cinzas, devido à concentração dos minerais durante o processo. Neste estudo, o teor de cinzas foi aumentado para todas as condições, exceto para a condição de potência máxima ($P = 238 \text{ W}$) e velocidade mínima ($v = 0,5 \text{ m/s}$) e para um dos ensaios no ponto central ($P = 178 \text{ W}$ e $v = 1,0 \text{ m/s}$). Essa diminuição no teor de cinzas pode ser explicada pela variação da própria fruta, uma vez que, mesmo oriunda do mesmo solo de cultivo, a banana *in natura* pode apresentar diferentes concentrações de sais minerais.

O potencial hidrogeniônico (pH) é calculado com base em uma escala logarítmica que varia de 0 a 14 e quantifica a concentração de íons (H^+). Essa medida é um indicativo da acidez de uma determinada substância. No âmbito da secagem, baixos valores de pH podem representar uma maior concentração de acidez (íon H^+), devido à dissociação do ácido carboxílico durante o tratamento térmico (DADHANEEYA et al., 2023). Para a banana *in natura*, o valor de pH encontrado foi de $4,44 \pm 0,02$, podendo ser considerada uma fruta ácida.

Da Silva et al. (2017) caracterizaram físico-quimicamente bananas (*Musa sapientum* cultivar prata) *in natura* e desidratadas por secagem em estufa com circulação de ar forçada na temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período de 450 minutos. As frutas foram adquiridas em Salgueiro, Pernambuco e imersas em solução de metabissulfito de sódio antes da secagem. Os autores relataram um pH de $4,55 \pm 0,02$ para a fruta fresca e $6,39 \pm 0,04$ para a banana passa. As divergências nos valores encontrados neste estudo com a literatura podem ser atribuídas às diferenças no local de origem das bananas e pela técnica de secagem empregada.

Comparando-se o pH da fruta *in natura* com o valor médio ($4,41 \pm 0,12$) obtido após a secagem nas diferentes condições analisadas, não é possível afirmar com confiança estatística que houve diferença no valor observado em virtude da secagem, porém, o $\text{pH} < 4,5$ contribui para a estabilidade microbiológica.

Por sua vez ao avaliar os valores de cada condição, observa-se que o maior pH foi obtido para a menor potência IV (118 W) e maior velocidade do ar (1,5 m/s), registrando um valor de $4,64 \pm 0,01$. Em contrapartida, o menor valor foi observado para a maior potência (238 W) e maior velocidade do ar (1,5 m/s), atingindo um pH de $4,23 \pm 0,01$. A Figura 14 apresenta a superfície de resposta que descreve a influência da potência IV e velocidade do ar de secagem no pH da banana passa.

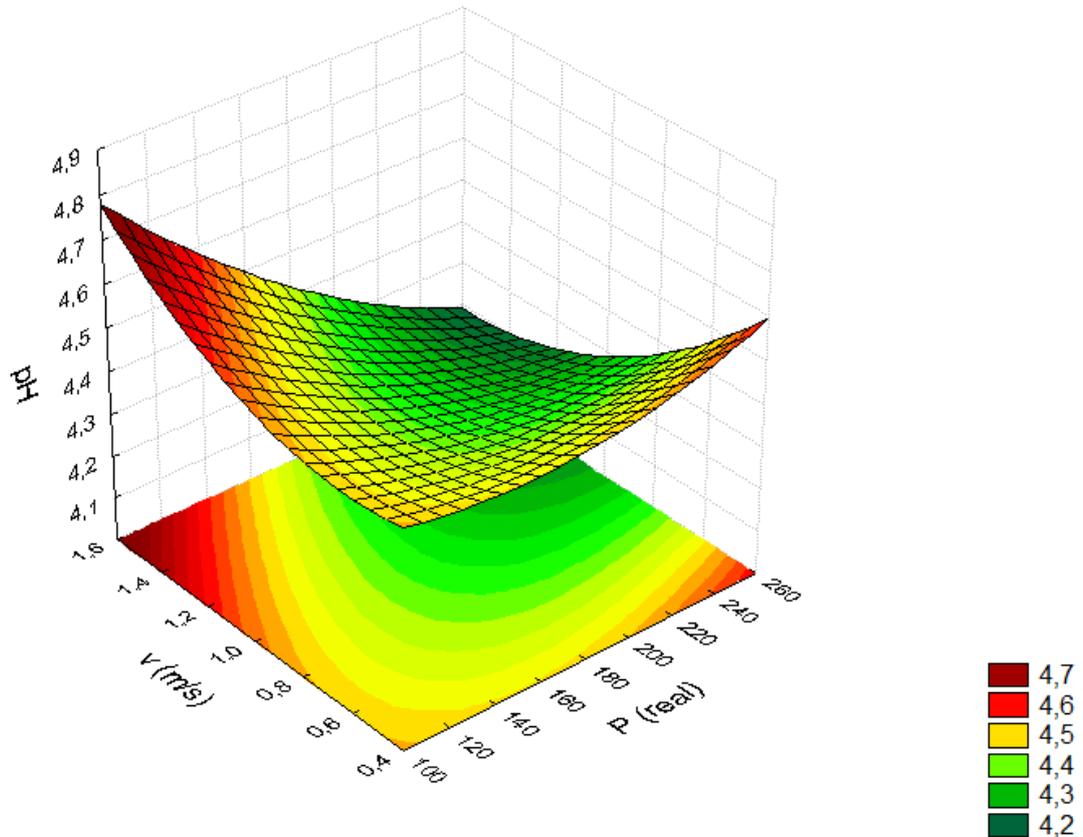
O modelo descrito pela Equação 23 ($R^2 = 0,95$) com grau de 90% de confiança ($p < 0,1$), evidencia que ambas as variáveis impactam esse parâmetro, sendo que tanto o aumento da radiação IV quanto da velocidade provocam a diminuição do pH. A redução do pH está associada a maiores concentrações de íons $[\text{H}^+]$ na amostra. Dessa forma, os efeitos da potência e velocidade são justificados pela concentração dos ácidos orgânicos devido ao processo de secagem. Ademais, a Tabela 9, apresenta os coeficientes dos efeitos significativos da potência e velocidade do ar sobre o pH.

Tabela 9 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o pH das amostras.

Fator	Coefficiente	Desvio	P
Média	4,4221	0,0105	0,0000
P (L)	-0,0967	0,0136	0,0004
P (Q)	-0,0218	0,0104	0,0815
V (Q)	-0,0243	0,0104	0,0586
P · v (L)	-0,1175	0,0166	0,0004

Fonte: Do autor (2023).

Figura 14 – Superfície de resposta para o pH.



Fonte: Do autor (2023).

$$pH = 4,4221 - 0,0967 \cdot P' - 0,0218 \cdot P'^2 - 0,0243 \cdot v'^2 - 0,1175 \cdot P' \cdot v' \quad (23)$$

A acidez é um importante parâmetro na avaliação da qualidade de produtos alimentícios, pois os ácidos orgânicos influenciam na cor, textura, odores e crescimento do número de microorganismos nos alimentos. A acidez total titulável (ATT) para a banana *in natura* foi de $0,18 \pm 0,01$ % de ácido málico em 100 g de fruta, corroborando com o resultado encontrando por Pereira (2012) no valor de $0,19 \pm 0,02$ % de ácido málico em 100 g de fruta.

Comparando-se a acidez da fruta *in natura* com o valor médio ($0,63 \pm 0,30$) das diferentes condições de secagem analisadas, é possível afirmar com confiança estatística que houve diferença no valor e aumento da concentração de ácido málico nas bananas passa. Além disso, o comportamento da acidez foi semelhante ao observado para o pH, isto é, a condição de maior potência IV (238 W) e maior velocidade do ar (1,5 m/s) resultou na banana passa com o maior teor de acidez, sendo este igual a $1,48 \pm 0,04$ % de ácido málico em 100 g de fruta. Já o

menor teor de acidez, no valor de $0,43 \pm 0,06$ % de ácido málico em 100 g de fruta, foi obtido na condição de menor potência IV (118 W) e maior velocidade do ar (1,5 m/s).

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a secagem favorece o aumento da acidez em porcentagem de ácido málico, conforme reportado por Batista et al. (2014) na acidez total de 1,61 (% ácido málico) para a banana passa orgânica da variedade prata anã. Os autores realizaram a secagem em secador da marca Pardal, modelo PE14 Junior, em temperatura fixa de 65 °C e velocidade do ar de 1,6 m/s. Nunes et al. (2017) atribuem esse aumento devido à desidratação concentrar alguns nutrientes e compostos, como os ácidos orgânicos. Para os autores, a elevação da temperatura promove a remoção da quantidade de água presente na amostra, e conseqüentemente, a concentração dos demais componentes que estavam previamente dissolvidos.

Os sólidos solúveis totais (SST) em alimentos são representados pelos componentes sólidos dissolvidos na água, incluindo os açúcares, sais, vitaminas, minerais, entre outros, além de também serem responsáveis pelo sabor. Nesse sentido, justifica-se a determinação desse parâmetro em produtos desidratados, a fim de verificar o efeito da secagem na degradação ou concentração das propriedades nutricionais dos alimentos e na aceitabilidade sensorial dos consumidores.

A banana *in natura* apresentou um teor de sólidos solúveis de $15,64 \pm 5$ °Brix. O valor observado é coerente com o que foi reportado por Pereira (2012), que quantificou os teores de sólidos solúveis totais em seis variedades de banana, obtendo um valor de $17,03 \pm 0,70$ ° Brix para o cultivar prata *in natura*. Com relação à banana desidratada, o valor médio das diferentes condições de secagem analisadas foi de $55,61 \pm 8,62$. Sendo assim, é possível afirmar com confiança estatística que houve diferença entre a fruta *in natura* e o produto seco, indicando um aumento no teor de SST provocado pelo processo de desidratação. Silva et al. (2022) registraram um teor de sólidos solúveis de $65,5 \pm 0,5$ ° Brix para a banana passa oriunda de secagem em estufa com circulação forçada de ar. Dessa forma, os resultados do presente trabalho corroboram com aqueles descritos na literatura.

Dentre as condições analisadas, o teor mais elevado de sólidos solúveis foi obtido na maior potência IV (238 W) e maior velocidade do ar de secagem (1,5 m/s), resultando em $68,97 \pm 10,41$ °Brix. Todavia, o menor teor foi observado para a menor potência IV (118 W) e menor velocidade do ar de secagem (0,5 m/s) no valor de $45,64 \pm 5$ °Brix. O incremento no teor de SST após o processo de secagem, pode ser atribuído à remoção da umidade da fruta, já que o principal componente da matéria seca são os sólidos solúveis. Além disso, esse aumento pode

ser influenciado por mudanças na estrutura da parede celular e pela decomposição de carboidratos complexos em açúcares simples (DEREJE, AREBA, 2020).

A atividade de água (a_w) em alimentos é uma medida que descreve a quantidade de água disponível no produto. Nesse contexto, a avaliação desta variável em frutas secas é de fundamental importância, pois microrganismos patogênicos e deteriorantes possuem crescimento limitado em alimentos com baixa atividade de água.

Para a banana *in natura*, a atividade de água obtida foi de $0,9676 \pm 0,0045$ e o valor médio para a banana passa considerando todas as condições analisadas foi de $0,4848 \pm 0,1538$, sendo possível afirmar com confiança estatística que houve diferença no valor e a secagem reduziu a atividade de água para um valor em que o crescimento de microrganismos como bactérias, bolores e leveduras passa a ser limitado, porém algumas reações químicas e enzimáticas ainda podem ocorrer. Além disso, o valor máximo ($0,842 \pm 0,012$) para este parâmetro foi obtido para a condição de potência mínima (118 W) e maior velocidade do ar (1,5 m/s) e o valor mínimo ($0,379 \pm 0,009$) para a potência média (178 W) e velocidade média do ar (1,0 m/s).

De acordo com o estudo desenvolvido por Gouveia et al. (2004) para a banana prata utilizando o método gravimétrico estático nas temperaturas de 20, 30 e 40 °C, a atividade de água variou na faixa de 0,479 a 0,809, sendo estes valores condizentes com os encontrados neste trabalho e um indicativo de que a secagem favorece a preservação da fruta, uma vez que reduz a atividade de água, e consequentemente a disponibilidade de água para reações oxidativas.

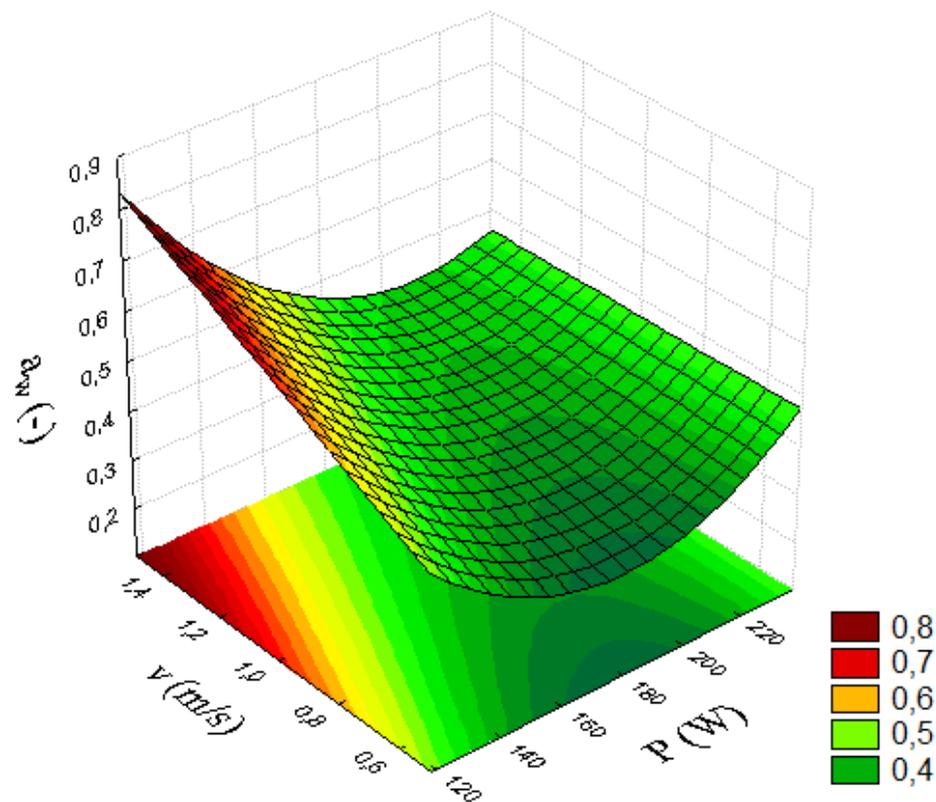
A Tabela 10 apresenta os coeficientes dos efeitos significativos da potência IV e da velocidade do ar sobre a atividade de água. A partir dela, observa-se que maiores potências reduzem a atividade de água, justificado pelo aumento na temperatura do material, enquanto maiores velocidades do ar de secagem podem contribuir para a elevação da atividade de água, devido às taxas de secagem mais brandas desenvolvidas, indicando maior disponibilidade de água. Ademais, o sinal negativo para o efeito de interação entre as variáveis de estudo evidencia que a potência IV exerce maior influência neste parâmetro, como observado para o tempo de processo.

Tabela 10 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre a atividade de água.

Fator	Coeficiente	Desvio	P
Média	0,50599	0,01894	0,0000
P (L)	-0,09997	0,02492	0,0070
P (Q)	-0,08732	0,01848	0,0032
v (L)	0,08110	0,02492	0,0174
P · v (L)	-0,08895	0,03052	0,0268

Fonte: Do autor (2023).

A Figura 15 descreve a superfície de resposta referente a influência da potência IV e velocidade do ar de escoamento na atividade de água da banana desidratada. Além disso, a Equação 24 apresenta o modelo para a atividade de água ($R^2 = 0,9055$) com grau de 95% de confiança ($p < 0,05$), em função da potência IV (P') e da velocidade do ar (v') codificadas.

Figura 15 – Superfície de resposta para a atividade de água (a_w).

Fonte: Do autor (2023).

$$a_w = 0,50599 - 0,09997 \cdot P' - 0,08732 \cdot P'^2 + 0,08110 \cdot v' - 0,08895 \cdot P' \cdot v' \quad (24)$$

Outro parâmetro de elevada relevância a ser avaliado no processo de secagem é a diferença total de cor entre o produto seco e a fruta *in natura*, pois está fortemente relacionado com a aceitabilidade dos consumidores. A Tabela 11 apresenta a diferença total de cor (ΔE) e o índice de escurecimento (BI) para as diferentes condições de secagem analisadas.

Tabela 11 – ΔE e BI para a banana passa nas diferentes condições analisadas.

P (W)	v (m/s)	ΔE	BI
118	0,5	13,16	84,02
118	1,0	10,89	94,58
118	1,5	9,95	44,08
178	0,5	34,33	119,74
178	1,0	31,35	136,11
178	1,5	26,88	95,95
238	0,5	36,60	79,78
238	1,0	37,18	97,46
238	1,5	49,99	86,59
178	1,0	14,14	102,65
178	1,0	33,53	165,67

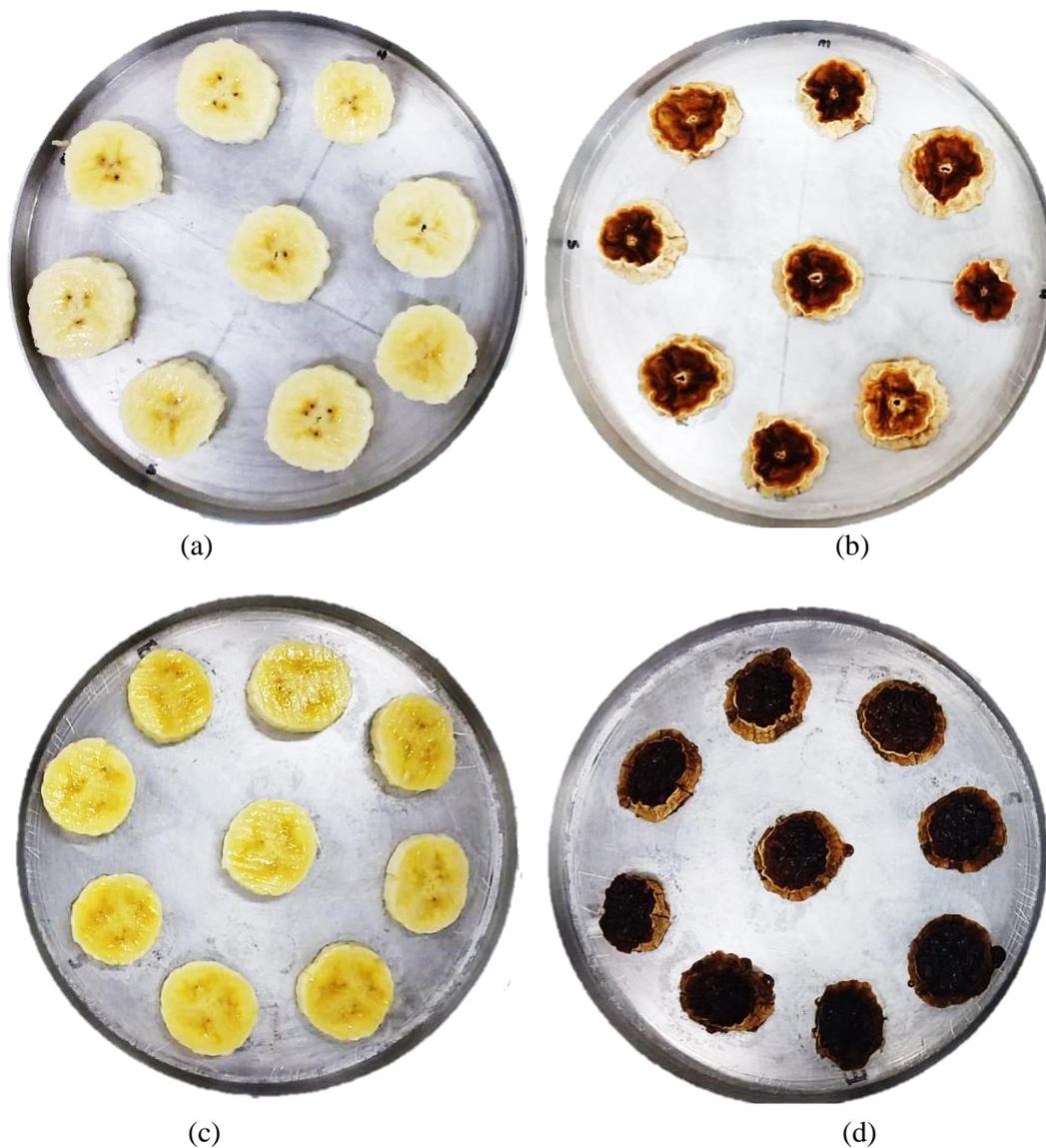
Fonte: Do autor (2023).

O valor máximo de ΔE de 49,99, foi obtido para a condição de potência e velocidade máxima ($P = 238$ W e $v = 1,5$ m/s), indicando que a coloração do produto seco difere muito da fruta *in natura*. Já o menor valor de 9,95 foi registrado para a potência mínima ($P = 118$ W) e maior velocidade do ar de secagem ($v = 1,5$ m/s), demonstrando uma coloração mais similar à fruta fresca.

Conforme demonstrado, qualitativamente, pela Figura 16 (a) e 16 (b), observa-se que maiores potências estão associadas a maiores valores de ΔE . Isso ocorre porque a reação de Maillard é favorecida pelo aumento da temperatura do processo, e, o resultado desta reação

não-enzimática é a formação de pigmentos escuros, que podem variar de marrom a preto, conhecidos como melanoidinas (FRANCISQUINI et al., 2017).

Figura 16 – banana (a) *in natura*, (b) seca em $P = 178 \text{ W}$ e $v = 0,5 \text{ m/s}$, (c) *in natura* e (d) seca em $P = 238 \text{ W}$ e $v = 0,5 \text{ m/s}$,



Fonte: Do autor (2023).

De Souza (2022) relatou que o uso de menores potências combinadas com maiores velocidades do ar não aquecido resulta em uma menor variação de cor para a secagem de bananas utilizando infravermelho assistido por convecção. Esse comportamento é justificado pelo fato de que o aumento da potência do infravermelho favorece a elevação da temperatura da amostra, podendo provocar alterações físicas e/ou químicas que contribuem para a degradação da cor, enquanto o aumento da velocidade ameniza esse processo de aquecimento.

O índice de escurecimento (BI) variou de 44,08 a 165,67, sendo o menor valor registrado para a condição de potência mínima ($P = 118 \text{ W}$) e velocidade máxima ($1,5 \text{ m/s}$) e o maior valor obtido na potência e velocidade intermediárias ($P = 178 \text{ W}$ e $v = 1,0 \text{ m/s}$). A Tabela 12 apresenta os coeficientes dos efeitos significativos da potência IV e da velocidade do ar sobre o índice de escurecimento. A partir dela, observa-se que apenas os efeitos quadráticos de ambas as variáveis analisadas são significativos a 90% de confiança e indicam que maiores potências e velocidades propiciam maiores valores de BI. De acordo com Ferreira (2015), o grau de escurecimento é proporcional à temperatura atingida pelo material durante o processo de secagem, conseqüentemente, proporcional a potência IV. Por outro lado, o aumento da velocidade contribui para o prolongamento no tempo de secagem e exposição da amostra ao oxigênio (O_2). Isso favorece reações de escurecimento, o que explica a elevação dos valores de BI para maiores velocidades.

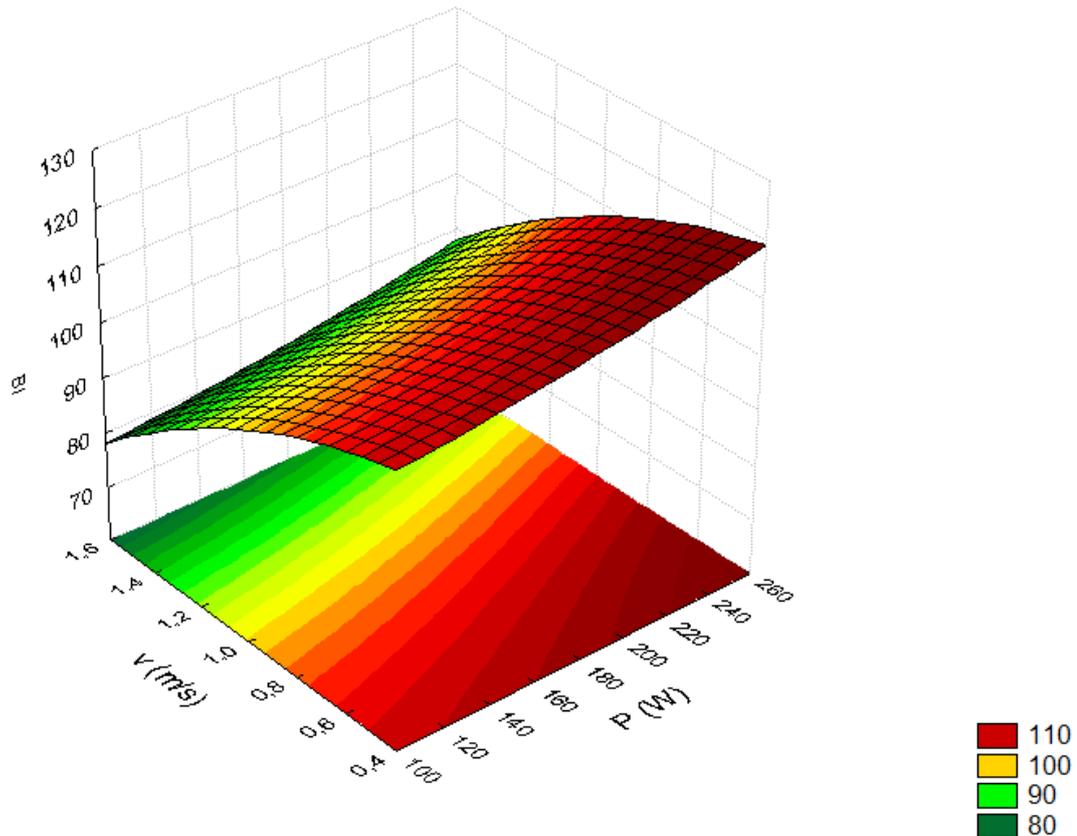
Tabela 12 – Coeficientes dos efeitos da potência e da velocidade do ar sobre o BI.

Fator	Coeficiente	Desvio	p
Média	93,2139	6,5722	0,0000
P (Q)	18,1939	6,5480	0,0240
v (Q)	12,2829	6,5480	0,0975

Fonte: Do autor (2023).

A Figura 17 apresenta a superfície de resposta que descreve a influência da potência e velocidade do ar no índice de escurecimento (BI). Já a Equação 25 apresenta o modelo para o BI ($R^2 = 0,6536$) com grau de 90% de confiança ($p < 0,10$), em função da potência IV (P') e da velocidade do ar (v') codificadas.

Figura 17 – Superfície de resposta para o índice de escurecimento (BI).



Fonte: Do autor (2023).

$$BI = 92,2139 + 18,1939 \cdot P'^2 + 12,2829 \cdot v'^2 \quad (25)$$

4.3. Análise de deseabilidade e otimização das condições operacionais

A deseabilidade e a otimização das condições operacionais foram estimadas por meio das Equações 2, 3 e 4, com base nos seguintes parâmetros desejáveis para o produto final: valores mínimos de atividade de água (a_w), consumo específico de energia (SEC) e diferença total de cor (ΔE), bem como valores máximos para o teor de sólidos solúveis totais (SST). A escolha da menor atividade de água se deu por esta variável refletir a umidade da banana passa, bem como a estabilidade e durabilidade do produto seco. Já o menor SEC contempla também menores emissões de CO_2 e tempo de processo. Em contrapartida, a menor diferença total de cor, juntamente com o maior teor de SST configuram uma banana passa com maior aceitabilidade sensorial pelos consumidores não só pelo aspecto visual, como também pelo sabor e aroma.

A Tabela 13 apresenta a escala de desejabilidade descrita por Lazic (2006), que avalia a qualidade do produto final em função do valor dessa medida.

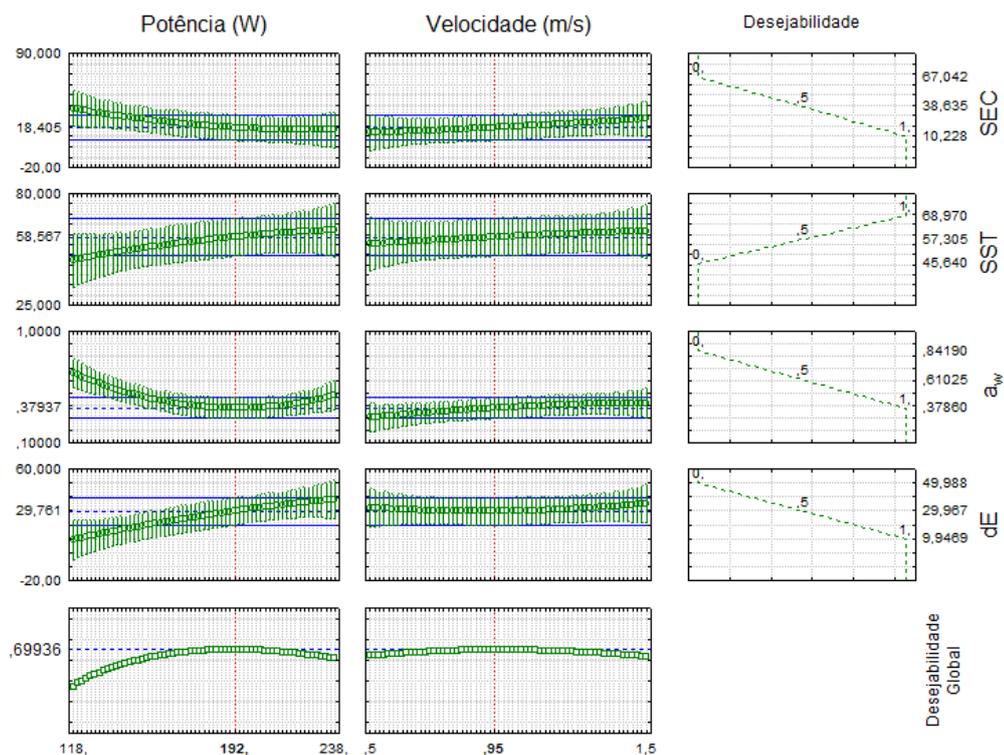
Tabela 13 – Classificação de desejabilidade.

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 (2006).

A Figura 18 foi elaborada no *software* Statistica 7.0 e apresenta os valores preditos para as características desejáveis, conforme os critérios estabelecidos, bem como as desejabilidades individuais e global do processo. Os valores preditos foram estimados, com base nos modelos gerados para atividade de água, SEC, diferença total de cor e teor de sólidos solúveis totais.

Figura 18 – Condição de operação ótima e valores previstos para a banana passa.



Fonte: Do autor (2023).

Os valores estimados para o produto final pela função desejabilidade para consumo específico de energia, teor de sólidos solúveis totais, atividade de água e diferença total de cor são de 18,405 kWh/kg_{água evaporada}, 58,567 °Brix, 0,3794 e 29,761, respectivamente. Além disso, observa-se que o valor obtido para a atividade de água refere-se a um produto em que não ocorre o crescimento de microrganismos e a atividade enzimática é limitada, garantindo a estabilidade e consequente aceitação pelos consumidores.

A condição de operação ótima foi para a potência de radiação infravermelho no valor de 192 W e velocidade do ar de secagem em 0,95 m/s, sendo estes valores muito próximos do ponto central ($P = 178$ W e $v = 1,0$ m/s). As discussões de resultados referentes à influência das variáveis desejáveis condizem com a condição ótima encontrada, já que a potência e velocidade intermediária combinadas são capazes de fornecer uma banana passa com consumo específico de energia, diferença total de cor, teor de sólidos solúveis totais e atividade de água aceitáveis, que atendam os padrões de qualidade proposto pela RDC n° 272 de 22 de setembro de 2005. E, portanto, pode ser comercializada devido o teor de umidade final ser inferior a 25% (b.u.).

A desejabilidade global foi estimada em 0,699 e configura um produto final de boa qualidade de acordo com a classificação proposta por Lazic (2006). Sendo assim, considerando a escala de 0 (completamente inaceitável) e 1 (qualidade máxima), é possível obter um produto aceitável na condição ótima de operação determinada.

A partir da condição ótima de operação encontrada ($P = 178$ W e $v = 1,0$ m/s), foi possível estimar os custos para se produzir uma banana passa que possua um teor de umidade aceitável de acordo com os padrões estabelecidos pela RDC n° 272 de 22 de setembro de 2005 e que apresente boa qualidade em termos nutricionais e sensoriais. A Tabela 14, apresenta a bandeira tarifária da CEMIG vigente no período de 28 de maio de 2023 até 27 de maio de 2024.

Tabela 14 – Bandeira tarifária da CEMIG.

	Bandeira Verde	Bandeira Amarela	Bandeira Vermelha 1	Bandeira Vermelha 2
Custo (R\$/KWh)	0,74906	0,778950	0,814060	0,8470710
Custo médio (R\$/KWh)	0,797285			

Fonte: CEMIG (2023).

A Tabela 15 descreve os teores de umidade ($X_{B.U.}$), o consumo de energia (kWh/kg_{banana passa}) e o custo operacional (R\$/kg_{banana passa}) para a produção de 1 kg de banana passa, considerando a condição ótima encontrada e o custo médio da bandeira tarifária da CEMIG.

Tabela 15 – $X_{B.U.}$, consumo de energia e custo operacional para a produção de 1 kg de banana passa.

P (W)	v (m/s)	$X_{B.U.}$ (%)	Consumo	Custo
			(kWh/kg_{banana passa})	(R\$/kg_{banana passa})
178	1,0	25,76	42,02	33,50
178	1,0	17,64	48,50	38,67
178	1,0	28,79	33,91	27,04
Média		24,06	41,48	33,07

Fonte: Do autor (2023).

Com base nos dados de cotação da Central de Abastecimento (CEASA) de Belo Horizonte/MG, o preço banana prata em 22 de novembro de 2023 era de R\$5,00/kg (AGROLINK, 2023). Ao somar os custos operacionais ao valor da fruta *in natura*, obtém-se um custo total de R\$38,07, para a produção de 1kg de banana passa. Em sites de buscas na *internet*, identificou-se a disponibilidade de banana passa da marca Banana Brasil produzida sem adição de açúcares a um preço de R\$75,60/kg (AMAZON, 2023). Dessa forma, verifica-se que a banana passa resultante do presente estudo é capaz de competir com os produtos disponíveis no mercado e ainda garantir uma margem de lucro atrativa.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu avaliar a influência da potência de radiação infravermelha e da velocidade do ar de secagem não aquecido na qualidade da banana passa e nas variáveis relacionadas ao desempenho do processo.

Ao analisar as curvas de taxa de secagem, observa-se que a secagem híbrida de bananas ocorre no período de taxa decrescente para todas as condições avaliadas, indicando que o processo é controlado pelo mecanismo difusivo. Com relação a avaliação das variáveis de desempenho do processo, verifica-se que condições de secagem com maiores potências de infravermelho resultam em menores valores de SEC, emissão de CO₂ e tempos de secagem mais curtos. Ao contrário da velocidade do ar, cujo aumento pode provocar secagens mais longas, maiores emissões de CO₂ e elevados valores de consumo específico de energia.

No que tange à qualidade, a banana passa produzida apresentou umidades finais entre 12,32% e 38,47% em base úmida. Além disso, considerando os valores médios obtidos após a secagem nas diferentes condições analisadas, é possível afirmar com confiança estatística que houve redução da umidade e atividade de água e aumento no teor de cinzas, acidez total titulável e sólidos solúveis totais em comparação com a banana *in natura* em virtude da secagem. No entanto, ao comparar o pH da fruta *in natura* com o da banana passa, não é possível afirmar com confiança estatística que houve diferença no valor. Todavia, foi observado que o aumento da potência IV, bem como da velocidade do ar favoreciam menores valores de pH e índices de escurecimento. Também foi observado que maiores potências combinadas com menores velocidades do ar de secagem favorecem a redução da atividade de água do material. Já o comportamento oposto, isto é, menores potências IV e maiores velocidades do ar, contribuem para uma menor degradação de cor.

As condições operacionais ótimas são de 192 W e 0,95 m/s, resultando em uma banana passa com 0,37937 de atividade de água, consumo específico de energia de 18,405 kWh/kg_{água} evaporada, diferença total de cor de 29,761 e teor de sólidos solúveis totais de 58,567 °Brix, garantindo um produto final que atenda às exigências da legislação vigente e apresente um teor de umidade inferior a 25% (b.u.). Estes resultados sugerem que a secagem infravermelha combinada com convecção de ar não aquecido mostra-se como uma técnica promissora para a produção de banana passa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem trabalhos disponíveis na literatura, como o de Malakar et al. (2023), que investigou o desempenho de um secador solar híbrido assistido por infravermelho e avaliou atributos de qualidade como o teor de flavonoides e fenólicos totais em fatias de abacaxi. Entretanto, não foram encontrados estudos envolvendo a determinação destes compostos em bananas para a secagem híbrida. Portanto, sugere-se a adição destas análises, bem como a determinação de vitamina C em futuros trabalhos, a fim de verificar se resultados semelhantes podem ser obtidos na secagem infravermelho assistida por convecção. Além disso, em termos de desempenho do processo, sugere-se avaliar o aquecimento do ar de secagem na redução do tempo, SEC e emissões de CO₂.

REFERÊNCIAS

- AGROLINK. **Cotações.** 2023. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/cotacoes/ceasa/frutas/banana/>. Acesso em: 24. nov. 2023.
- ALMEIDA COUTO, Luzia et al. **Análise Microbiológica E Físico-Química De Banana Desidratada Submetida A Diferentes Tratamentos.** 2020.
- AMAZON. **Banana Passa.** 2023. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/>. Acesso em: 24. nov. 2023.
- ANDRADE, Keyse Santos; DO PRADO, Manoel Marcelo; MARQUES, Luanda Gimeno. Estudo da transferência de calor e massa na secagem infravermelho combinada com convecção forçada do resíduo da laranja. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 20199-20206, 2019.
- ARAUJO, Eder Augusto Furtado et al. **Estudo da cinética de secagem de fatias de banana nanica (*Musa acuminata* var. *Cavendish*) osmoticamente desidratadas.** Dissertação de Trabalho de Conclusão de Curso. 2000.
- AUORE, G.; PARFAIT, B.; FAHRASMANE, L. Bananas, raw materials for making processed food products. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, p. 78 – 91, 2009.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 414 p.
- BATISTA, Daniele de Vasconcellos Santos et al. Estabilidade físico-química e microbiológica de banana passa orgânica. **Ciência Rural**, v. 44, p. 1886-1892, 2014.
- BORGES, A. L. et al. **A cultura da banana.** 3. ed. rev. e aum. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- BORGES, Soraia Vilela et al. Secagem de bananas prata e d'água por convecção forçada. **Food Science and Technology**, v. 30, p. 605-612, 2010.
- BRANDÃO, Shirley Clyde Rupert. **Secagem por infravermelho de melão pré-tratado com etanol: estudo cinético e parâmetros de qualidade.** 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT-Food science and Technology**, v. 28, n. 1, p. 25- 30, 1995.
- BREITKREITZ, Márcia Cristina; SOUZA, André Marcelo de; POPPI, Ronei Jesus. Experimento didático de quimiometria para planejamento de experimentos: avaliação das condições experimentais na determinação espectrofotométrica de ferro II com o-fenantrolina. Um tutorial, parte III. **Química Nova**, v. 37, p. 564-573, 2014.
- CALADO, Verônica; MONTGOMERY, Douglas. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica.** Editora E-papers, 2003.
- CAMEIRA, P.; VILELA, A. Estabilização tartárica de vinhos: estudo comparativo da eletrodiálise e do tratamento pelo frio. **Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária**, 2017.

CANO-CHAUCA, Milton et al. Curvas de secagem e avaliação da atividade de água da banana passa. **Boletim do centro de pesquisa de processamento de alimentos**, v. 22, n. 1, 2004.

CASTRO JÚNIOR, M.A.; ARENILLO, S.A. Acceptability of *Musa Balbisiana* (saba banana) puree in two treatments in making ice cream. **Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research**, v.4, n.4, p.29-33, 2016.

CEMIG. **Valores de tarifas e serviços**. 2023. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 24. nov. 2023.

CHITARRA M.I.F.; CHITARRA A.B. **Pós-colheita de Frutos e hortaliças: Fisiologia e Manuseio**. Lavras: UFLA, 2005. 785p.

CHOU S.K.; CHUA, K.J. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. **Trends in Food Science & Technology**.12 (2001) 359–369.

DA SILVA, Maria Inácio et al. Avaliação físico-química de bananas (*Musa sapientum* cultivar prata) *in natura* e desidratadas. **Revista Semiárido De Visu**, v. 5, n. 2, p. 73-79, 2017.

DADHANEYYA, Harsh et al. The impact of refractance window drying on the physicochemical properties and bioactive compounds of malbhog banana slice and pulp. **Applied Food Research**, v. 3, n. 1, p. 100279, 2023.

DE GOUVEIA, Josivanda PG et al. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessecção da polpa de banana da variedade prata. **Engenharia Agrícola**, v. 24, p. 799-806, 2004.

DE SOUSA, Francinalva Cordeiro. Banana-passa como substituto do açúcar em formulação de bolo funcional. **HOLOS**, v. 1, 2022.

DE SOUZA, JOÃO VICTOR B. **Secagem infravermelha de bananas assistida por convecção**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

DELGADO, Fernanda. O setor energético na COP26: nada de novo, de novo. **Revista Conjuntura Econômica**, v. 75, n. 12, p. 44-46, 2021.

DEREJE, Belay; ABERA, Solomon. Effect of pretreatments and drying methods on the quality of dried mango (*Mangifera Indica* L.) slices. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 1747961, 2020.

DOS SANTOS, A. A. C.; FLORENCIO, A. K. G. D.; ROCHA, É. M. D. F. F.; DA COSTA, J. M. C. Avaliação físico-química e comportamento higroscópico de goiaba em pó obtida por spray-dryer. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 3, p. 508-514, 2014.

EL-MESERY, Hany S. et al. Evaluation of infrared drying for okra: Mathematical modelling, moisture diffusivity, energy activity and quality attributes. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 50, p. 103451, 2023.

EL-MESERY, Hany S.; KAMEL, Reham M.; EMARA, Ramy Z. Influence of infrared intensity and air temperature on energy consumption and physical quality of dried apple using hybrid dryer. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 27, p. 101365, 2021.

EMBRAPA. **Banana**, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/banana/pre-producao/economia/mercado>. Acesso em: 17 dez. 2023.

ERDOGDU, S. Belgin et al. Experimental determination of penetration depths of various spice commodities (black pepper seeds, paprika powder and oregano leaves) under infrared radiation. **Journal of Food Engineering**, v. 161, p. 75-81, 2015.

FAO. **Banana Market Review 2022**. Rome, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cc6952en/cc6952en.pdf>. Acesso em: 09 out. 2023.

FEITOSA, Bruno Fonsêca et al. Cinética de secagem dos resíduos da agroindústria processadora de polpa de frutas. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 01, p. 134-141, 2019.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos: Princípios e Práticas**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602 p.

FERREIRA, Camila Felix. **Aplicação de energia eletromagnética na região do infravermelho para a secagem de sementes de *Moringa oleifera* Lam.** 2015.

FERREIRA, Luiza Almeida et al. Avaliação da alteração de cor de uma resina composta "beautiful bulk" submetida à imersão em soluções pigmentantes. **Arquivos em Odontologia**, v. 56, 2020.

FIORAVANÇO, João Caetano et al. Mercado mundial da banana: produção, comércio e participação brasileira. **Informações econômicas**, v. 33, n. 10, p. 15-27, 2003.

FONTES, Luciana Cristina Brigatto et al. Efeito de antioxidantes na prevenção de escurecimento enzimático de batata-doce (*Ipomoea Batatas*) e inhame (*Dioscorea spp*). **Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra, Agrárias e Engenharias-ATIVIDADES ENCERRADAS**, v. 15, n. 3, p. páginas 167-174, 2009.

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.

FRANCISQUINI, Júlia d'Almeida et al. Reação de Maillard: uma revisão. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v. 72, n. 1, p. 48-57, 2017.

GARZILLO, Josefa Maria Fellegger et al. **Pegadas dos alimentos e das preparações culinárias consumidos no Brasil**. 2019.

GERMER, S. P. M.; QUEIROZ, M. R.; GASPARINO-FILHO, J.; CAVICHIOLO, J. R.; AGUIRRE, J. M. Viabilidade Econômica de uma Unidade Produtora de Frutas Desidratadas por Processo Osmótico. **Informações Econômicas**, São Paulo, Vol. 42, Nº 05, p.20-35, 2012.

GEROMEL, Lara Beatriz; FREITAS, Irene Rodrigues. Aplicação da energia de micro-ondas para secagem da banana nanica (*Musa acuminata'dwarf cavendish'*) submetida ao processo de osmose. In: **Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332**. 2020. p. 1-10.

GODOY, CAROLINE. **Uma aplicação do planejamento de experimentos e carta de controle em uma Indústria de Cosméticos: Ciclo Dmaic**. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)—Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho

GUEDES NETO, Odilon Moreira. **Modelagem da secagem de café em diferentes granulometrias por infravermelho**. 2019.

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.

HOFFMANN, Fernando Leite. Fatores limitantes à proliferação de microorganismos em alimentos. **Brasil alimentos**, v. 9, n. 1, p. 23-30, 2001.

IBGE. **Pesquisa de Orçamentos Familiares 2017-2018**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/46/0>. Acesso em: 09 out. 2023.

IBGE. **Produção de Banana**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/banana/br>. Acesso em: 09 out. 2023.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: **Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**, 3. ed. São Paulo, 1985.

INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS - IBRAF. Produção Brasileira de Frutas em 2007. São Paulo: IBRAF, 2009.

JATURONGLUMLERT, S; KIATSIRTOAT, T; Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. **Journ of Food Eng**, n100, p254-260, 2010.

JESUS SA, AKIRA FC, URBANO MATSUURA U, FOLEGATTI MIS & CARDOSO RL. Avaliação de banana-passa obtida de frutos de diferentes genótipos de bananeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 40:573-579, 2005.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972. 358p.

LABUZA, Theodore P.; TANNENBAUM, Steven R. Nutrient losses during drying and storage of dehydrated foods. **Critical Reviews in Food Science & Nutrition**, v. 3, n. 2, p. 217-240, 1972.

LAZIC, Z. R. **Design of experiments in chemical engineering: a practical guide**. [s.l.] John Wiley & Sons, 2006.

LEITE, F. L. A et al. Pegada de carbono associada a processos de secagem: eletricidade v.s. energia solar. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 5., 2017. **Anais [...]**. ISSN, 2017. p. 1081-1093.

Madamba, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MAIA, Gabriela Araújo de Oliveira. **Cinética de secagem de manga rosa pelo método camada de espuma (foam-mat-drying)**. 2020.

MALAKAR, Santanu et al. Development of infrared-assisted hybrid solar dryer for drying pineapple slices: Investigation of drying characteristics, mass transfer parameters, and quality attributes. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 88, p. 103437, 2023.

MARTINAZZO, Ana P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 301-306, 2007.

MARTINS, Fernanda Pereira et al. Secagem: uma revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 4, p. 0600-0607i, 2020.

MATSUURA, F. C. A. U; COSTA, J. I. P; FOLEGATTI, M. I. S. Marketing de banana: preferências do consumidor quanto aos atributos de qualidade dos frutos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, São Paulo, v. 26, n. 1, abril/2004.

MENON, A. S.; MUJUMDAR, A.S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. cap. 9, p. 295-326.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Fator médio – Inventários Corporativos**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>. Acesso em: 17 dez. 2023.

MOKBEL, M. S.; HASHINAGA, F. Antibacterial and Antioxidant Activities of Banana (*Musa, AAA cv. Cavendish*) Fruits Peel, **American Journal of Biochemistry and Biotechnology**, v. 1, n. 3, p. 126 - 132, 2005.

MOREIRA, Daniele Buraen et al. Determinação do teor de cinzas em alimentos e sua relação com a saúde. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 10, p. 3041-3053, 2021.

MOTARJEMI, Y. **A study of some physical properties of water in foodstuffs**. PhD. Thesis, Department of Food Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 1988.

MOTEVALI, Ali; KOLOOR, Reza Tabatabaee. A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 445-461, 2017.

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.

NANVAKENARI, Sara; MOVAGHARNEJAD, Kamyar; LATIFI, Asefeh. Modelling and experimental analysis of rice drying in new fluidized bed assisted hybrid infrared-microwave dryer. **Food Research International**, v. 159, p. 111617, 2022.

NASCIMENTO, A. P. S.; BARROS, S. L.; SANTOS, N. C.; ARAÚJO, A. J. B.; CAVALCANTI, A. S. R. R. M.; DUARTE, M. E. M. Secagem convectiva e influência da temperatura nas propriedades físico-químicas das amêndoas de girassol comercial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 20, n. 3, p. 227-238, 2018.

NASCIMENTO, V. R. G. **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de *Moringa Oleifera* Lam**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2014

NASCIMENTO, Vânia RG; BIAGI, João D.; OLIVEIRA, Rafael A. de. Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 686-692, 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, 2011. p.89-97.

NUNES, Jarderlany Sousa et al. Influência da temperatura de secagem nas propriedades físico-química de resíduos abacaxi. **Revista Agropecuária Técnica**, v. 1, n. 1, p. 41-46, 2017.

- OLIVEIRA, Raí Melo de. **Estudo da secagem infravermelho de sementes de melancia (*Citrullus lanatus*)**. 2019.
- PARK, K.J.; TUBONI, C.T.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. Estudo da secagem de caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.6, n.1, p.71-86, 2004.
- PASCHOALINO, J. E. Hortaliças acidificadas em conserva: riscos e cuidados. Informativo Fruthotec, Campinas, v. 3, n. 2, 1997.
- PEREIRA, Guilherme Pacheco. **Compostos bioativos e atividade antioxidante em bananas (*Musa sp.*)**. Orientadora: Célia Maria de Sylos. 2012. 63p. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Nutrição) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Araraquara, 2012.
- PHOUNGCHANDANG, S; WOODS, J. L. Moisture Diffusion and Desorption Isotherms for Banana. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 4, p. 651-657, 2000.
- PINHEIRO, R. V. R.; MARTELETO, L. O.; SOUZA, A. C. G. de; CASALI, W. D.; CONDÉ, A. R. Produtividade e qualidade dos frutos de dez variedades de goiaba, em Visconde do Rio Branco, Minas Gerais, visando ao consumo ao natural e à industrialização. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 31, p. 360-387, 1984.
- PIO, L. O Brasil é o quarto maior produtor mundial de banana. **Campos & Negócios**, 2023. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/o-brasil-e-o-quarto-maior-produtor-mundial-de-banana/>. Acesso em: 09 out. 2023.
- 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.
- SADLER, Michele Jeanne et al. Dried fruit and public health–what does the evidence tell us?. **International journal of food sciences and nutrition**, v. 70, n. 6, p. 675-687, 2019.
- SAHARI, Yahya et al. Characterization of single and hybrid mode drying of desiccated coconut. **Journal of Food Engineering**, p. 111628, 2023.
- SAKAI, Noboru; HANZAWA, Tamotsu. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. **Trends in Food Science & Technology**, v. 5, n. 11, p. 357-362, 1994.
- SAKARE, Priyanka et al. Infrared drying of food materials: Recent advances. **Food Engineering Reviews**, v. 12, n. 3, p. 381-398, 2020.
- SALAGNAC, P.; GLOUANNEC, P.; LECHARPENTIER, D., v.47, p.4479-4489, 2004. Numerical modeling of heat and mass transfer in porous medium during combined hot air, infrared and microwave heating. **International Journal of heat and mass transfer**, v.47, p.4479-4489, 2004.
- SANDU C. Infrared radiative drying in food engineering: a process analysis. **Biotechnology Progress**, v. 2, n. 3, p. 109-119, 1986.
- SANTOS, C. J. R. **Secagem de sementes de girassol via radiação infravermelho e convecção forçada de ar aquecido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju – SE, 2009.
- SILVA, P. L. et al. BANANA PASS AS SUGAR SUBSTITUTE IN FUNCTIONAL CAKE FORMULATION. **HOLOS**, v. 1, 2022.

UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas): Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação – NEPA, **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO 4ª Ed.**, Campinas – SP, 161 p. 2011.

VALARMATHI, T. N. et al. Recent developments in drying of food products. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2017. p. 012037.

VALMAYOR, R.V. Classification and characterization of *Musa exotica*, *M. alinsanaya* and *M. acuminata* ssp. Errans. **Infomusa**, v.10, p.35-39, 2001.

VASCONCELLOS, R. C.; BELTRÃO, N.E.S.; PONTES, A.N. Estimativa da pegada de carbono no setor de soja no Município de Paragominas, Pará. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 7, n. 1, p. 142-149, 2016.

WATERHOUSE, A. L. The Phenolic Wine Antioxidant. In: PACKER, L.; CADENAS, E. (Ed) **The Handbook of Antioxidants**, Nova Iorque: Marcel Dekker Inc, 2002.

ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. **Food Chemistry**, v. 64, n. 4, p. 555-559, 1999.