



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

IVAN BAZO BERGAMIM

**DESEMPENHO DA SECAGEM DE MORANGO EM UM
SECADOR COM BOMBA DE CALOR**

CAMPINAS

2021

IVAN BAZO BERGAMIM

**DESEMPENHO DA SECAGEM DE MORANGO EM UM
SECADOR COM BOMBA DE CALOR**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na Área de Tecnologia Pós-Colheita.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO IVAN BAZO BERGAMIM, E ORIENTADA PELO PROF. DR. RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA.

CAMPINAS

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

B452d Bergamim, Ivan Bazo, 1993-
Desempenho da secagem de morango em um secador com bomba de calor / Ivan Bazo Bergamim. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Rafael Augustus de Oliveira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Antocianinas. 2. Cinética. 3. Cor. 4. Otimização. 5. Secagem. 6. Superfície de resposta - Metodologia. 7. Morango. I. Oliveira, Rafael Augustus de, 1979-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Performance analysis of strawberry drying on a heat pump dryer

Palavras-chave em inglês:

Anthocyanins

Kinetics

Color

Optimization

Drying

Response surface - Methodology

Strawberry

Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Rafael Augustus de Oliveira [Orientador]

Franciane Colares Souza Usberti

Carolina Maria Sánchez-Sáenz

Data de defesa: 06-08-2021

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-3031-4639>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/5192998063691844>

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Ivan Bazo Bergamim**, aprovada pela Comissão Julgadora em 6 de agosto de 2021, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira – Presidente e Orientador

Profa. Dra. Franciane Colares Souza Usberti – Membro Titular

Profa. Dra. Carolina Maria Sánchez-Sáenz – Membro Titular

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas por todo o investimento e suporte no desenvolvimento científico e profissional, assim como por toda minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Augustus de Oliveira pela paciência e entrega, pela orientação durante todo o período de mestrado, mostrando-me os caminhos para uma boa pós-graduação, assim como por ter me apoiado durante momentos difíceis durante a trajetória.

Agradecimentos a Prof. Dra. Carolina Maria Sánchez-Sáenz e Profa. Dra. Franciane Colares Souza Usberti por terem formado a banca de defesa do mestrado, assim como pelo tempo hábil em que precisaram avaliar.

Gostaria de agradecer ao meu pai Carlos Augusto Bergamim, à minha mãe Márcia Cristina Bazo Bergamim e à minha irmã Fernanda Bazo Bergamim, pelo apoio e suporte durante todo o meu período profissional, assim como terem permitido uma boa criação, além do meu desenvolvimento profissional e de caráter.

Agradecimentos a José Maria da Silva, Antônio Henrique Boato e Cláudio Kiyoshi Umezu, pela ajuda, cooperação e paciência na criação, construção e desenvolvimento do secador por bomba de calor desenvolvido para o projeto. A Ma. Cyntia Trevisan Soares pela ajuda, supervisão e apoio essenciais nas análises de qualidade do produto.

Agradecimentos a todos os meus colegas de república pelo apoio direto ou indireto durante todo tempo de estadia pelo período do mestrado.

Assim como agradecimentos a todos aqueles que direta ou indiretamente me ajudaram no meu desenvolvimento profissional

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

Durante a pesquisa e desenvolvimento de máquinas, é sempre necessário conseguir aliar os parâmetros de qualidade do processo com a qualidade do produto resultante. A secagem, por ser um processo importante na conservação do produto, possui uma influência direta nos processos pós-colheita. O secador com bomba de calor é um sistema de aquecimento e desumidificação do ar de secagem que utiliza ciclos de refrigeração para permitir o uso do processo de secagem. Com isso, há necessidade de processos que possam ser aliados ao desempenho de máquinas de secagem e qualidade dos produtos agrícolas, assim como permitir a otimização em relação a estes parâmetros. Por meio do uso da modelagem pelo modelo de Fick, foi possível analisar a difusividade efetiva de duas diferentes condições do sistema, sendo câmara primária (CP) e câmara secundária (CS), enquanto utilizaram-se a razão específica de extração de umidade (SMER) e o coeficiente de performance (COP) para analisar o desempenho da secagem nos ensaios realizados. A qualidade do morango foi avaliada pela sua coloração e composição química, precisamente pela concentração de antocianinas. Métodos estatísticos como um planejamento fatorial e delineamento composto central rotacional (DCCR) foram utilizados para modelagem de equações que aliaram as respostas de qualidade, secagem e desempenho do secador com a temperatura e velocidade do ar de secagem. Os resultados mostraram uma maior faixa de valores de difusividade efetiva na CS se comparada a CP, sendo $1,71 \times 10^{-10}$ a $4,14 \times 10^{-10}$ m²/s e $2,00 \times 10^{-10}$ a $5,18 \times 10^{-10}$ m²/s, respectivamente, além de serem influenciadas positivamente em relação à temperatura e à velocidade do ar. Quanto à demanda de energia, tem-se uma diminuição da demanda com a diminuição da temperatura, assim como do tempo de secagem, variando de 6,766 a 11,230 kWh. Houve influência positiva do SMER em relação à diminuição da demanda e ao aumento da temperatura, variando de 0,034 a 1,010 kg/kWh, assim como uma alta influência das condições ambientais nos resultados do COP, que variaram de 1,64 a 1,9. Os valores de Croma e ΔE^* foram influenciados pelo processo de secagem como um todo, com aumento do Croma na escala do vermelho, saturando esta cor. Quanto aos resultados de concentração de antocianinas após o processo de secagem, que variaram de 9,71 a 17,84 mg/100g, apresentaram uma relação positiva com a temperatura e velocidade do ar, apesar da degradação do seu conteúdo em função do tempo de exposição. Na otimização, o ponto ótimo considerando os resultados de demanda energética e a difusividade efetiva da CS se situou em 48,0°C e 3,0 m/s, enquanto que considerando os resultados de demanda energética e teor de antocianinas, se situou em 47,5°C e 3,4 m/s (para CS) ou 0,37 m/s (para CP).

ABSTRACT

During research and development of machines, it is always necessary to combine the quality process parameters with the quality of the resulting product. Drying, as an important process in product conservation, presents a direct influence on post-harvest product processes. The heat pump dryer is a drying air heating and dehumidification system that uses refrigeration cycles to enable the drying process. Thus, there is a need for processes that can be combined with the performance of drying machines and the quality of agricultural products, as well as allowing optimization in relation to these parameters. By using of Fick's model, it was possible to analyze the effective diffusivity of two different conditions of the system, main chamber (CP) and secondary chamber (CS), while the specific moisture extraction ratio (SMER) and coefficient of performance (COP) were used to analyze the drying performance in the tests. The strawberry quality was evaluated by the analysis of color and chemical composition, precisely by the anthocyanins content. Statistical methods such as factorial design and central composite rotatable design (DCCR) were used for modeling equations that combine quality, drying and dryer performance responses with temperature and drying air velocity. The results showed a wider range of effective diffusivity values for CS compared to the CP, as 1.71×10^{-10} to 4.14×10^{-10} m²/s and 2.00×10^{-10} to 5.18×10^{-10} m²/s, respectively, with a positive influence in relation to temperature and air velocity. On energy consumption, the results presented a decrease with decreasing temperature, as well as drying time, ranging from 6.766 to 11.230 kWh. There was a positive influence of the SMER in relation to the decrease in energy consumption and increase in temperature, ranging from 0,034 a 1,010 kg/kWh, as well as the high influence of ambient conditions on the COP results, which ranged from 1.64 to 1.9. Chroma and ΔE^* were influenced by drying process, with Chroma values increasing the red scale, intensifying the saturation of this color. For anthocyanins concentration results, which ranged from 9.71 to 17.84 mg/100g, there was a positive influence with temperature and air velocity, although the exposure time resulted in its content degradation. In optimization, the optimum point considering the results of energy demand and effective diffusivity of CS was situated at 48.0°C and 3.0 m/s, while considering the results of energy demand and anthocyanin content, it was situated at 47.5°C and 3.4 m/s (for CS) or 0.37 m/s (for CP).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do ciclo de uma bomba de calor.....	21
Figura 2: Esquema do secador com bomba de calor.....	22
Figura 3: Ciclo de Carnot, refrigeração e bomba de calor.....	24
Figura 4: Representação de um sistema com seus fatores e respostas.	29
Figura 5: Esquema do secador.....	31
Figura 6: Visão frontal.....	33
Figura 7: Visão lateral e superior	34
Figura 8: Foto frontal do secador	35
Figura 9: Ligações dos circuitos elétricos.	35
Figura 10: Instrumentação e controle dos processos.....	36
Figura 11: Esquema do planejamento fatorial e DCCR.....	39
Figura 12: DCCR do projeto para câmara secundária.....	51
Figura 13: DCCR do projeto para a câmara primária.....	52
Figura 14: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara primária pelo planejamento fatorial.....	60
Figura 15: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara secundária pelo planejamento fatorial.....	62
Figura 16: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara primária pelo DCCR.....	64
Figura 17: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara secundária pelo DCCR.....	66
Figura 18: Superfície de resposta com curvas em nível para difusividade efetiva na câmara secundária.....	66
Figura 19: Superfície de resposta tridimensional para difusividade efetiva na câmara secundária.....	67
Figura 20: Dados experimentais e preditos para a demanda energética de secagem pelo DCCR.....	71
Figura 21: Superfície de resposta com curvas em nível para demanda energética de secagem.....	71
Figura 22: Superfície de resposta tridimensional sobre demanda energética de secagem.....	72
Figura 23: Dados experimentais e preditos para o SMER pelo planejamento fatorial.....	76
Figura 24: Dados experimentais e preditos para o SMER pelo DCCR.....	79

Figura 25: Superfície de resposta com curvas de nível sobre o SMER.....	79
Figura 26: Superfície de resposta tridimensional para o SMER	80
Figura 27: Gráfico de dados experimentais e preditos para a antocianina da câmara primária pelo DCCR	84
Figura 28: Superfície de resposta com curvas em nível para teor de antocianinas na câmara primária.....	84
Figura 29: Superfície de resposta tridimensional para teor de antocianinas na câmara primária	85
Figura 30: Dados experimentais e preditos para a antocianina da câmara secundária pelo DCCR	88
Figura 31: Dados experimentais e preditos para o ΔE^* (câmara primária).....	93
Figura 32: Superfície de resposta com curvas de nível sobre o ΔE^* (câmara primária).....	94
Figura 33: Superfície de resposta tridimensional sobre o ΔE^* (câmara primária).....	94
Figura 34: Pontos ótimos para a relação entre demanda energética de secagem e difusividade efetiva	103
Figura 35: Pontos ótimos para a relação entre teor de antocianinas e demanda energética de secagem	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de entrada e respostas do DCCR para câmara secundária	52
Tabela 2: Fatores de entrada e respostas do DCCR para a câmara primária.....	53
Tabela 3: Resultados do método convectivo convencional.....	53
Tabela 4: Tempo de secagem, massa inicial e umidade inicial da câmara primária e da câmara secundária.	54
Tabela 5: Difusividade efetiva e parâmetros de ajuste para modelo de Fick para a câmara primária.....	55
Tabela 6: Constantes de Page e parâmetros de ajuste para modelo de Page para a câmara primária.....	56
Tabela 7: Difusividade efetiva e parâmetros de ajuste para o modelo de Fick para câmara secundária	57
Tabela 8: Constantes de Page e parâmetros para o modelo de Page para câmara secundária..	58
Tabela 9: ANOVA do planejamento fatorial para a difusividade efetiva na câmara primária	59
Tabela 10: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para a difusividade efetiva da câmara primária.....	59
Tabela 11: ANOVA do planejamento fatorial para a difusividade efetiva da câmara secundária	60
Tabela 12: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para a difusividade efetiva da câmara secundária	61
Tabela 13: ANOVA do DCCR para a difusividade efetiva da câmara primária.....	63
Tabela 14: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a difusividade efetiva da câmara primária	63
Tabela 15: ANOVA do DCCR para a difusividade efetiva da câmara secundária	65
Tabela 16: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a difusividade efetiva da câmara secundária.....	65
Tabela 17: Demanda energética de secagem.....	68
Tabela 18: ANOVA do planejamento fatorial para a demanda energética de secagem.....	69
Tabela 19: ANOVA do DCCR para a demanda energética de secagem.....	69
Tabela 20: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a demanda energética de secagem	70
Tabela 21: SMER e COP.....	73
Tabela 22: ANOVA do planejamento fatorial para o COP	75

Tabela 23: ANOVA do planejamento fatorial para o SMER.....	75
Tabela 24: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para o SMER	76
Tabela 25: ANOVA do DCCR para o COP	77
Tabela 26: ANOVA do DCCR do SMER.....	77
Tabela 27: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para o SMER.....	78
Tabela 28: Concentração de antocianinas nas amostras da câmara primária e da câmara secundária.	81
Tabela 29: ANOVA do planejamento fatorial para teor de antocianinas (câmara primária) ...	82
Tabela 30: ANOVA do DCCR para o teor de antocianinas (câmara primária)	83
Tabela 31: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a antocianina (câmara primária)	83
Tabela 32: ANOVA do planejamento fatorial para teor de antocianinas (câmara secundária)	86
Tabela 33: ANOVA do DCCR para a antocianina (câmara secundária)	87
Tabela 34: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para teor de antocianinas (câmara secundária).....	87
Tabela 35: Valores de L, a* e b* (câmara primária)	89
Tabela 36: Cromo e ΔE^* (Câmara primária).....	89
Tabela 37: ANOVA do planejamento fatorial para o Cromo (câmara primária)	91
Tabela 38: ANOVA do planejamento fatorial para o ΔE^* (câmara primária).....	92
Tabela 39: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para o Delta E (câmara primária)	92
Tabela 40: ANOVA do DCCR para o Cromo (câmara primária)	95
Tabela 41: ANOVA do DCCR para o ΔE^* (câmara primária)	96
Tabela 42: Valores de L, a* e b* (Câmara secundária).....	96
Tabela 43: Cromo e ΔE^* (Câmara secundária)	97
Tabela 44: ANOVA do planejamento fatorial para o Cromo (câmara secundária).....	98
Tabela 45: ANOVA do planejamento fatorial para o ΔE^* (câmara secundária)	98
Tabela 46: ANOVA do DCCR para o Cromo (câmara secundária).....	99
Tabela 47: ANOVA do DCCR para o ΔE^* (câmara secundária).....	100
Tabela 48: Atividade de água (Câmara primária)	101
Tabela 49: Atividade de água (Câmara secundária).....	102

SUMÁRIO

1. Introdução	15
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo principal	16
1.2.2 Objetivos secundários	16
2. Revisão Bibliográfica	16
2.1 Secagem	16
2.2 Cinética de secagem	18
2.3 Secador com Bomba de Calor	19
2.3.1 Operação básica de uma bomba de calor	20
2.3.2 Operação básica de um secador com bomba de calor	22
2.3.3 Vantagens e desvantagens	23
2.3.4 Desempenho e Eficiência	24
2.4 Morango	25
2.4.1 Características nutricionais	26
2.4.2 Cor	26
2.4.3 Antocianinas	27
2.5 Superfície de Resposta	27
2.5.1 Planejamento fatorial e Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)	28
2.5.2 Vantagens e Desvantagens	29
3. Material e métodos	30
3.1 Local	30
3.2 Construção	30
3.2.1 Construção e instrumentação do secador	31
3.2.1.1 Materiais utilizados	31
3.2.1.2 Perfis do secador	33
3.3 Planejamento experimental	36
3.3.1 Preparação e secagem das amostras	37
3.3.2 Escolha das faixas dos fatores	38
3.3.3 Definição dos experimentos	38
3.4 Secagem	40
3.4.1 Razão de umidade – Y	40
3.4.2 Taxa de secagem – DR	40
3.4.3 Modelos de secagem	41
3.4.3.1 Modelo de Fick	41
3.4.3.2 Modelo de Page	42
3.4.4 Regressão não-linear dos modelos	42
3.4.4.1 Coeficiente de Determinação (R^2)	42
3.4.4.2 Raiz do erro médio quadrado (RMSE)	43
3.4.4.3 Chi-quadrado reduzido (χ^2)	43

3.5	Desempenho e Energia	44
3.5.1	Demanda energética de secagem	44
3.5.2	Coeficiente de performance (COP)	45
3.5.3	Razão específica de extração de umidade (SMER).....	46
3.6	Qualidade do produto biológico	46
3.6.1	Cor	46
3.6.2	Teor de antocianinas	47
3.6.3	Atividade água	48
3.7	Superfície de Resposta.....	48
3.7.1	Seleção das combinações.....	48
3.7.2	Regressão polinomial	48
3.7.3	Estatística da regressão polinomial.....	49
3.8	Otimização do processo de secagem.....	50
4.	Resultados e discussão.....	50
4.1	Considerações.....	50
4.2	Secagem	53
4.2.1	Cinética de secagem da câmara primária	54
4.2.2	Cinética de secagem da câmara secundária	57
4.2.3	Planejamento Fatorial	58
4.2.3.1	Secagem de morango na câmara primária	58
4.2.3.2	Secagem de morango na câmara secundária	60
4.2.4	DCCR	62
4.2.4.1	Secagem de morango na câmara primária	62
4.2.4.2	Secagem de morango na câmara secundária	64
4.3	Demanda energética de secagem	67
4.3.1	Planejamento Fatorial	69
4.3.2	DCCR	69
4.4	Desempenho	72
4.4.1	Planejamento Fatorial	74
4.4.1.1	COP	74
4.4.1.2	SMER	75
4.4.2	Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR.....	77
4.4.2.1	COP	77
4.4.2.2	SMER	77
4.5	Concentração de antocianinas.....	80
4.5.1	Câmara primária	82
4.5.1.1	Planejamento Fatorial	82
4.5.1.2	Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR.....	82
4.5.2	Câmara secundária.....	86
4.5.2.1	Planejamento Fatorial	86
4.5.2.2	Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR.....	86
4.6	Cor.....	88
4.6.1	Secagem de morango na câmara primária	88
4.6.1.1	Planejamento Fatorial	91
4.6.1.1.1	Croma.....	91

4.6.1.1.2	ΔE^*	92
4.6.1.2	Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR.....	95
4.6.1.2.1	Croma.....	95
4.6.1.2.2	ΔE^*	95
4.6.2	Secagem de morango na câmara secundária	96
4.6.2.1	Planejamento Fatorial.....	98
4.6.2.1.1	Croma.....	98
4.6.2.1.2	ΔE^*	98
4.6.2.2	Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR.....	99
4.6.2.2.1	Croma.....	99
4.6.2.2.2	ΔE^*	99
4.7	Atividade de água - Aw	100
4.8	Otimização.....	102
4.8.1	Demanda energética e difusividade efetiva da câmara secundária.....	102
4.8.2	Teor de antocianinas e Demanda energética	103
5.	Conclusões	105
6.	Recomendações	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	Apêndice I.....	116
	Apêndice II	119
	Apêndice III.....	122

1. Introdução

Na pesquisa e desenvolvimento de sistemas industriais, busca-se sempre criar ou desenvolver algo que beneficie tanto a sociedade quanto os próprios usuários destes sistemas, sendo eles inovadores ou adaptados. Ao construir e desenvolver sistemas para usos industriais e comerciais, o desempenho atrelado à qualidade do produto resultante norteiam a busca por soluções inovadoras com base em aspectos sustentáveis (econômicos, ambientais e sociais) como, por exemplo, o menor uso de energia.

Um destes processos essenciais é a secagem, que é uma etapa do beneficiamento de produtos agrícolas que consiste na desidratação de produtos, permitindo assim uma maior durabilidade desses produtos até o seu consumo (AKTAŞ et al., 2017a). Esse processo, além de vital, também é um dos de maior influência na utilização e desempenho de suas máquinas, assim como na qualidade resultante do processo (MINEA, 2013a).

Para tal função, a bomba de calor é um excelente candidato, que permite uma manutenção nas qualidades biológica, química e física dos produtos agrícolas, devido a sua capacidade de desumidificação do ar e secagem a baixas temperaturas (MINEA, 2013b).

Para a utilização de um processo tão importante, é necessário existir um limiar operacional que permita que os equipamentos, nos quais a secagem é realizada, respeitem aspectos econômicos e de qualidade, sem proporcionar prejuízos ao produto (MUJUMDAR, 2015), algo que deve ser sempre levado em conta com relação a processos que modificam o estado natural dos produtos biológicos.

O processo de secagem com bomba de calor é interessante por garantir a qualidade dos produtos, mas que ao mesmo tempo também permite um bom desempenho e gasto energético adequado com o processo, causando assim benefícios para a indústria e consumidores. Métodos de otimização como as superfícies de respostas são excelentes para permitir a quantificação da combinação dos parâmetros operacionais (ABANO; MA; QU, 2014; GEIGER, 1996).

1.1 Justificativa

O presente trabalho tem por justificativa a construção e avaliação de uma bomba de calor de configuração aberta para secagem de produtos biológicos, considerando que este tipo de equipamento pode garantir indicadores adequados de qualidade do produto final, de

demanda energética do processo e de desempenho da máquina a partir de combinação ótima dos parâmetros operacionais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do projeto é avaliar o uso de uma bomba de calor para secagem de materiais biológicos, no caso o morango, obtendo a melhor configuração operacional do equipamento quanto aos parâmetros de desempenho, energia e qualidade do morango seco.

1.2.2 Objetivos secundários

→ Avaliar a cinética de secagem do morango em diferentes temperaturas e velocidades do ar com uso do secador com bomba de calor sob diferentes condições do secador;

→ Obter a demanda de energia do equipamento, eficiência e desempenho do sistema da bomba de calor e de secagem, assim como a qualidade do produto após a secagem;

→ Obter os pontos ótimos do sistema em relação de desempenho, energia e qualidade do produto após a secagem para as condições utilizadas, com intuito de encontrar a melhor configuração em relação a cada resposta.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Secagem

A secagem é um processo industrial que visa à redução da umidade dos produtos biológicos. Tem como objetivo principal a redução da atividade de água do produto, permitindo um maior tempo de vida mantendo ao máximo possível a qualidade inicial do produto fresco (DOYMAZ, 2016).

Ela é uma das etapas pós-colheita mais importantes, pois proporciona a manutenção da qualidade do produto, assim como a redução de custos e facilitação de processos seguintes, como armazenamento, embalagem e transporte (AKTAŞ et al., 2017a; MUJUMDAR, 2015). Porém, se usada de modo incorreto, pode provocar danos irreversíveis na qualidade do produto (MUJUMDAR, 2015).

A secagem se baseia em complexas operações envolvendo regimes transientes, regidos por fenômenos de transferência de calor e massa. O primeiro é a elevação da temperatura do produto, permitindo assim a evaporação da água na superfície do produto, enquanto a segunda é o trânsito de umidade no interior do produto para a superfície do mesmo (MUJUMDAR, 2015). O calor permite, a partir da energia latente, a evaporação da água na superfície, que é oriunda da movimentação da umidade do interior do produto.

É um dos processos mais antigos do mundo, possuindo uma grande variedade de tipos de secadores industriais, assim sendo um grande consumidor de energia, representando de 10 a 15 % nos Estados Unidos da América, Canadá, França e Reino Unido, e de 20 a 25 % para Dinamarca e Alemanha (MUJUMDAR, 2015).

A redução do consumo da energia usada pelos processos de secagem na indústria vem sendo pesquisado durante os últimos anos, permitindo que eles sigam as diretrizes socioeconômica, ecológica, organizacional e tecnológica (CZESŁAW; JONES; ZYŁŁA, 2015).

Além das questões de eficiência e energia, deve-se prestar muita atenção nas questões de qualidade do produto após a secagem (MINEA, 2013a). Esta atenção é essencial, pois a preservação das qualidades físicas e nutricionais é o principal foco dos consumidores (BARADEY et al., 2016).

O estudo da influência da secagem na qualidade é imprescindível, pois muitos dos atributos de qualidade dos produtos biológicos, como cor e conteúdo de ácido ascórbico, são afetados negativamente pela temperatura de secagem (RAMALLO; MASCHERONI, 2012). Assim como a secagem proporciona o encolhimento do produto, tal ocorrência proporciona a ruptura do tecido do produto, criando espaços abertos para a passagem de água e de demais componentes, afetando as propriedades de qualidade (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016) e alterando suas condições nutricionais e sensoriais.

Existem muitos sistemas diferentes que são implementados para a secagem, sendo que cada um tem um propósito específico na qualidade, assim como também nos seus custos de uso e implementação. O mais comum e mais usado na indústria é o por ar quente (MINEA, 2013b). Existem outros que podem ser usados isoladamente ou em conjunto, como leito fluidizado (LAW; MUJUMDAR, 2015), com radiação infravermelha (AKTAŞ; ŞEVİK; AKTEKELI, 2016), a vácuo (AKAR; BARUTÇU MAZI, 2019), desidratação osmótica

(EREN; KAYMAK-ERTEKIN, 2007) e o por bomba de calor (AKTAŞ et al., 2017a; TUNÇKAL et al., 2018), foco deste trabalho.

2.2 Cinética de secagem

A cinética de secagem é uma relação da mudança da umidade e temperatura médias do produto com o ambiente de secagem em função do tempo, descrevendo perfis de temperatura e umidade sobre o produto (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016). Para tal assunto, aliam-se modelos fenomenológicos e empíricos com dados experimentais para melhor retratar o processo de secagem.

O estudo da cinética leva em conta vários processos e análises, como a razão de umidade do produto pelo tempo, algo muito importante para analisar o comportamento do conteúdo de água durante todo o processo. Entretanto, um dos mais importantes, além do citado, é a taxa de secagem. Ela proporciona saber como será possível retratar o processo, sendo essencial saber em que período de taxa de secagem o produto se encontra para escolher como será a modelagem do processo.

A taxa de secagem possui três períodos distintos (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016; PAGE, 1949): o primeiro é o período de indução, no qual há evaporação do conteúdo de água presente na superfície e aquecimento inicial da amostra. O segundo é o período de taxa constante, no qual o decréscimo de umidade é constante em relação ao tempo. O terceiro e último é o período de taxa decrescente, no qual não há mais evaporação de água na superfície, a temperatura tende a crescer até alcançar o equilíbrio com a temperatura de bulbo seco do meio de secagem e a difusão interna de umidade é o principal mecanismo do processo (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016).

Como a difusão, que é o transporte de matéria de uma parte para outra por meio de movimento molecular, é o principal fenômeno envolvido, são necessários modelos que retratam tal caráter (CRANK, 1975). As leis de Fick são modelos matemáticos que explicam o fenômeno da difusão em produtos, dependendo do tempo, por se tratar de um processo transiente, da geometria do produto e de uma constante de proporcionalidade que retrata a composição do produto que é a difusividade efetiva.

Outros modelos que se encaixam em processos com taxas decrescentes são os modelos empíricos e semi empíricos, como o modelo de Midilli (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002) e de Page (PAGE, 1949), sendo o segundo um dos mais usados. Esses

modelos levam em conta a característica de resistências de massa externas aos produtos sendo desprezíveis (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002). Eles também não levam em conta características de difusividade e dimensão do produto, sendo somente ajustados aos dados experimentais.

Há inúmeros autores que estudam o processo de secagem de uma camada de produto com uma taxa decrescente de secagem (MALAIKRITSANACHALEE; CHOOSRI; CHOOSRI, 2018; RAMALLO; MASCHERONI, 2012, 2013; TUNÇKAL et al., 2018), assim como em outros produtos que possuem alta umidade interna como figo (DOYMAZ, 2005), tomate (COŞKUN et al., 2017), bagaço de uva (AKTAŞ et al., 2019) e queijo (CASTELL-PALOU; SIMAL, 2011).

2.3 Secador com Bomba de Calor

A bomba de calor é um complexo sistema termodinâmico que usa a mesma operação de um sistema de refrigeração. As bombas de calor são conhecidas por serem equipamentos de recuperação energética e grande amplitude térmica, sendo usadas para os mais diversos setores da sociedade, como doméstico, comercial e industrial (MINEA, 2016).

O sistema possui características muito interessantes para o processo de secagem. Essas características são baseadas no funcionamento em si do sistema, o qual permite o aquecimento e desumidificação do fluido de secagem do sistema, sendo feitos pelo condensador e evaporador da bomba (KIANG; JON, 2015; MINEA, 2013b).

Uma característica marcante é a pluralidade de configurações do sistema, que irão permitir ou não a recuperação energética graças à reutilização do ar. As configurações passíveis de uma reutilização são o parcialmente fechado (CHAKRABORTY; RAO; MISHRA, 2015a) e fechado (LEE; KIM, 2009), enquanto a do tipo aberto (LIU et al., 2018), não permite a reutilização do ar.

A reutilização do ar de secagem permite um alto controle da temperatura e umidade relativa que passa pelo sistema inteiro (KIANG; JON, 2015). O reaproveitamento de energia propiciado pela reutilização do ar de secagem pode variar na faixa de 35 a 75% (AKTAŞ et al., 2017a; AKTAŞ; ŞEVIK; AKTEKELI, 2016; CHAI et al., 2019; MINEA, 2013b). Essa reutilização se baseia no uso dos calores sensíveis e latentes do ar de exaustão que são recuperados em parte pelo evaporador, acrescentando-os ao desempenho geral da máquina (YAMANKARADENIZ et al., 2016).

Diferentes configurações da bomba e sua amplitude térmica permitem o seu uso nos mais diversos tipos de produtos biológicos, principalmente aqueles que são mais sensíveis a altas temperaturas (KIANG; JON, 2015; MINEA, 2013a). Alguns exemplos são: menta (AKTAŞ et al., 2017a) e hortelã (FALQUETTO, 2012), assim como frutas e hortaliças como abacaxi (RAMALLO; MASCHERONI, 2012), uva (TAŞERI et al., 2018), pimentão (PAL; KHAN; MOHANTY, 2008), tomate e gengibre (GÜMÜŞAY et al., 2015), que apresentaram influência positiva ao serem secas a temperaturas mais baixas.

A bomba de calor permite também a combinação com diferentes sistemas auxiliares, para permitir uso maior e mais diversificado de produtos biológicos. Alguns exemplos são: resistência elétrica (CHAPCHAIMOH et al., 2016), leite fluidizado (GÜREL; CEYLAN, 2014), radiação infravermelha (AKTAŞ et al., 2017b) e radiação solar (GUDIÑO-AYALA; CALDERÓN-TOPETE, 2014).

2.3.1 Operação básica de uma bomba de calor

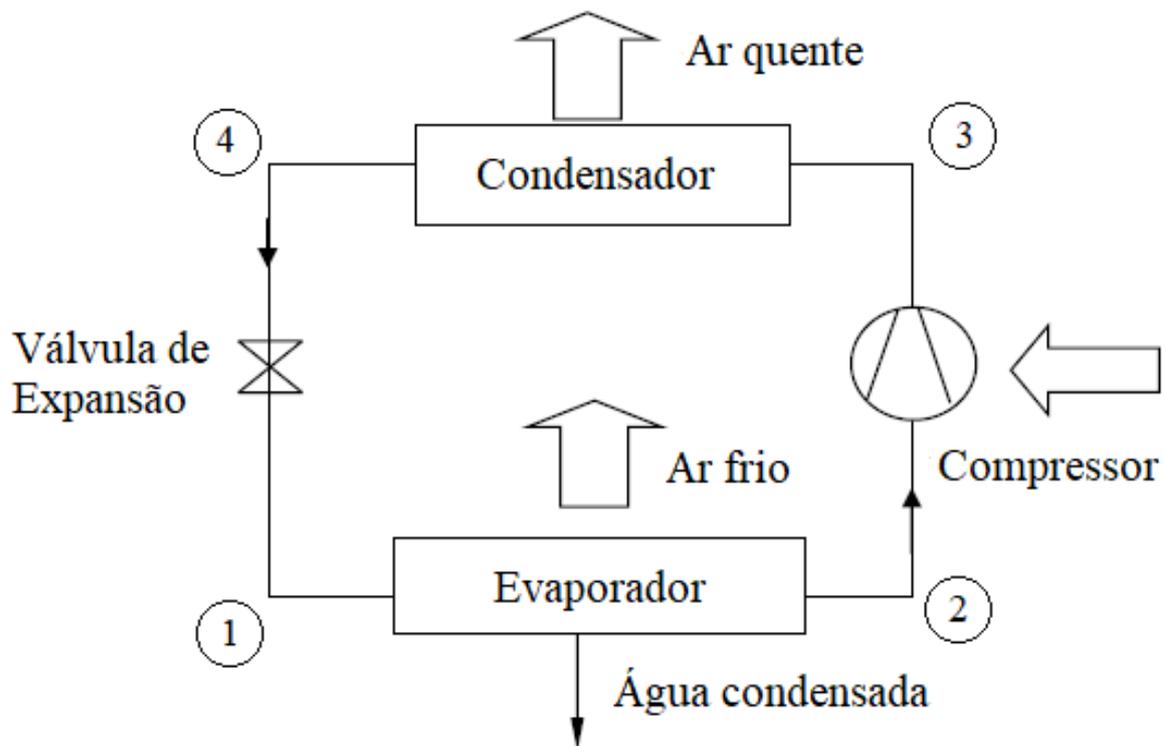
O sistema básico de uma bomba de calor é constituído pelos mesmos componentes de um sistema de refrigeração. Ele possui os trocadores de calor, ou seja, condensador e evaporador, que representam a parte quente e fria, respectivamente, além do compressor e da válvula de expansão. Para explicação do seu ciclo, é comum o uso de diagramas de pressão e entalpia, que depende do tipo de fluido.

A Figura 1 mostra o ciclo básico de uma bomba de calor, segundo Kiang e Jon (2015) e Alves-Filho (2016):

- 1-2: O fluido refrigerante entra no evaporador, submetendo-se à mudança de fase, mantendo sua temperatura e pressão constantes, até atingir o estado de vapor saturado. O evaporador absorve energia do ar ambiente, e por meio da transferência de energia latente, o fluido refrigerante muda de fase, ao mesmo tempo em que a umidade contida no ar é condensada. A temperatura do ar que passa pelo trocador também é alterada;
- 2-3: Nesta etapa, o fluido entra como vapor no compressor, onde o mesmo, a partir da indução de trabalho, provoca a compressão do fluido, aumentando a sua temperatura e pressão, tornando-o vapor superaquecido. O compressor provoca uma compressão adiabática isentrópica;

- 3-4: Após a compressão, o fluido entra em um outro trocador de calor, que é o condensador. Nele ocorre a mudança de fase do fluido no sentido inverso do evaporador, mantendo a pressão e temperatura constantes. Para mudança de fase do fluido, o condensador rejeita calor sensível para o ar, aquecendo-o. Na saída do condensador, o fluido se encontra no estado de líquido saturado;
- 4-1: Após a saída do trocador, ocorrerá a expansão do fluido refrigerante através da válvula de expansão ou um tubo capilar. Nela ocorre um processo adiabático isoentálpico, no qual ocorre diminuição da pressão e temperatura do fluido, sendo elas a condição de entrada para o evaporador. A partir deste ponto o ciclo se reinicia.

Figura 1: Esquema do ciclo de uma bomba de calor



Fonte: Kiang e Jon (2015)

As bombas de calor possuem várias configurações diferentes, dependendo da aplicação, sendo em estágio simples o modo mais usado e mais difundido, os múltiplos estágios, que são máquinas mais eficientes na recuperação e eficiência, assim como em combinação com outros métodos como leito fluidizado (ALVES-FILHO, 2016).

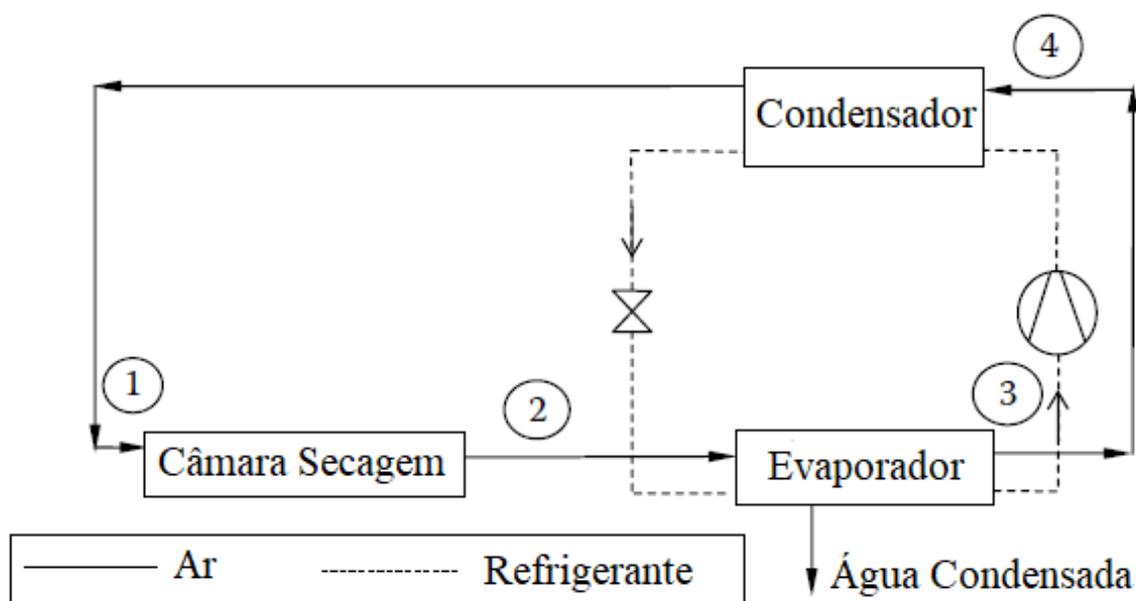
2.3.2 Operação básica de um secador com bomba de calor

No caso da secagem por bomba de calor, tem-se a união do ciclo da bomba de calor, relatado no item 2.3.1, com o ciclo de secagem, supondo um sistema com ciclo fechado. A utilização de carta psicrométrica é essencial para esta etapa, pois ela permite a obtenção das propriedades termodinâmicas do ar.

A Figura 2 mostra a sequência do ciclo de secagem, segundo Kiang e Jon (2015) e Alves-Filho (2016):

- 1-2: Onde ocorre a secagem adiabática do produto. Neste ponto ocorre o ponto chave do sistema retirando a umidade do produto até a sua umidade de equilíbrio. O ar quente e seco que entra no sistema permitirá a migração e transporte da umidade do produto para o ar. Na saída, o ar sai ainda quente e úmido;
- 2-3: Nesta etapa ocorre a diminuição da temperatura do ar e sua desumidificação, ambos devido ao evaporador, ocorrendo a condensação da umidade do ar em contato com a superfície do evaporador. No evaporador, provoca-se também a mudança de fase do fluido refrigerante devido à absorção do calor do ar de secagem. Neste ponto, o ar entra quente e úmido e sai frio e seco;
- 3-4: Nesta etapa pode ser usado um equipamento auxiliar para mudança da temperatura ou umidade do ar, como uma resistência elétrica ou um umidificador, respectivamente;
- 4-1: Etapa do reaquecimento do ar de secagem devido à presença do condensador. A energia retirada pelo sistema do ar que sai da câmara de secagem, retorna ao ciclo, proporcionando a reutilização de parte da energia absorvida pelo sistema. Ele aquece o ar por meio de transferência de calor sensível. Com isso, o ar entra frio e seco e sai quente e seco.

Figura 2: Esquema do secador com bomba de calor



Fonte: Kiang e Jon (2015)

2.3.3 Vantagens e desvantagens

São indicadas algumas vantagens e desvantagens dos sistemas de secagem com bomba de calor, segundo Kiang e Jon (2015).

Vantagens:

- Incremento na qualidade de secagem e das propriedades nutricionais e físicas dos produtos que são secos a baixas temperaturas, aliado a baixa umidade relativa;
- Grande amplitude térmica, na faixa de -20 a 100°C e grande amplitude de umidade relativa, na faixa de 15 a 80%;
- Excelente controle de parâmetros de secagem como temperatura e umidade relativa, além de permitir a independência quanto às condições do ambiente na secagem;
- Possibilidade de controle do sistema e ambiente para produtos de alto valor agregado, além de permitir a redução do consumo de energia elétrica;
- Reutilização do ar e reaproveitamento de energia do processo.

Desvantagens:

- Alto capital inicial de investimento;
- Necessidade de manutenção periódica do sistema e de seus componentes;

- Risco de vazamento dos fluidos de trabalho, o que pode provocar impacto ambiental e risco à saúde humana, dependendo do tipo de fluido.

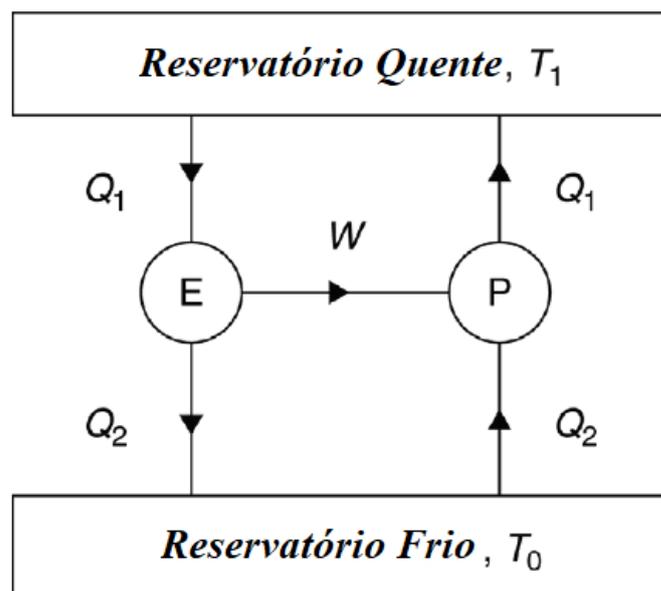
2.3.4 Desempenho e Eficiência

Um ponto importante quando são tratadas as máquinas e seus funcionamentos, algo que é sempre tratado é com relação aos seus desempenho e eficiência. Em sistemas de refrigeração isto não é diferente, apesar de apresentar uma nomenclatura diferente.

O ciclo de Carnot é algo muito importante e relevante para compreensão da eficiência das máquinas térmicas como a bomba de calor, pois ela é diretamente dependente da relação entre as temperaturas dos arredores da máquina e o trabalho induzido no sistema (HUNDY; TROTT; WELCH, 2016). A idealização de Sadi Carnot, juntamente com a posterior contribuição de Clausius, permitiu o entendimento de que, em uma máquina ideal, a eficiência dela depende das temperaturas absolutas dos arredores (CHANDRA, 2016).

A idealização do ciclo, assim como a complementação pela Segunda Lei da Termodinâmica, pode reverter o sistema padrão que vai do reservatório quente para o frio. Isso permitiu a criação dos sistemas de refrigeração, que com a indução de trabalho, pode fazer o sentido inverso do sistema padrão. A Figura 3 mostra estes dois exemplos, sendo o da esquerda um sistema de geração de energia a partir de turbinas, por exemplo, e a direita, uma representação de um sistema de refrigeração.

Figura 3: Ciclo de Carnot, refrigeração e bomba de calor.



Fonte: Hundy, Trott e Welch (2016).

O desempenho do sistema é avaliado, principalmente, por dois tipos de medições de eficiência. A primeira, que traduz muito a relação do ciclo de Carnot, é o coeficiente de *performance* (COP). Ele mede a razão entre o calor rejeitado pelo condensador e o trabalho induzido no sistema pelo compressor (KIANG; JON, 2015; MINEA, 2013a). Pode-se usar com o evaporador também, com a razão entre o calor absorvido pelo evaporador e o trabalho induzido pelo compressor (ALVES-FILHO, 2016), sendo, respectivamente, o COP quente e COP frio (FALQUETTO, 2012).

A segunda é a razão específica de extração de umidade (SMER). Ela tem por função medir a razão entre a quantidade de água retirada pelo sistema de secagem e a energia induzida no sistema para isto acontecer (KIANG; JON, 2015; MINEA, 2013a). Este parâmetro é um dos mais usados, pois ele permite calcular a capacidade da reutilização do ar e recuperação de energia pela bomba, sendo que o secador com bomba de calor é um dos equipamentos com melhor valor de SMER (KIANG; JON, 2015).

2.4 Morango

O morango (*Fragaria x ananassa*) é uma fruta octoplóide oriunda da hibridização de duas outras espécies da fruta, a *Fragaria chiolensis* e *Fragaria virginiana* (FAEDI; BARUZZI, 2016). Ela pertence à família Rosaceae e sua hibridização natural ocorreu no meio dos anos 1700 na França, quando Amédée-François Frézier, um membro do exército, trouxe das Américas as duas variedades originárias do morango atual, sendo a primeira originária da América do Norte, enquanto a segunda oriunda do Chile (HUSAINI; ZAKI, 2016). Ele pode ser consumido de diversas formas, sendo as mais comuns *in natura*, sucos e geleias (GIAMPIERI et al., 2012).

O morango é um pseudofruto não climatérico, não ocorrendo a maturação do mesmo após a sua colheita, sendo necessário ocorrer a colheita no pico de maturação (SALTVEIT, 2019). Durante o seu desenvolvimento, o morango possui uma alta resistência a baixas temperaturas, conseguindo sobreviver em temperaturas negativas, enquanto possui uma dificuldade no desenvolvimento para temperaturas acima de 35°C (GULEN; TURHAN; ERIS, 2016). Outro ponto a se detalhar é grande resistência a longos períodos de excesso de água, pelo fato de ser uma planta com grande exigência de água, apresentando dificuldade no crescimento em momento de déficit hídrico, necessitando irrigação constante (GULEN; TURHAN; ERIS, 2016).

2.4.1 Características nutricionais

Assim como outros tipos de frutas, o morango possui uma grande variedade de compostos nutricionais essenciais para o corpo humano, sendo rico em minerais, baixas calorias, rico em antioxidante e vitaminas, além de apresentar características físicas chamativas e marcantes (GIAMPIERI et al., 2012).

As características mais marcantes sobre a composição nutricional do morango são em relação aos antioxidantes e compostos fenólicos (AABY; EKEBERG; SKREDE, 2007; FAEDI; BARUZZI, 2016). Com relação aos antioxidantes, o morango possui uma vasta gama de vitaminas, com maior destaque para o ácido ascórbico, que é um poderoso antioxidante (GIAMPIERI et al., 2012). No caso dos compostos fenólicos, existe uma grande quantidade de antocianinas, que são relacionadas aos pigmentos do morango, além de serem fitocompostos com propriedades antioxidativas (DA SILVA et al., 2007; LÓPEZ-ORTIZ et al., 2020). O produto também possui uma quantidade considerável de manganês como um dos principais minerais (GIAMPIERI et al., 2012).

A secagem de morango possui uma função importante, pois o produto é altamente perecível e métodos de conservação como a secagem, permitem uma longevidade maior do produto (DOYMAZ, 2008; LÓPEZ-ORTIZ et al., 2020). Apesar disso, não importando o tipo de método usado, assim como dito por de Brujin e Bórquez (2014), a retenção dos biocompostos nos produtos secos e, conseqüentemente, sua qualidade apresentaram alguma redução.

2.4.2 Cor

A cor, assim como o sabor e aroma, é um dos parâmetros mais importantes na decisão de compra pelo consumidor (ANCOS; SÁNCHEZ-MORENO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2017; DE BRUIJN; BÓRQUEZ, 2014), apresentando uma concepção de relação entre os parâmetros de qualidade dos produtos e coloração do mesmo (PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013).

Normalmente, a mudança de cor de frutas e vegetais está associada ao amadurecimento, proporcionada por uma sequência de efeitos metabólicos própria do produto durante a sua produção, sendo a degradação da clorofila, biossíntese de carotenoides, fenilpropanoides, flavonoides e antocianinas (KUMAR et al., 2019; PATHARE; OPARA;

AL-SAID, 2013). Durante a secagem pode ocorrer alterações de cor nos produtos, devido a reações de Maillard e escurecimento não enzimático (ZANONI et al., 1998).

A quantificação da cor após um processo de secagem do morango é um importante fator de qualidade (WOJDYŁO; FIGIEL; OSZMIAŃSKI, 2009). Durante a secagem de morango, Lopez-Ortiz et al. (2020) identificaram um decréscimo na intensidade do vermelho do produto após o uso de secagem convectiva de 40 a 60°C. Entretanto, Wojdyło, Figiel e Oszmiański (2009) atestaram a manutenção de cor após a aplicação de secagem por micro-ondas.

2.4.3 Antocianinas

As antocianinas são compostos fitoquímicos, da classe dos compostos fenólicos (GIAMPIERI et al., 2012). Elas são algumas das responsáveis pela presença do pigmento vermelho presente no morango e se apresentam em grande quantidade no produto fresco (AABY; EKEBERG; SKREDE, 2007; WOJDYŁO; FIGIEL; OSZMIAŃSKI, 2009).

As antocianinas são alguns dos flavonoides mais coloridos e estudados, estando disponíveis em quase todas as plantas que não são verdes, apresentando características violetas e vermelhas, estando presentes na maçã, morango, berinjela, mirtilo etc. (SOLOVCHENKO; YAHIA; CHEN, 2019).

Com relação à secagem do morango, como mostrado por Wojdyło, Figiel e Oszmiański (2009), com o aumento da potência usada para funcionamento do secador por micro-ondas, ocorreu uma diminuição na quantidade de antocianinas, se comparado aos produtos base, não importando a cultivar. Como indicado por López-Ortiz et al. (2020), devido à influência de fenilalanina amônia liase e chalcona sintase, enzimas presentes na maturação do fruto, pode ocorrer a produção de antocianinas com aumento da temperatura, embora, com o passar do tempo e aumento da temperatura, possa ocorrer a sua degradação devido à inibição destas enzimas.

2.5 Superfície de Resposta

A metodologia de superfície de resposta (RSM) é uma metodologia de avaliação matemática e estatística para otimização de processos (ERBAY; ICIER, 2009). O método permite análise simultânea de múltiplas entradas e saídas, conseguindo uma análise e correlação multivariada das respostas, permitindo assim encontrar pontos e configurações

ótimas de processos (GARG et al., 2008; TAN; AHMAD; HAMEED, 2008) . A RSM possui dois *designs* mais utilizados: o planejamento central composto (CCD) e o Box–Behnken (HANRAHAN; LU, 2006).

A otimização de processos pode ser feita a partir de métodos estatísticos e empíricos, mas eles possuem limitações sobre dados informados e suas respostas, consumindo tempo de análise, pois analisam um fator de entrada por vez (LIYANA-PATHIRANA; SHAHIDI, 2005). Um exemplo é o *Evolutionary Optimization* (EVOP), que é um método iterativo que testa um experimento a mais que o número de variáveis a serem otimizadas, mas que, por ser iterativo, demanda tempo computacional com aumento da dimensão, além da limitação na quantidade de informações proporcionadas pelas suas respostas (GEIGER, 1996).

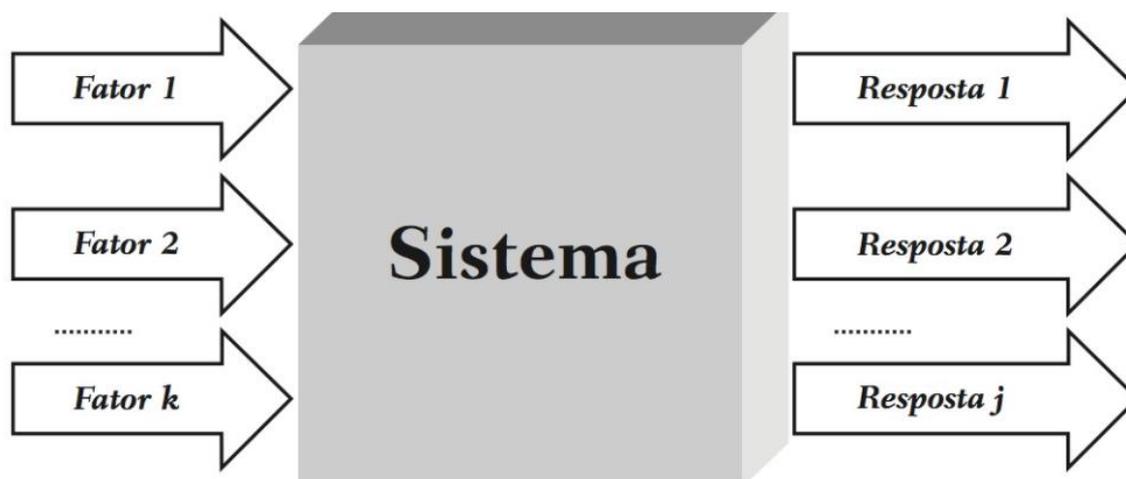
A RSM possui a vantagem de poder analisar e correlacionar múltiplas entradas e saídas, permitindo uma análise mais profunda sobre a operação, assim como permite usar o mínimo possível de experimentos para garantir o máximo de respostas e informações no final (ERBAY; ICIER, 2009; GEIGER, 1996).

A RSM pode ser aplicada para as mais diversas áreas de conhecimentos, como química e engenharia química (CHAI et al., 2019; TAN; AHMAD; HAMEED, 2008), engenharia ambiental (CHU; CHAMBENOIT; KIM, 2006; GARG et al., 2008; WANI et al., 2008), engenharia dos materiais (SINGH et al., 2011), engenharia mecânica (TOROPOV; ALVAREZ, 1998) e alimentos (CHAKRABORTY; RAO; MISHRA, 2015b; ERBAY; ICIER, 2009; EREN; KAYMAK-ERTEKIN, 2007; LIYANA-PATHIRANA; SHAHIDI, 2005).

2.5.1 Planejamento fatorial e Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

O CCD ou planejamento fatorial 2^k é uma metodologia estatística que usa k números de fatores, que são as entradas do sistema, resultando em j -enésimas respostas, que são as saídas do sistema (ARULKUMAR; SATHISHKUMAR; PALVANNAN, 2011; NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; TAN; AHMAD; HAMEED, 2008)). O planejamento fatorial 2^k permite a diminuição de experimentos realizados (HANRAHAN; LU, 2006; SINGH et al., 2011). Para realizar o planejamento e a metodologia, deve-se conhecer e definir quais são os fatores e respostas que se deseja, sendo a parte essencial do planejamento.

Figura 4: Representação de um sistema com seus fatores e respostas.



Fonte: Neto, Scarminio e Bruns (2010).

O delineamento composto central rotacional (DCCR) é a aplicação para otimização de processos com o uso do planejamento fatorial convencional (CCD), com a posterior duplicação e sobreposição do mesmo planejamento, mas rotacionando-o 45° em seu eixo (ERBAY; ICIER, 2009; GEIGER, 1996; NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). Com a rotação da cópia do planejamento, seu formato na superfície fica parecido com uma estrela, sendo chamado de planejamento estrela (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

2.5.2 Vantagens e Desvantagens

Assim como todo método, ele possui vantagens e desvantagens, segundo Geiger (1996). As vantagens são:

- Grande quantidade de informações dos experimentos;
- Múltiplas respostas de uma única vez;
- Máxima quantidade de respostas com esforço mínimo;
- Mostra informações sobre as interações entre variáveis;
- Quanto tempo cada experimento leva e a sua quantidade;
- Força planejamento das faixas de fatores de entrada e respostas.

Enquanto que as desvantagens são:

- Limitado a faixa de variáveis que esta estudando;
- Não permite previsão além da faixa de estudo;
- Mostra o que ocorreu e não o porquê.

3. Material e métodos

3.1 Local

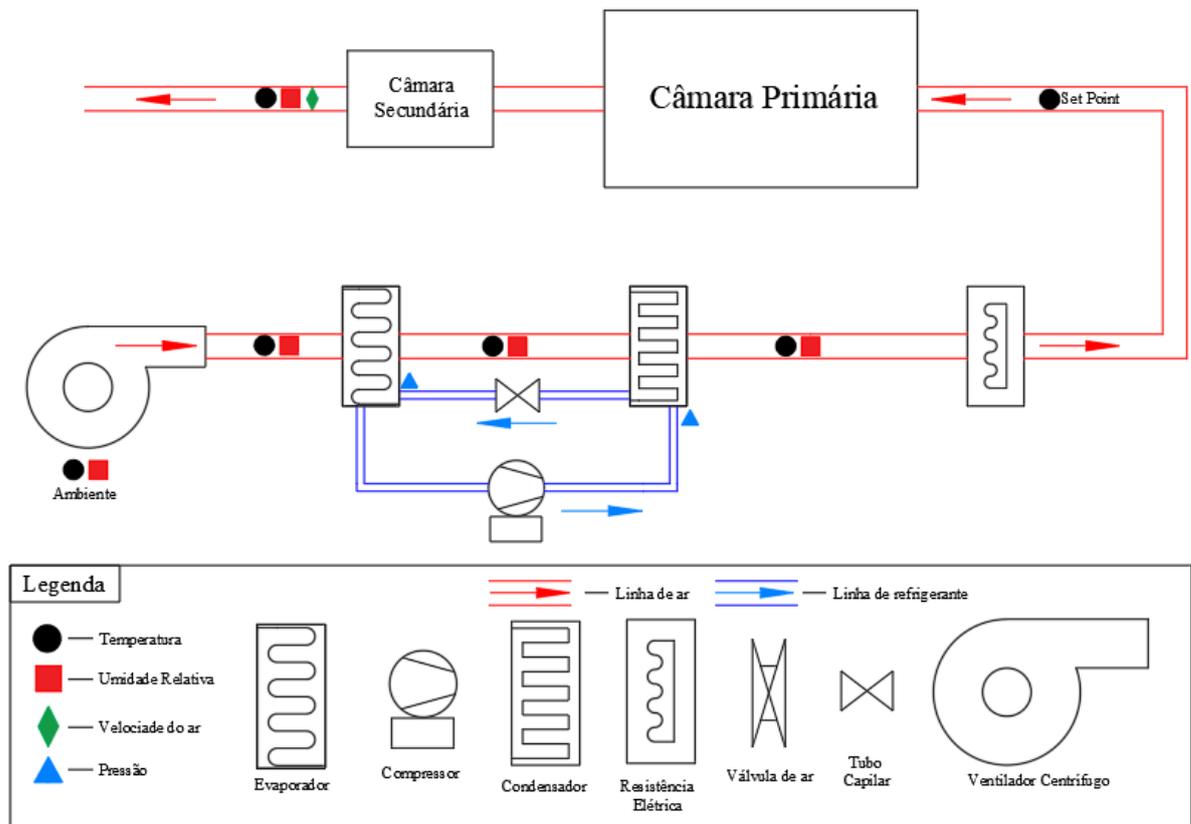
A construção, teste, análise e experimentações foram feitas na Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas, no campus de Campinas/SP, altitude de 685 m do nível do mar, latitude 22°49'07'' Sul e 44°03'34'' Oeste.

A construção foi realizada no Laboratório de Protótipos, com auxílio de técnicos em mecânica e instrumentação do Laboratório de Protótipos e do Laboratório de Instrumentação e Controle - LIC. Os testes e experimentos foram conduzidos no Laboratório de Secagem.

3.2 Construção

Esquema do secador Figura 5A Figura 5 mostra um esquema do secador com bomba de calor. O esquema mostra a disposição dos equipamentos, o sentido do fluxo de ar e do fluido refrigerante e a localização dos instrumentos de medição. A separação da máquina entre sistema de secagem e sistema de refrigeração foi feita a partir de cores, detalhando melhor o seu funcionamento. Os esquemas do secador, assim como os seus perfis, foram feitos no *software Autodesk AutoCAD versão 2021*.

Figura 5: Esquema do secador



3.2.1 Construção e instrumentação do secador

3.2.1.1 Materiais utilizados

São listados todos os materiais usados na composição do secador, permitindo detalhamento de suas partes constituintes e dispositivos:

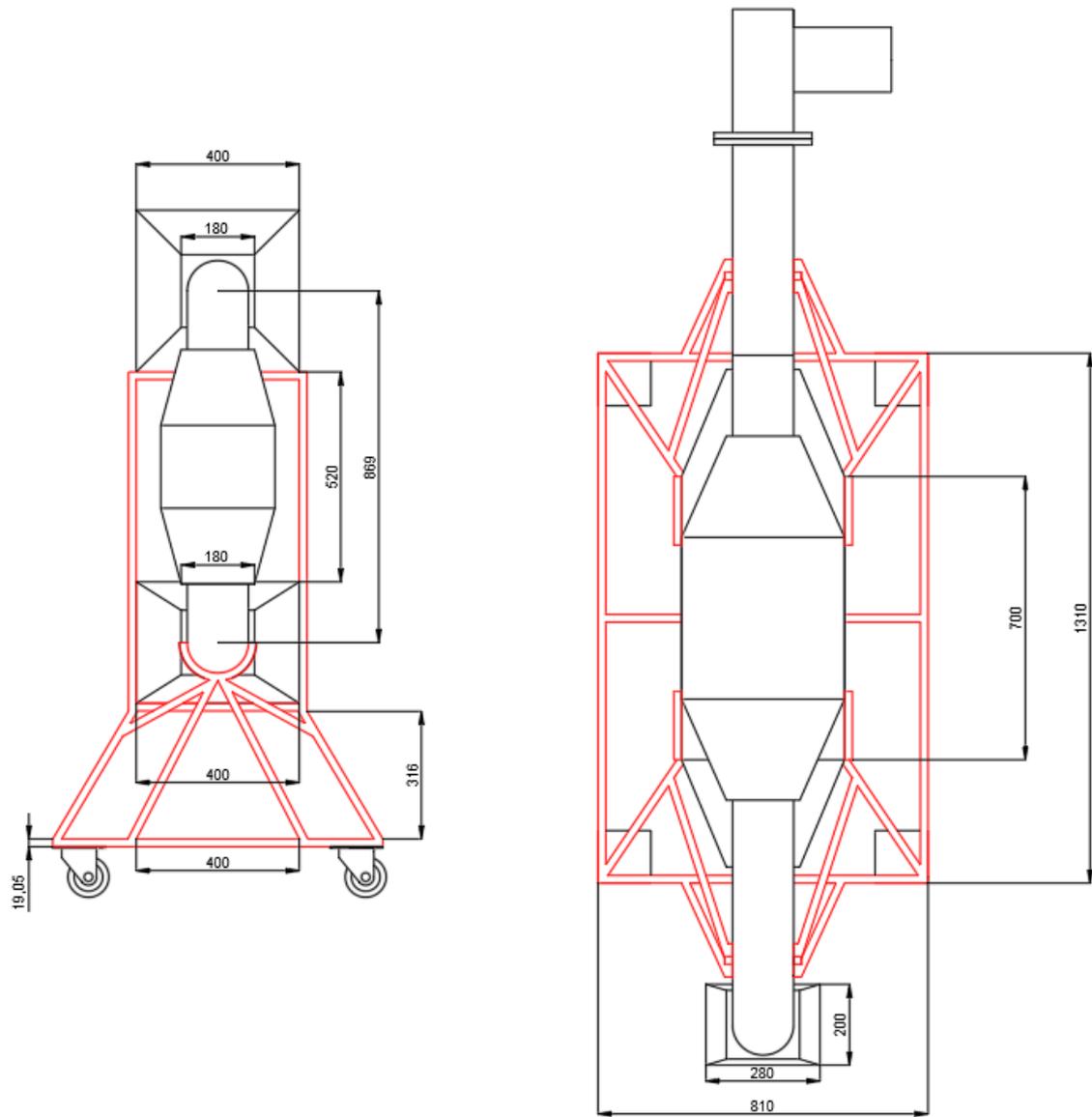
- 1 (uma) unidade condensadora (marca Elgin, modelo UCM 0030 ES) de ½ cv;
- 1 (um) condensador (marca Elgin, modelo CDE 2777), tubos de cobre e aletas de alumínio;
- 1 (um) tubo capilar de cobre (Leas Industrial) de 0,042” de diâmetro, 3m;
- 3 (três) resistência aletadas (marca Corel Resistências Elétricas) 1200W, 300mm;
- 1 (um) ventilador centrífugo (marca Asten & Cia LTDA) trifásico, 1500W;
- Câmara de acrílico trapezoidal com 150mm de entrada e dimensão central em forma de cubo de 400 mm, construída por Acrileste.

Sensores, controle e componentes elétricos:

- 4 (quatro) controladores de temperatura e umidade relativa (marca Full Gauge Controls, modelo MT-530E *super 05*);
- 1 (um) controlador universal (marca Novus Produtos Eletrônicos LTDA, modelo N1100);
- 1 (um) inversor de frequência (marca Weg, modelo CFW300 vector inverter), trifásico, 1 cv;
- 1 (um) termo higrômetro (marca AKSO, modelo AK172), com faixa de -40 a 70°C e 0 a 100%RH;
- 2 (dois) manômetros (marca Eco Tools, modelo ET500b);
- 1 (um) anemômetro de ventoinha Kimo LV110;
- 1 (um) disjuntor (marca JNG, modelo DZ47-63 C63), trifásico, 400V~;
- 4 (quatro) disjuntores (marca Steck, modelo SD C40), bifásico, 400V~;
- 1 (um) disjuntor (marca Steck, modelo SD C16), monofásico, 230/400V;
- 2 (dois) contatores (marca Telemecanique Schneider Electric, modelo LC1 D2510 M6), 11kW-400V;
- 1 (uma) chave estática (ou relé de estado sólido) (marca Coel Controles Elétricos LTDA, modelo SSR-D);
- 3 (três) transformadores de corrente (marca Kron Medidores, modelo HD-174);
- 3 (três) multimedidores de grandezas elétricas trifásicos (marca Kron Medidores, modelo Multi-K Plus);
- 1 (um) conjunto analisador manifold (marca Vulkan Lokring, modelo VLCT-636V);
- 1 (uma) balança semi-analítica digital (marca Shimadzu, modelo UX4200H).

Materiais para construção do secador:

- Placa de alumínio;
- Tubos e conexões de PVC de 150 mm de diâmetro;
- Perfis de metal cantoneiras de abas iguais de 3/4" e 1/8" de espessura;
- Panquecas de tubos de cobre de 1/2" e 3/4";
- Rodas de rodízio de 40kg;
- Fluido refrigerante R134a, (marca Klea Mexichem Refrigerants);
- Parafusos, rebites, soldas, ligações e cabos elétricos.

Figura 7: Visão lateral e superior

As Figuras 8, 9 e 10 são imagens fotográficas do secador com bomba de calor, com todos os componentes e dispositivos montados.

Figura 8: Foto frontal do secador



Figura 9: Ligações dos circuitos elétricos.

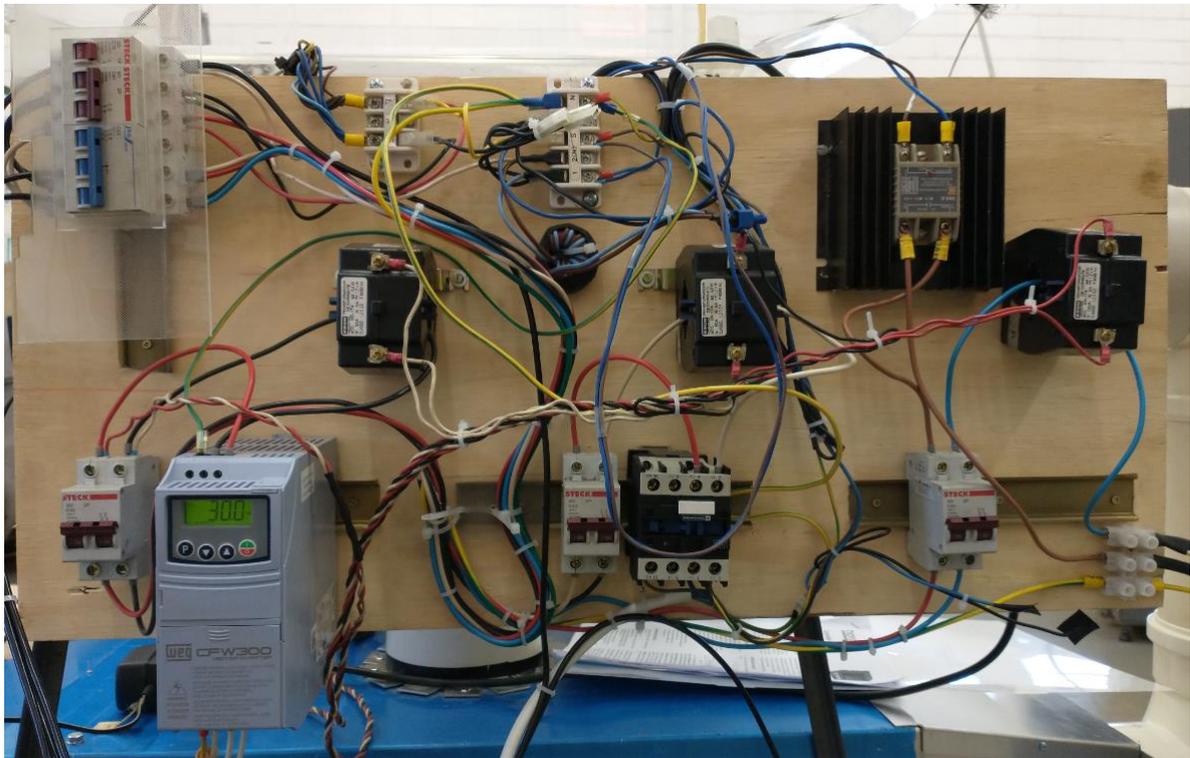
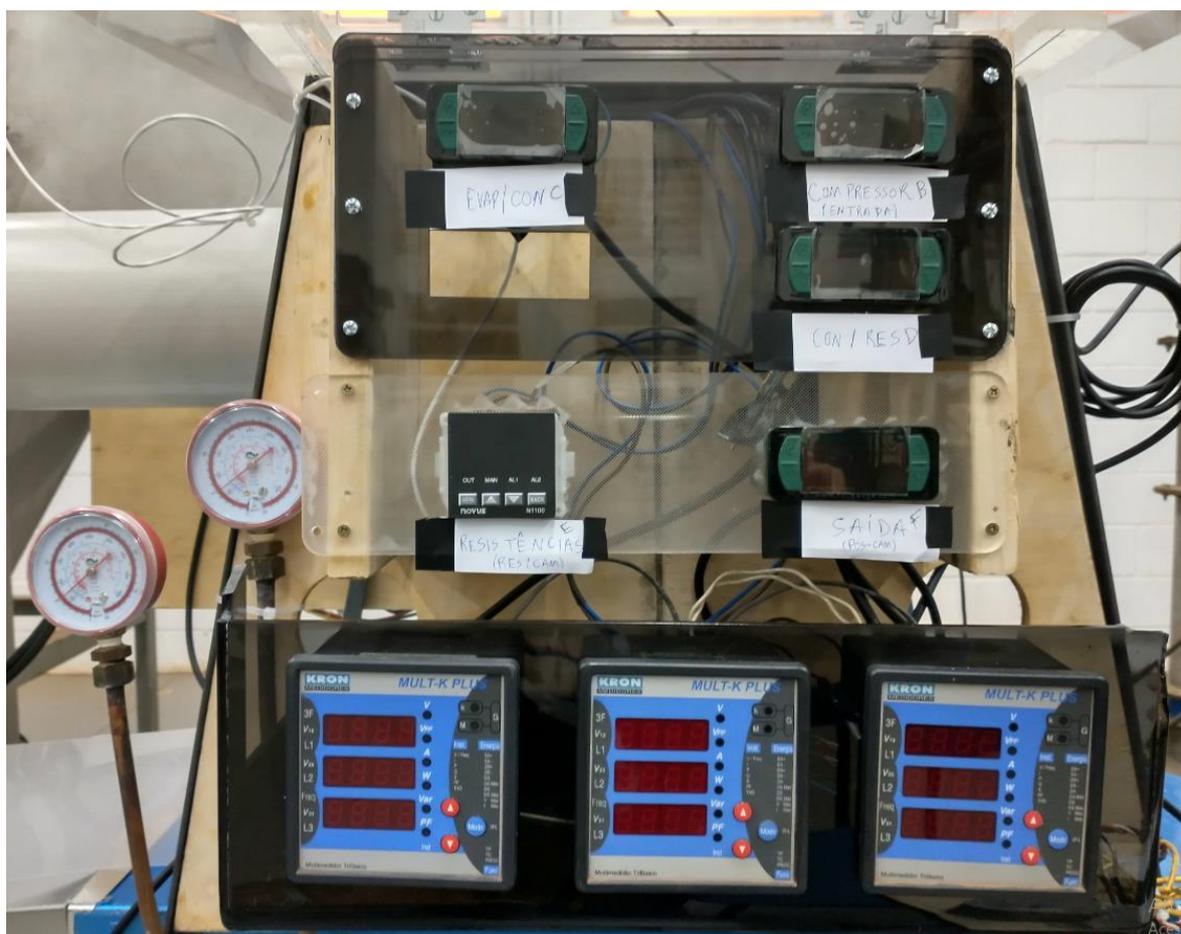


Figura 10: Instrumentação e controle dos processos



3.3 Planejamento experimental

O planejamento experimental foi definido a partir da literatura, das características do produto e do desenvolvimento da RSM. A configuração do secador foi do tipo aberta, ou seja, sem recirculação do ar de secagem. Com isso, os resultados psicrométricos e de secagem foram apresentados em função da mudança do ambiente durante o período dos ensaios (KIVEVELE; HUAN, 2015; TAŞERI et al., 2018).

As variáveis independentes escolhidas para os ensaios foram a temperatura e velocidade do ar. Elas são fundamentais para os processos de secagem que se utilizam do ar como meio de secagem, além do fato de serem variáveis que possuem uma influência direta e indireta na qualidade e duração do processo, assim como nas demais respostas do planejamento.

Com relação às análises de qualidade do produto, primeiramente foi selecionado o morango como produto alvo, pois é um produto muito perecível, possui uma composição rica em compostos antioxidantes termossensíveis, além de outras propriedades que são afetadas

pela secagem, como por exemplo, a cor e conteúdo de antocianinas (LÓPEZ-ORTIZ et al., 2020; MÉNDEZ-LAGUNAS et al., 2017; NEMZER et al., 2018; WOJDYŁO; FIGIEL; OSZMIAŃSKI, 2009).

Com relação às outras respostas estudadas, foram escolhidas a demanda de energia na secagem, SMER e COP. O primeiro permite descobrir o consumo de energia elétrica durante o processo de secagem, enquanto os dois últimos são referentes ao desempenho da bomba de calor. Todos estes parâmetros são essenciais para o estudo do desempenho e avaliação energética do sistema com bomba de calor (MOHAMMADI; TABATABAEKOLOR; MOTEVALI, 2019; PAL; KHAN; MOHANTY, 2008; TAŞERI et al., 2018; YOUSAF et al., 2019).

Já a RSM foi escolhida por permitir uma excelente capacidade comparar suas respostas, realizar otimização de processos, assim como encontro do ponto ótimo de atuação do processo (GEIGER, 1996; NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

3.3.1 Preparação e secagem das amostras

As amostras foram adquiridas e utilizadas conforme as necessidades dos experimentos. Tal decisão foi tomada para permitir sempre a disponibilidade de produto fresco para o desenvolvimento dos experimentos.

Os morangos foram previamente classificados, evitando frutas sem defeitos e com mesmo padrão de maturação, buscando uniformidade de características iniciais para todos os experimentos. Com o uso de uma faca afiada, os morangos foram cortados em fatias, com espessura média de $4,05 \pm 0,43$ mm para a câmara primária e $3,97 \pm 0,47$ mm para a secundária. Após fatiamento, foram feitas as medições de espessura, atividade de água e cor iniciais das amostras, sendo posteriormente colocadas para secar em dois locais distintos no secador: o primeiro em uma bandeja na câmara primária de secagem e o segundo em uma bandeja dentro da câmara secundária de exaustão do secador (com menor seção transversal que a câmara primária). A massa inicial de produto nos experimentos foi de $96,34 \pm 10,20$ g produto na bandeja suspensa dentro da câmara primária e de $31,69 \pm 4,87$ g na bandeja na câmara secundária que foi pesada de forma manual. A câmara primária possui uma seção transversal de $0,16$ m² e a câmara secundária possui uma seção de $0,017$ m². Devido a mudança de seção, os experimentos apresentaram velocidades diferentes, sendo na câmara primária com menor velocidade se comparada com a da câmara secundária.

Já a bandeja da câmara primária foi adaptada para permanecer suspensa numa posição central da câmara e suportada por uma balança situada na parte superior da câmara. Tal processo permitiu que as amostras não sofressem interferência durante as pesagens do produto nos intervalos de tempo definidos até o final do processo de secagem.

Após o término da secagem, os produtos secos foram analisados novamente quanto à espessura, atividade de água e cor. Após as medições com o produto seco, as amostras foram colocadas em sacos plásticos identificados e alocadas em um refrigerador para uso posterior nas demais análises.

3.3.2 Escolha das faixas dos fatores

As faixas dos fatores (variáveis independentes) para criação do planejamento fatorial e DCCR e, por consequência, a sequência de experimentos foram definidas a partir de limites operacionais aceitáveis que permitiam abranger um grande intervalo de resultados possíveis.

Para a velocidade do ar, foi escolhida a faixa em função da rotação do ventilador, sendo de 36,6 a 60,2 Hz. Foi criada uma curva do ventilador para permitir a correlação entre velocidade do ar, em m/s, e a frequência do ventilador, em Hz. A velocidade do ar foi medida e ajustada na saída do secador, enquanto a frequência do ventilador foi controlada pelo inversor de frequência.

Com relação a temperatura, foi escolhida uma faixa de 30 a 50°C para o ar de secagem. Os valores foram escolhidos com a ideia de apresentar uma faixa com menores temperaturas que os mostrados na literatura, como apresentados por Doymaz (2008) e Akpinar e Bicer (2006), que usaram o método de secagem convectivo convencional com uma faixa de 50 a 65°C e 60 a 85°C, respectivamente.

3.3.3 Definição dos experimentos

Toda idealização do planejamento fatorial, DCCR e RSM foram definidos a partir de conceitos expressos por Neto, Scarminio e Bruns (2010).

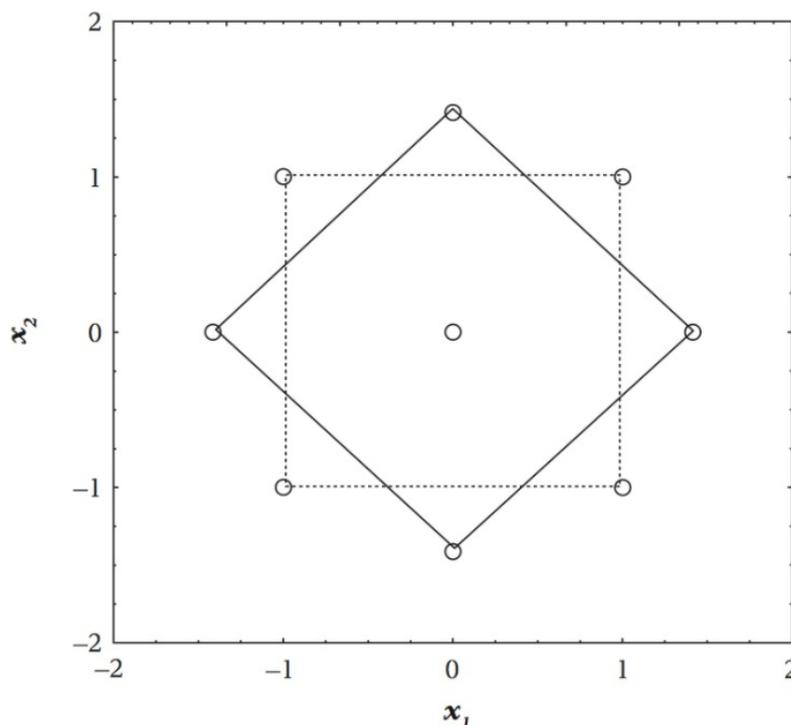
A quantidade de experimentos foi definida pelo planejamento fatorial 2^2 e o DCCR. Primeiramente, formou-se um quadrado normalizado entre 1 e -1 , como sendo seus limites. O polígono formado é então rotacionado em 45° em relação ao eixo x, formando uma estrela, com limites de $-\sqrt{2}$ e $\sqrt{2}$. As extremidades dos dois polígonos, que formam uma

estrela são, respectivamente, os pontos axiais do DCCR, com o acréscimo de mais três pontos centrais do diagrama (vide Figura 11).

A normalização dos fatores é essencial para equalizar valores de grandezas muito diferentes, permitindo um ajustamento melhor do modelo polinomial do RSM, assim como na questão das análises estatísticas (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010).

A faixa de temperatura e velocidade do ar de secagem que foi definida são os extremos máximos e mínimos de todo o planejamento. Com isso, a normalização das faixas foi baseada em $-\sqrt{2}$ e $\sqrt{2}$.

Figura 11: Esquema do planejamento fatorial e DCCR



Fonte: Neto, Scarminio e Bruns (2010)

A Figura 11 mostra o planejamento fatorial e DCCR normalizado. Cada ponto na imagem representa um experimento que combina a relação de temperatura (x_1) e velocidade do ar (x_2). Para o planejamento fatorial, foram feitos quatro (4) experimentos somados a uma triplicata (3) no centro do diagrama, totalizando 7 (sete) ensaios. No caso do DCCR foram feitos oito (8) experimentos somados a uma triplicata (3) do centro do diagrama, totalizando onze (11) experimentos. Os mesmos experimentos usados no planejamento fatorial foram usados e acrescidos com o uso do DCCR.

A realização dos experimentos aconteceu de forma aleatória, com sorteio da ordem de execução dos experimentos, impedindo a ocorrência de distorções estatísticas dos resultados (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010). Somente para os três experimentos no centro do DCCR foram alocados no início, meio e fim da sequência de experimentos sorteados, afim de identificar possíveis variações do erro aleatório.

3.4 Secagem

3.4.1 Razão de umidade – Y

Para o cálculo da razão de umidade ou conteúdo adimensional de umidade Y, é necessário calcular o teor de água (X), em base seca, ou seja, a razão entre a quantidade de água do produto, que é a diferença entre a quantidade total de produto (m_t) e quantidade de massa seca (m_s), pela quantidade de massa seca (Equação 1).

$$X = \frac{m_t - m_s}{m_s} \quad (1)$$

A razão de umidade é a divisão da diferença entre a diferença da umidade em um instante de tempo 't' (X_t) e umidade de equilíbrio (X_e) pela diferença entre a umidade inicial (X_o) do processo e a umidade de equilíbrio (Equação 2).

$$Y = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} \quad (2)$$

A umidade (X_t) é a umidade da amostra em cada momento, enquanto (X_o) e (X_e) são constantes.

A umidade inicial das amostras foi determinada utilizando o método de estufa a 105°C por 24 horas (AOAC, 2019).

No caso da umidade de equilíbrio de secagem, ela foi determinada com a estabilização da curva de secagem, sendo medida pelo equilíbrio dinâmico do produto seco, ou seja, por meio dos últimos valores da curva de conteúdo de água.

3.4.2 Taxa de secagem – DR

A taxa de secagem – DR é a razão entre a diferença da umidade em um instante de tempo 't' (X_t) com a umidade em um instante de tempo 't+Δt' ($X_{t+\Delta t}$), pelo intervalo de tempo (Δt), conforme Equação 3:

$$DR = \frac{X_t - X_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (3)$$

3.4.3 Modelos de secagem

Os modelos de secagem são ferramentas fenomenológicas e empíricas que permitem descrever o processo de secagem, assim como prever seu comportamento. A escolha do modelo depende do comportamento e do período em que se encontra quanto à taxa de secagem do mesmo.

A escolha de um modelo para secagem é dependente das etapas da secagem que é definida pelo comportamento de taxa de secagem durante todo o processo de secagem ou em períodos específicos do mesmo. A taxa é dependente das condições de secagem, como temperatura, velocidade etc. e das características do produto a ser seco.

Doymaz (2008) e Akpinar e Bicer (2006) testaram a secagem do morango com sistemas convectivos de secagem e atestaram a presença de taxas decrescentes, garantindo a presença da difusão como mecanismo principal para secagem, necessitando assim de modelos que acompanhem esse tipo de cinética de secagem.

3.4.3.1 Modelo de Fick

O modelo de Fick segue a segunda lei de difusão de Fick, sendo um modelo fenomenológico. Usado para processos com taxas decrescentes de secagem, este modelo tem como premissas o não encolhimento do produto durante a secagem e um coeficiente de difusão mássico efetivo constante, chamado de difusividade efetiva (D_{eff}). Além disso, A geometria da amostra é muito importante. No presente trabalho, tem-se como hipótese que o diâmetro da fatia do produto é muito maior que sua espessura, caracterizando uma difusão que acontece somente no sentido da espessura e não nas laterais, sendo considerado então um *infinite slab* ou placa plana infinita (DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016).

A Equação 4 mostra a 2ª Lei de Fick da difusão, originária da equação geral de transferência de massa, usando a conservação de massa do meio. Foi simplificada para uma única dimensão z, sem geração de massa e com acúmulo de concentração.

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (4)$$

Em continuidade, a Equação (5) é a solução da 2ª Lei de Fick para uma placa plana (CRANK, 1975; DINÇER; ZAMFIRESCU, 2016; RAMALLO; MASCHERONI, 2013):

$$Y = \frac{8}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \times \exp\left[-(2n-1)^2 \times \frac{\pi^2 \times D_{eff} \times t}{4 \times l^2}\right] \quad (5)$$

Com Y sendo a razão de umidade adimensional, n o número de termos da série, D_{eff} é o coeficiente de difusão efetiva, em m^2/s , t é o tempo do processo, em segundos e l é a semi-espessura do produto a ser seco.

3.4.3.2 Modelo de Page

O modelo de Page (Equação ((6) é um modelo semi-empírico, que é utilizado usualmente para o período decrescente de taxa de secagem (PAGE, 1949).

$$Y = \exp(-g \times t^j) \quad (6)$$

Sendo que Y é a razão de umidade adimensional, g e j são constantes de secagem da equação, sendo a primeira inversa ao tempo e a segunda, adimensional e t é o tempo, em segundos.

3.4.4 Regressão não-linear dos modelos

Para avaliar o ajuste dos modelos matemáticos apresentados aos dados experimentais, fez-se uso de certas métricas estatísticas. Tais métricas são essenciais para mostrar de modo numérico o quão adequado é a regressão não linear obtida pelos cálculos do pacote computacional. Dessa forma, foram usadas por diversos autores na realização da modelagem de curvas de cinética de secagem (AKAR; BARUTÇU MAZI, 2019; COŞKUN et al., 2017; DOYMAZ, 2005; IZLI; IZLI; TASKIN, 2018; MALAIKRITSANACHALEE; CHOOSRI; CHOOSRI, 2018; TUNÇKAL et al., 2018).

3.4.4.1 Coeficiente de Determinação (R^2)

A primeira métrica, apresentada pela Equação (7) é o coeficiente de determinação (R^2), que mostra quão próximo os dados preditos estão dos experimentais. Ele possui uma escala de 0 a 1 e quanto maior ele for mais ajustado o modelo.

$$R^2 = 1 - \left[\sum_{i=1}^N (Y_{pred,i} - Y_{exp,i})^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^N (\overline{Y_{pred,i}} - Y_{exp,i})^2 \right] \quad (7)$$

Em que $Y_{pred,i}$ é razão de umidade predita, $Y_{exp,i}$ é a razão de umidade experimental, $\overline{Y_{pred,i}}$ é a razão de umidade média predita e N é número de observações.

3.4.4.2 Raiz do erro médio quadrado (RMSE)

O resultado da raiz do erro médio quadrado (RMSE), apresentada pela Equação (8), é um número positivo que, quanto mais próximo de zero, mais ajustado é o modelo.

$$RSME = \left[\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (Y_{pred,i} - Y_{exp,i})^2 \right]^{0,5} \quad (8)$$

Em que $Y_{pred,i}$ é razão de umidade predita, $Y_{exp,i}$ é a razão de umidade experimental e N é número de observações.

3.4.4.3 Chi-quadrado reduzido (χ^2).

O chi-quadrado reduzido (χ^2), apresentado pela Equação (9), mede as discrepâncias existentes entre as frequências observadas com suas respectivas frequências esperadas ou preditas (WITTE; WITTE, 2017). Assim como o RSME, seu resultado deverá ser um número positivo, o qual quanto mais próximo de zero, mais ajustado estará o modelo aos dados experimentais.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{pred,i} - Y_{exp,i})^2}{(N - z)} \quad (9)$$

Em que $Y_{pred,i}$ é razão de umidade predita, $Y_{exp,i}$ é a razão de umidade experimental, N é número de observações e z é o número de constantes do modelo de secagem.

Todos os modelos de secagem, assim como as estatísticas usadas para a validação dos mesmos, foram analisados e desenvolvidos utilizando a linguagem de programação *Python*, em conjunto com os pacotes *open source* fornecidos pela comunidade científica da linguagem, aliado ao *Jupyter Notebook*, que é a interface da linguagem usada. Os pacotes usados foram: *Pandas*, *Numpy*, *Matplotlib*, *Seaborn*, *Scikit-Learn* e *Scipy* (HARRIS et al., 2020; HUNTER, 2007; MCKINNEY, 2010; PEDREGOSA et al., 2011; VIRTANEN et al., 2020).

3.5 Desempenho e Energia

3.5.1 Demanda energética de secagem

A demanda energética de secagem é a quantidade de energia total gasta para o equipamento realizar a secagem. Foram realizados dois métodos para medição da demanda energética de secagem. O primeiro método consistiu em utilizar um multimedidor de grandezas elétricas (modelo Multi-K Plus, marca Kron Medidores), utilizando a coleta de dados a cada minuto, captando parâmetros elétricos instantâneos, para os circuitos do compressor e do ventilador, separadamente. No segundo método foram utilizados balanços psicrométricos aplicados para as resistências elétricas, devido à impossibilidade de o medidor coletar dados em períodos menores que 1 min. Como a atuação das resistências elétricas acontece em períodos muito curtos quando o sistema atinge um estado estabilizado na temperatura de secagem, o medidor não consegue captar as demandas.

Para o cálculo da demanda energética foi necessário normalizar os dados a partir de uma umidade final padrão para todos os ensaios. Essa umidade padrão foi escolhida para padronizar o decréscimo de umidade avaliado em todos os processos de secagem, permitindo uma comparação entre ensaios. Essa umidade foi definida como sendo a maior umidade de equilíbrio (umidade final do produto) dentre todos os ensaios. Definida a umidade padrão, determinaram-se os períodos necessários para atingir esse valor em todos os ensaios e, assim, utiliza-los para cálculos das respectivas demandas energéticas.

Foram utilizadas três equações para demanda energética, sendo a primeira em relação ao compressor e ventilador, a segunda em relação às resistências elétricas e a terceira consistiu na soma das duas anteriores, resultando na demanda total de secagem de cada ensaio.

A Equação (10) calcula o somatório do produto entre a potência aparente e o tempo. Feito o somatório, o mesmo é multiplicado pela constante de conversão de unidades de *Joules* para *kWh*.

$$D_{eq,i} = 2.7778 \times 10^{-7} \times \left(\sum_{n=1}^N (60 \times S_{n,i} \times \Delta t_{n,i}) \right) \quad (10)$$

Sendo que o $D_{eq,i}$ representa a demanda do ventilador ou compressor, em *kWh*; o índice i é o número do ensaio; N é o número de medições realizadas pelo instrumento durante

o período tratado de secagem; $S_{n,i}$ é a potência aparente instantânea; com unidade em VA e $\Delta t_{n,i}$ é o intervalo de tempo de medição, em minutos.

A Equação (11) utiliza as propriedades termodinâmicas do ar de secagem para o cálculo da demanda energética utilizada, representando o somatório do produto entre a diferença de entalpia, com o fluxo mássico do sistema e o respectivo intervalo de tempo, além da conversão de *Joules* para *kWh*:

$$D_{res,i} = 2.7778 \times 10^{-7} \times \left(\sum_{n=1}^N (60 \times (h_{E,i} - h_{D,i}) \times \dot{m}_i \times \Delta t) \right) \quad (11)$$

O $D_{res,i}$, representa a demanda energética de secagem da resistência, em *kWh*; o índice i é o número do ensaio; N é o número de medições realizadas pelo instrumento durante o período tratado de secagem; o $h_{E,i}$ e $h_{D,i}$ são a entalpia do ar de secagem no ponto E e D, respectivamente, em *J/kg_{ar}*; \dot{m}_i , é o fluxo mássico do sistema, em *kg_{ar}/s*; o Δt é o intervalo de tempo, em minutos

$$D_{t,i} = D_{ven,i} + D_{com,i} + D_{res,i} \quad (12)$$

A Equação (12) cálculo da demanda total de secagem de cada ensaio se baseia na soma das demandas de cada dispositivo em cada ensaio, representando o ventilador, compressor e resistências elétricas, respectivamente. O índice i representa a identificação dos ensaios realizados.

3.5.2 Coeficiente de performance (COP)

O coeficiente de *performance* (COP) representa o desempenho de sistemas de refrigeração e bombas de calor. Ele depende do trocador de calor que se deseja avaliar, o evaporador ou condensador, sendo a razão entre o calor absorvido ou rejeitado pelo sistema, respectivamente, pelo trabalho total induzido pela máquina. Seu resultado é oriundo dos diagramas de entalpia-pressão presentes no Apêndice III, gerados pelo *software CoolPack* (MEK, 2021).

$$COP_{hp} = \frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{W}_{comp}} \quad (13)$$

O coeficiente da bomba de calor (COP_{hp}) é adimensional; \dot{Q}_{cond} é o calor rejeitado pelo condensador; \dot{W}_{comp} é a potência induzida pelo compressor. Todos eles possuem unidade de potência e taxa de calor em kW.

3.5.3 Razão específica de extração de umidade (SMER)

A razão específica de extração de umidade (*specific moisture extraction ratio* - SMER) é uma relação muito usada também em sistemas de refrigeração e bombas de calor. A Equação (14) mede principalmente a capacidade de remoção de água do sistema em função da energia induzida por ela, representando a medição do SMER a cada intervalo de pesagem. Dados psicrométricos foram utilizados para obtenção da quantidade de água removida, enquanto para demanda energética de secagem, foi usada medição da energia gasta, usando o método proposto pelo item 3.5.1.

$$SMER_i = \frac{1}{2.7778 \times 10^{-7}} \times \left(\sum_{k=1}^{k=n} \frac{\dot{m}_{ar,i} \times (\omega_{F,k} - \omega_{E,k})}{(D_{ven,k} + D_{com,k} + D_{res,k})} \right) \quad (14)$$

Em que o $\dot{m}_{ar,i}$ é o fluxo mássico de ar de secagem referente ao ensaio i , em kg_{ar}/s ; $\omega_{F,k}$ e $\omega_{E,k}$ são as umidades absolutas dos pontos F e E para cada instante i , em kg_w/kg_{ar} ; $D_{ven,k}$, $D_{com,k}$ e $D_{res,k}$ são referentes às demandas energéticas dos equipamentos em cada instante k , em W. O SMER possui uma unidade em kg/kWh.

3.6 Qualidade do produto biológico

Os testes de qualidade mostram o comportamento do produto com relação às mudanças físico-químicas como cor e degradação de seus compostos. Os produtos foram analisados antes e depois da secagem para avaliar o comportamento do produto na secagem.

3.6.1 Cor

A cor foi obtida com o uso de um colorímetro (modelo CM-700d, marca Konica Minolta). Foram medidos a partir do plano gráfico tridimensional cromático $CIE L^*a^*b^*$. O primeiro eixo é o L^* , que representa a luminosidade, variando do branco ao preto. O segundo eixo é a^* , que é um eixo com limites de -60 a 60, apresentando uma escala do verde ao vermelho. O último é o b^* , que é um eixo com limites de -60 a 60, representando uma escala do amarelo ao azul, respectivamente.

Além destas medidas, foi utilizado o parâmetro *Croma*, que representa uma medida quantitativa de cor que analisa a intensidade de cor, sendo a hipotenusa entre o a^* e o b^* (PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013; WOJDYŁO; FIGIEL; OSZMIAŃSKI, 2009).

$$Croma = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (15)$$

Outro parâmetro é a variação da cor ΔE^* , que representa um valor que indica se ocorreu de fato mudança de cor no produto antes e depois da secagem (NEMZER et al., 2018; PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013).

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_f - L_s)^2 + (a_f^* - a_s^*)^2 + (b_f^* - b_s^*)^2} \quad (16)$$

Os índices f e s de cada variável representam os valores de cor para o produto fresco e seco, respectivamente. Com relação ao ΔE^* , quanto mais próximo de zero ele for, mais próximo da cor original do produto inicial é a cor do produto resultante.

Para cada ensaio realizado foram feitas cinco medições de L , a^* e b^* , sendo medidas aleatoriamente no montante de amostra, antes e depois da secagem.

3.6.2 Teor de antocianinas

A quantificação das antocianinas do morango foi feita com o uso do método espectral para predição de pigmentos de folhas descrito por Sims e Gamon (2002).

A Equação (17) determina a concentração de antocianinas na solução de extração a partir da medição das absorvâncias em diferentes comprimentos de onda.

$$Antocianina = 0,08173 \times A_{537} - 0,00697 \times A_{647} - 0,002228 \times A_{663} \quad (17)$$

O teor de antocianinas tem por unidade, $\mu mol. ml^{-1}$, enquanto A_{537} , A_{647} e A_{663} são valores de absorvância da solução de extração, que são adimensionais.

Para calcular a quantidade de antocianinas na amostra é necessária a utilização da Equação (18).

$$AA = \frac{0,1 \times Antocianinas \times M_{molar} \times V_{solvente}}{m_s} \quad (18)$$

A variável AA é a quantidade de antocianinas em miligramas por 100 gramas de material seco de morango, em $mg. 100g^{-1}$. Antocianinas é em $\mu mol. ml^{-1}$; M_{molar} , é a

massa molar da antocianina que é de $449,2 \text{ g.mol}^{-1}$; V_{solvente} é o volume do solvente em ml e m_s que é a massa seca do morango, em g .

3.6.3 Atividade água

A atividade de água, que representa a quantidade de água disponível para reações dentro de um produto biológico, foi medida por meio do medidor direto de bancada (marca AquaLab, modelo 4TEV Series). As medições foram realizadas em triplicata para cada um dos ensaios realizados, antes e depois da secagem.

3.7 Superfície de Resposta

Todas as análises nas etapas de modelagem, estatística, planejamento experimental e otimização foram feitas pela linguagem de programação *Python*, com a utilização de pacotes *open source* fornecidos pela comunidade científica da linguagem, em conjunto com o *Jupyter Notebook*, que é um interpretador da linguagem. Os pacotes utilizados foram: *Pandas*, *Numpy*, *Matplotlib*, *Seaborn*, *Scikit-Learn*, *Scipy* e *Pymoo* (BLANK; DEB, 2020; HARRIS et al., 2020; HUNTER, 2007; MCKINNEY, 2010; PEDREGOSA et al., 2011; VIRTANEN et al., 2020).

3.7.1 Seleção das combinações

A seleção das respostas do modelo com RSM ocorreu a partir dos parâmetros e características mais relevantes para o estudo da secagem da bomba de calor assim como do produto, levando em conta a disponibilidade, informações e captação de dados referentes aos ensaios de secagem realizados.

O Croma e ΔE^* foram escolhidos para analisar mudanças com relação a coloração do produto; o teor de antocianinas, devido ao fato de serem compostos fitoquímicos termossensíveis muito presentes em produtos de com pigmentos vermelhos; o SMER e COP foram escolhidos, pois são os dois parâmetros mais utilizados na medição do desempenho e eficiência de sistemas com bombas de calor. Para a secagem foi escolhida a difusividade efetiva, pelo fato de ser um dos parâmetros mais importantes sobre o comportamento da secagem de produtos. Finalmente, a demanda energética de secagem, podendo medir e quantificar a demanda de energia elétrica para realizar a secagem do produto.

3.7.2 Regressão polinomial

Após a realização de todos os experimentos no secador, das análises laboratoriais da qualidade dos produtos e da quantificação dos parâmetros de desempenho, foram

realizadas regressões polinomiais para criação das superfícies de resposta, baseadas nas respostas escolhidas.

Para o planejamento fatorial 2^2 , a regressão polinomial foi de primeira ordem (Equação 19) e para o DCCR, utilizou-se modelo polinomial de segunda ordem (Equação 20), conforme metodologia consolidada, a partir do método dos mínimos quadrados para obtenção dos coeficientes da expansão polinomial de Taylor.

$$R_n = \beta_0 + \alpha_{n,2}x_1 + \alpha_{n,3}x_2 + \alpha_{n,4}x_1x_2 \quad (19)$$

Em que R representa a n -ésima resposta do modelo, sendo dependente da quantidade de respostas escolhidas; β e α são o intercepto e coeficientes do modelo polinomial, respectivamente; x_1 e x_2 , são as variáveis codificadas do modelo, representando a temperatura e velocidade do ar, respectivamente. A equação gerada foi codificada com uma faixa de normalização de -1 e 1 para a faixa de velocidade do ar de $0,274$ a $0,379$ m/s para a câmara primária e de $2,48$ a $3,43$ m/s para a secundária, e de temperatura de 33 a 47°C em ambas.

$$R_n = \beta_0 + \alpha_{n,2}x_1 + \alpha_{n,3}x_2 + \alpha_{n,4}x_1x_2 + \alpha_{n,5}x_1^2 + \alpha_{n,6}x_2^2 \quad (20)$$

Em que R representa a n -ésima resposta do modelo, sendo dependente da quantidade de respostas escolhidas; β e α são o intercepto e coeficientes do modelo polinomial, respectivamente; x_1 e x_2 , são as variáveis codificadas do modelo, representando a temperatura e velocidade do ar, respectivamente. A equação gerada foi codificada com uma faixa de normalização de $-\sqrt{2}$ e $\sqrt{2}$, para a faixa de velocidade do ar de $0,251$ a $0,402$ m/s para a câmara primária e $2,33$ a $3,73$ m/s para a secundária, e de temperatura de 30 a 50°C em ambas.

Para todas as respostas escolhidas, foram utilizados o planejamento fatorial e o DCCR. O primeiro é uma etapa de medição das possíveis regiões de análise das superfícies de respostas, enquanto o segundo permitirá uma ampliação da análise com a possibilidade de criação de modelos para otimização das respostas.

3.7.3 Estatística da regressão polinomial

Para criação do planejamento e DCCR para cada uma das respostas, é necessária a realização de uma série de análises estatísticas para descobrir a significância do modelo e de

seus respectivos coeficientes. Para isso serão realizados testes ANOVA na equação codificada com nível de confiança de 90%.

A etapa posterior é a retirada dos coeficientes e fatores que não são significativos, a partir de sua maior ordem, com análises dos p-valores para significância individual de cada coeficiente e o f-valor, que é o p-valor com relação a significância do modelo, além do uso de métricas adicionais como o R^2 e R^2 -ajustado, o quadrado médio dos resíduos, AIC (critério de informação de Akaike) e BIC (critério de informação Bayesiano). Os modelos com os melhores resultados destas métricas foram escolhidos como definitivos. Após a definição das equações codificadas significantes da regressão, foram criadas as superfícies de respostas.

3.8 Otimização do processo de secagem

A otimização foi realizada nos modelos considerados significativos e preditivos, que possuíam pelo menos uma variável independente em sua formulação, permitindo assim uma maior profundidade na análise dos possíveis pontos de máximos e mínimos de cada uma das respostas escolhidas.

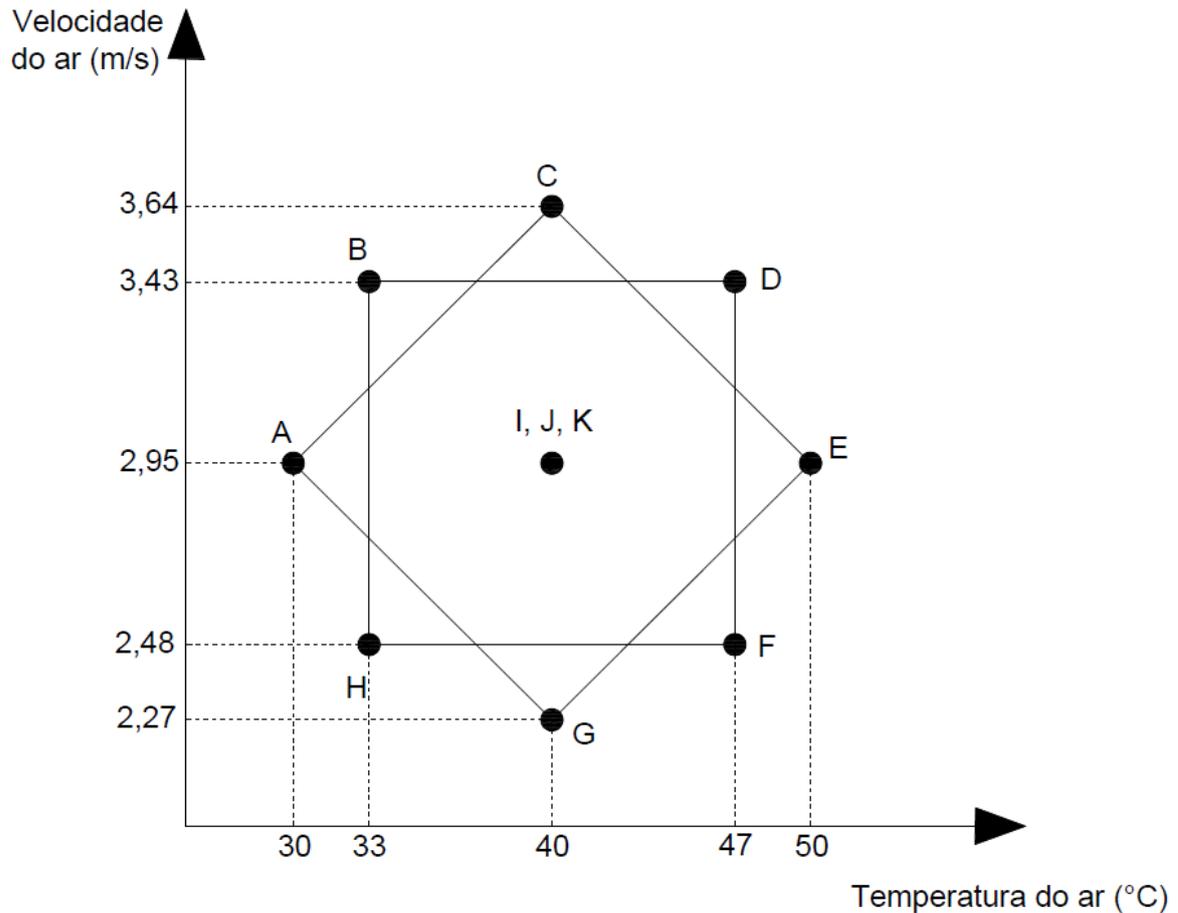
A combinação ótima dos parâmetros operacionais foi selecionada a partir dos modelos que tiveram os resultados estatísticos de significância mais robustos.

4. Resultados e discussão

4.1 Considerações

Todos os ensaios apresentados no DCCR mostrados na Figura 12 foram realizados em sequência aleatória. O intervalo de 1 a 11 são os números indicando a sequência na qual os ensaios foram feitos. Cada ensaio representa uma letra dentro do DCCR, sendo que cada um tem seus próprios resultados.

Figura 12: DCCR do projeto para câmara secundária



A variável independente ou fator X_1 é a temperatura de secagem que variou de 30 a 50 °C, e a variável independente ou fator X_2 , referente à velocidade do ar na câmara secundária que variou de 2,27 a 3,64 m/s, que foi correlacionada à frequência de rotação do ventilador, que variou de 36,2 a 60,2 Hz. Além do ensaio testemunha com o método de secagem convectivo convencional com 48°C de temperatura de secagem e 3,2 m/s de velocidade do ar.

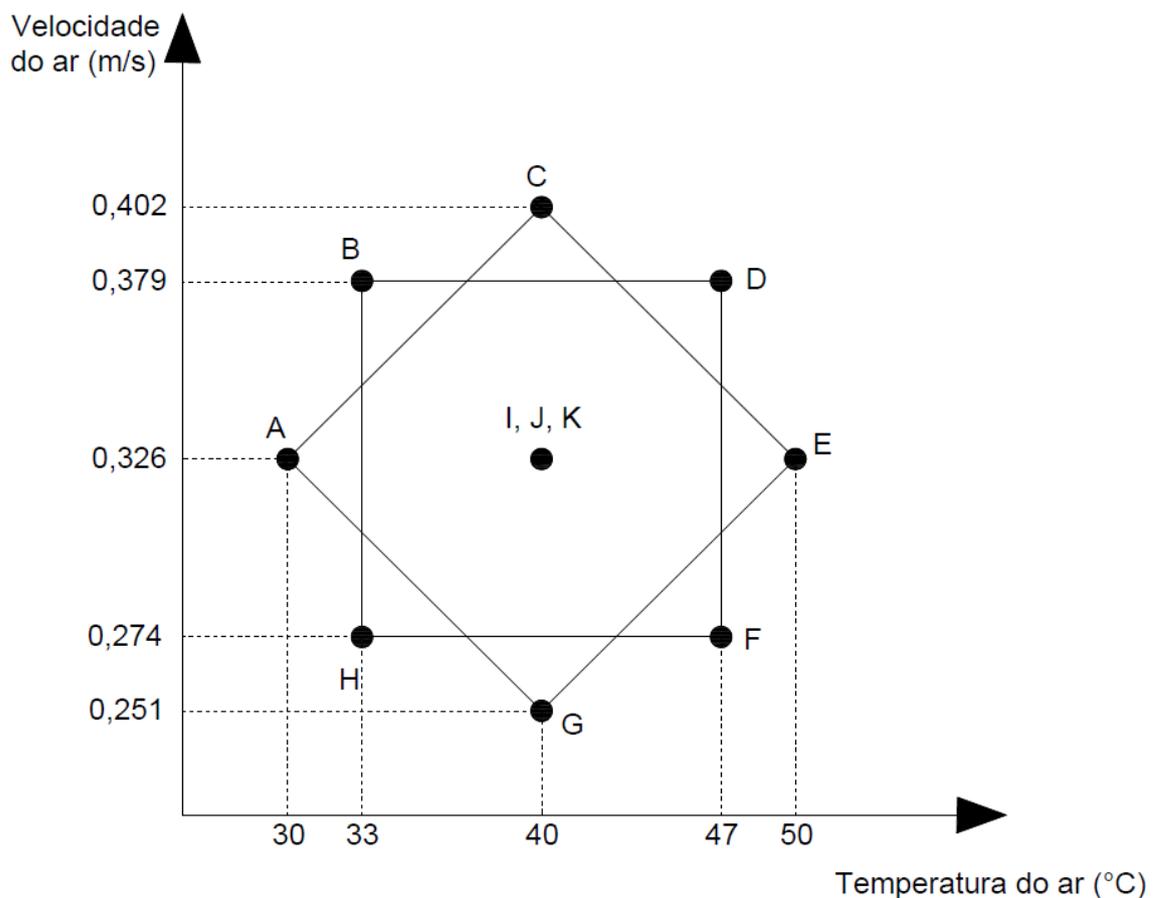
A Tabela 1 mostra os valores de Cromo, ΔE^* e difusividade efetiva na câmara secundária, além dos resultados referentes ao desempenho e demanda de energia elétrica.

Tabela 1: Fatores de entrada e respostas do DCCR para câmara secundária

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Croma	ΔE^*	Difusividade efetiva (m ² /s)	Antocianinas (mg/100g b.s.)	SMER (kg/kWh)	COP	Demanda Energética (kWh)
1-H	33 (-1)	2,48 (-1)	28,63	5,10	3,12E-10	17,16	0,298	1,72	9,662
2-B	33 (-1)	3,43 (1)	26,64	7,94	3,16E-10	9,21	0,056	1,73	10,352
3-F	47 (1)	2,48 (-1)	20,27	12,38	4,21E-10	16,52	0,489	1,75	8,506
4-D	47 (1)	3,43 (1)	25,39	4,55	5,18E-10	16,34	1,010	1,72	7,267
5-A	30 (-1,41)	2,95 (0)	23,07	8,12	2,00E-10	12,56	0,034	1,73	11,230
6-E	50 (1,41)	2,95 (0)	25,37	12,91	5,66E-10	26,30	0,538	1,90	8,373
7-G	40 (0)	2,27 (-1,41)	28,21	15,00	2,24E-10	11,69	0,447	1,76	7,486
8-C	40 (0)	3,64 (1,41)	28,17	8,95	2,89E-10	10,34	0,713	1,71	9,166
9-I	40 (0)	2,95 (0)	19,60	2,24	3,75E-10	11,11	0,513	1,67	6,591
10-J	40 (0)	2,95 (0)	32,24	9,45	3,42E-10	13,60	0,383	1,64	6,766
11-K	40 (0)	2,95 (0)	22,68	6,15	3,92E-10	12,97	0,088	1,74	7,843

Todos os ensaios apresentados no DCCR mostrados na foram realizados do mesmo modo que os mostrados na Figura 13, só que, neste caso, é para a câmara principal de secagem.

Figura 13: DCCR do projeto para a câmara primária.



A variável independente ou fator X_1 é a temperatura de secagem que variou de 30 a 50 °C, e a variável independente ou fator X_2 , referente à velocidade do ar na câmara primária que variou de 0,251 a 0,402 m/s, que foi correlacionada com a vazão volumétrica

medida a partir da seção transversal de saída e as velocidades do ar na câmara secundária, mostradas na Figura 12.

A Tabela 2 mostra os valores de Croma, ΔE^* e difusividade efetiva para a câmara primária, além dos resultados referentes ao desempenho e demanda de energia elétrica.

Tabela 2: Fatores de entrada e respostas do DCCR para a câmara primária

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Croma	ΔE^*	Difusividade efetiva (m ² /s)	Antocianinas (mg/100g b.s.)	SMER (kg/kWh)	COP	Demanda Energética (kWh)
1-H	33 (-1)	0,274 (-1)	20,82	1,08	1,92E-10	13,12	0,298	1,72	9,662
2-B	33 (-1)	0,379 (1)	23,82	5,82	1,99E-10	9,71	0,056	1,73	10,352
3-F	47 (1)	0,274 (-1)	19,71	9,72	2,87E-10	12,34	0,489	1,75	8,506
4-D	47 (1)	0,379 (1)	19,41	7,01	4,14E-10	17,84	1,010	1,72	7,267
5-A	30 (-1,41)	0,326 (0)	23,23	10,57	1,71E-10	10,91	0,034	1,73	11,230
6-E	50 (1,41)	0,326 (0)	29,65	17,82	3,61E-10	14,23	0,538	1,90	8,373
7-G	40 (0)	0,251 (-1,41)	25,25	13,50	2,25E-10	11,32	0,447	1,76	7,486
8-C	40 (0)	0,402 (1,41)	27,50	13,71	2,10E-10	14,71	0,713	1,71	9,166
9-I	40 (0)	0,326 (0)	24,55	6,00	2,54E-10	17,39	0,513	1,67	6,591
10-J	40 (0)	0,326 (0)	20,18	7,72	2,10E-10	10,03	0,383	1,64	6,766
11-K	40 (0)	0,326 (0)	20,65	3,13	2,50E-10	10,64	0,088	1,74	7,843

Na Tabela 3, apresentam-se os dados referentes ao ensaio de comparação (testemunha), pelo método convectivo convencional.

Tabela 3: Resultados do método convectivo convencional

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m/s)	Croma	ΔE^*	Difusividade efetiva (m ² /s)	Antocianinas (mg/100g b.s.)	SMER (kg/kWh)	Demanda Energética (kWh)
Câmara	48	3,2	28,24	4,76	2,98E-10	23,28	0,085	5,086
Tubo			25,10	3,47	3,88E-10	21,29		

No tratamento estatístico para encontrar as equações e coeficientes significativos, foi usado o procedimento de remoção dos coeficientes não significativos (com p-valores $\leq 0,10$), assim como verificação das outras métricas para medição de predição, resíduos e ajuste do modelo, como o p-valor da estatística-F, quadrado médio dos resíduos, AIC, BIC, R^2 e R^2 -ajustado com auxílio da tabela ANOVA.

4.2 Secagem

A Tabela 4 apresenta dados referentes ao tempo de secagem total para cada um dos experimentos com os relativos valores iniciais de massa das amostras (M_0) para a câmara primária e câmara secundária, respectivamente, assim como suas respectivas umidades iniciais, além das temperaturas e umidades relativas médias do ambiente durante o processo de secagem. A partir desta umidade inicial é possível descobrir a massa seca de cada ensaio,

permitindo a criação das curvas de secagem e de taxa de secagem apresentadas nos Apêndices I e II.

Tabela 4: Tempo de secagem, massa inicial e umidade inicial da câmara primária e da câmara secundária.

Ensaio	Tempo Secagem (min)	Mo. Câmara Primária (g)	Mo. Câmara Secundária (g)	Umidade inicial (%b.u.)	Temperatura Ambiente (°C)	$\pm \sigma$ (°C)	Umidade Relativa Ambiente (%)	$\pm \sigma$ (%)
1-H	440	111.08	39.84	0.93282	19.36	± 0.95	62.43	± 5.33
2-B	390	103.23	32.97	0.91324	19.24	± 1.71	57.81	± 7.98
3-F	315	95.06	29.68	0.93319	17.77	± 1.36	68.70	± 7.76
4-D	235	80.11	23.71	0.92244	20.37	± 0.45	53.21	± 2.10
5-A	485	106.77	39.42	0.92141	19.08	± 1.08	61.48	± 6.75
6-E	270	90.00	32.74	0.94513	18.73	± 1.11	59.93	± 5.11
7-G	330	100.30	35.51	0.91779	17.24	± 1.75	66.79	± 7.85
8-C	280	79.43	30.19	0.92278	19.77	± 0.86	54.32	± 4.05
9-I	300	103.94	31.11	0.92385	21.22	± 0.35	55.56	± 6.17
10-J	300	101.18	30.82	0.92615	21.58	± 1.28	62.18	± 2.80
11-K	300	87.37	25.49	0.92418	18.91	± 1.40	58.60	± 5.03
Conv.	180	97.57	28.77	0.92635	23.77	± 1.01	67.73	± 3.25

Com relação ao tempo de secagem, nota-se que os ensaios mais longos são aqueles que possuem menores valores de temperatura do ar, influenciando diretamente a duração do processo (COŞKUN et al., 2017). O ensaio 5-A apresentou o maior tempo, pois também foi o de menor temperatura de secagem, sendo o inverso para o ensaio 6-E, que apresentou o segundo menor tempo, possuindo a maior temperatura, tendo em ambos os casos, a mesma velocidade do ar.

A velocidade do ar possui uma influência sutil no processo, sendo que quanto maior ela for menor o tempo de secagem como, por exemplo, o ensaio 4-D, que foi realizado com as segundas maiores velocidade e temperatura do ar, mostrando que a junção destas duas variáveis resultou no menor tempo de secagem dentre os ensaios com a bomba de calor ligada. O ensaio acompanha o ensaio convectivo de validação que apresentou o menor tempo de secagem, devido ao fato de apresentar fatores de velocidade do ar e temperatura próximos do ensaio 4-D, assim como pelo fato da temperatura ambiente do ensaio ter sido a maior dentre todos os ensaios realizados (Tabela 4).

4.2.1 Cinética de secagem da câmara primária

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes a difusividade efetiva dos ensaios ocorridos na câmara primária, com suas respectivas métricas referentes à qualidade da regressão com o modelo de Fick. Com os dados da tabela, é notável observar uma relação direta entre a temperatura e difusividade efetiva de cada ensaio. Com relação a esta tendência, o ensaio 6-E, com a maior temperatura e velocidade média, apresentou a segunda maior

difusividade, enquanto que o ensaio 4-D, apresentou a maior, devido a alta temperatura de 47°C e 3,43m/s, mostrando uma influência de ambas no seu resultado. No outro extremo, têm-se os ensaios 5-A e 1-H, que apresentaram as menores difusividades, pelo fato do primeiro ter sido realizado com a menor temperatura dos ensaios e o segundo com uma temperatura de 33°C e 2,43m/s.

Tabela 5: Difusividade efetiva e parâmetros de ajuste para modelo de Fick para a câmara primária

Ensaio	Difusividade efetiva (m²/s)	R²	RMSE	Chi²
1-H	1,92E-10	0,9138	9,50E-02	9,33E-03
2-B	1,99E-10	0,9334	8,16E-02	6,93E-03
3-F	2,87E-10	0,9350	8,11E-02	6,87E-03
4-D	4,14E-10	0,9522	6,75E-02	4,81E-03
5-A	1,71E-10	0,9220	8,76E-02	7,91E-03
6-E	3,61E-10	0,9467	7,39E-02	5,77E-03
7-G	2,25E-10	0,9100	9,59E-02	9,62E-03
8-C	2,10E-10	0,9260	8,66E-02	7,86E-03
9-I	2,54E-10	0,9209	9,09E-02	8,66E-03
10-J	2,10E-10	0,9206	9,25E-02	8,96E-03
11-K	2,50E-10	0,9366	7,90E-02	6,55E-03
Conv.	2,98E-10	0,9191	9,18E-02	8,95E-03

Com relação aos resultados de difusividade efetiva, os ensaios variaram de $1,71 \times 10^{-10}$ a $4,14 \times 10^{-10}$ m²/s, sendo próximos dos valores apresentados por Doymaz (2008), obtidos na secagem convectiva convencional de morangos de 50 a 65 °C com 1,5 m/s, apresentando uma variação de $4,95 \times 10^{-10}$ e $1,42 \times 10^{-9}$ m²/s. Estes valores acompanham também os resultados mostrados por Akpinar e Bicer (2006), que obtiveram valores na faixa de $4,528 \times 10^{-10}$ a $9,631 \times 10^{-10}$ m²/s, em secagem convectiva convencional por ciclone, com uma faixa de temperatura de 60 a 85 °C e velocidade do ar de 0,5 a 1,5 m/s, assim como Contreras et al. (2008), que analisaram a influência de micro-ondas em secagem convectiva convencional para efeitos nos parâmetros de cinética e propriedades ópticas e mecânicas da maçã e morango e obtiveram valores de $2,5 \times 10^{-10}$ e $5,5 \times 10^{-9}$ m²/s de difusividade efetiva do morango de 30 e 50°C para amostras sem o tratamento de impregnação a vácuo. Os primeiros trabalhos possuem maiores valores de difusividade devido a maiores valores na faixa de temperatura estudados que, como esperado, influencia diretamente nos valores de difusividade efetiva (TUNÇKAL et al., 2018), enquanto o último possui uma faixa próxima da usada no presente trabalho.

Comparativamente, é notável reparar que a bomba de calor com configuração aberta atingiu valores próximos de difusividade efetiva dos artigos, mesmo utilizando menores valores de temperatura de secagem, da mesma forma que a difusividade efetiva obtida no ensaio 4-D foi maior se comparada ao ensaio com secagem convectiva convencional (Conv.), com ambas possuindo parâmetros operacionais próximos (Tabela 5).

No caso dos parâmetros de ajuste dos modelos, têm-se valores com R^2 acima de 0,91 em todos os casos, valores de RMSE e Chi^2 baixos, mostrando bons ajustes, assim como uma baixa soma de erros de regressão.

Na Tabela 6, têm-se os valores das constantes de Page para cada ensaio realizado, assim como seus respectivos parâmetros de qualidade da regressão realizada para o modelo de Page. Todos os ensaios proporcionaram um ajuste adequado com coeficientes de determinação maiores que 0,99, com valores baixos de RMSE e Chi^2 . Com relação às condições propostas, o modelo semi-empírico de Page proporcionou ajustes adequados aos dados experimentais de secagem de morango.

Tabela 6: Constantes de Page e parâmetros de ajuste para modelo de Page para a câmara primária

Ensaio	g	j	R^2	RMSE	Chi^2
1-H	1,31E-03	1,317	0,9972	1,71E-02	3,12E-04
2-B	2,71E-03	1,247	0,9988	1,08E-02	1,27E-04
3-F	3,33E-03	1,292	0,9996	5,98E-03	3,92E-05
4-D	7,32E-03	1,231	0,9996	6,10E-03	4,16E-05
5-A	1,53E-03	1,276	0,9974	1,60E-02	2,72E-04
6-E	5,30E-03	1,226	0,9991	9,85E-03	1,08E-04
7-G	1,74E-03	1,347	0,9985	1,25E-02	1,71E-04
8-C	2,82E-03	1,312	0,9982	1,36E-02	2,03E-04
9-I	2,35E-03	1,363	0,9988	1,11E-02	1,35E-04
10-J	2,21E-03	1,368	0,9983	1,35E-02	2,00E-04
11-K	3,73E-03	1,265	0,9986	1,18E-02	1,54E-04
Conv.	3,45E-03	1,375	0,9980	1,44E-02	2,35E-04

As curvas de secagem juntamente com as curvas preditas pelos modelos de Fick e Page estão apresentadas no Apêndice I.

4.2.2 Cinética de secagem da câmara secundária

A Tabela 7 mostra os resultados da regressão do modelo de Fick para a secagem de morango na câmara secundária, com os resultados da difusividade efetiva de cada ensaio e os parâmetros de ajuste do modelo. Assim como no item 4.2.1, tem-se que a difusividade efetiva acompanhou com efeitos positivos da temperatura e da velocidade do ar. Assim, o ensaio 6-E apresentou o maior valor de difusividade efetiva, diferentemente da secagem na câmara primária, para a qual o ensaio 4-D teve valor maior. Todos os valores de difusividade efetiva na câmara secundária foram maiores que os apresentados na câmara primária. Isso ocorreu, pois, por mais que vazão durante todo o trajeto seja constante, as seções são alteradas, com uma seção de 0,16 m² na câmara primária e 0,017 m², levando a um aumento da velocidade do ar na câmara secundária, aumentando os coeficientes de difusão em todos os ensaios.

Tabela 7: Difusividade efetiva e parâmetros de ajuste para o modelo de Fick para câmara secundária

Ensaio	Difusividade efetiva (m ² /s)	R ²	RMSE	Chi ²
1-H	3,12E-10	0,9505	6,95E-02	5,00E-03
2-B	3,16E-10	0,9695	5,20E-02	2,82E-03
3-F	4,21E-10	0,9670	5,38E-02	3,03E-03
4-D	5,18E-10	0,9726	4,81E-02	2,44E-03
5-A	2,00E-10	0,9586	6,08E-02	3,81E-03
6-E	5,66E-10	0,9530	6,86E-02	4,97E-03
7-G	2,24E-10	0,9462	7,22E-02	5,45E-03
8-C	2,89E-10	0,9698	5,13E-02	2,75E-03
9-I	3,75E-10	0,9560	6,38E-02	4,26E-03
10-J	3,42E-10	0,9598	6,09E-02	3,88E-03
11-K	3,92E-10	0,9658	5,50E-02	3,17E-03
Conv.	3,88E-10	0,9442	7,46E-02	5,92E-03

Assim como no item 4.2.1, tem-se valores de difusividade efetiva próximos dos encontrados por Akpınar e Bicer (2006), Contreras et al. (2008) e Doymaz (2008), enquanto que a difusividade efetiva na câmara secundária alcançou valores na faixa entre $2,00 \times 10^{-10}$ e $5,18 \times 10^{-9}$ m²/s. As comparações entre as diferentes regiões mostram uma vantagem da maior velocidade do ar para melhoria dos parâmetros de transferência de calor e massa.

Avaliando o ajuste dos modelos, as métricas apresentaram resultados melhores, comparativamente aos modelos de secagem na câmara primária, com valores de R² maiores

que 0,94 e valores dos módulos menores que os apresentados pela câmara primária, também. Isso demonstra que os modelos apresentaram ajustes mais finos com relação aos da câmara primária.

A Tabela 8 apresenta os valores das constantes do modelo de Page para cada um dos ensaios com os valores de suas respectivas métricas de regressão. Assim como no item 4.2.1, tem-se um adequado ajuste do modelo de Page aos dados experimentais, com valores de R^2 maiores que 0,99 em todos os ensaios. Com relação aos outros parâmetros, se comparados aos da câmara primária, apresentaram valores menores, o que demonstra que o ajuste neste caso foi melhor que o apresentado pelo ajuste aos da câmara primária.

Tabela 8: Constantes de Page e parâmetros para o modelo de Page para câmara secundária

Ensaio	g	j	R²	RMSE	Chi²
1-H	3,74E-03	1,186	0,9984	1,26E-02	1,71E-04
2-B	8,66E-03	1,087	0,9993	7,74E-03	6,51E-05
3-F	9,75E-03	1,134	0,9997	5,21E-03	2,97E-05
4-D	1,57E-02	1,146	0,9994	6,96E-03	5,42E-05
5-A	4,50E-03	1,120	0,9984	1,18E-02	1,48E-04
6-E	6,79E-03	1,253	0,9985	1,24E-02	1,72E-04
7-G	4,64E-03	1,217	0,9990	9,75E-03	1,04E-04
8-C	1,06E-02	1,083	0,9992	8,42E-03	7,80E-05
9-I	7,11E-03	1,219	0,9994	7,55E-03	6,27E-05
10-J	7,79E-03	1,200	0,9989	9,85E-03	1,07E-04
11-K	9,74E-03	1,145	0,9988	1,03E-02	1,18E-04
Conv.	6,80E-03	1,314	0,9985	1,24E-02	1,75E-04

4.2.3 Planejamento Fatorial

4.2.3.1 Secagem de morango na câmara primária

A Tabela 9 mostra a análise de variância - ANOVA para o planejamento fatorial da difusividade efetiva da câmara primária e os respectivos coeficientes. Nota-se que somente o coeficiente linear da temperatura de secagem foi significativo.

Tabela 9: ANOVA do planejamento fatorial para a difusividade efetiva na câmara primária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	9,829	0,046	-
β	2,58E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	7,77E-11	1	2,42E-20	2,42E-20	22,077	0,018	Verdadeiro
X2	3,35E-11	1	4,49E-21	4,49E-21	4,106	0,136	Falso
X1X2	3,01E-11	1	3,62E-21	3,62E-21	3,305	0,167	Falso
Resíduo	-	3	3,28E-21	1,09E-21	-	-	-

A Tabela 10 mostra a análise de variância - ANOVA para o planejamento fatorial da difusividade efetiva da câmara primária e os respectivos coeficientes significativos. Neste caso, assim como os dados apresentados na Tabela 9 após a remoção dos coeficientes, o único coeficiente significativo continuou sendo o linear da temperatura de secagem.

Tabela 10: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para a difusividade efetiva da câmara primária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	1	-	-	10,600	0,023	-
β	2,58E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	7,77E-11	1	2,42E-20	2,42E-20	10,603	0,023	Verdadeiro
Resíduo		5	1,14E-20	2,28E-21	-	-	-

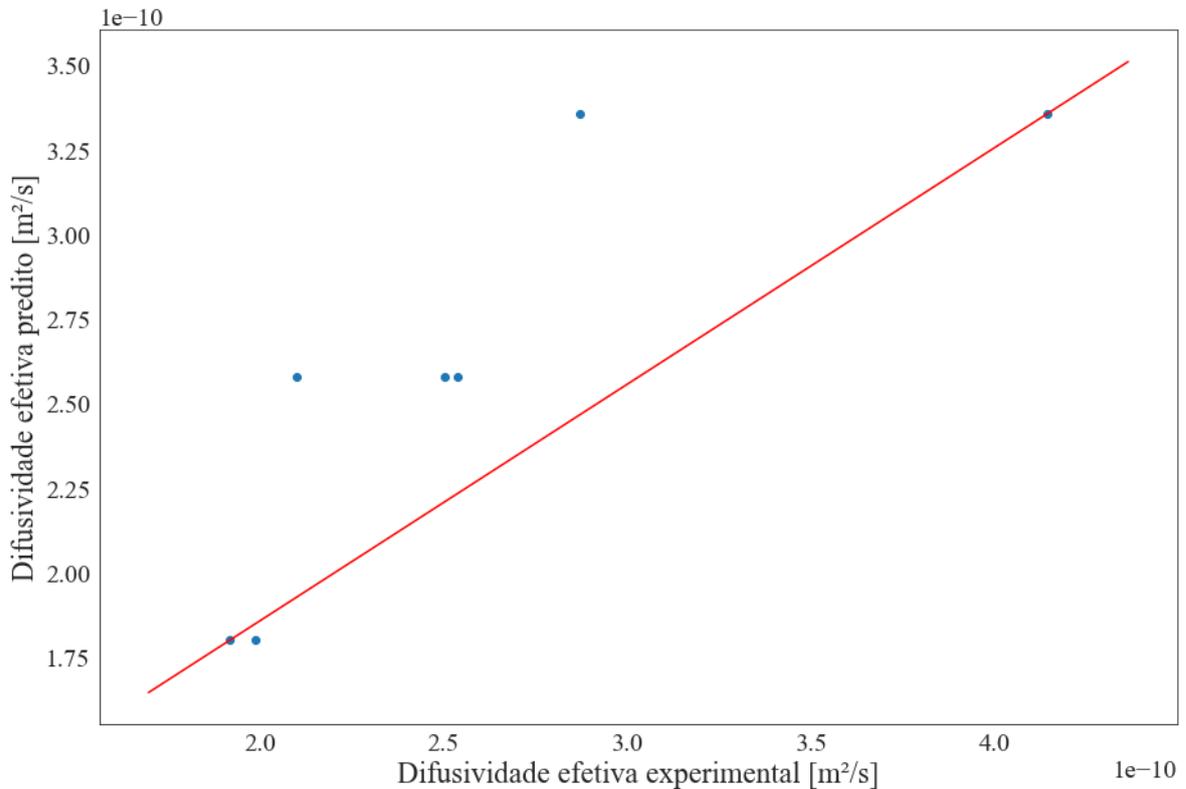
A Equação (21) define o modelo codificado para a difusividade efetiva na câmara primária.

$$Def f_c \left(\frac{m^2}{s} \right) = (2,58 + 0,777 \times X_1) \cdot 10^{-10} \quad (21)$$

A Equação (21) apresentou R^2 e R^2 -ajustado de 0,679 e 0,615, respectivamente; com AIC e BIC de -314,206 e -311,315; quadrado médio dos resíduos de $2,28 \times 10^{-21}$ e f-valor de 0,022.

A Figura 14 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para difusividade efetiva da câmara primária.

Figura 14: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara primária pelo planejamento fatorial



A variável independente - temperatura do ar possui um efeito positivo na difusividade efetiva na câmara primária.

4.2.3.2 Secagem de morango na câmara secundária

A Tabela 11 mostra a análise de variância - ANOVA para o planejamento fatorial da difusividade efetiva para secagem de morango na câmara secundária e os respectivos coeficientes. Nota-se que, assim como para a difusividade efetiva na câmara primária (Tabela 9), somente o coeficiente linear da temperatura de secagem foi significativo.

Tabela 11: ANOVA do planejamento fatorial para a difusividade efetiva da câmara secundária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	13,270	0,031	
β	3,82E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	7,78E-11	1	2,42E-20	2,42E-20	33,376	0,010	Verdadeiro
X2	2,51E-11	1	2,51E-21	2,51E-21	3,460	0,160	Falso
X1X2	2,32E-11	1	2,16E-21	2,16E-21	2,975	0,183	Falso
Resíduo	-	3	2,18E-21	7,26E-22	-	-	-

A Tabela 12 mostra a análise de variância - ANOVA para o planejamento fatorial da difusividade efetiva na câmara secundária somente com os coeficientes significativos.

Assim como mostrado na Tabela 11, o único coeficiente que continuou significativo, após a remoção dos não-significativos, foi o linear da temperatura de secagem.

Tabela 12: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para a difusividade efetiva da câmara secundária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	1	-	-	17,690	0,008	-
β	3,82E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	7,78E-11	1	2,42E-20	2,42E-20	17,687	0,008	Verdadeiro
Resíduo	-	5	6,85E-21	1,37E-21	-	-	-

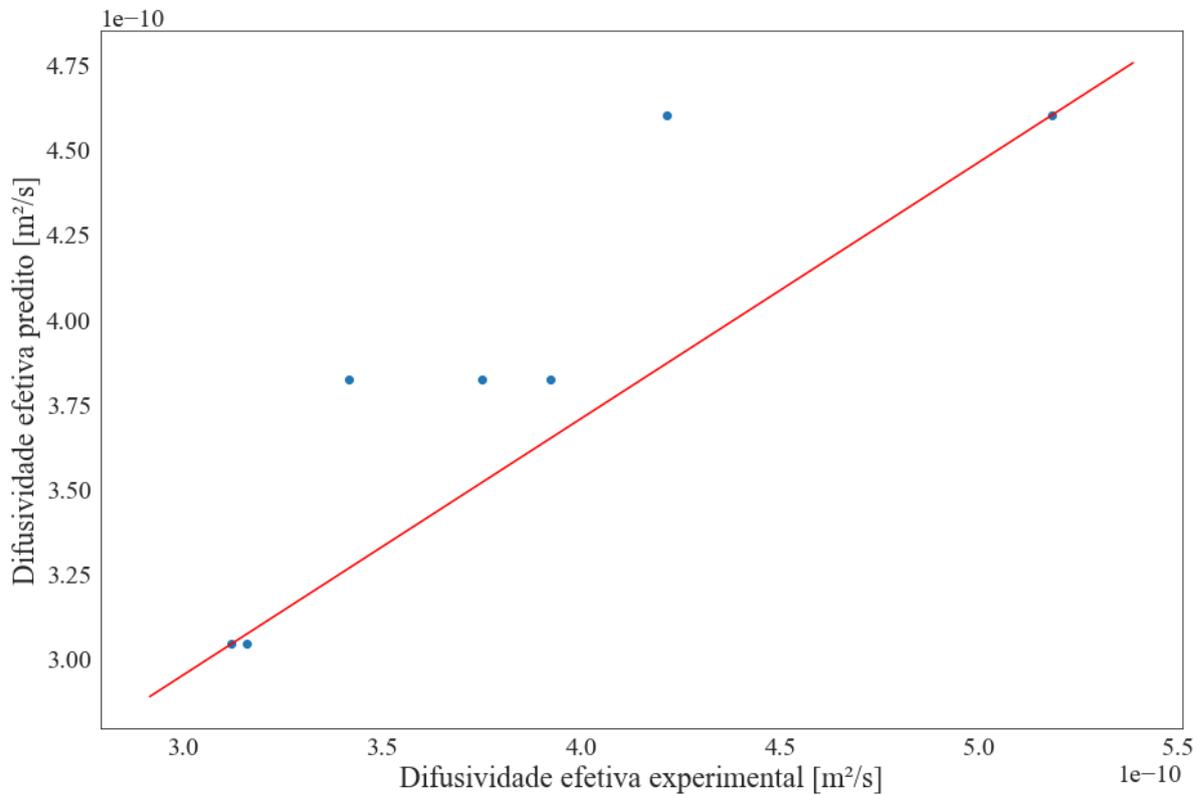
A Equação (22) define o modelo codificado para a difusividade efetiva na câmara secundária.

$$Def f_t \left(\frac{m^2}{s} \right) = (3,82 + 0,778 \times X_1) \cdot 10^{-10} \quad (22)$$

A Equação (22) apresentou R^2 e R^2 -ajustado de 0,78 e 0,736, respectivamente; com AIC e BIC de -314,765 e -311,874; quadrado médio dos resíduos de $1,37 \times 10^{-21}$ e f-valor de 0,0084.

A Figura 15 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para difusividade efetiva da câmara secundária.

Figura 15: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara secundária pelo planejamento fatorial



A variável independente - temperatura do ar possui um efeito positivo na difusividade efetiva na câmara secundária.

4.2.4 DCCR

4.2.4.1 Secagem de morango na câmara primária

A Tabela 13 mostra a análise de variância - ANOVA para o DCCR da difusividade efetiva na câmara primária e os respectivos coeficientes. Nota-se que somente o coeficiente linear da temperatura do ar de secagem foi significativo.

Tabela 13: ANOVA do DCCR para a difusividade efetiva da câmara primária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	7,888	0,020	-
β	2,38E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	7,25E-11	1	4,19E-20	4,19E-20	32,887	0,002	Verdadeiro
X2	1,41E-11	1	1,58E-21	1,58E-21	1,237	0,317	Falso
X1X2	3,01E-11	1	3,62E-21	3,62E-21	2,838	0,153	Falso
X1²	2,19E-11	1	3,12E-21	3,12E-21	2,452	0,178	Falso
X2²	-2,27E-12	1	2,87E-23	2,87E-23	0,023	0,886	Falso
Resíduo	-	5	6,37E-21	1,27E-21	-	-	-

A Tabela 14 mostra a análise de variância - ANOVA para o DCCR da difusividade efetiva na câmara primária com apenas os coeficientes significativos. Neste caso, assim como os dados apresentados na Tabela 13 após a remoção dos coeficientes, o único coeficiente significativo continuou sendo o linear da temperatura, com um aumento significativo do valor de F, de 7,888 para 25,360.

Tabela 14: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a difusividade efetiva da câmara primária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	1	-	-	25,630	0,000	-
β	2,52E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	7,25E-11	1	4,19E-20	4,19E-20	25,625	0,001	Verdadeiro
Resíduo	-	9	1,47E-20	1,63E-21	-	-	-

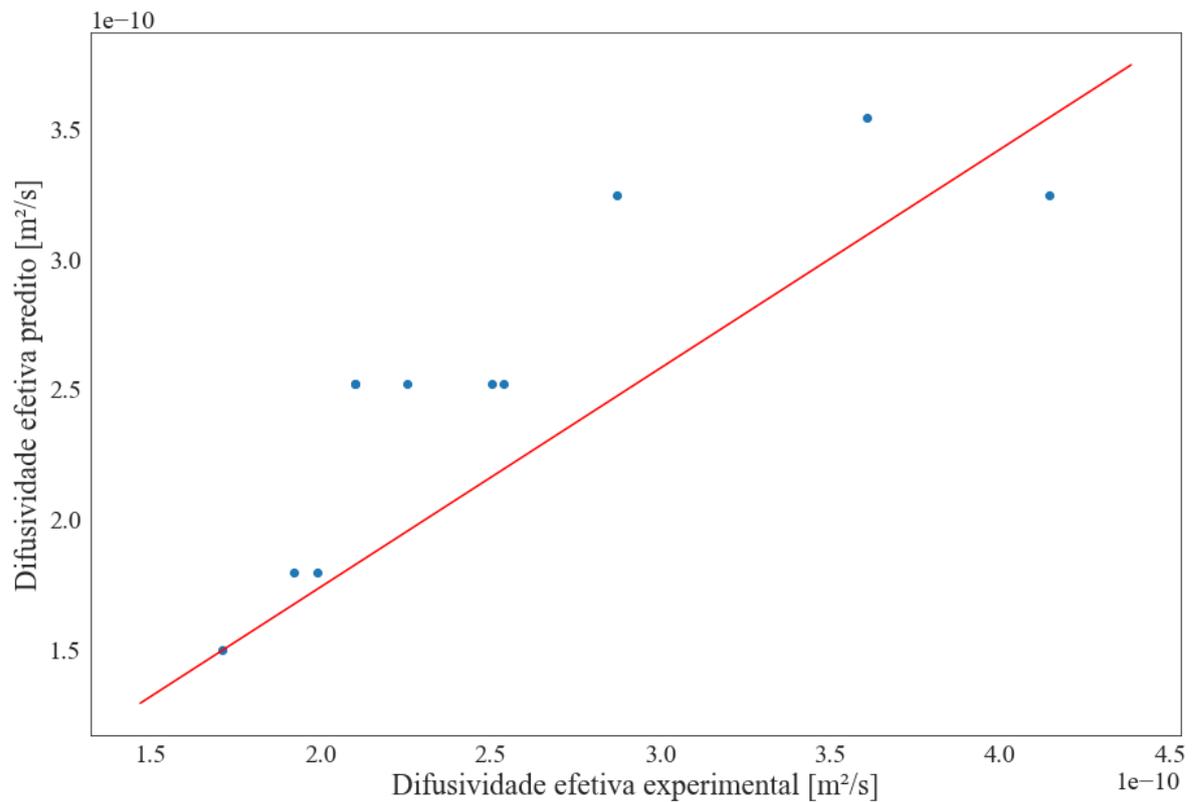
A Equação (23) é a equação codificada para a difusividade efetiva na câmara primária:

$$Def f_c \left(\frac{m^2}{s} \right) = (2,52 + 0,725 \times X_1) \cdot 10^{-10} \quad (23)$$

A Equação (23) apresentou R² e R²-ajustado de 0,740 e 0,711, respectivamente; com AIC e BIC de -493,480 e -492,684; quadrado médio dos resíduos de 1,63×10⁻²¹ e f-valor de 0,0007, demonstrando que o modelo é significativo e apresenta capacidade de predição para a difusividade efetiva dentro da câmara primária.

A Figura 16 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para difusividade efetiva da câmara primária.

Figura 16: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara primária pelo DCCR



A variável independente - temperatura do ar possui um efeito positivo na difusividade efetiva da câmara primária.

4.2.4.2 Secagem de morango na câmara secundária

A Tabela 15 mostra a análise de variância - ANOVA para o DCCR da difusividade efetiva na câmara secundária e os respectivos coeficientes. Nota-se que, assim como para a difusividade efetiva na câmara primária (Tabela 13), somente o coeficiente linear da temperatura do ar foi significativo.

Tabela 15: ANOVA do DCCR para a difusividade efetiva da câmara secundária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	6,376	0,032	-
β	3,69E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	1,04E-10	1	8,59E-20	8,59E-20	25,085	0,004	Verdadeiro
X2	2,42E-11	1	4,67E-21	4,67E-21	1,364	0,295	Falso
X1X2	2,32E-11	1	2,16E-21	2,16E-21	0,631	0,463	Falso
X1²	2,52E-11	1	8,12E-21	8,12E-21	2,372	0,184	Falso
X2²	-3,85E-11	1	8,31E-21	8,31E-21	2,427	0,180	Falso
Resíduo	-	5	1,71E-20	3,42E-21	-	-	-

A Tabela 16 mostra a análise de variância - ANOVA para o DCCR da difusividade efetiva na câmara secundária somente com os coeficientes significativos. Diferentemente das demais equações para a difusividade efetiva, tem-se que o coeficiente linear de temperatura e o quadrático da velocidade do ar se tornaram significativos para o modelo, apresentando um aumento de 6,376 e 19,140 nos valores de F, comparando o modelo com todos os coeficientes e o modelo só com os coeficientes significativos.

Tabela 16: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a difusividade efetiva da câmara secundária

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	2	-	-	19,140	0,002	-
β	3,93E-10	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	1,04E-10	1	8,59E-20	8,59E-20	24,976	0,001	Verdadeiro
X2²	-4,59E-11	1	1,29E-20	1,29E-20	3,744	0,089	Verdadeiro
Resíduo	-	8	2,75E-20	3,44E-21	-	-	-

A Equação (24) é a equação codificada para a difusividade efetiva na câmara secundária.

$$Def f_t \left(\frac{m^2}{s} \right) = (3,93 + 1,04 \times X_1 - 0,459 \times X_2^2) \cdot 10^{-10} \quad (24)$$

A Equação (24) apresentou valores de R² e R²-ajustado de 0,782 e 0,728, respectivamente; com AIC e BIC de -484,595 e -483,401; quadrado médio dos resíduos de 3,44×10⁻²¹ e f-valor de 0,002, demonstrando que o modelo é significativo e apresenta capacidade de predição para a difusividade efetiva na câmara secundária.

A Figura 17 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva na câmara secundária, enquanto que a Figura 18 mostra as curvas em

nível do modelo da difusividade efetiva na câmara secundária. A Figura 19 mostra a representação tridimensional da superfície de resposta para a difusividade efetiva na câmara secundária dada pela Equação (24).

Figura 17: Dados experimentais e preditos para a difusividade efetiva da câmara secundária pelo DCCR

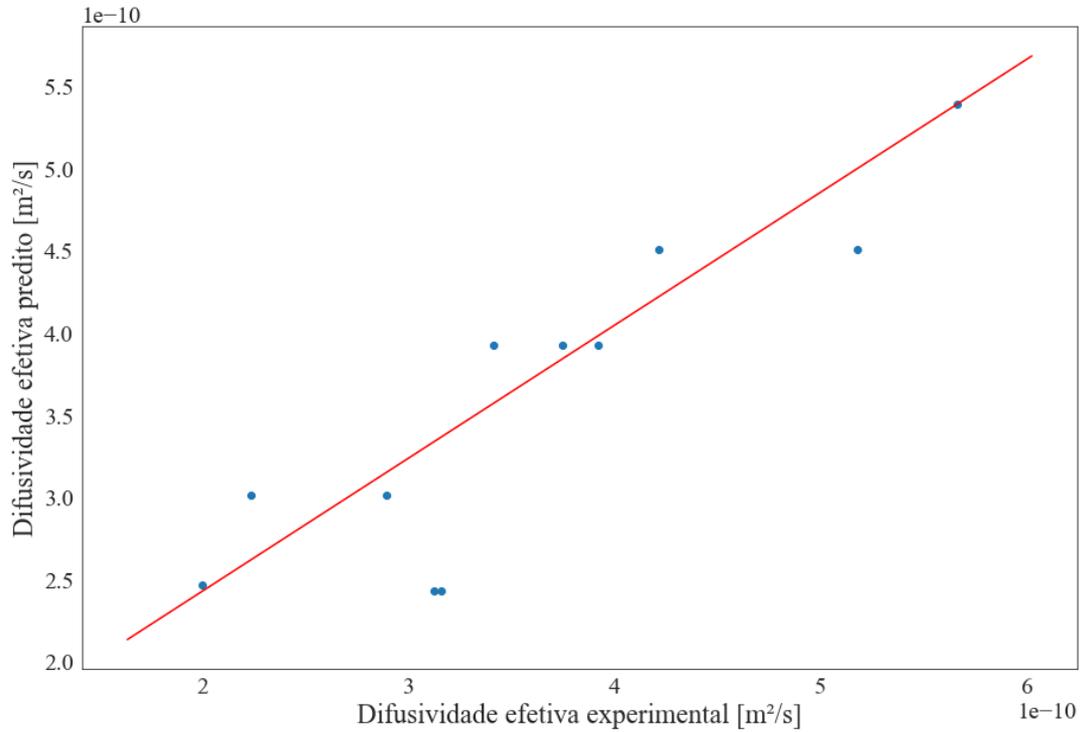


Figura 18: Superfície de resposta com curvas em nível para difusividade efetiva na câmara secundária

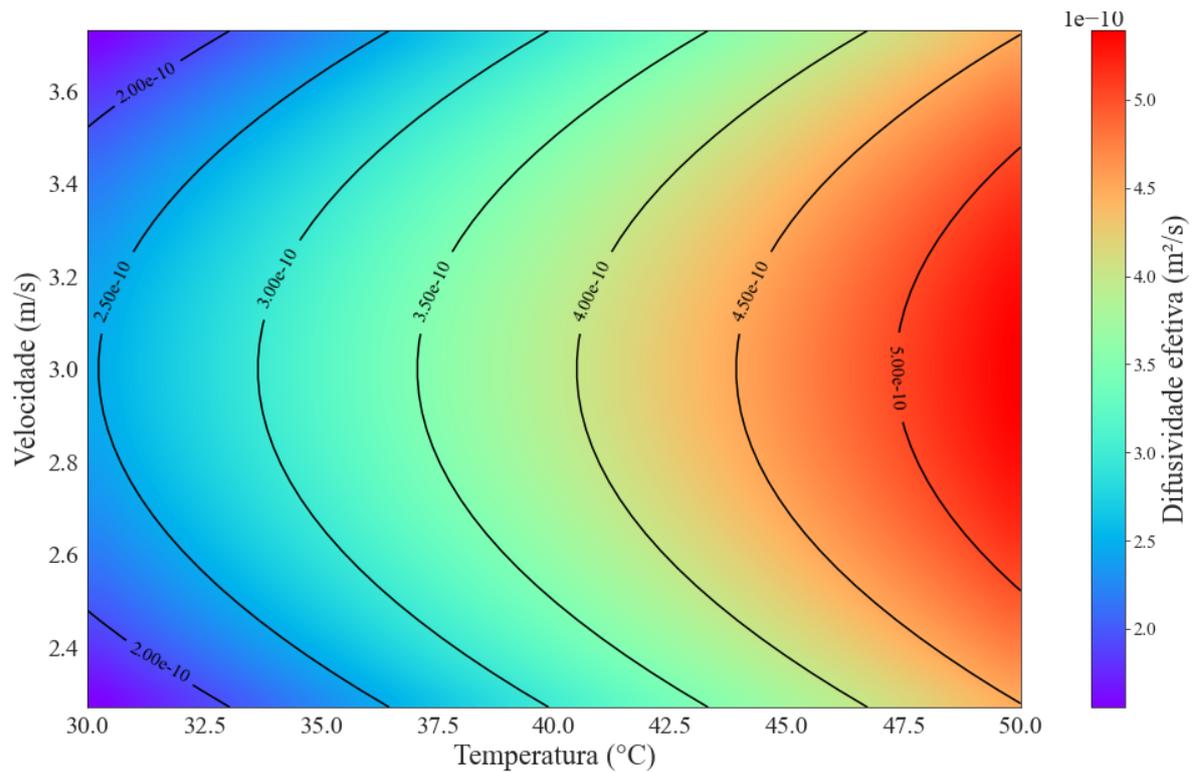
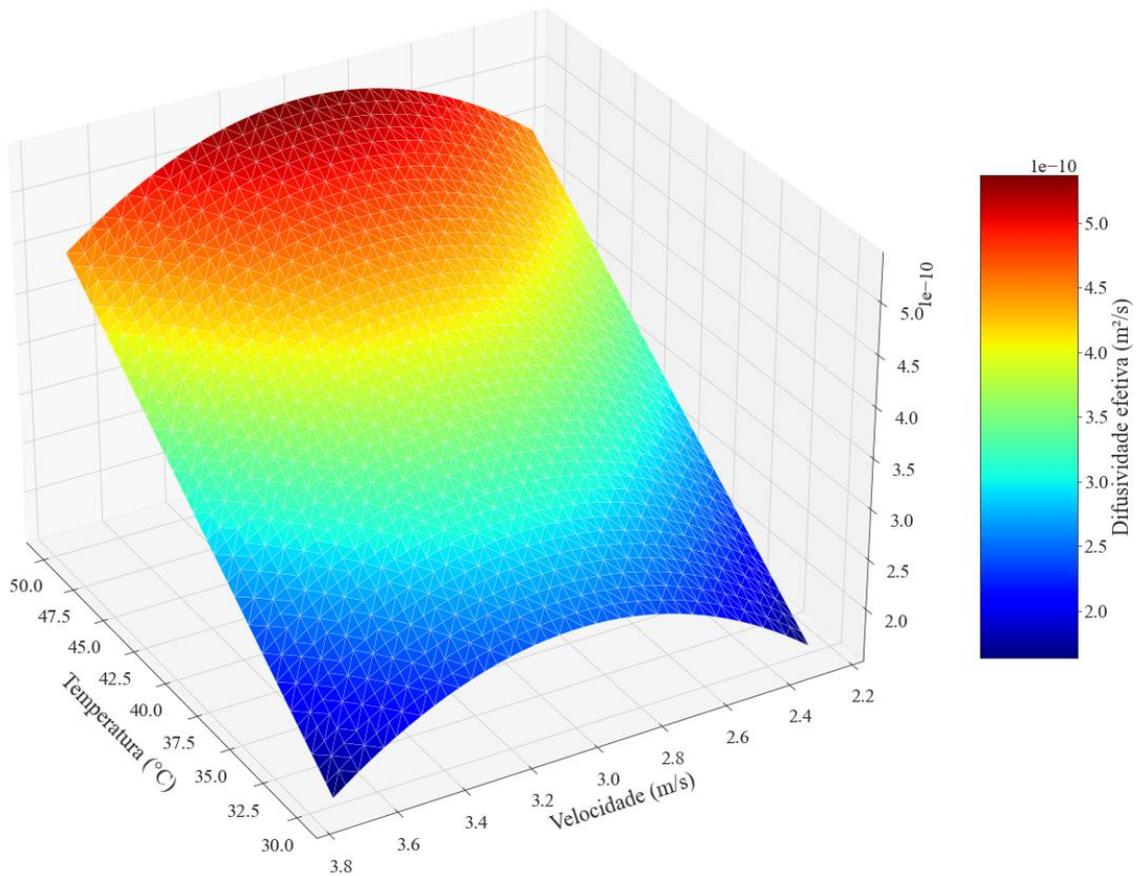


Figura 19: Superfície de resposta tridimensional para difusividade efetiva na câmara secundária



Com relação à difusividade efetiva para secagem na câmara secundária, é possível dizer que a temperatura do ar possui um efeito positivo de forma mais acentuada que a velocidade do ar, que apresenta um efeito negativo quadrático. Isso se deve ao fato do coeficiente em relação ao quadrado da velocidade ser menor do que o referente à temperatura do ar. Isso resulta em máximos valores de Def em faixas de velocidades médias e altas temperaturas do ar, com os menores valores de Def posicionados nas extremidades da faixa de valores de velocidade e baixas temperaturas do ar.

4.3 Demanda energética de secagem

Na Tabela 17, tem-se os resultados de demanda energética de secagem para cada um dos dispositivos utilizados durante a secagem. A parametrização dos dados para conseguir apresentar uma equivalência em ensaios com tempos diferentes foi baseada em uma umidade de referência. Essa umidade de referência foi definida a partir da maior umidade final dentre os ensaios que, no caso, foi de 0,44 em base seca do ensaio 5-A.

Tabela 17: Demanda energética de secagem

Ensaio	Ventilador (kWh)	Compressor (kWh)	Resistência (kWh)	Demanda Energética Total (kWh)
1-H	2,280	3,824	3,559	9,662
2-B	3,100	3,314	3,938	10,352
3-F	1,231	2,266	5,009	8,506
4-D	1,423	1,484	4,361	7,267
5-A	3,044	4,630	3,556	11,230
6-E	1,229	1,811	5,334	8,373
7-G	1,104	2,574	3,807	7,486
8-C	2,216	2,209	4,741	9,166
9-I	1,375	2,049	3,168	6,591
10-J	1,451	2,126	3,188	6,766
11-K	1,377	2,307	4,159	7,843
Conv.	1,243	0,000	3,844	5,086

Pela Tabela 17, existe uma relação direta em relação ao tempo de secagem e a demanda de energia, com uma variação de 6,591 para 11,230 kWh. Nesta relação, têm-se que quanto maior tempo de secagem para atingir a umidade referência, maiores são as demandas energéticas, com os ensaios 5-A, 2-B e 1-H com as maiores demandas. Tal comportamento é mostrado por Aktaş, Şevik e Aktekeli (2016), que mostraram que os ensaios mais longos foram aqueles que apresentaram maiores gastos de energia, assim como o compressor sendo o maior consumidor. Da mesma forma, o método convectivo convencional foi o mais rápido e, por conta da bomba estar desligada, foi também o de menor demanda energética para secagem.

Tais resultados são diferentes dos obtidos por Taşeri et al. (2018), que não obtiveram diferença significativa nos valores de demanda de energia elétrica com diferentes valores de velocidade do ar. Em compensação, Mohammadi, Tabatabaekoloor e Motevali (2019) demonstraram uma diminuição da demanda de energia com o aumento da temperatura para a secagem de 45 a 65°C, sem recirculação, apesar de apresentarem valores de demanda maiores do que os ciclos com 100% de recirculação do ar, assim como Aktaş, Şevik e Aktekeli (2016), que atestaram que quanto maior a temperatura, menores as demandas energéticas, pois foram os ensaios com menores tempos de processo.

4.3.1 Planejamento Fatorial

A Tabela 18 mostra a análise de variância - ANOVA para o planejamento fatorial da demanda energética de secagem com todos os coeficientes. Neste caso, nenhum coeficiente foi significativo, com exceção feita ao β_0 .

Tabela 18: ANOVA do planejamento fatorial para a demanda energética de secagem

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	0,789	0,575	-
β	8,1411	-	-	-	-	0,001	Verdadeiro
X1	-1,0603	1	4,497	4,497	1,934	0,259	Falso
X2	-0,1370	1	0,075	0,075	0,032	0,869	Falso
X1X2	-0,4821	1	0,930	0,930	0,400	0,572	Falso
Resíduo	-	3	6,977	2,326	-	-	-

Após a retirada dos coeficientes não significativos, foi atestado que nenhum deles se tornou significativo. Com isso, o modelo do planejamento fatorial para a demanda energética de secagem não foi significativo.

4.3.2 DCCR

A Tabela 19 mostra a análise de variância - ANOVA para o DCCR da demanda energética de secagem. Diferentemente do mostrado na Tabela 18, referente ao planejamento fatorial, com o uso do DCCR, sem a remoção de coeficientes, os efeitos significativos foram o linear da temperatura e os quadráticos da temperatura e velocidade do ar.

Tabela 19: ANOVA do DCCR para a demanda energética de secagem

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	10,000	0,012	-
β	7,0674	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	-1,0367	1	8,573	8,573	21,136	0,006	Verdadeiro
X2	0,2283	1	0,416	0,416	1,025	0,358	Falso
X1X2	-0,4821	1	0,930	0,930	2,292	0,190	Falso
X1²	1,3429	1	8,349	8,349	20,583	0,006	Verdadeiro
X2²	0,6007	1	2,021	2,021	4,983	0,076	Verdadeiro
Resíduo	-	5	2,028	0,406	-	-	-

A Tabela 20 apresenta a Análise de Variância - ANOVA da demanda energética de secagem para o DCCR com a remoção dos coeficientes não significativos. Isso posto, assim como relatado na Tabela 19, os efeitos significativos continuaram sendo o linear da

temperatura e os quadráticos da temperatura e velocidade do ar. Neste caso, houve um aumento no valor de F de 10 para 13,1.

Tabela 20: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a demanda energética de secagem

	Coeficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	13,100	0,003	-
β	7,0674	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	-1,0367	1	8,573	8,573	17,789	0,004	Verdadeiro
X1²	1,3429	1	8,349	8,349	17,324	0,004	Verdadeiro
X2²	0,6007	1	2,021	2,021	4,194	0,080	Verdadeiro
Resíduo	-	7	3,373	0,482	-	-	-

A Equação (25) é a equação codificada para a demanda energética de secagem:

$$D_{total}(kWh) = 7,0674 - 1,0367 \times X_1 + 1,3429 \times X_1^2 + 0,6007 \times X_2^2 \quad (25)$$

O modelo da Equação (25) apresentou valores de R² e R²-ajustado de 0,849 e 0,784, respectivamente; com AIC e BIC de 26,215 e 27,807; quadrado médio dos resíduos de 0,482 e f-valor de 0,0029, demonstrando que o modelo é significativo e apresenta capacidade de predição para a demanda energética de secagem.

A Figura 20 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para a demanda energética durante a secagem, enquanto que a Figura 21 mostra as curvas em nível do modelo da demanda energética de secagem. A Figura 22 mostra a representação tridimensional da superfície de resposta para a demanda energética de secagem, dada pela equação (25).

Figura 20: Dados experimentais e preditos para a demanda energética de secagem pelo DCCR

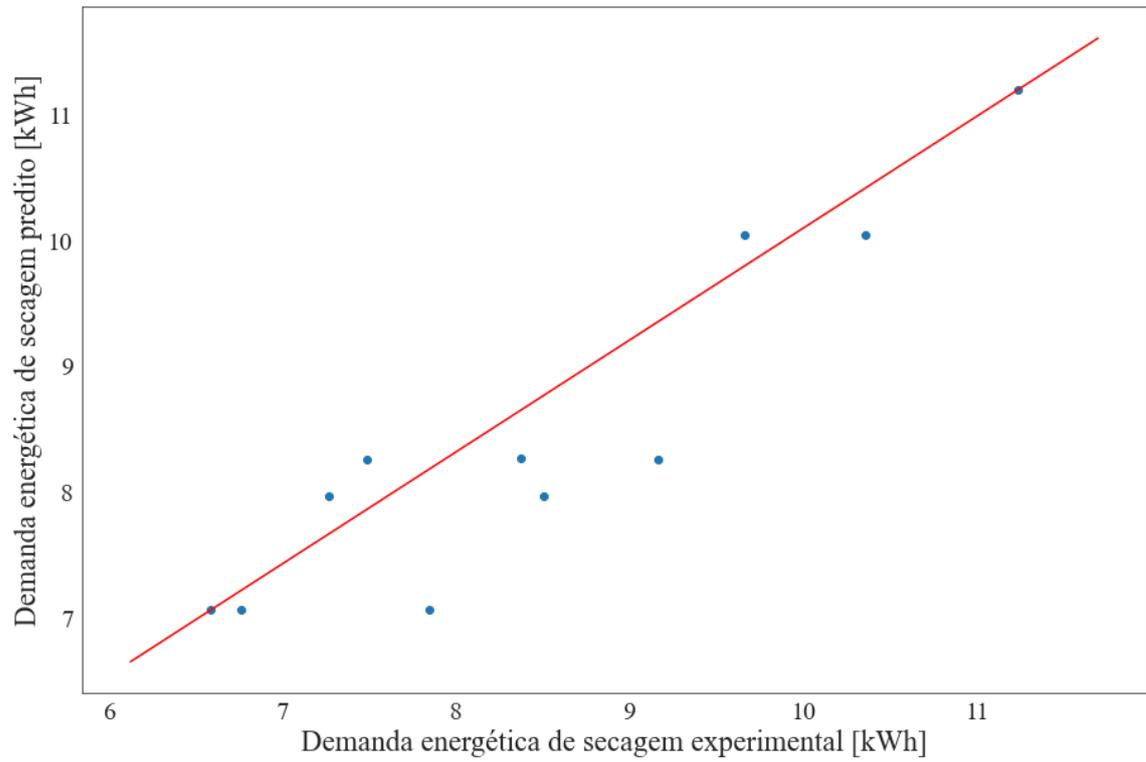


Figura 21: Superfície de resposta com curvas em nível para demanda energética de secagem

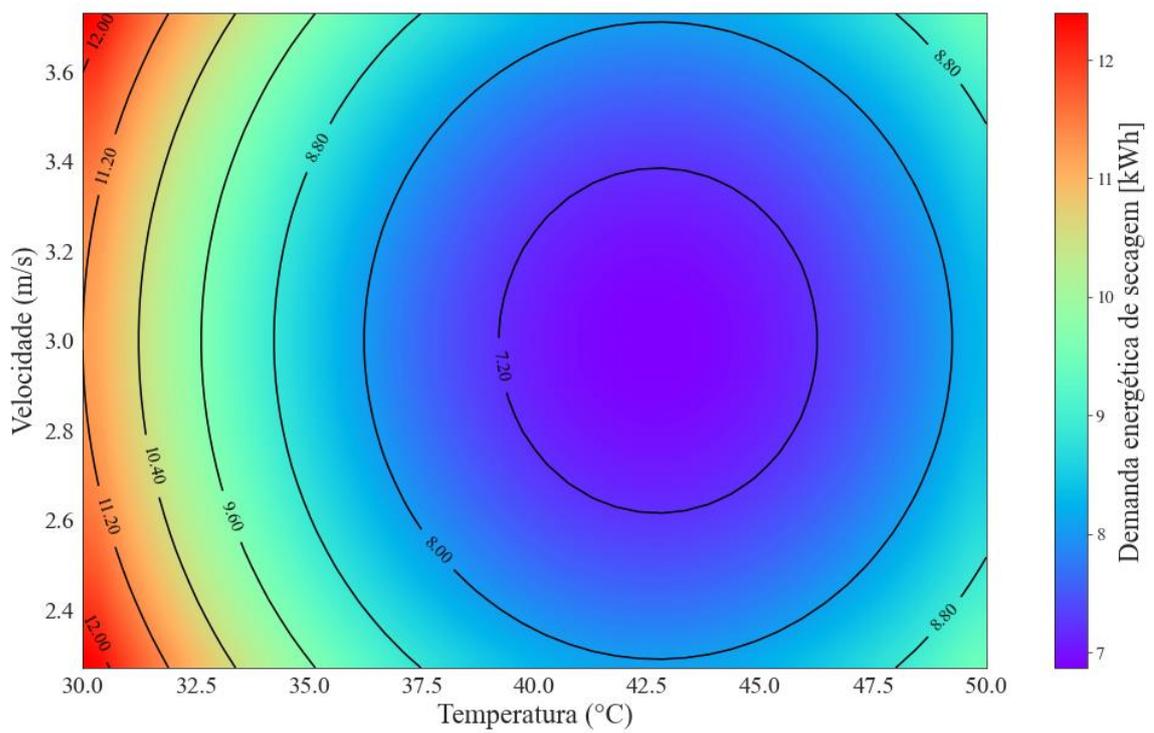
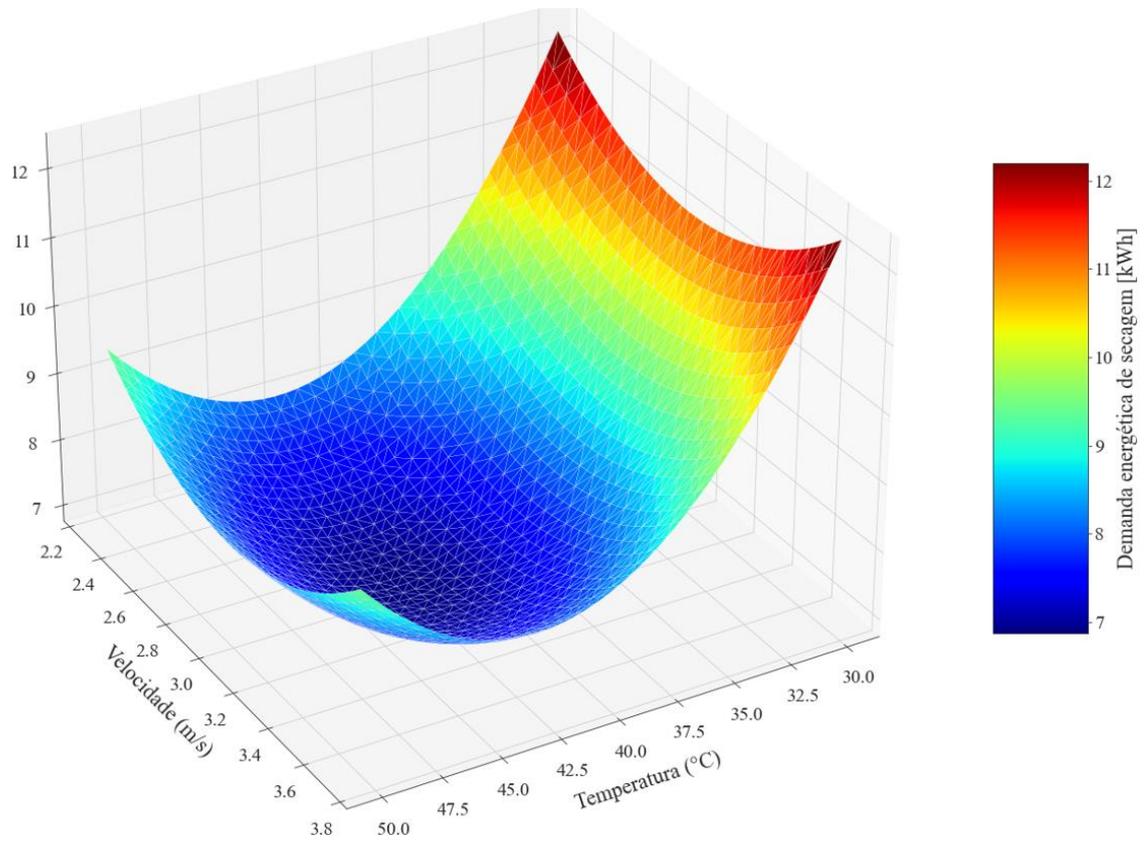


Figura 22: Superfície de resposta tridimensional sobre demanda energética de secagem



Com relação à demanda energética de secagem, os fatores apresentaram efeitos quadráticos positivos para as velocidade e temperatura do ar e linear negativo para a temperatura de secagem. Tais resultados demonstram que ensaios com menores temperaturas e valores extremos de velocidade do ar tendem a apresentar maiores demandas energéticas na secagem. Ressalta-se que a possível região de mínimos valores desta resposta está nas faixas de 40 a 47,5°C e 2,6 a 3,4 m/s. Outrossim, para altas temperaturas, tem início uma tendência de aumento de demanda energética, iniciando-se a utilização mais frequente e intensiva das resistências elétricas para manutenção dessas altas temperaturas.

4.4 Desempenho

Na Tabela 21, são apresentados os resultados com relação ao desempenho da bomba de calor e da secagem de morango.

Tabela 21: SMER e COP

Ensaio	SMER (kg/kWh)	COP
1-H	0,298	1,72
2-B	0,056	1,73
3-F	0,489	1,75
4-D	1,010	1,72
5-A	0,034	1,73
6-E	0,538	1,90
7-G	0,447	1,76
8-C	0,713	1,71
9-I	0,513	1,67
10-J	0,383	1,64
11-K	0,088	1,74
Conv.	0,085	-

Os valores de SMER foram próximos se comparados aos obtidos por Yousaf et al. (2019) que, para a configuração aberta, obtiveram valores entre 0,148 a 0,217 kg/kWh, enquanto os apresentados no presente trabalho variaram na faixa de 0,034 a 1,010 kg/kWh. No trabalho realizado por Zlatanović, Komatina e Antonijević (2017), são apresentados valores de SMER entre 0,047 e 0,651 kg/kWh com temperatura de secagem variando de 35 a 55°C e velocidade do ar entre 1,5 e 2 m/s, na secagem de fatias de maçã, batata e banana, em um secador com bomba de calor de ciclo fechado. Estes valores são maiores que os apresentados por Mohammadi, Tabatabaekoloor e Motevali (2019), que secaram kiwi com temperaturas de 45 a 65°C com a variação de 0 a 100% de circulação e obtiveram valores de 0,052, 0,063 e 0,071 kg/kWh para 45, 55 e 65°C, respectivamente, todos com 0% de recirculação, considerado um sistema aberto.

Com a configuração aberta da bomba, Liu et al. (2018) demonstraram que os valores de SMER variaram com a temperatura e umidade relativa do ambiente, assim como o que ocorreu durante os ensaios no presente trabalho. Pal, Khan e Mohanty (2008) e Tunçkal et al. (2018) demonstraram uma relação positiva entre o aumento do SMER e da temperatura de secagem, enquanto que Mohammadi, Tabatabaekoloor e Motevali (2019) mostraram que a diminuição do SMER está diretamente relacionada com o aumento da demanda de energia do sistema. Na Tabela 21, esta tendência de diminuição do SMER ocorreu com o aumento da demanda de energia, em função de maiores tempos de secagem, relatando a influência negativa no consumo energético, enquanto uma relação positiva aconteceu nos ensaios de menor tempo, acarretando menores demandas e maiores valores de SMER, devido às altas

temperaturas (COŞKUN et al., 2017; TUNÇKAL et al., 2018). A bomba de calor apresentou, no geral, uma melhor capacidade de remoção de conteúdo de umidade do produto que o sistema convectivo, mesmo consumindo menos energia para secagem (Tabela 17 e 21).

No caso do COP, não foi verificada uma tendência significativa com relação às fatores dos ensaios, com o seu valor variando de 1,64 a 1,9, com uma média de 1,74. Estes resultados são menores se comparados aos com configuração aberta de bomba de calor testada por Kivevele e Huan (2015), que obtiveram um valor de COP de 3,75, ao mesmo tempo em que são maiores que 1,409 para configuração aberta testada por Yousaf et al. (2019). Ao mesmo tempo, a não relação com os parâmetros operacionais vai ao sentido contrário do afirmado por Coşkun et al. (2017) e Tunçkal et al (2018), que relataram que, quanto maior a temperatura do ar de secagem, maiores os valores de COP, mas para configuração fechada.

O COP apresentou uma variação com relação aos ensaios devido à variação de umidade relativa e temperatura do ambiente durante o período de ensaios. Como mostrado no comportamento do SMER, a variação entre períodos quentes e frios durante os dias foram apresentados por Huang et al. (2019), que analisaram a sazonalidade do ambiente em diferentes partes do mundo e sua relevância com o COP, mostrando que em ambientes frios, o COP apresenta uma diminuição quando comparado a regiões mais quentes.

4.4.1 Planejamento Fatorial

4.4.1.1 COP

A Tabela 22 apresenta a análise de variância - ANOVA referente ao planejamento fatorial do COP. É possível verificar que nenhum dos coeficientes apresentou significância, com exceção do intercepto β_0 .

Tabela 22: ANOVA do planejamento fatorial para o COP

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	0,057	0,979	-
β	1,7129	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	5,00E-03	1	1,00E-04	1,00E-04	0,028	0,877	Falso
X2	-5,00E-03	1	1,00E-04	1,00E-04	0,028	0,877	Falso
X1X2	-1,00E-02	1	4,00E-04	4,00E-04	0,114	0,758	Falso
Resíduo	-	3	1,05E-02	3,51E-03	-	-	-

Após a retirada dos coeficientes não significativos, verificou-se que não restou nenhum coeficiente significativo para representar o modelo. Com isso, o modelo proposto para o COP no planejamento fatorial não é significativo.

4.4.1.2 SMER

A Tabela 23 apresenta a análise de variância - ANOVA dos valores de SMER em relação ao planejamento fatorial com todos os coeficientes significativos e não significativos. Diferentemente do modelo com o COP, para o SMER, apenas um coeficiente foi considerado significativo, além do intercepto β_0 , o coeficiente referente ao efeito linear da temperatura do ar.

Tabela 23: ANOVA do planejamento fatorial para o SMER

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	3,903	0,146	-
β	0,4053	-	-	-	-	0,001	Verdadeiro
X1	0,2862	1	3,28E-01	3,28E-01	7,786	0,068	Verdadeiro
X2	0,0694	1	1,93E-02	1,93E-02	0,458	0,547	Falso
X1X2	0,1909	1	1,46E-01	1,46E-01	3,464	0,160	Falso
Resíduo	-	3	1,26E-01	4,21E-02	-	-	-

A Tabela 24 mostra o modelo somente com os coeficientes significativos para o planejamento fatorial com o SMER. Neste caso, com a remoção do coeficiente de interação entre a velocidade e temperatura do ar, assim como o coeficiente referente ao linear da velocidade do ar, somente a componente referente ao linear da temperatura se manteve significativo para o modelo, com aumento dos seus p-valores e estatística-F.

Tabela 24: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para o SMER

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	1	-	-	5,624	0,064	-
β	0,4053	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	0,2862	1	3,28E-01	3,28E-01	5,624	0,064	Verdadeiro
Resíduo	-	5	2,91E-01	5,83E-02	-	-	-

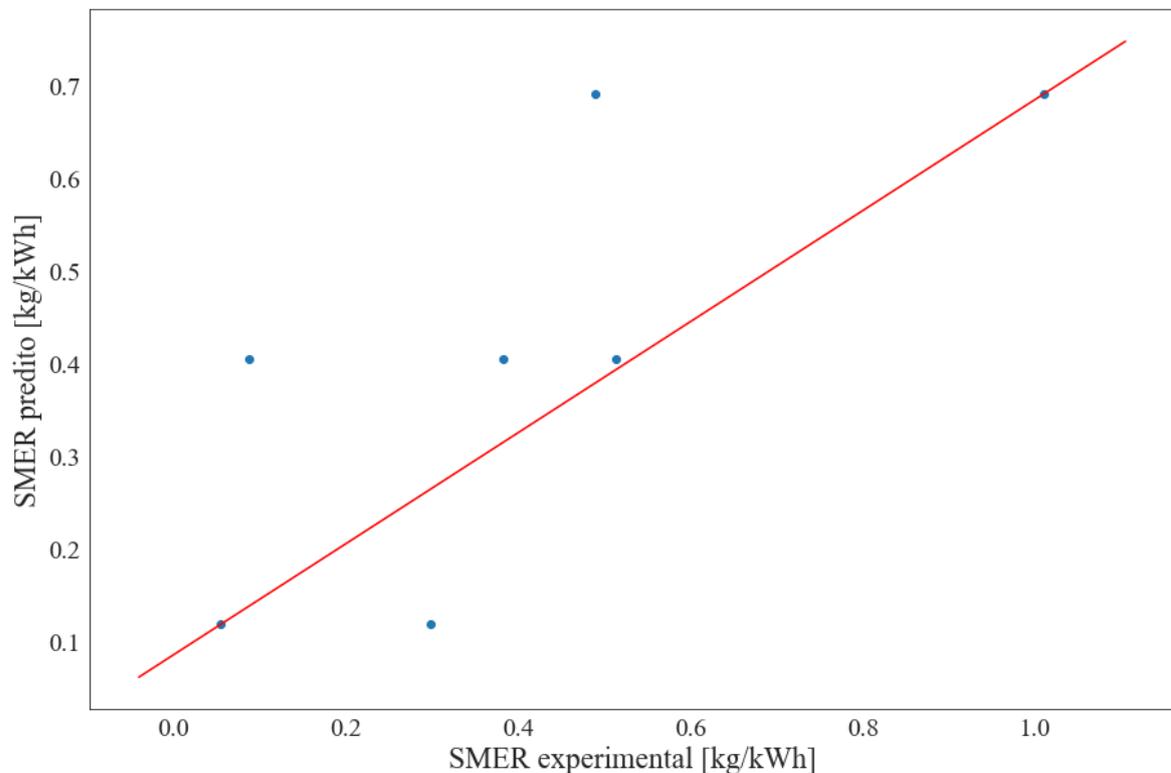
A Equação (26) é a equação codificada para o SMER do sistema:

$$SMER(kg/kWh) = 0,4053 + 0,2862 \times X_1 \quad (26)$$

A Equação (26) apresentou valores de R^2 e R^2 -ajustado de 0,529 e 0,435, respectivamente; com AIC e BIC de 1,609 e 1,501; quadrado médio dos resíduos de 0,058 e f-valor de 0,064.

A Figura 23 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para difusividade efetiva da câmara primária.

Figura 23: Dados experimentais e preditos para o SMER pelo planejamento fatorial



A variável independente temperatura do ar possui um efeito positivo na difusividade efetiva na câmara secundária.

4.4.2 Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR

4.4.2.1 COP

A Tabela 25 apresenta a análise de variância - ANOVA do DCCR para o COP com todos os coeficientes relacionados ao modelo. Assim como a Tabela 22, nenhum dos coeficientes do modelo apresentou significância.

Tabela 25: ANOVA do DCCR para o COP

	Coeficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	1,349	0,375	-
β	1,6902	-	-	-	-	0,015	Verdadeiro
X1	0,0326	1	0,008	0,008	2,306	0,189	Falso
X2	-0,0113	1	0,001	0,001	0,280	0,619	Falso
X1X2	-0,0100	1	0,000	0,000	0,109	0,755	Falso
X1²	0,0513	1	0,014	0,014	3,863	0,107	Falso
X2²	0,0111	1	0,001	0,001	0,188	0,683	Falso
Resíduo	-	5	0,018	0,004	-	-	-

Após a retirada de alguns coeficientes não significativos, a modelagem com DCCR do COP não apresentou significância em nenhum coeficiente, restando apenas o intercepto e, com isso, o modelo do COP não é significativo.

4.4.2.2 SMER

A Tabela 26 apresenta a análise de variância - ANOVA do DCCR em relação ao SMER com todos os coeficientes da regressão. É possível identificar que o único coeficiente significativo é o referente ao efeito linear da temperatura do ar.

Tabela 26: ANOVA do DCCR do SMER

	Coeficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	6,191	0,034	-
β	0,3280	-	-	-	-	0,018	Verdadeiro
X1	0,2327	1	0,432	0,432	17,845	0,008	Verdadeiro
X2	0,0818	1	5,34E-02	5,34E-02	2,206	0,198	Falso
X1X2	0,1909	1	1,46E-01	1,46E-01	6,025	0,058	Verdadeiro
X1²	-0,0138	1	1,72E-02	1,72E-02	0,709	0,438	Falso
X2²	0,1342	1	1,01E-01	1,01E-01	4,170	0,097	Verdadeiro
Resíduo	-	5	1,21E-01	2,42E-02	-	-	-

A Tabela 27 mostra a análise de variância - ANOVA para o DCCR com relação ao SMER incluindo somente os coeficientes significativos após a remoção dos não

significativos. Diferentemente do apresentado no item 4.4.1.2, apenas o efeito linear da temperatura do ar foi significativo, ocorrendo um aumento no valor de F de 6,191 para 9,238.

Tabela 27: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para o SMER

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	9,238	0,008	-
β	0,3150	-	-	-	-	0,002	Verdadeiro
X1	0,2327	1	4,32E-01	4,32E-01	17,229	0,004	Verdadeiro
X1X2	0,1909	1	1,46E-01	1,46E-01	5,817	0,047	Verdadeiro
X2²	0,1382	1	1,17E-01	1,17E-01	4,668	0,068	Verdadeiro
Resíduo	-	7	1,75E-01	2,51E-02	-	-	-

A Equação (27) é a equação codificada para o SMER.

$$SMER(kg/kWh) = 0,3150 + 0,2327 \times X_1 + 0,1909 \times X_1 \times X_2 + 0,1382 \times X_2^2 \quad (27)$$

A Equação (27) apresentou valores de R² e R²-ajustado de 0,798 e 0,712, respectivamente; com AIC e BIC de -6,307, -4,715; quadrado médio dos resíduos de 0,0251 e f-valor de 0,008, demonstrando que o modelo é significativo e apresenta capacidade de predição para o SMER.

A Figura 24 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para os valores de SMER do sistema durante a secagem, enquanto que a Figura 25 mostra as curvas em nível do modelo referente aos valores de SMER. A Figura 26 mostra a representação tridimensional da superfície de resposta para os resultados de SMER do sistema de secagem dada pela equação (27).

Figura 24: Dados experimentais e preditos para o SMER pelo DCCR

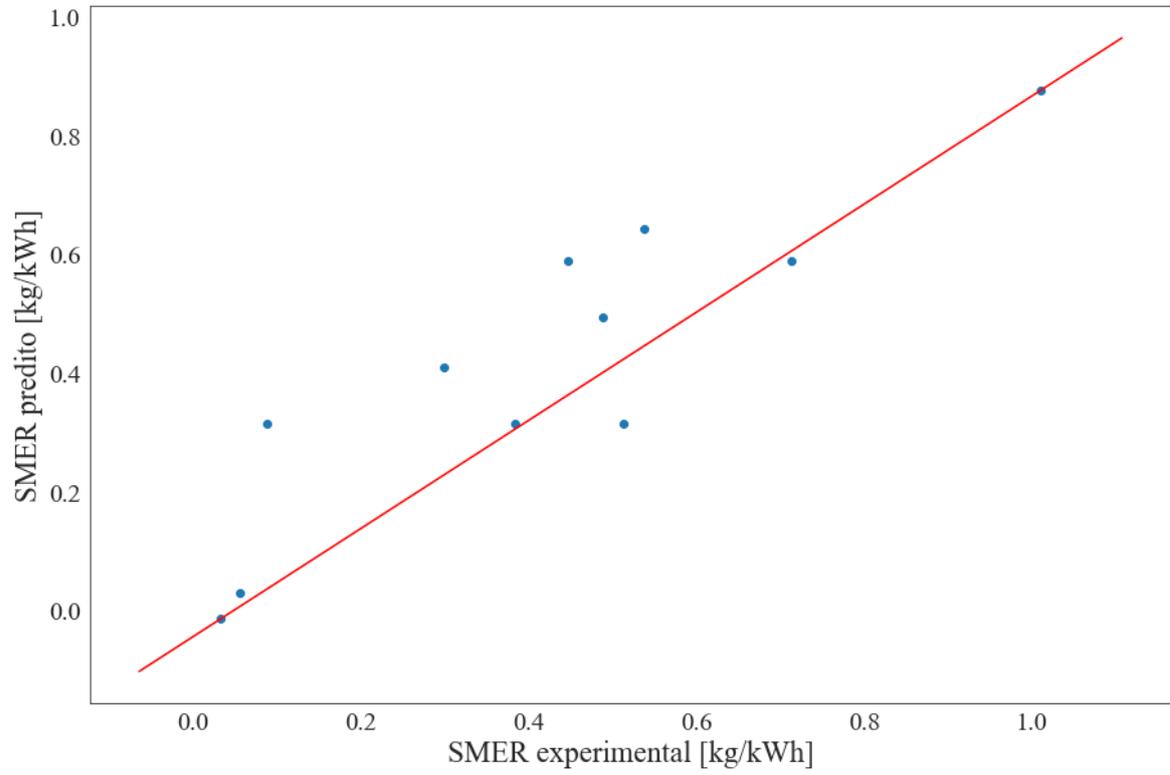


Figura 25: Superfície de resposta com curvas de nível sobre o SMER

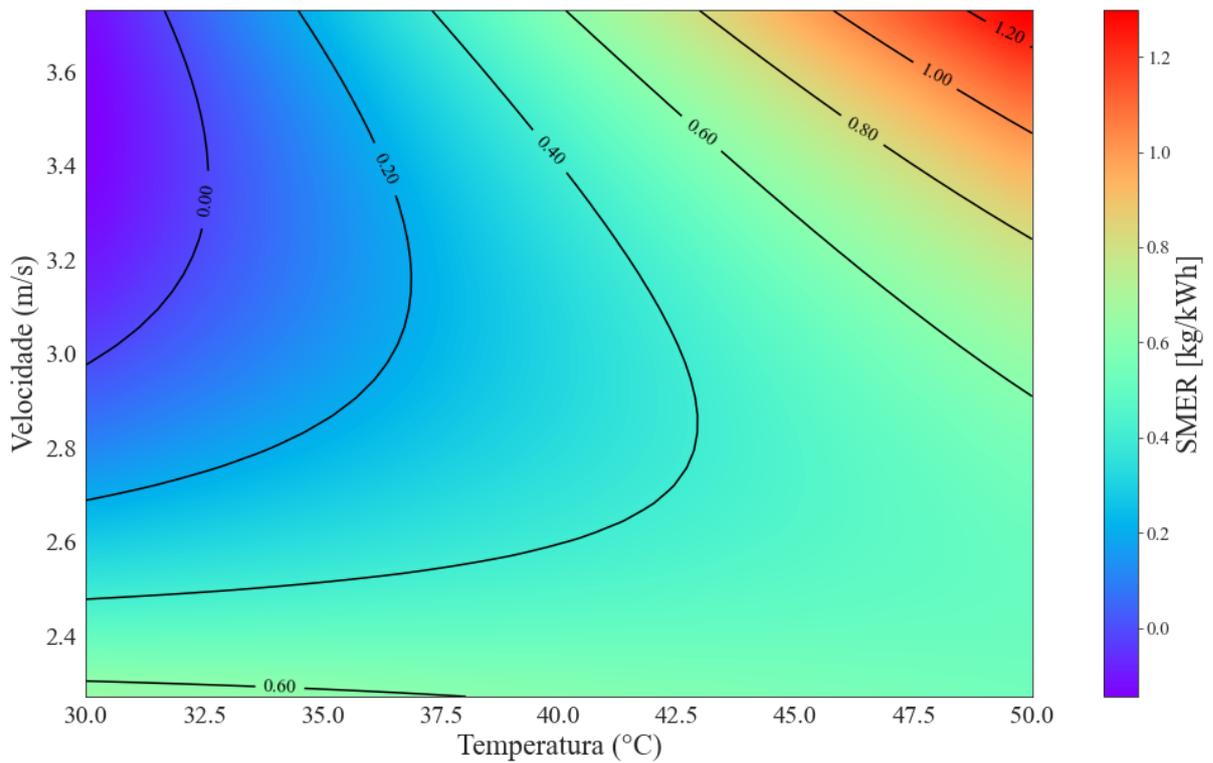
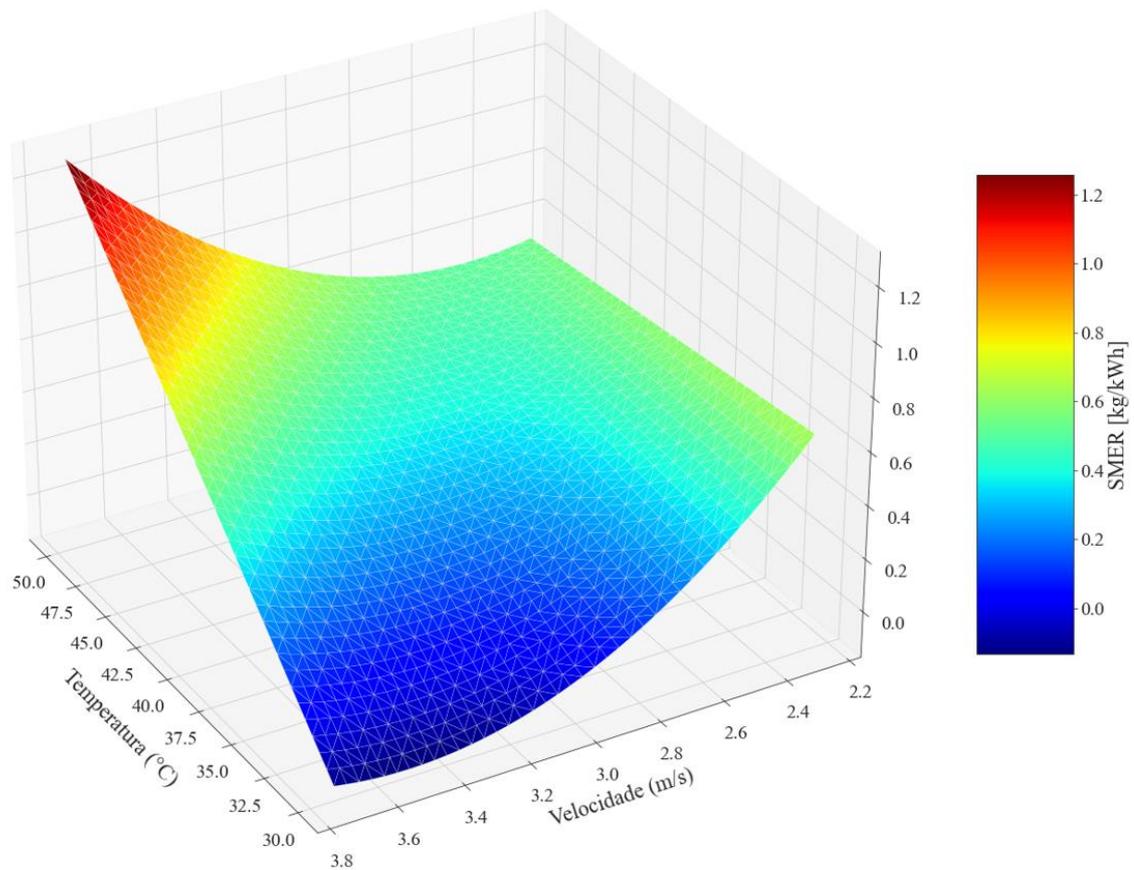


Figura 26: Superfície de resposta tridimensional para o SMER



Com relação aos resultados de SMER da bomba de calor, pode-se dizer que existe uma tendência positiva para o aumento da extração com o aumento da velocidade e temperatura do ar. Tal comportamento é plausível, pois os maiores valores de temperatura do ar aumentam a difusividade efetiva na secagem do produto, provocando maiores gradientes de temperaturas internas e conseqüente evaporação e migração de água pelo produto de forma mais acentuada, assim como a velocidade do ar proporciona um aumento nos coeficientes convectivos de calor e massa, aumentando a transferência de calor e massa. Além disso, pode-se correlacioná-los ao tempo de secagem, uma vez que os ensaios com menores tempos de secagem, como o ensaio 4-D, foram aqueles com os maiores valores de SMER, enquanto que ensaios como o ensaio 5-A (tempos de secagem mais longos) foram os menores em extração por energia induzida do sistema.

4.5 Concentração de antocianinas

A Tabela 28 representa os teores de antocianinas encontrados nos produtos secos de cada um dos ensaios realizados para câmara primária e câmara secundária.

Tabela 28: Concentração de antocianinas nas amostras da câmara primária e da câmara secundária.

Ensaio	Câmara Primária			Câmara Secundária		
	Antocianinas (mg/100g b.s.)	±	σ (mg/100g b.s.)	Antocianinas (mg/100g b.s.)	±	σ (mg/100g b.s.)
1-H	13,119	±	0,504	17,16	±	0,411
2-B	9,713	±	0,671	9,21	±	0,300
3-F	12,336	±	0,615	16,52	±	0,416
4-D	17,840	±	0,201	16,34	±	0,800
5-A	10,907	±	0,305	12,56	±	1,464
6-E	14,228	±	0,804	26,30	±	1,820
7-G	11,320	±	1,378	11,69	±	0,621
8-C	14,714	±	0,713	10,34	±	0,993
9-I	17,391	±	0,920	11,11	±	0,632
10-J	10,028	±	0,371	13,60	±	1,172
11-K	10,640	±	0,305	12,97	±	0,382
Conv.	23,279	±	0,405	21,29	±	0,961

Com relação ao comportamento dos dados de antocianinas, tem-se que, para ambas as localidades, apresentaram valores bem abaixo dos apresentados por Patras et al. (2009), que relataram concentrações de 202,27 e 145,82 mg/100g b.s. (base seca) para morango sem e com processo térmico, respectivamente, distante dos 26,30 e 16,00 mg/100g b.s. para o morango com o maior teor de antocianinas após a secagem e fresco, respectivamente, com o primeiro mostrado na Tabela 28.

As antocianinas apresentaram uma maior degradação de seu conteúdo para com os ensaios que apresentaram maiores tempos de secagem, ou seja, maior tempo de exposição a secagem acarretou variação do teor de antocianinas com a sua degradação. Patras et al. (2010) relatam que as antocianinas são altamente influenciáveis pela temperatura e pela sua exposição. Aurélio, Edgardo e Navarro-Galindo (2004) apresentaram um estudo de medição da taxa de degradação térmica das antocianinas do hibisco. Concluíram que, com o aumento do tempo para maiores temperaturas, a taxa decresce, enquanto que para mais baixas ocorreu alta taxa e constante.

4.5.1 Câmara primária

4.5.1.1 Planejamento Fatorial

A Tabela 29 apresenta a análise de variância - ANOVA do planejamento fatorial para os teores de antocianinas do morango seco para a câmara primária com todos os coeficientes de regressão, sendo eles significativos e não significativos. Percebe-se que todos os coeficientes foram não significativos, com exceção do intercepto β_0 .

Tabela 29: ANOVA do planejamento fatorial para teor de antocianinas (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	1,014	0,495	-
β	13,0094	-	-	-	-	0,002	Verdadeiro
X1	1,8359	1	13,483	13,483	1,192	0,355	Falso
X2	0,5246	1	1,101	1,101	0,097	0,776	Falso
X1X2	2,2273	1	19,844	19,844	1,754	0,277	Falso
Resíduo	-	3	33,936	11,312	-	-	-

Após a remoção de coeficientes não significativos, nenhum coeficiente do modelo de regressão do planejamento fatorial foi considerado significativo ($p\text{-valor} \leq 0,10$). Com isso, o modelo não apresentou significância para os fatores estudados.

4.5.1.2 Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR

A Tabela 30 mostra a análise de variância - ANOVA do DCCR para a concentração de antocianinas do morango seco. Neste caso, assim como para o planejamento fatorial, analisando todos os coeficientes de regressão, identifica-se que nenhum deles foi significativo com exceção do intercepto β_0 .

Tabela 30: ANOVA do DCCR para o teor de antocianinas (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	1,247	0,407	-
β	12,6842	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	1,5079	1	18,137	18,137	2,548	0,171	Falso
X2	0,8629	1	5,939	5,939	0,834	0,403	Falso
X1X2	2,2273	1	19,844	19,844	2,788	0,156	Falso
X1²	0,0567	1	0,004	0,004	0,001	0,982	Falso
X2²	0,2828	1	0,448	0,448	0,063	0,812	Falso
Resíduo	-	5	35,587	7,117	-	-	-

A Tabela 31 apresenta a análise de variância - ANOVA do DCCR para a quantidade de antocianinas no morango seco. Com a remoção de coeficientes não significativos, o efeito linear da temperatura do ar e o efeito de interação entre velocidade e temperatura do ar foram significativos para este modelo, com um aumento do valor de F de 1,247 para 3,619.

Tabela 31: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para a antocianina (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	2	-	-	3,619	0,076	-
β	12,9304	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	1,5079	1	1,81E+01	1,81E+01	3,456	0,100	Verdadeiro
X1X2	2,2273	1	1,98E+01	1,98E+01	3,782	0,088	Verdadeiro
Resíduo	-	8	4,20E+01	5,25E+00	-	-	-

A Equação (28) é a equação codificada para concentração de antocianinas nos morangos secos:

$$AA(mg/100g_{seco}) = 12,9304 + 1,5079 \times X_1 + 2,2273 \times X_1 \times X_2 \quad (28)$$

A Equação (28) apresentou valores de R² e R²-ajustado de 0,475 e 0,344, respectivamente; com AIC e BIC de 51,949 e 53,142; quadrado médio dos resíduos de 5,247 e f-valor de 0,076.

A Figura 27 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para os valores de concentração de antocianinas no morango seco, enquanto que a Figura 28 é mostra as curvas em nível do modelo referente aos valores de concentração de antocianinas. A Figura 29 mostra a representação tridimensional da superfície de resposta para os resultados de concentração de antocianinas no produto seco dada pela Equação (28).

Figura 27: Gráfico de dados experimentais e preditos para a antocianina da câmara primária pelo DCCR

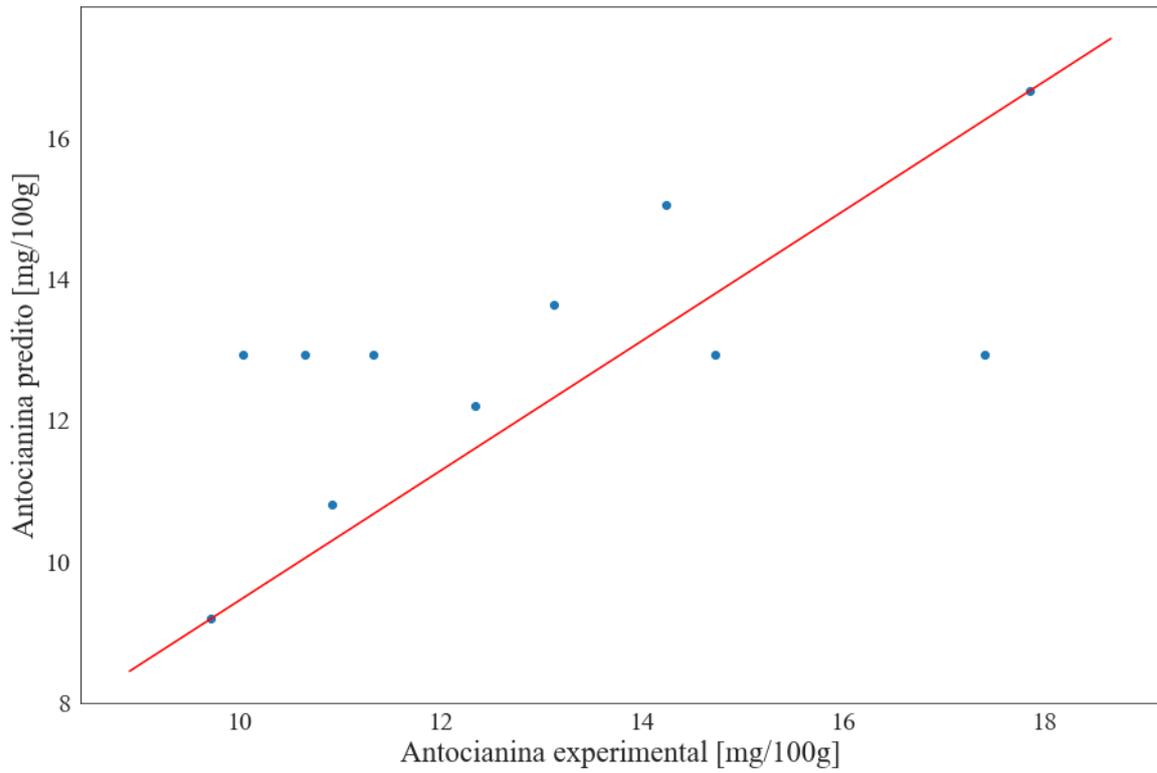


Figura 28: Superfície de resposta com curvas em nível para teor de antocianinas na câmara primária

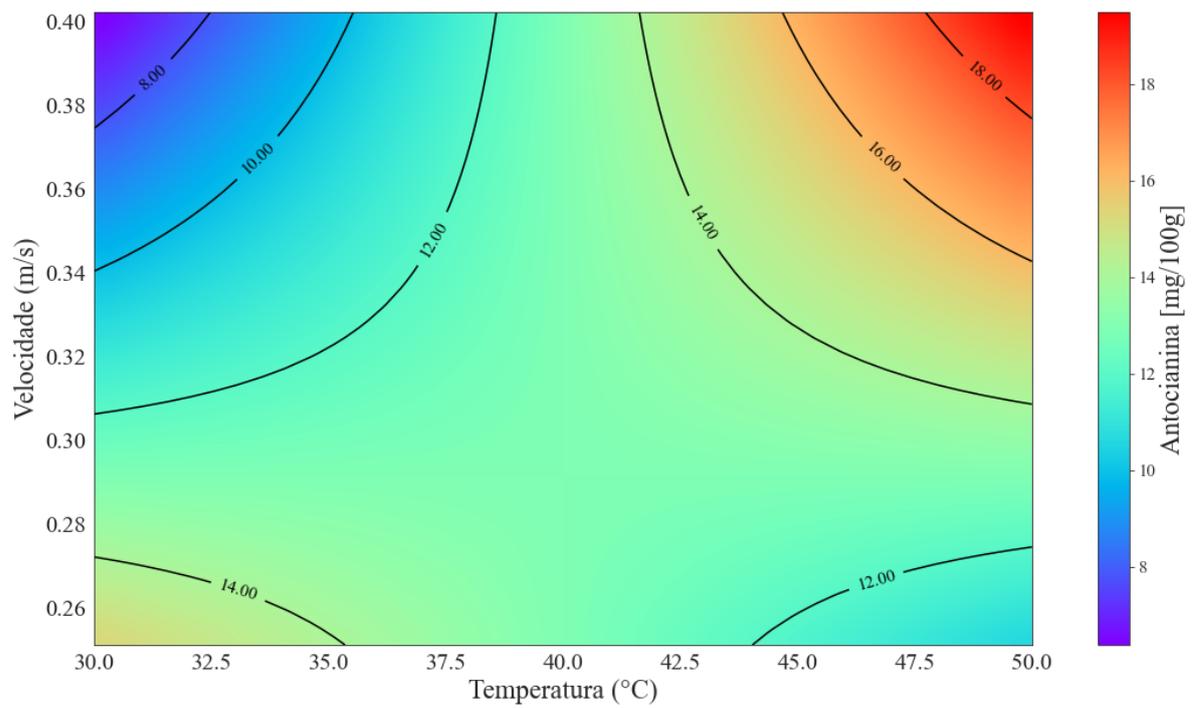
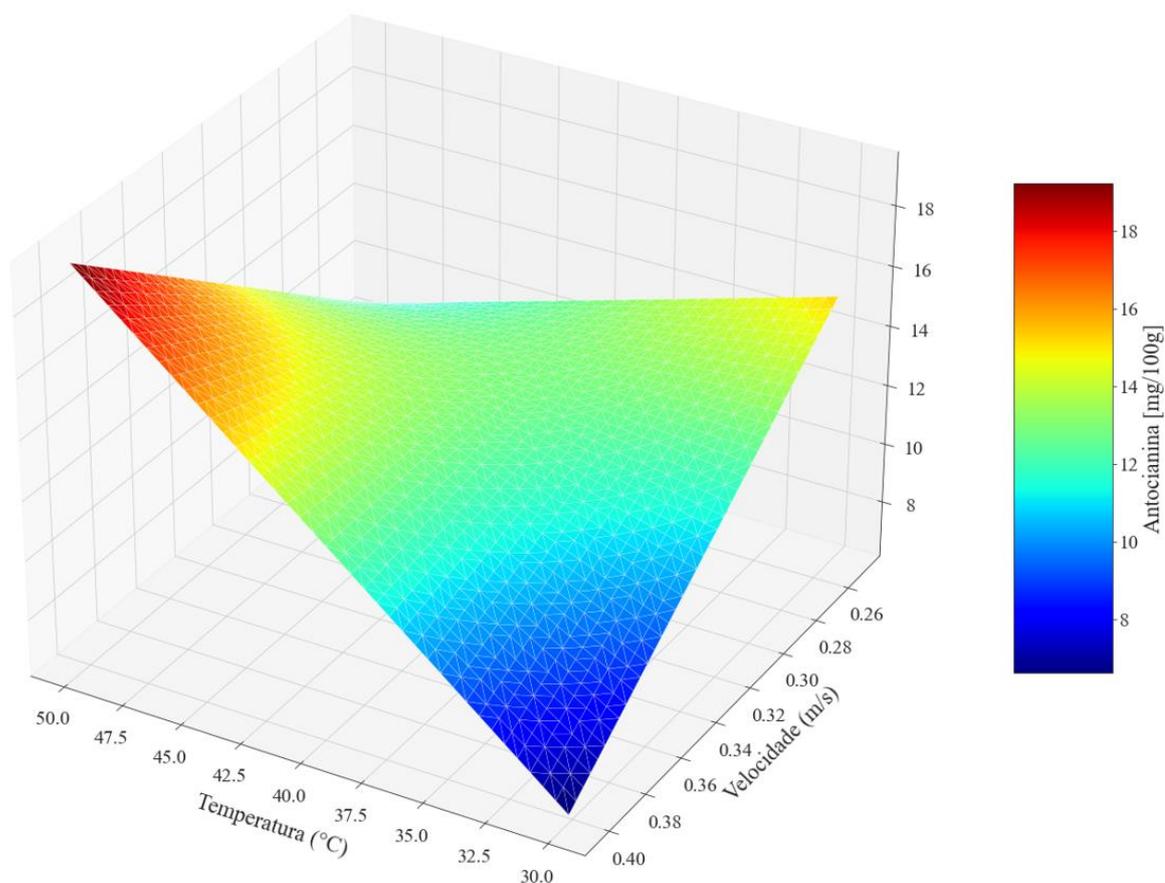


Figura 29: Superfície de resposta tridimensional para teor de antocianinas na câmara primária



Com relação à superfície de resposta da Figura 29, nota-se uma maior manutenção do conteúdo de antocianinas do morango seco, com aumento dos parâmetros operacionais da temperatura e velocidade do ar. Esse comportamento de aumento de antocianinas, com uma possível conservação do seu conteúdo, principalmente em todo eixo temperatura para a faixa de 0,28 a 0,30 m/s (Figura 28). Como relatado por Martynenko e Chen (2016), a degradação de mirtilo não foi significativo na faixa de 2,5 a 80 °C. A explicação para esse comportamento se deve à inibição das enzimas polifenoloxidase e peroxidase. Tais enzimas podem ter sido inativadas até 80°C, como mostrado por Martynenko e Chen (2016), enquanto que Patra et al. (2010) relata que até 50°C, a polifenoloxidase permanece inativa e que tratamentos acima desta temperatura podem acarretar reações indesejáveis.

Uma das possíveis explicações para esse comportamento contraditório, pois as antocianinas são compostos bioquímicos termossensíveis se dá pela influência e exposição ao ar de secagem, permitindo assim a oxidação (CAM et al., 2018) do seu conteúdo a longos períodos de exposição. Esse artigo demonstra que a exposição de morangos a ensaios com ar apresentou maiores degradações que a liofilização e com atmosfera modificada.

4.5.2 Câmara secundária

4.5.2.1 Planejamento Fatorial

A Tabela 29 apresenta a análise de variância - ANOVA do planejamento fatorial para as concentrações de antocianinas no morango seco com todos os coeficientes de regressão significativos e não significativos. Percebe-se que todos os coeficientes foram não significativos, com exceção do intercepto β_0 .

Tabela 32: ANOVA do planejamento fatorial para teor de antocianinas (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	3,504	0,165	-
β	13,8450	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	1,6193	1	10,489	10,489	2,618	0,204	Falso
X2	-2,0332	1	16,535	16,535	4,128	0,135	Falso
X1X2	1,9419	1	15,084	15,084	3,765	0,148	Falso
Resíduo	-	3	12,018	4,006	-	-	Falso

Após a remoção de coeficientes, nenhum coeficiente do modelo de regressão do planejamento fatorial foi considerado significativo ($p\text{-valor} \leq 0,10$). Com isso, o modelo não apresenta significância para os fatores estudados.

4.5.2.2 Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR

A Tabela 33 mostra a análise de variância - ANOVA do DCCR para a concentração de antocianinas do morango seco na câmara secundária. Neste caso, dois coeficientes foram significativos dentro de todo o modelo base, sendo eles o linear e quadrático da temperatura do ar, além do intercepto β_0 .

Tabela 33: ANOVA do DCCR para a antocianina (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	6,596	0,03	-
β	12,5621	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	3,2408	1	83,772	83,772	14,141	0,013	Verdadeiro
X2	-1,2593	1	12,649	12,649	2,135	0,204	Falso
X1X2	1,9419	1	15,084	15,084	2,546	0,171	Falso
X1²	3,3450	1	79,472	79,472	13,415	0,015	Verdadeiro
X2²	-0,8860	1	4,398	4,398	0,742	0,428	Falso
Resíduo	-	5	29,620	5,924	-	-	-

A Tabela 34 apresenta a análise de variância - ANOVA do DCCR para a quantidade de antocianinas no morango seco. Com a remoção de coeficientes não significativos, os efeitos positivos linear e quadrático da temperatura do ar foram significativos para este modelo, com um aumento do valor de F de 6,596 para 10,57.

Tabela 34: ANOVA com coeficientes significativos do DCCR para teor de antocianinas (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	2	-	-	10,570	0,006	-
β	11,7325	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	3,2408	1	8,38E+01	8,38E+01	10,853	0,011	Verdadeiro
X1²	3,6031	1	7,95E+01	7,95E+01	10,296	0,012	Verdadeiro
Resíduo	-	8	6,18E+01	7,72E+00			Falso

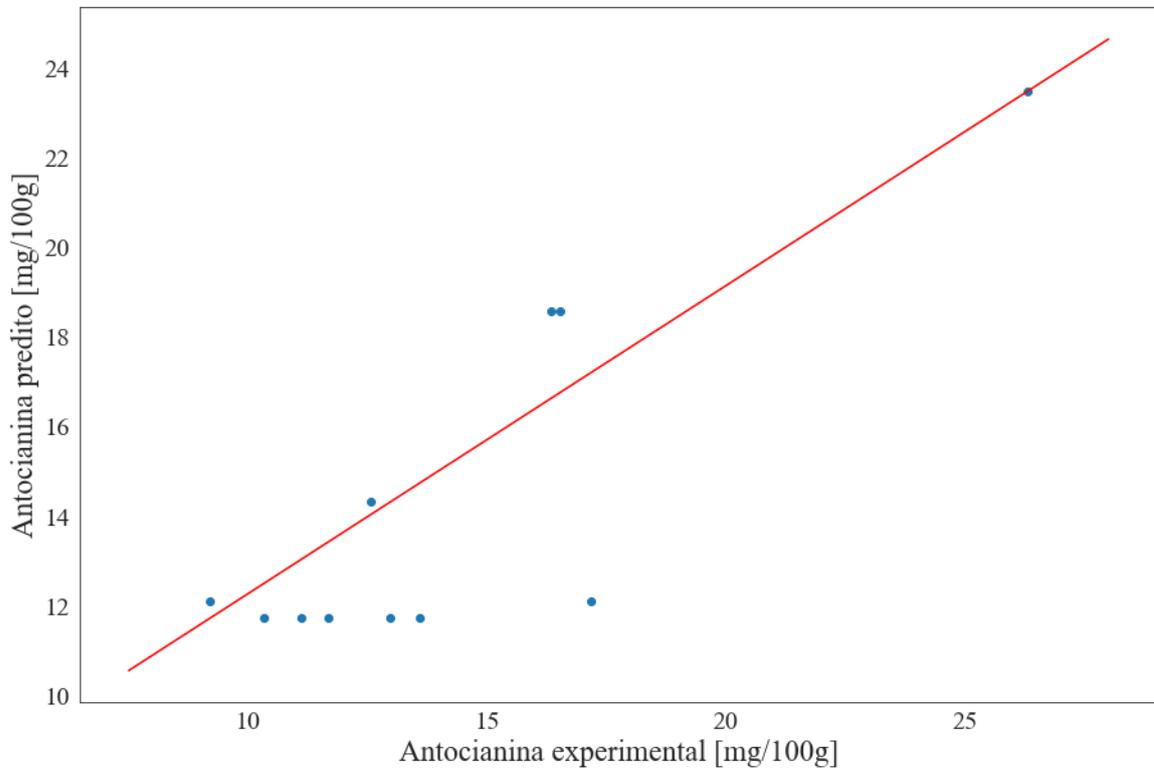
A Equação (29) é a equação codificada para concentração de antocianinas nos morangos secos:

$$AA(mg/100g_{seco}) = 11,7325 + 3,2408 \times X_1 + 3,6031 \times X_1^2 \quad (29)$$

A Equação (29) apresentou valores de R² e R²-ajustado de 0,726 e 0,657, respectivamente; com AIC e BIC de 56,194 e 57,388; quadrado médio dos resíduos de 7,719 e f-valor de 0,006, demonstrando que o modelo é significativo e apresenta capacidade de predição para a concentração de antocianinas no produto resultante.

A Figura 30 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para o teor de antocianinas na câmara secundária.

Figura 30: Dados experimentais e preditos para a antocianina da câmara secundária pelo DCCR



4.6 Cor

4.6.1 Secagem de morango na câmara primária

A Tabela 35 apresenta os resultados de cor do morango no sistema CIELab obtidos antes e depois da secagem na câmara primária.

Tabela 35: Valores de L, a* e b* (câmara primária)

Ensaio	In natura			Seco		
	L* ± σ	a* ± σ	b* ± σ	L* ± σ	a* ± σ	b* ± σ
1-H	28.99 ± 4.83	14.87 ± 1.21	13.05 ± 1.73	28.72 ± 6.11	15.58 ± 4.57	13.80 ± 1.06
2-B	27.18 ± 3.47	15.36 ± 4.82	12.87 ± 3.74	23.14 ± 4.54	19.46 ± 5.91	13.74 ± 2.62
3-F	27.60 ± 5.51	8.76 ± 4.69	10.66 ± 2.18	34.50 ± 7.04	15.38 ± 7.71	12.32 ± 0.24
4-D	31.81 ± 6.68	17.12 ± 5.34	14.78 ± 3.99	25.68 ± 9.24	15.36 ± 2.93	11.87 ± 2.02
5-A	33.04 ± 4.73	10.63 ± 5.85	13.28 ± 2.78	26.25 ± 5.73	18.72 ± 3.34	13.75 ± 0.94
6-E	20.10 ± 1.56	17.23 ± 3.03	14.18 ± 1.59	36.11 ± 4.19	24.75 ± 5.82	16.31 ± 2.14
7-G	25.72 ± 3.79	10.70 ± 3.79	10.76 ± 2.67	34.22 ± 4.82	20.27 ± 2.73	15.06 ± 1.14
8-C	30.08 ± 4.41	9.82 ± 4.34	11.69 ± 1.21	26.90 ± 4.96	22.52 ± 5.53	15.78 ± 1.40
9-I	23.40 ± 6.53	14.87 ± 2.82	13.49 ± 1.64	23.96 ± 5.34	20.83 ± 5.88	12.99 ± 3.27
10-J	26.77 ± 4.54	17.89 ± 6.17	16.85 ± 3.55	21.20 ± 1.80	16.45 ± 4.59	11.70 ± 2.53
11-K	26.44 ± 3.44	13.29 ± 2.83	12.54 ± 1.09	28.48 ± 2.98	14.99 ± 4.09	14.20 ± 1.44
Conv.	17.94 ± 2.19	20.31 ± 1.04	15.42 ± 0.70	19.71 ± 3.31	24.39 ± 5.27	14.22 ± 2.88

Ainda com relação à cor do morango, a Tabela 36 apresenta os valores de Croma antes e depois da secagem e a diferença de cor para os produtos secos na câmara primária.

Tabela 36: Croma e ΔE^* (Câmara primária)

Ensaio	Croma in natura	Croma seco	ΔE^*
1-H	19.78	20.82	1.08
2-B	20.04	23.82	5.82
3-F	13.79	19.71	9.72
4-D	22.61	19.41	7.01
5-A	17.01	23.23	10.57
6-E	22.31	29.65	17.82
7-G	15.18	25.25	13.50
8-C	15.27	27.50	13.71
9-I	20.08	24.55	6.00
10-J	24.58	20.18	7.72
11-K	18.27	20.65	3.13
Conv.	25.50	28.24	4.76

A comparação entre os diferentes métodos e experimentos torna-se complicado devido às diferenças em relação aos próprios métodos utilizados para medição dos parâmetros de cor, assim como pelos equipamentos utilizados (PATHARE; OPARA; AL-SAID, 2013).

Com relação aos resultados de L^* , a^* e b^* , em todos os ensaios ocorreram alterações nos seus valores, principalmente com relação ao aumento de a^* e b^* após a secagem. Isso representa um aumento na escala de vermelho e amarelo, respectivamente. Tais alterações vão de encontro com os resultados encontrados por Wojdyło, Figiel e Oszmiański (2009) que, na secagem de morango com vários métodos de secagem, verificaram alterações nos resultados de L^* e b^* , mas com uma degradação da cor nos processos de secagem. Os autores não relataram diferenças significativas em a^* para a secagem convectiva convencional e a vácuo, com uma semelhança maior com a liofilização que apresentou uma coloração vermelho escuro. Contreras et al. (2008) também demonstraram um decréscimo das escalas de a^* e b^* para a secagem convectiva convencional, evidenciando uma descoloração do produto, enquanto que Méndez-Lagunas et al. (2017) relataram aumento dos valores das escalas para secagem convectiva nas temperaturas de 50 a 60°C, com a primeira apresentando valores maiores que a última.

No presente trabalho, todos os ensaios, com exceção dos ensaios 4-D e 10-J, apresentaram um aumento do croma após a secagem. Isso demonstra que o processo de secagem influenciou na mudança do croma, que representa o aumento da saturação das cores do produto. Tal tendência foi contrária ao apresentado por Contreras et al. (2008), de Brujin e Bórquez (2014), Sadilova, Stintzing e Carle (2006) e Wojdyło, Figiel e Oszmiański (2009) que citaram decréscimo do croma com a secagem em seus respectivos estudos, principalmente com relação a secagem convectiva convencional, sendo a exceção a liofilização e vácuo-microondas do último trabalho.

O aumento do croma está muito relacionado ao aumento de valores nos eixos a^* e b^* e, principalmente no caso do morango, ao primeiro eixo que é referente à escala de verde ao vermelho, sendo que quanto maior e positivo for o seu valor, maior será a presença da cor vermelha. Tais afirmações são possíveis de serem analisadas a partir da Tabela 36, que mostra a alteração dos valores de a^* e b^* antes e depois da secagem.

Com relação aos valores de ΔE^* presentes também na Tabela 36, não é possível traçar uma relação direta dos parâmetros operacionais do estudo com as mudanças ocorridas na cor dos produtos secos. Porém, a variação foi provocada pelo processo de secagem, pois o ensaio 6-E, com maior temperatura, apresentou a maior mudança de cor, assim como o ensaio 5-A, que foi o de menor temperatura e mais longo. Tais resultados, principalmente o último, são salientados por Méndez-Lagunas et al. (2017) e Sadilova, Stintzing e Carle (2006) que

demonstraram que o aumento do tempo de exposição permitiu um aumento da diferença de coloração entre as amostras.

Todos os resultados mostraram que as medições dos eixos de cores do produto, assim como as métricas utilizadas para medir a intensidade e diferença total de cor foram influenciadas diretamente por todas as características da secagem, abrangendo desde as variáveis independentes quanto ao tempo de exposição à secagem.

Com relação ao comportamento da cor nos ensaios com a bomba de calor, é possível afirmar que possui uma capacidade de intensificação da coloração assim como da sua manutenção. Tais fatos podem ser comparados com os dados obtidos por Wojdyło, Figiel e Oszmiański (2009) nos ensaios com liofilização, que apresentaram um comportamento parecido.

4.6.1.1 Planejamento Fatorial

4.6.1.1.1 Cromo

A Tabela 37 apresenta a análise de variância - ANOVA referente ao planejamento fatorial dos resultados do parâmetro Cromo para secagem do morango na câmara primária mostrando que nenhum dos coeficientes para este modelo apresentou significância.

Tabela 37: ANOVA do planejamento fatorial para o Cromo (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	0,956	0,514	-
β	21,3058	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	-1,3795	1	7,612	7,612	1,794	0,273	Falso
X2	0,6772	1	1,835	1,835	0,432	0,558	Falso
X1X2	-0,8254	1	2,725	2,725	0,642	0,481	Falso
Resíduo	-	3	12,726	4,242	-	-	-

Após a retirada de coeficientes não significativos, o único que restou foi o intercepto β_0 , invalidando assim a modelagem para esta resposta. Tal resultado define que o modelo para o Cromo com o planejamento fatorial não é significativo.

No caso do Cromo, apesar dos fatores velocidade e temperatura do ar não se apresentarem significativos, é possível que as alterações sejam influenciadas pelo processo de

secagem em si, a partir do fato de que há uma alteração na composição do material, com a concentração de biocompostos responsáveis pela cor.

4.6.1.1.2 ΔE^*

A Tabela 38 apresenta a análise de variância - ANOVA referente aos valores de ΔE^* em relação ao planejamento fatorial com todos os coeficientes. Inicialmente, o único coeficiente significativo foi o efeito linear da temperatura de secagem.

Tabela 38: ANOVA do planejamento fatorial para o ΔE^* (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	3,584	0,161	-
β	5,7837	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	2,4573	1	24,153	24,153	6,645	0,082	Verdadeiro
X2	0,5115	1	1,047	1,047	0,288	0,629	Falso
X1X2	-1,8627	1	13,878	13,878	3,818	0,146	Falso
Resíduo	-	3	10,904	3,635	-	-	-

A Tabela 39 apresenta a análise de variância - ANOVA do planejamento fatorial, para os valores de ΔE^* para a secagem de morango após a remoção de coeficientes não significativos. Os efeitos linear de temperatura e o da interação entre temperatura e velocidade do ar foram significativos para este modelo, apresentando um aumento do valor de F de 3,584 para 6,365.

Tabela 39: ANOVA com coeficientes significativos do planejamento fatorial para o Delta E (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	2	-	-	6,365	0,0572	-
β	5,7837	-	-	-	-	0,001	Verdadeiro
X1	2,4573	1	24,153	24,153	8,084	0,047	Verdadeiro
X1X2	-1,8627	1	13,878	13,878	4,645	0,097	Verdadeiro
Resíduo	-	4	11,951	2,988	-	-	-

Assim, a Equação (30) é a equação codificada para os valores de ΔE^* :

$$\Delta E^* = 5,7837 + 2,4573 \times X_1 - 1,8627 \times X_1 \times X_2 \quad (30)$$

A Equação (30) apresentou valores de R^2 e R^2 -ajustado de 0,761 e 0,641, respectivamente; com AIC e BIC de 29,609 e 29,447; quadrado médio dos resíduos de 2,988

e f-valor de 0,0572, demonstrando que o modelo é significativo e apresenta capacidade de predição para o ΔE^* .

A Figura 31 mostra a relação entre os dados experimentais e preditos para os valores de ΔE^* na secagem de morango, enquanto que a Figura 32 mostra as curvas em nível do modelo referente aos valores de ΔE^* . A Figura 33 mostra a representação tridimensional da superfície de resposta para os resultados de ΔE^* na secagem de morango, dados pela Equação (30).

Figura 31: Dados experimentais e preditos para o ΔE^* (câmara primária)

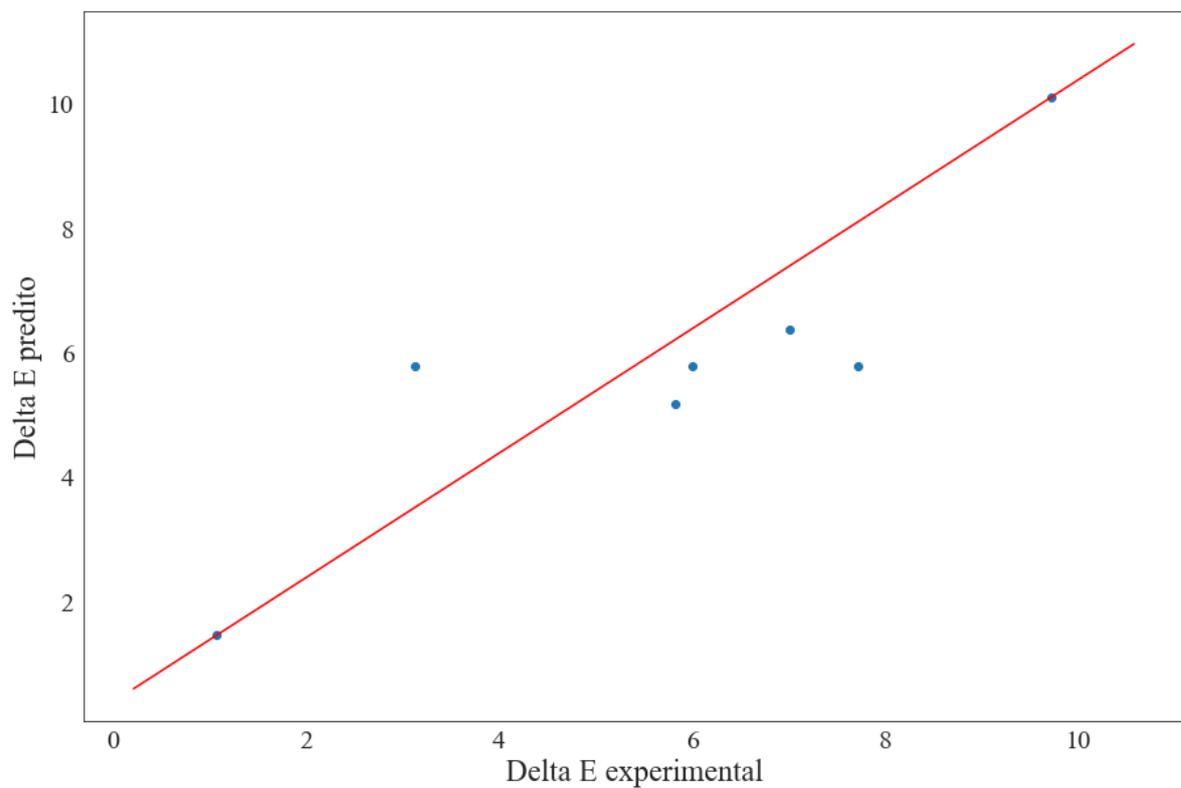


Figura 32: Superfície de resposta com curvas de nível sobre o ΔE^* (câmara primária)

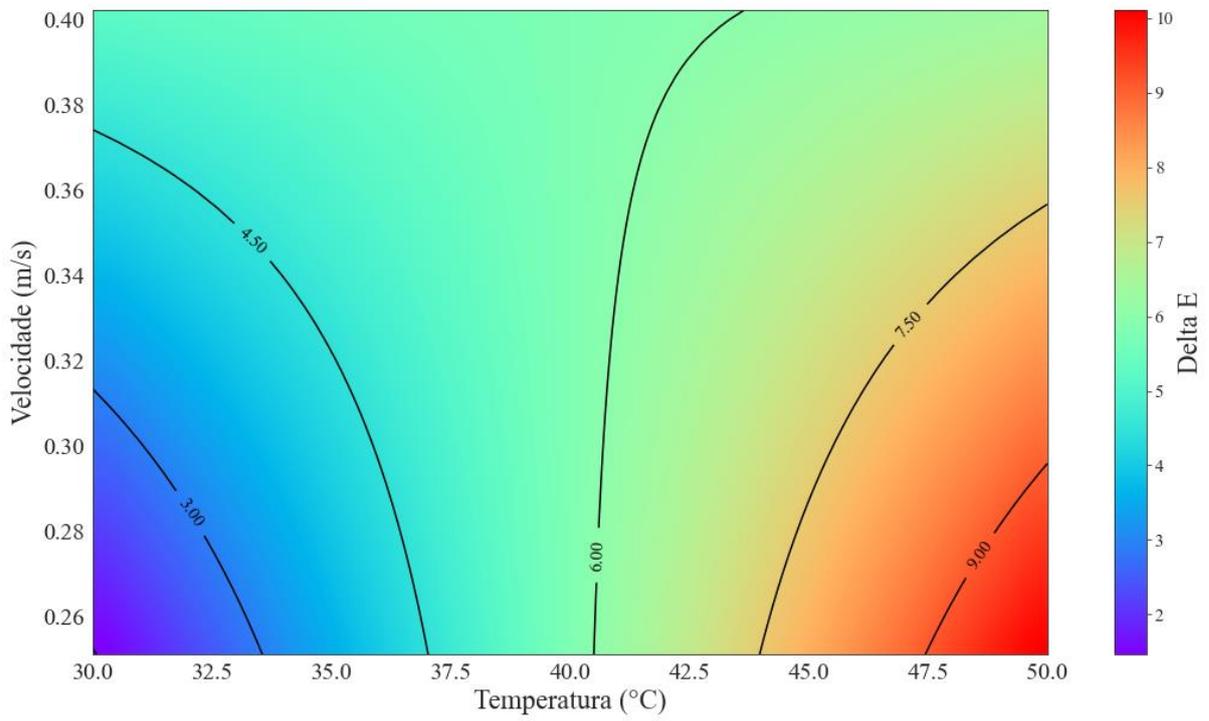
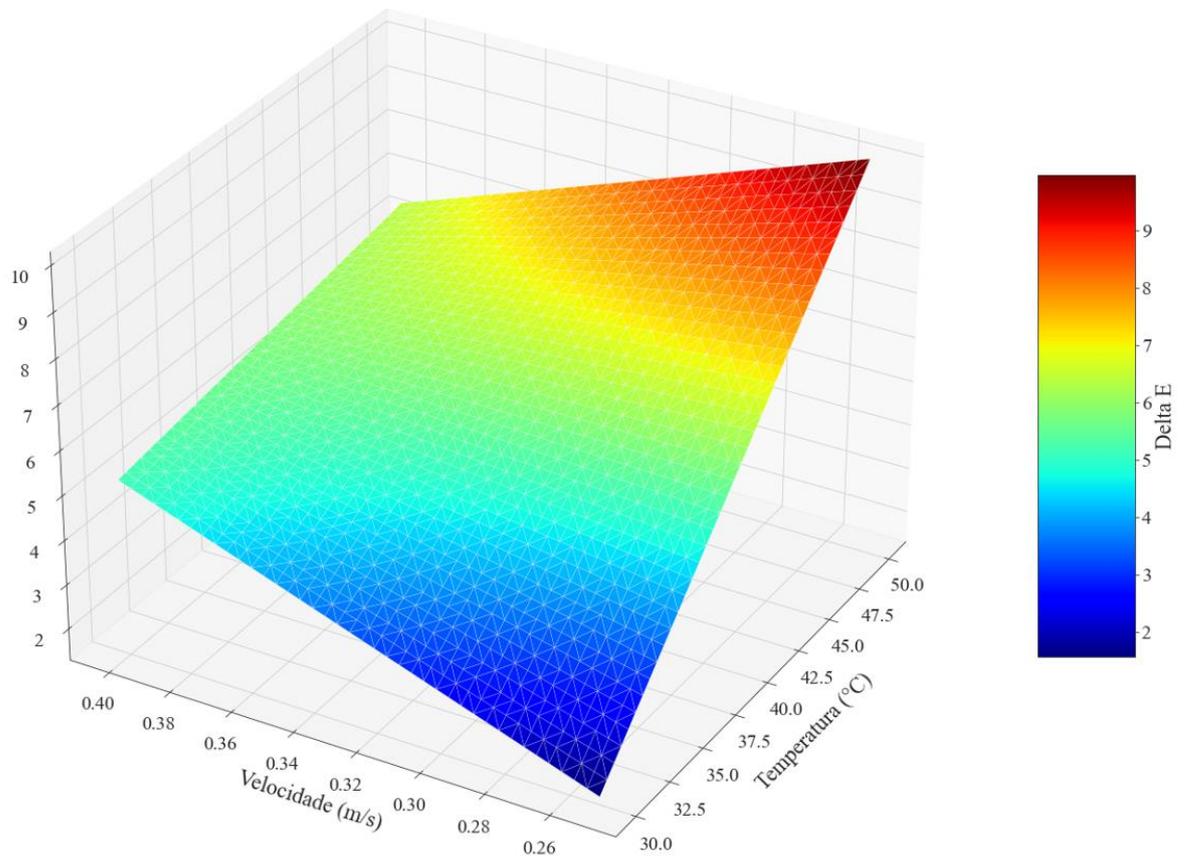


Figura 33: Superfície de resposta tridimensional sobre o ΔE^* (câmara primária)



A mudança de cor está relacionada tanto com a velocidade do ar quanto com a temperatura de secagem. Com relação à temperatura, tem-se um efeito positivo grande no sentido de quanto maior a temperatura, maior a mudança de cor no produto, algo que não pode ser identificado somente pela Tabela 36. Além disso, pode-se identificar um efeito positivo da interação da velocidade e temperatura do ar também, apesar de ser em menor intensidade comparativamente ao efeito linear da temperatura, pois seu coeficiente é menor. Esse valor menor de coeficiente da interação influencia na menor inclinação por parte da velocidade na superfície de resposta. Tais resultados garantem uma maior relevância da temperatura na cor do que a velocidade do ar.

4.6.1.2 Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR

4.6.1.2.1 Cromo

A Tabela 40 apresenta a análise de variância - ANOVA do DCCR referente aos resultados de Cromo na secagem de morango na câmara primária. Assim como mostrado no item 4.6.1.1.1 sobre o planejamento fatorial do Cromo, todos os coeficientes foram considerados não significativos.

Tabela 40: ANOVA do DCCR para o Cromo (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	0,164	0,965	-
β	21,8148	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	0,4428	1	1,564	1,564	0,080	0,789	Falso
X2	0,7366	1	4,328	4,328	0,220	0,658	Falso
X1X2	-0,8254	1	2,725	2,725	0,139	0,725	Falso
X1²	0,9434	1	2,810	2,810	0,143	0,721	Falso
X2²	0,9126	1	4,665	4,665	0,238	0,647	Falso
Resíduo	-	5	98,155	19,631	-	-	-

Após a retirada dos coeficientes não significativos, o modelo continuou não significativo, sobrando apenas o intercepto β_0 como coeficiente significativo. Tal resposta invalida o modelo e o deixa como não significativo.

4.6.1.2.2 ΔE^*

A Tabela 41 apresenta a análise de variância - ANOVA referente aos valores de ΔE^* em relação ao DCCR. Assim como mostrado no item 4.6.1.1.2 relativo ao planejamento fatorial para valores de Cromo, todos os coeficientes foram não significativos.

Tabela 41: ANOVA do DCCR para o ΔE^* (câmara primária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	0,748	0,621	-
β	5,6510	-	-	-	-	0,123	Falso
X1	2,5133	1	50,381	50,381	1,802	0,237	Falso
X2	0,2942	1	0,690	0,690	0,025	0,881	Falso
X1X2	-1,8627	1	13,878	13,878	0,496	0,513	Falso
X1²	2,2750	1	17,659	17,659	0,632	0,463	Falso
X2²	1,9787	1	21,933	21,933	0,785	0,416	Falso
Resíduo	-	5	139,782	27,956	-	-	-

Diferentemente do item 4.6.1.1.2, no qual o modelo do planejamento fatorial foi considerado significativo para o ΔE^* , no caso do DCCR, após a retirada dos coeficientes, nenhum deles se converteu em significativo. Portanto, o modelo não é significativo.

4.6.2 Secagem de morango na câmara secundária

A Tabela 42 apresenta os valores de L, a^* e b^* , medidos pelo colorímetro, sendo usados para calcular os valores de Cromo e ΔE^* . A Tabela 43 apresenta os resultados das análises de cor do morango, por meio dos valores de Cromo antes e depois da secagem e a diferença total de cor - ΔE^* relativa ao processo.

Tabela 42: Valores de L, a^* e b^* (Câmara secundária)

Ensaio	In natura			Seco		
	L* \pm σ	a* \pm σ	b* \pm σ	L* \pm σ	a* \pm σ	b* \pm σ
1-H	23.96 \pm 3.45	19.77 \pm 0.93	15.02 \pm 1.02	24.13 \pm 3.75	24.81 \pm 5.58	14.28 \pm 4.83
2-B	26.64 \pm 3.19	15.24 \pm 2.93	13.13 \pm 1.76	24.69 \pm 5.03	22.93 \pm 7.35	13.57 \pm 5.29
3-F	21.70 \pm 3.19	8.26 \pm 1.65	10.09 \pm 1.41	31.24 \pm 9.00	15.64 \pm 7.15	12.90 \pm 2.10
4-D	27.46 \pm 7.94	17.61 \pm 5.10	13.77 \pm 3.20	30.22 \pm 4.20	21.22 \pm 6.73	13.94 \pm 3.23
5-A	32.20 \pm 6.50	10.94 \pm 6.36	11.75 \pm 3.66	35.70 \pm 2.96	17.47 \pm 8.20	15.07 \pm 2.77
6-E	17.94 \pm 2.38	16.54 \pm 2.99	13.55 \pm 1.76	29.63 \pm 1.34	21.96 \pm 4.21	12.71 \pm 1.53
7-G	24.42 \pm 2.78	9.11 \pm 4.25	11.17 \pm 1.34	25.98 \pm 4.80	23.22 \pm 3.82	16.02 \pm 1.44
8-C	27.74 \pm 5.32	14.96 \pm 5.01	13.50 \pm 4.31	25.97 \pm 5.41	23.49 \pm 9.34	15.53 \pm 4.29
9-I	18.77 \pm 4.57	16.07 \pm 1.21	13.48 \pm 0.69	19.15 \pm 3.34	16.03 \pm 3.12	11.27 \pm 2.15
10-J	25.52 \pm 4.14	19.52 \pm 2.01	16.16 \pm 1.55	20.69 \pm 4.79	27.62 \pm 2.37	16.63 \pm 1.78
11-K	27.26 \pm 5.95	16.39 \pm 2.38	13.70 \pm 2.78	21.35 \pm 4.94	18.09 \pm 5.67	13.69 \pm 2.35
Conv.	19.71 \pm 3.56	19.80 \pm 2.40	16.07 \pm 1.57	20.02 \pm 6.52	21.45 \pm 3.14	13.04 \pm 2.51

Tabela 43: Croma e ΔE^* (Câmara secundária)

Ensaio	Croma in natura	Croma seco	ΔE^*
1-H	24.83	28.63	5.10
2-B	20.12	26.64	7.94
3-F	13.04	20.27	12.38
4-D	22.35	25.39	4.55
5-A	16.06	23.07	8.12
6-E	21.38	25.37	12.91
7-G	14.41	28.21	15.00
8-C	20.16	28.17	8.95
9-I	20.98	19.60	2.24
10-J	25.34	32.24	9.45
11-K	21.36	22.68	6.15
Conv.	25.50	25.10	3.47

Assim como o que aconteceu na câmara primária, descrito no item 4.6.1, para todos os ensaios ocorreram mudanças nos valores de Croma e, conseqüentemente, mudanças de cor durante a secagem. No caso do Croma, tem-se que, em todos os ensaios, com exceção do ensaio 9-I, houve um aumento no seu valor, aumentando assim a saturação de cores nos produtos, deixando-os com cores mais intensas que as iniciais. Isso ocorreu, pois tanto os valores de a^* quanto os de b^* foram modificados. Essa mudança ocorreu em todos os ensaios, com exceção do 9-I, principalmente, quanto ao parâmetro a^* , no qual o vermelho está presente (Tabela 42). A escala do vermelho aumentou, aumentando assim os valores de Croma e intensificando o vermelho.

O comportamento em relação à mudança de cor na secagem de morango na câmara secundária é parecido com o encontrado na câmara primária. Não é possível identificar de forma direta que os parâmetros influenciaram na alteração da cor do produto final, mas a secagem como um todo influenciou na mudança. Assim como o que ocorreu com o parâmetro Croma, a diferença total de cor também foi afetado pelo processo de secagem.

4.6.2.1 Planejamento Fatorial

4.6.2.1.1 Cromo

A Tabela 44 apresenta a análise de variância - ANOVA referente ao planejamento fatorial dos resultados do parâmetro Cromo para secagem do morango na câmara secundária. Assim, nenhum dos coeficientes para este modelo apresentou significância.

Tabela 44: ANOVA do planejamento fatorial para o Cromo (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	0,438	0,743	-
β	25,0651	-	-	-	-	0,001	Verdadeiro
X1	-2,4015	1	23,068	23,068	0,794	0,439	Falso
X2	0,7834	1	2,455	2,455	0,084	0,790	Falso
X1X2	1,7763	1	12,621	12,621	0,434	0,557	Falso
Resíduo	-	3	87,181	29,060	-	-	-

Após a retirada de coeficientes não significativos, o único que restou foi o intercepto β_0 , invalidando assim a modelagem para esta resposta. Tal resultado define que o modelo para o Cromo para secagem na câmara secundária para o planejamento fatorial não é significativo.

4.6.2.1.2 ΔE^*

A Tabela 45 apresenta a análise de variância - ANOVA referente aos valores de ΔE^* em relação ao planejamento fatorial para secagem do morango na câmara secundária. Nenhum dos fatores foi considerado significativo no modelo.

Tabela 45: ANOVA do planejamento fatorial para o ΔE^* (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	3	-	-	0,438	0,743	-
β	25,0651	-	-	-	-	0,001	Verdadeiro
X1	-2,4015	1	23,068	23,068	0,794	0,439	Falso
X2	0,7834	1	2,455	2,455	0,084	0,790	Falso
X1X2	1,7763	1	12,621	12,621	0,434	0,557	Falso
Resíduo	-	3	87,181	29,060	-	-	-

Com a retirada de coeficientes não significativos, identificou-se que todos eles foram removidos do modelo, restando apenas o intercepto β_0 , resultando em modelo não significativo para representar o ΔE^* do produto seco na câmara secundária.

4.6.2.2 Delineamento Central Composto Rotacional - DCCR

4.6.2.2.1 Cromagem

A Tabela 46 apresenta a análise de variância - ANOVA do DCCR referente aos resultados de Cromagem na secagem de morango na câmara secundária. Todos os coeficientes do modelo mostraram-se não significativos, com exceção do seu intercepto β_0 .

Tabela 46: ANOVA do DCCR para o Cromagem (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	0,327	0,877	-
β	24,8448	-	-	-	-	0,000	Verdadeiro
X1	-0,7977	1	5,075	5,075	0,229	0,652	Falso
X2	0,3852	1	1,183	1,183	0,053	0,826	Falso
X1X2	1,7763	1	12,621	12,621	0,570	0,484	Falso
X1²	-0,5596	1	5,850	5,850	0,264	0,629	Falso
X2²	1,4347	1	11,530	11,530	0,521	0,503	Falso
Resíduo	-	5	110,735	22,147	-	-	-

Com a remoção dos coeficientes não significativos, tem-se que o modelo se manteve não significativo e não representativo quanto à resposta do Cromagem na secagem na câmara secundária.

4.6.2.2.2 ΔE^*

A Tabela 47 apresenta a análise de variância - ANOVA referente aos valores de ΔE^* em relação ao DCCR para secagem do morango na câmara secundária. Nenhum dos fatores foi considerado significativo no modelo. Com isso, o modelo também não é significativo.

Tabela 47: ANOVA do DCCR para o ΔE^* (câmara secundária)

	Coefficientes	Graus de Liberdade	Soma dos quadrados	Média dos Quadrados	F	p-valor	Significante
Modelo	-	5	-	-	1,629	0,303	-
β	5,9606	-	-	-	-	0,123	Falso
X1	1,3352	1	14,220	14,220	1,245	0,315	Falso
X2	-1,6967	1	22,963	22,963	2,011	0,215	Falso
X1X2	-2,6671	1	28,453	28,453	2,491	0,175	Falso
X1²	1,3390	1	3,305	3,305	0,289	0,614	Falso
X2²	2,0739	1	24,093	24,093	2,110	0,206	Falso
Resíduo	-	5	57,102	11,420	-	-	-

Após a remoção dos coeficientes, restou somente o seu intercepto, pois nenhum de seus coeficientes se tornaram significativos, invalidando o modelo e sua capacidade de predição da mudança de cor em relação à secagem na câmara secundária.

4.7 Atividade de água - Aw

Na Tabela 48, tem-se os resultados referentes à atividade de água para cada um dos ensaios realizados. Com relação a comparação entre a atividade de água entre o produto *in natura* e seco, em todos os ensaios ocorreu a esperada diminuição de seus valores, sendo que em todos eles ocorreu uma diminuição para uma faixa entre 0,4 a 0,5 de atividade de água final. A diminuição da atividade de água evita a proliferação de microrganismos e outras atividades deteriorativas no produto, permitindo assim uma maior vida útil para o produto seco. Não há uma correlação sensível entre as condições da secagem e os resultados finais de atividade de água.

Tabela 48: Atividade de água (Câmara primária)

Ensaio	In natura				Seco			
	aw	±	σ	Temperatura (°C) ± σ (°C)	aw	±	σ	Temperatura (°C) ± σ (°C)
1-H	0.9689	±	0.005	22.44 ± 0.475	0.5911	±	0.100	25.05 ± 0.064
2-B	0.9575	±	0.027	22.56 ± 0.486	0.4290	±	0.015	24.97 ± 0.053
3-F	0.9645	±	0.016	22.54 ± 0.433	0.5080	±	0.108	25.45 ± 0.417
4-D	0.9754	±	0.006	22.60 ± 0.263	0.4489	±	0.007	24.98 ± 0.032
5-A	0.9796	±	0.003	22.18 ± 0.142	0.5035	±	0.034	24.84 ± 0.095
6-E	0.9602	±	0.018	22.17 ± 0.255	0.4132	±	0.031	24.95 ± 0.035
7-G	0.9382	±	0.037	22.61 ± 0.549	0.4562	±	0.019	24.93 ± 0.062
8-C	0.9147	±	0.027	22.53 ± 0.471	0.4460	±	0.049	24.92 ± 0.147
9-I	0.9721	±	0.016	22.38 ± 0.155	0.3428	±	0.024	24.82 ± 0.185
10-J	0.9718	±	0.009	22.77 ± 0.644	0.4584	±	0.008	24.97 ± 0.051
11-K	0.9733	±	0.012	22.11 ± 0.173	0.5050	±	0.153	25.07 ± 0.208
Conv.	0.9551	±	0.027	22.36 ± 0.186	0.5953	±	0.092	24.89 ± 0.592

No caso da Tabela 49, sobre a atividade de água nos ensaios de secagem na câmara secundária, nota-se que a diferença de seção transversal da secagem proporcionou menores valores de atividade de água na câmara secundária em relação ao produto seco na câmara primária. Isso pode ser explicado pela maior velocidade do ar de secagem, devido a menor seção transversal. Assim como relatado sobre os resultados da câmara primária, tem-se que não há uma relação explícita entre os ensaios.

Tabela 49: Atividade de água (Câmara secundária)

Ensaio	In natura				Seco			
	aw	σ	Temperatura (°C)	σ (°C)	aw	σ	Temperatura (°C)	σ (°C)
1-H	0.9725	± 0.018	22.95	± 0.739	0.5152	± 0.124	24.90	± 0.046
2-B	0.9654	± 0.009	23.16	± 0.643	0.4040	± 0.012	25.94	± 1.591
3-F	0.9487	± 0.018	23.93	± 0.486	0.5323	± 0.181	24.98	± 0.477
4-D	0.9179	± 0.025	22.92	± 0.191	0.5618	± 0.106	25.10	± 0.335
5-A	0.9703	± 0.014	22.37	± 0.603	0.4830	± 0.037	24.77	± 0.132
6-E	0.9889	± 0.007	22.86	± 1.295	0.3936	± 0.006	24.97	± 0.038
7-G	0.9381	± 0.012	22.37	± 0.221	0.4505	± 0.090	24.97	± 0.108
8-C	0.9394	± 0.026	22.73	± 0.698	0.3753	± 0.004	24.97	± 0.066
9-I	0.9422	± 0.013	22.67	± 0.298	0.3492	± 0.014	22.67	± 0.298
10-J	0.9707	± 0.003	22.44	± 0.228	0.4485	± 0.017	24.94	± 0.087
11-K	0.9494	± 0.020	22.47	± 0.257	0.5129	± 0.186	25.18	± 0.312
Conv.	0.9576	± 0.016	23.06	± 0.817	0.5259	± 0.015	24.81	± 0.121

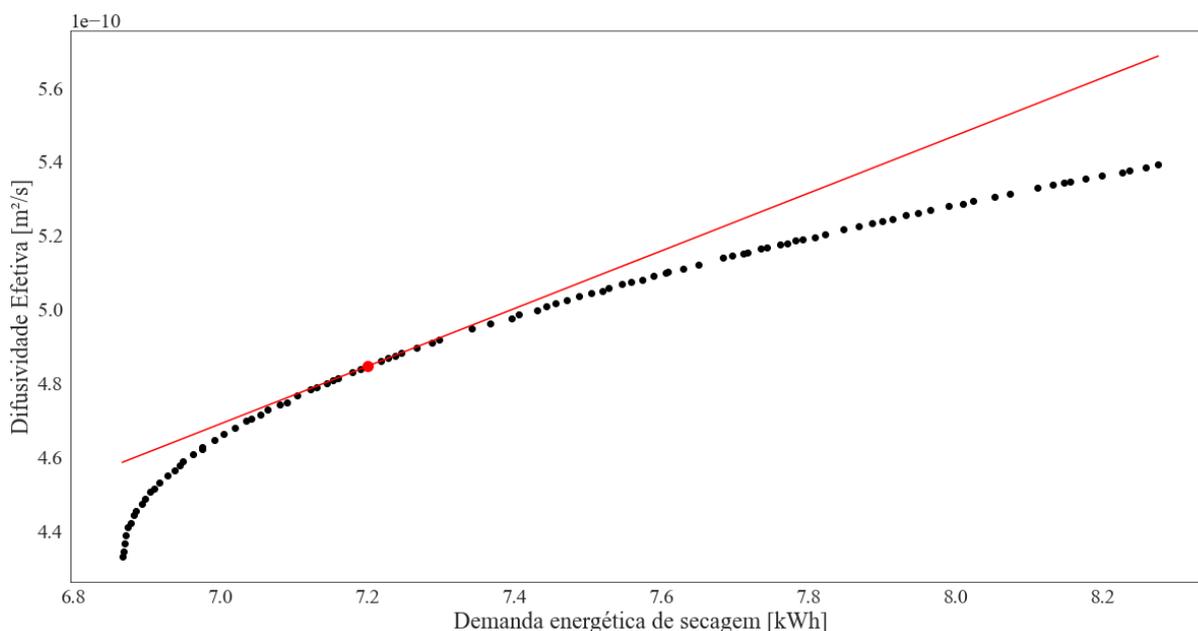
Com relação à atividade de água inicial do morango, os seus valores foram maiores que os apresentados por de Bruijin e Borquez (2014), com um valor médio de 0,92, enquanto que foram próximos aos apresentados por Mosquera, Moraga e Matinez-Navarrete (2012), que obtiveram um valor médio de 0,98.

4.8 Otimização

4.8.1 Demanda energética e difusividade efetiva da câmara secundária

A Figura 34 representa todos os pontos experimentais obtidos para otimização em relação aos modelos significativos com duas variáveis independentes das Equações (24) e (25), da difusividade efetiva da câmara secundária e demanda energética de secagem, respectivamente.

Figura 34: Pontos ótimos para a relação entre demanda energética de secagem e difusividade efetiva



A reta vermelha presente na Figura 34 representa a derivada do ponto referente à demanda 7,2 kWh e difusividade efetiva $4,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, aproximadamente. Neste local é onde ocorre a diminuição da inclinação da tendência da curva, com uma posterior constância da inclinação da reta, representando assim, um ponto ótimo onde há um ganho substancial de energia gasta pelo sistema em relação a um adequado valor de difusividade efetiva.

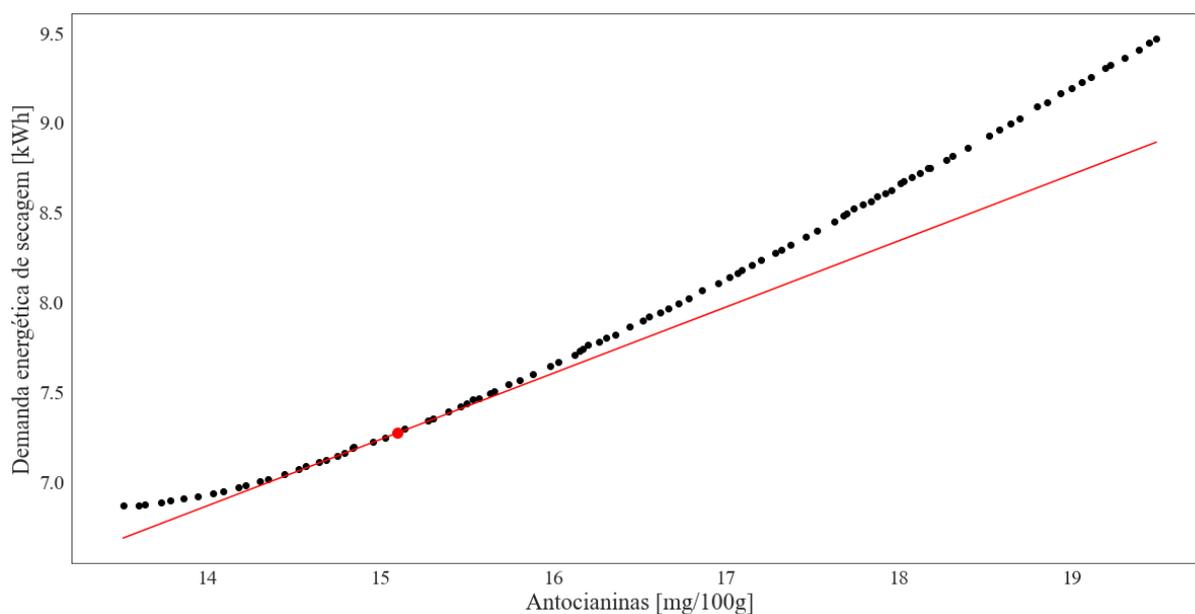
Antes do ponto ótimo, pouca demanda é necessária para aumentar a difusividade efetiva do produto, ao mesmo tempo em que a faixa de difusividade efetiva é muito baixa, dificultado assim a secagem do produto. A partir deste ponto para se obter um aumento no valor da difusividade efetiva, é necessário empregar muita energia, aumentando a demanda de energia para a secagem do produto.

Com relação aos valores das variáveis independentes do ponto ótimo, tem-se que utilizando a Figura 18 e a Figura 21, os seus valores são de 48 °C e 3,0 m/s.

4.8.2 Teor de antocianinas e Demanda energética

A Figura 35 representa todos os pontos experimentais obtidos para otimização em relação aos modelos significativos com duas variáveis independentes das equações (28) e (25), da concentração de antocianinas e demanda energética de secagem, respectivamente.

Figura 35: Pontos ótimos para a relação entre teor de antocianinas e demanda energética de secagem



Assim como relatado no item 4.8.1, a reta vermelha representa a derivada do ponto de 15mg/100g b.s. de concentração de antocianinas e demanda energética de 7,2 kWh. Neste ponto é onde ocorre a diminuição do aumento da inclinação da reta, com uma tendência de constância no seu valor, representando assim o ponto ótimo onde a demanda imposta pelo secador não prejudica a concentração de antocianinas no morango.

Antes deste ponto, devido a uma inclinação menor da reta, ocorre uma grande preservação de antocianinas no produto com o uso de pouca energia demandada, garantindo assim uma boa retenção de qualidade. O contrário ocorre após o ponto ótimo, onde após a constância de seu valor, é necessário empregar muita energia no sistema para permitir uma maior preservação de antocianinas no produto.

Com relação aos valores das variáveis independentes do ponto ótimo, tem-se que utilizando a Figura 21 e Figura 28, os seus valores são de 47,5 °C e 3,4 m/s, para a câmara secundária e 0,37 m/s para a câmara primária.

5. Conclusões

Com relação ao tempo de secagem na câmara primária e câmara secundária, pode-se concluir que com o aumento da temperatura e velocidade do ar proporcionam menores períodos de secagem. Assim como também proporcionaram maiores valores de difusividade efetiva, com a câmara secundária apresentando maiores valores. O modelo de Fick e Page apresentaram bons ajustes, apresentando um ajuste melhor para a câmara secundária.

Sobre a demanda energética de secagem, pode-se concluir que há uma relação entre os resultados com o tempo de secagem e a temperatura do ar de secagem. As maiores demandas de energia foram obtidas nos ensaios com os maiores tempos de secagem, devido às menores temperaturas. O compressor apresentou maior contribuição para o gasto energético, assim como para baixas temperaturas e extremos de velocidade do ar.

É possível concluir que o SMER apresenta maiores valores para também maiores valores de temperatura e velocidade do ar. Ele possui também uma relação de diminuição de extração em ensaios com maiores períodos de secagem, com uma relação inversa a demanda energética de secagem. No caso do COP, não foi possível verificar uma relação direta entre os parâmetros operacionais com seus resultados, sendo mais relevantes as condições ambientais para sua variação.

As antocianinas apresentaram valores contraditórios a primeiro momento com relação a temossensibilidade, pois a sua conservação foi proporcionada pelo aumento da temperatura do e velocidade do ar. Há uma possível influência do tempo de exposição à secagem para sua degradação, assim como inativação de enzimas que a degradam na faixa de temperatura estudada.

No caso dos parâmetros de cor nas câmaras, elas apresentaram resultados parecidos, concluindo-se que suas alterações foram decorrentes do processo de secagem como um todo, ao invés da influência direta das variáveis independentes. O aumento do Croma e ΔE^* foram proporcionados pelo aumento dos valores das escalas cromáticas, principalmente com relação ao eixo a^* , representando o vermelho, ocorrendo à intensificação do mesmo, mostrando que o tempo de exposição permitiu alteração nos parâmetros de cor.

No caso da análise de otimização da demanda energética e a difusividade efetiva, tem-se que o ponto ótimo é de 7,2 kWh e $4,8 \times 10^{-10}$ m²/s, com a combinação de variáveis independentes para os valores de 48,0°C e 3,0 m/s. Para o caso da otimização em relação à

demanda energética e conteúdo de antocianinas, tem-se que o ponto ótimo é de 7,2 kWh e 15mg/100g b.s., respectivamente, com a combinação de variáveis independentes de 47,5 °C e 3,4 m/s, para a câmara secundária e 47,5 °C e 0,37 m/s para a câmara primária.

6. Recomendações

Com relação a recomendações para trabalhos futuros, tem-se: a necessidade de estudo com uma bomba de calor com as outras duas configurações, para permitir uma melhor compreensão sobre os parâmetros de desempenho, mitigando a influencia do ambiente; secagem com maior quantidade de produtos na câmara primária para o melhor aproveitamento do espaço interno da câmara; melhoria na parte de controle, com uso de compressor com inverter, permitindo um controle melhor do uso energético; utilização de maiores faixas de temperaturas para obter uma melhor compreensão sobre sua influência nos parâmetros de qualidade, desempenho e secagem dos produtos agrícolas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AABY, K.; EKEBERG, D.; SKREDE, G. Characterization of phenolic compounds in strawberry (*Fragaria x ananassa*) fruits by different HPLC detectors and contribution of individual compounds to total antioxidant capacity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 11, p. 4395–4406, 2007.

ABANO, E. E.; MA, H.; QU, W. Optimization of drying conditions for quality dried tomato slices using response surface methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 38, n. 3, p. 996–1009, 2014.

AKAR, G.; BARUTÇU MAZI, I. Color change, ascorbic acid degradation kinetics, and rehydration behavior of kiwifruit as affected by different drying methods. **Journal of Food Process Engineering**, v. 42, n. 3, p. 1–16, 2019.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y. Mathematical modeling and experimental study on thin layer drying of strawberry. **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 1, 2006.

AKTAŞ, M. et al. Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 28, p. 18034–18044, 2017a.

AKTAŞ, M. et al. Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 132, p. 327–338, 2017b.

AKTAŞ, M. et al. Heat pump drying of grape pomace: Performance and product quality analysis. **Drying Technology**, v. 37, n. 14, p. 1766–1779, 2019.

AKTAŞ, M.; ŞEVIK, S.; AKTEKELI, B. Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying. **Energy Conversion and Management**, v. 113, p. 82–94, 2016.

ALVES-FILHO, O. **Heat Pump Dryers: Theory, Design and Industrial Applications**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.

ANCOS, B. DE; SÁNCHEZ-MORENO, C.; GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. Pineapple composition and nutrition. In: LOBO, M. G.; PAULL, R. E. (Eds.). **Handbook of Pineapple Technology: Production, Postharvest Science, Processing and Nutrition**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. p. 221–239.

AOAC. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists Internacional**. 21. ed. Rockville, Maryland: AOAC International, 2019.

ARULKUMAR, M.; SATHISHKUMAR, P.; PALVANNAN, T. Optimization of Orange G dye adsorption by activated carbon of *Thespesia populnea* pods using response surface methodology. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 1, p. 827–834, 2011.

AURELIO, D. L.; EDGARDO, R. G.; NAVARRO-GALINDO, S. Thermal kinetic degradation of anthocyanins in a roselle (*Hibiscus sabdariffa* L. cv. 'Criollo') infusion. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 322–325, 2008.

BARADEY, Y. et al. Drying of Fruits and Vegetables: The Impact of Different Drying Methods on Products Quality. In: MINEA, V. (Ed.). . **Advances in Heat Pump-Assisted Drying Technology**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. p. 189–216.

BLANK, J.; DEB, K. Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python. **IEEE Access**, v. 8, p. 89497–89509, 2020.

CAM, I. B. et al. Strawberry drying: Development of a closed-cycle modified atmosphere drying system for food products and the performance evaluation of a case study. **Drying Technology**, v. 36, n. 12, p. 1460–1473, 2018.

CASTELL-PALOU, Á.; SIMAL, S. Heat pump drying kinetics of a pressed type cheese. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, n. 2, p. 489–494, 2011.

CHAI, S. et al. Experimental investigation on a fresh air dehumidification system using heat pump with desiccant coated heat exchanger. **Energy**, v. 171, p. 306–314, 2019.

CHAKRABORTY, S.; RAO, P. S.; MISHRA, H. N. Effect of combined high pressure-temperature treatments on color and nutritional quality attributes of pineapple (*Ananas comosus* L.) puree. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 28, p. 10–21, 2015a.

CHAKRABORTY, S.; RAO, P. S.; MISHRA, H. N. Response Surface Optimization of Process Parameters and Fuzzy Analysis of Sensory Data of High Pressure-Temperature Treated Pineapple Puree. **Journal of Food Science**, v. 80, n. 8, p. E1763–E1775, 2015b.

CHANDRA, S. **Energy, Entropy and Engines: An Introduction to Thermodynamics**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2016.

CHAPCHAIMOH, K. et al. Thermal characteristics of heat pump dryer for ginger drying. **Applied Thermal Engineering**, v. 95, p. 491–498, 2016.

CHU, K. H.; CHAMBENOIT, J. P.; KIM, E. Y. **Enzymatic hydrolysis of waste paper: Process optimization using response surface methodology**. [s.l.] Elsevier Masson SAS, 2006. v. 159

CONTRERAS, C. et al. Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry. **Journal of Food Engineering**, v. 88, n. 1, p. 55–64, 2008.

COŞKUN, S. et al. Investigation of drying kinetics of tomato slices dried by using a closed loop heat pump dryer. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 53, n. 6, p. 1863–1871, 2017.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2. ed. Bristol: Oxford University Press, 1975.

CZESŁAW, S.; JONES, P. L.; ZYŁŁA, R. Energy Aspects in Drying. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. p. 1077–1100.

DA SILVA, F. L. et al. Anthocyanin pigments in strawberry. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, n. 2, p. 374–382, 2007.

DE BRUIJN, J.; BÓRQUEZ, R. Quality retention in strawberries dried by emerging dehydration methods. **Food Research International**, v. 63, p. 42–48, 2014.

DINÇER, İ.; ZAMFIRESCU, C. **Drying Phenomena Theory and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2016.

DOYMAZ, I. Sun drying of figs: An experimental study. **Journal of Food Engineering**, v. 71, n. 4, p. 403–407, 2005.

DOYMAZ, I. Convective drying kinetics of strawberry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 47, n. 5, p. 914–919, 2008.

DOYMAZ, İ. Hot-Air Drying and Rehydration Characteristics of Red Kidney Bean Seeds. **Chemical Engineering Communications**, v. 203, n. 5, p. 599–608, 2016.

ERBAY, Z.; ICIER, F. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 533–541, 2009.

EREN, I.; KAYMAK-ERTEKIN, F. Optimization of osmotic dehydration of

potato using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 344–352, 2007.

FAEDI, W.; BARUZZI, G. Strawberry Breeding. In: HUSAINI, A. M.; NERI, D. (Eds.). . **Strawberry Growth, Development and Diseases**. Boston, MA: CAB International, 2016. p. 26–40.

FALQUETTO, P. Desenvolvimento de uma bomba de calor doméstica para secagem de ervas termossensíveis campinas 2012. v. 8, n. 7, p. 552–559, 2012.

GARG, U. K. et al. Removal of Nickel(II) from aqueous solution by adsorption on agricultural waste biomass using a response surface methodological approach. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 5, p. 1325–1331, 2008.

GEIGER, E. O. Statistical Methods For Fermentation Optimization. **Fermentation and Biochemical Engineering Handbook: Principles, Process Design and Equipment: Second Edition**, p. 161–180, 1996.

GIAMPIERI, F. et al. The strawberry: Composition, nutritional quality, and impact on human health. **Nutrition**, v. 28, n. 1, p. 9–19, 2012.

GUDIÑO-AYALA, D.; CALDERÓN-TOPETE, Á. Pineapple drying using a new solar hybrid dryer. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1642–1650, 2014.

GULEN, H.; TURHAN, E.; ERIS, A. Molecular and Physiological Responses of Strawberries Plants to Abiotic Stress. In: HUSAINI, A. M.; NERI, D. (Eds.). . **Strawberry Growth, Development and Diseases**. Boston, MA: CAB International, 2016. p. 288–301.

GÜMÜŞAY, Ö. A. et al. Drying effects on the antioxidant properties of tomatoes and ginger. **Food Chemistry**, v. 173, p. 156–162, 2015.

GÜREL, A. E.; CEYLAN, I. Thermodynamic analysis of PID temperature controlled heat pump system. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 2, p. 42–49, 2014.

HANRAHAN, G.; LU, K. Application of factorial and response surface methodology in modern experimental design and optimization. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 36, n. 3–4, p. 141–151, 2006.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357–362, 2020.

HUANG, S. et al. Performance evaluation of heating tower heat pump systems over the world. **Energy Conversion and Management**, v. 186, n. March, p. 500–515, 2019.

HUNDY, G. F.; TROTT, A. R.; WELCH, T. C. **Refrigeration, Air Conditioning, and Heat Pumps**. 5. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2016.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. **Computing in Science and Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007.

HUSAINI, A. M.; ZAKI, F. A. Strawberries: a General Account. In: HUSAINI, A. M.; NERI, D. (Eds.). . **Strawberry Growth, Development and Diseases**. Boston, MA: CAB International, 2016. p. 1–9.

IZLI, N.; IZLI, G.; TASKIN, O. Impact of different drying methods on the drying kinetics , color , total phenolic content and antioxidant capacity of pineapple. **CyTA - Journal of Food**, v. 16, n. 1, p. 213–221, 2018.

KIANG, C. S.; JON, C. K. Heat Pump Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). . **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. p. 1101–1126.

KIVEVELE, T.; HUAN, Z. Experimental comparative study of an open and completely closed air source heat pump for drying sub-tropical fruits. **Proceedings of the Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy, ICUE**, v. 2015- Septe, p. 232–238, 2015.

KUMAR, S. et al. Enzymes. In: YAHIA, E. M.; CARRILLO-LÓPEZ, A. (Eds.). . **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**. 1. ed. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 335–358.

LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. Fluidized Bed Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). . **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. p. 161–189.

LEE, K. H.; KIM, O. J. Investigation on drying performance and energy savings of the batch-type heat pump dryer. **Drying Technology**, v. 27, n. 4, p. 565–573, 2009.

LIU, H. et al. Design and thermal analysis of an air source heat pump dryer for food drying. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 9, 2018.

LIYANA-PATHIRANA, C.; SHAHIDI, F. Optimization of extraction of phenolic compounds from wheat using response surface methodology. **Food Chemistry**, v. 93, n. 1, p.

47–56, 2005.

LÓPEZ-ORTIZ, A. et al. Understanding the drying kinetics of phenolic compounds in strawberries: An experimental and density functional theory study. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 60, n. December 2019, p. 102283, 2020.

MALAIKRITSANACHALEE, P.; CHOOSRI, W.; CHOOSRI, T. Study on kinetics of flow characteristics in hot air drying of pineapple. **Food Science and Biotechnology**, v. 27, n. 4, p. 1047–1055, 2018.

MARTYNENKO, A.; CHEN, Y. Degradation kinetics of total anthocyanins and formation of polymeric color in blueberry hydrothermodynamic (HTD) processing. **Journal of Food Engineering**, v. 171, p. 44–51, 2016.

MCKINNEY, W. Data Structures for Statistical Computing in Python. **Proceedings of the 9th Python in Science Conference**, v. 1, n. Scipy, p. 56–61, 2010.

MEK. **CoolPackIPU**, , 2021. Disponível em: <<https://www.ipu.dk/products/coolpack/>>

MÉNDEZ-LAGUNAS, L. et al. Convective drying kinetics of strawberry (*Fragaria ananassa*): Effects on antioxidant activity, anthocyanins and total phenolic content. **Food Chemistry**, v. 230, p. 174–181, 2017.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503–1513, 2002.

MINEA, V. Drying heat pumps-Part II: Agro-food, biological and wood products. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 3, p. 659–673, 2013a.

MINEA, V. Drying heat pumps-Part I: System integration. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 3, p. 643–658, 2013b.

MINEA, V. Advances in Industrial Heat Pump Technologies and Applications. In: MINEA, V. (Ed.). **Advances in Heat Pump-Assisted Drying Technology**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. p. 1–116.

MOHAMMADI, I.; TABATABAEKOLOR, R.; MOTEVALI, A. Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices. **Energy**, v. 170, p. 149–158, 2019.

MOSQUERA, L. H.; MORAGA, G.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Critical water activity and critical water content of freeze-dried strawberry powder as affected by maltodextrin and arabic gum. **Food Research International**, v. 47, n. 2, p. 201–206, 2012.

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of Industrial Drying**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. p. 3–29.

NEMZER, B. et al. Phytochemical and physical properties of blueberries, tart cherries, strawberries, and cranberries as affected by different drying methods. **Food Chemistry**, v. 262, n. January, p. 242–250, 2018.

NETO, B. DE B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos : pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

PAGE, G. E. **Factors Influencing The Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. [s.l.] Purdue University, 1949.

PAL, U. S.; KHAN, M. K.; MOHANTY, S. N. Heat pump drying of green sweet pepper. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1584–1590, 2008.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. J. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 36–60, 2013.

PATRAS, A. et al. Impact of high pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 10, n. 3, p. 308–313, 2009.

PATRAS, A. et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation. **Trends in Food Science and Technology**, v. 21, n. 1, p. 3–11, 2010.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825–2830, 2011.

RAMALLO, L. A.; MASCHERONI, R. H. Quality evaluation of pineapple fruit during drying process. **Food and Bioproducts Processing**, v. 90, n. 2, p. 275–283, 2012.

RAMALLO, L. A.; MASCHERONI, R. H. Effect of shrinkage on prediction

accuracy of the water diffusion model for pineapple drying. **Journal of Food Process Engineering**, v. 36, n. 1, p. 66–76, 2013.

SADILOVA, E.; STINTZING, F. C.; CARLE, R. Thermal degradation of acylated and nonacylated anthocyanins. **Journal of Food Science**, v. 71, n. 8, 2006.

SALTVEIT, M. E. Respiratory Metabolism. In: YAHIA, E. M.; CARRILLO-LÓPEZ, A. (Eds.). . **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**. [s.l.] Woodhead, 2019. p. 73–92.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2–3, p. 337–354, 2002.

SINGH, K. P. et al. Optimizing adsorption of crystal violet dye from water by magnetic nanocomposite using response surface modeling approach. **Journal of Hazardous Materials**, v. 186, n. 2–3, p. 1462–1473, 2011.

SOLOVCHENKO, A.; YAHIA, E. M.; CHEN, C. Pigments. In: YAHIA, E. M.; CARRILLO-LÓPEZ, A. (Eds.). . **Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables**. [s.l.] Woodhead, 2019. p. 225–252.

TAN, I. A. W.; AHMAD, A. L.; HAMEED, B. H. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology. **Chemical Engineering Journal**, v. 137, n. 3, p. 462–470, 2008.

TAŞERI, L. et al. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. **Food Chemistry**, v. 260, n. November 2017, p. 152–159, 2018.

TOROPOV, V. V.; ALVAREZ, L. F. Application of genetic programming and response surface methodology to optimization and inverse problems. **INVERSE PROBLEMS IN ENGINEERING MECHANICS**, p. 551–560, 1998.

TUNÇKAL, C. et al. Determination of sliced pineapple drying characteristics in a closed loop heat pump assisted drying system. **International Journal of Renewable Energy Development**, v. 7, n. 1, p. 35–41, 2018.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, p. 261–272, 2020.

WANI, A. A. et al. Extraction optimization of watermelon seed protein using

response surface methodology. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 8, p. 1514–1520, 2008.

WITTE, R. S.; WITTE, J. S. **Statistics**. 11. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc, 2017.

WOJDYŁO, A.; FIGIEL, A.; OSZMIANŚKI, J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, n. 4, p. 1337–1343, 2009.

YAMANKARADENIZ, N. et al. Performance analysis of a re-circulating heat pump dryer. **Thermal Science**, v. 20, n. 1, p. 267–277, 2016.

YOUSAF, K. et al. Influence of environmental conditions on drying efficiency and heat pump performance in closed and open loop drying of paddy. **Drying Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2019.

ZANONI, B. et al. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. **Food Research International**, v. 31, n. 5, p. 395–401, 1998.

Apêndice I

FIGURA I-A – Gráfico de razão de umidade pelo tempo dos ensaios 1, 2, 3 e 4 (fatoriais) com dados experimentais da câmara primária e preditos dos modelos de Fick e Page para cada ensaio.

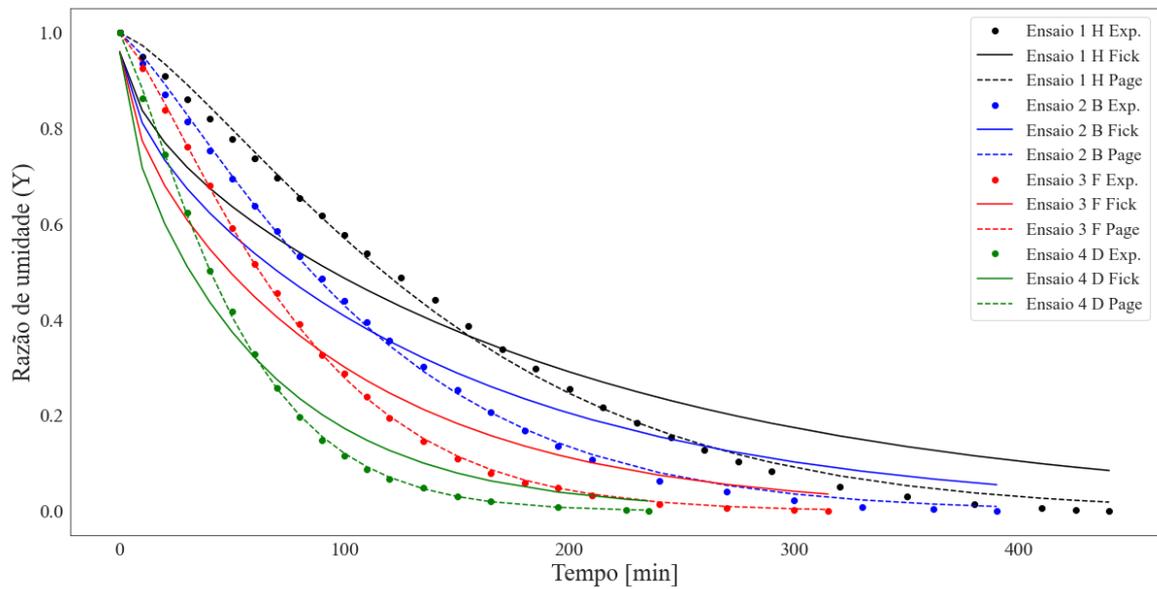


FIGURA I-B – Gráfico de razão de umidade pelo tempo dos ensaios 5, 6, 7 e 8 (axiais) com dados experimentais da câmara primária e preditos dos modelos de Fick e Page para cada ensaio.

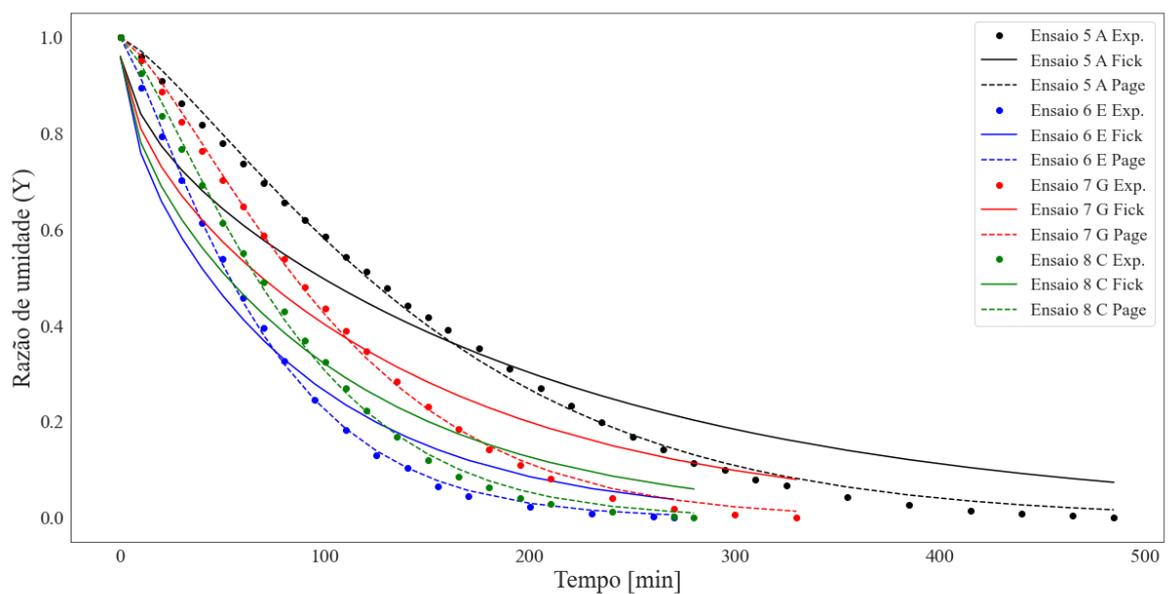


FIGURA I-C – Gráfico de razão de umidade pelo tempo dos ensaios 9, 10 e 11 (centrais) com dados experimentais da câmara primária e preditos dos modelos de Fick e Page para cada ensaio.

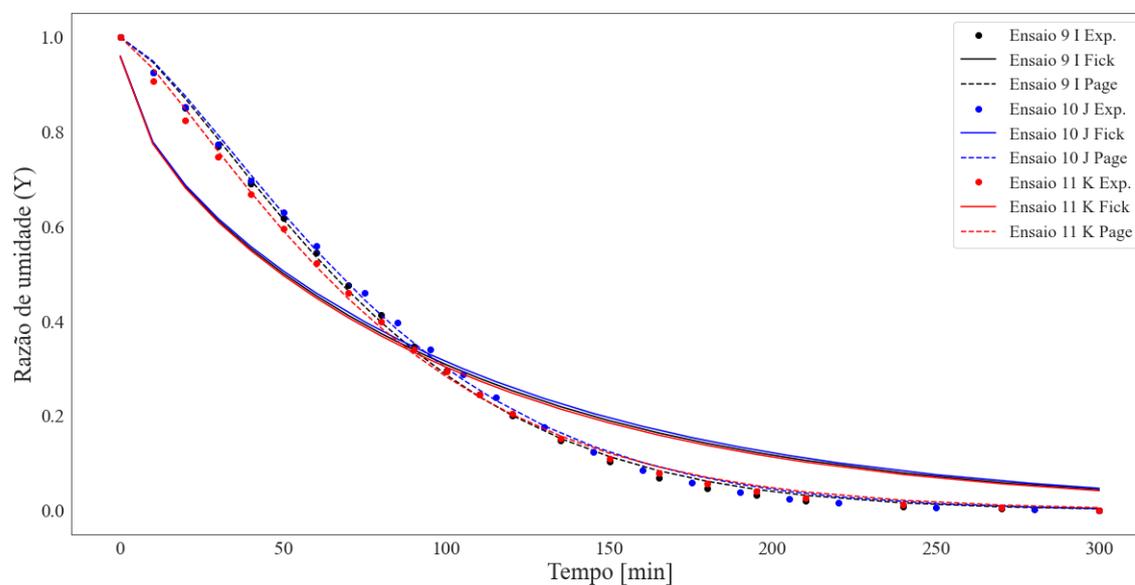


FIGURA I-D – Gráfico de razão de umidade pelo tempo dos ensaios 1, 2, 3 e 4 (fatoriais) com dados experimentais da câmara secundária e preditos dos modelos de Fick e Page para cada ensaio.

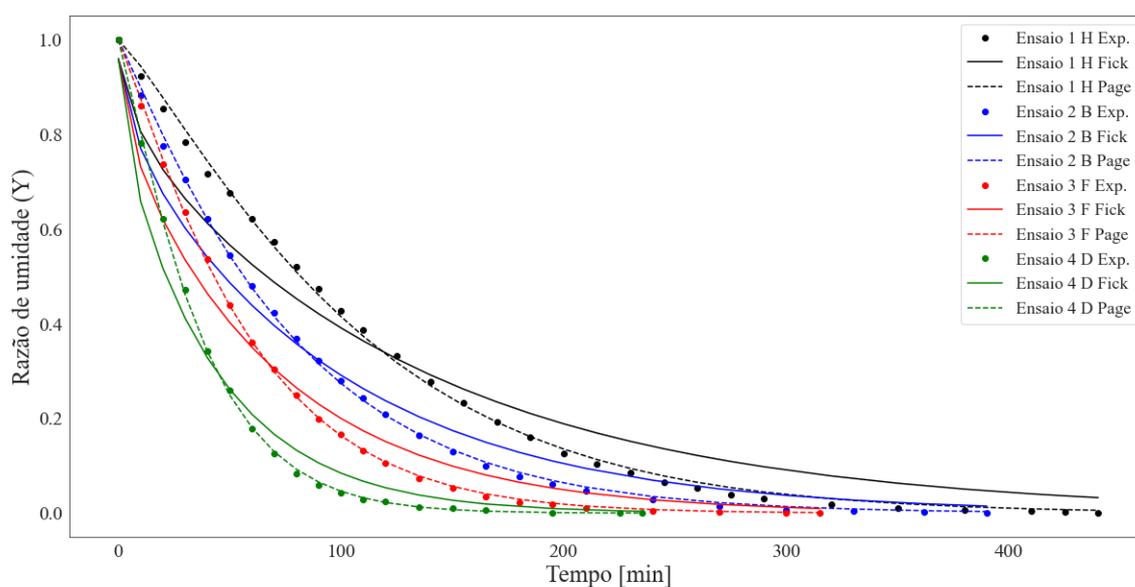


FIGURA I-E – Gráfico de razão de umidade pelo tempo dos ensaios 5, 6, 7 e 8 (axiais) com dados experimentais da câmara secundária e preditos dos modelos de Fick e Page para cada ensaio.

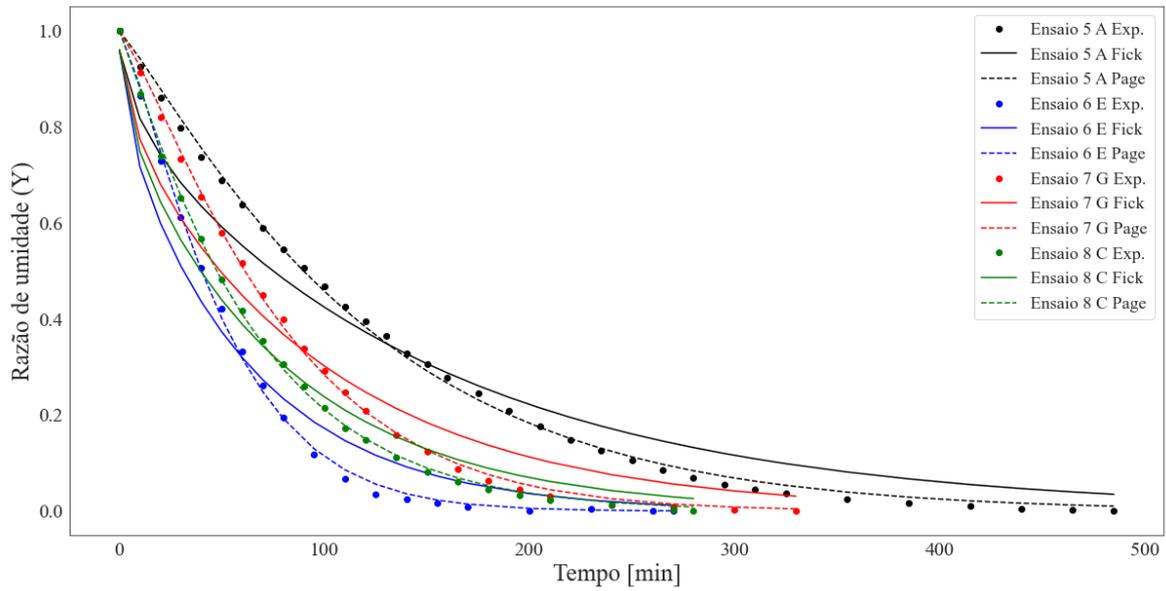
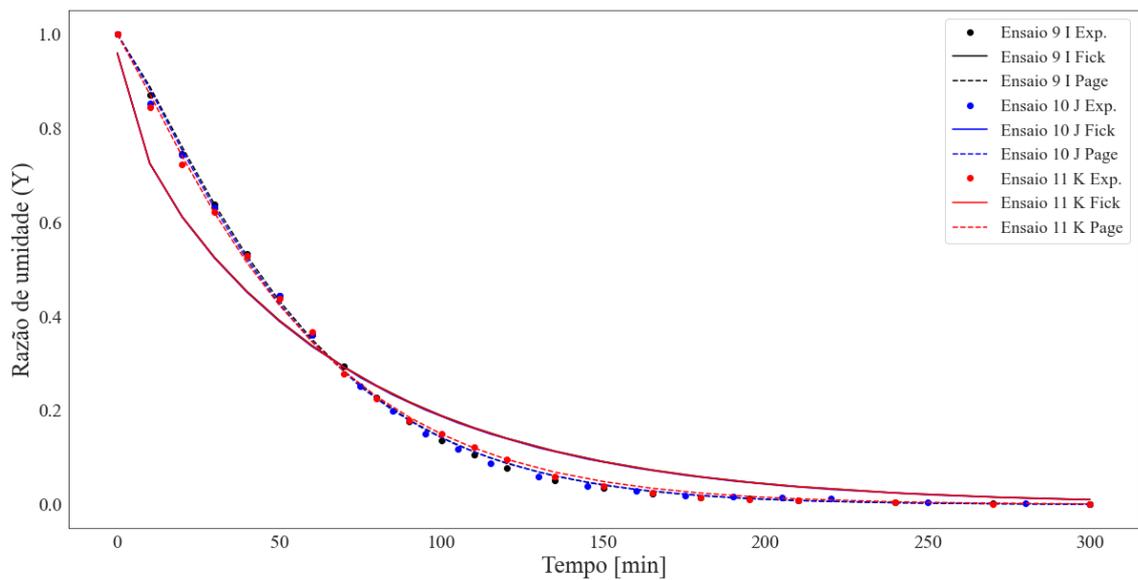


FIGURA I-F – Gráfico de razão de umidade pelo tempo dos ensaios 9, 10 e 11 (centrais) com dados experimentais da câmara secundária e preditos dos modelos de Fick e Page para cada ensaio.



Apêndice II

FIGURA II-A – Gráfico de taxa de secagem pela umidade por base seca dos ensaios 1, 2, 3 e 4 (fatoriais), referentes a câmara primária.

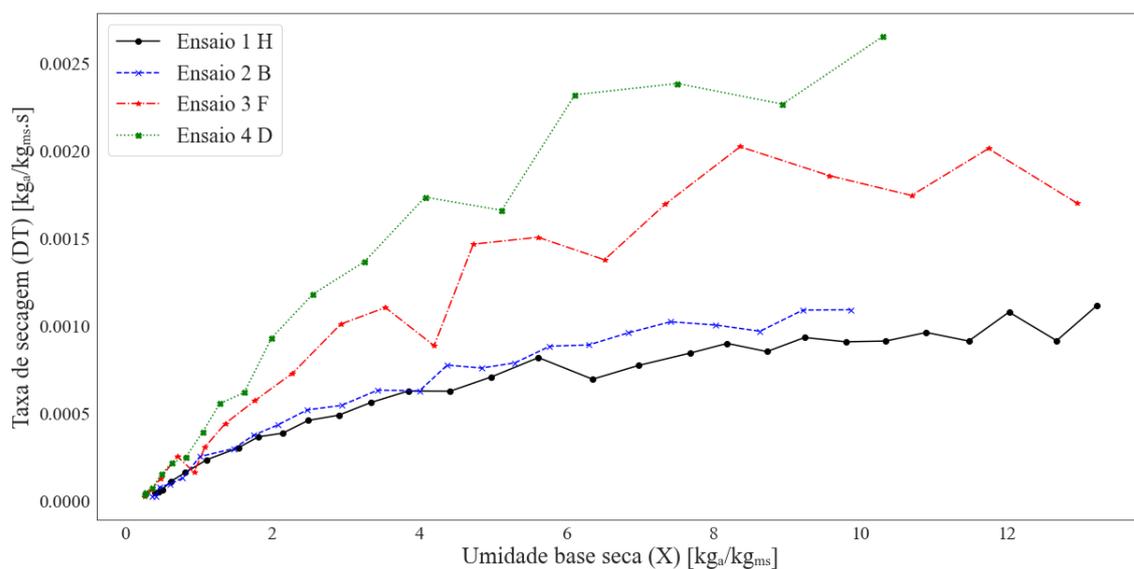


FIGURA II-B – Gráfico de taxa de secagem pela umidade por base seca dos ensaios 5, 6, 7 e 8 (axiais), referentes a câmara primária.

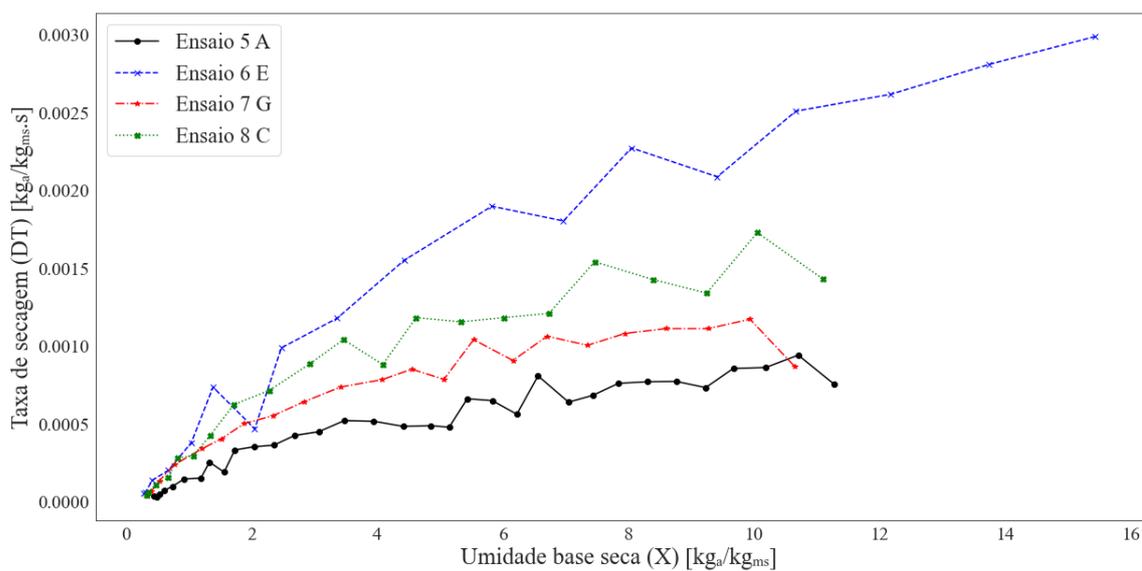


FIGURA II-C – Gráfico de taxa de secagem pela umidade por base seca dos ensaios 9, 10 e 11 (centrais), referentes a câmara primária.

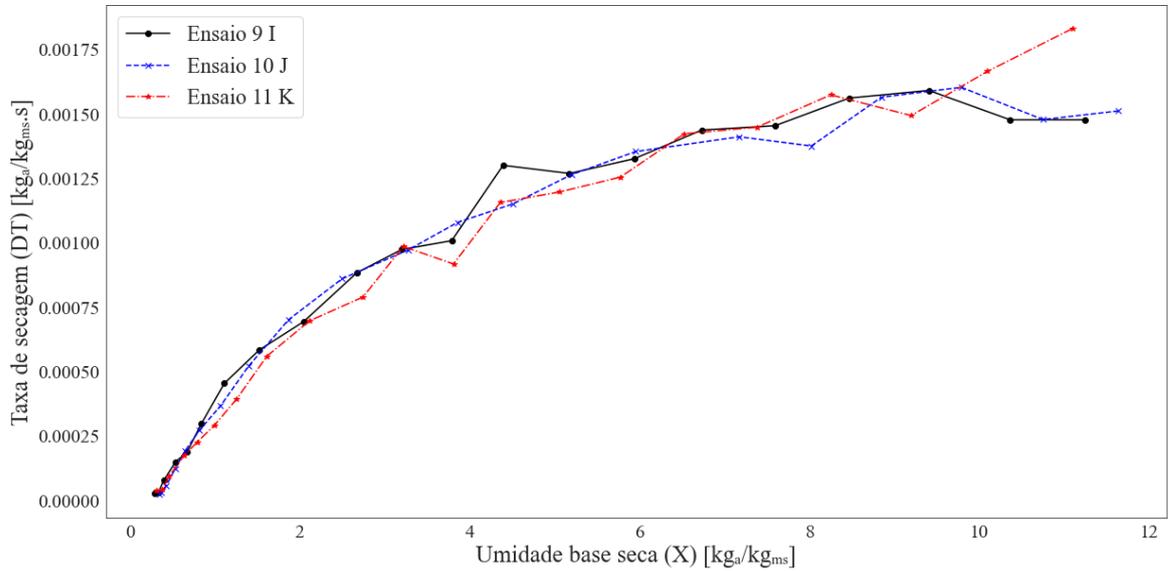


FIGURA II-D – Gráfico de taxa de secagem pela umidade por base seca dos ensaios 1, 2, 3 e 4 (fatoriais), referentes a câmara secundária.

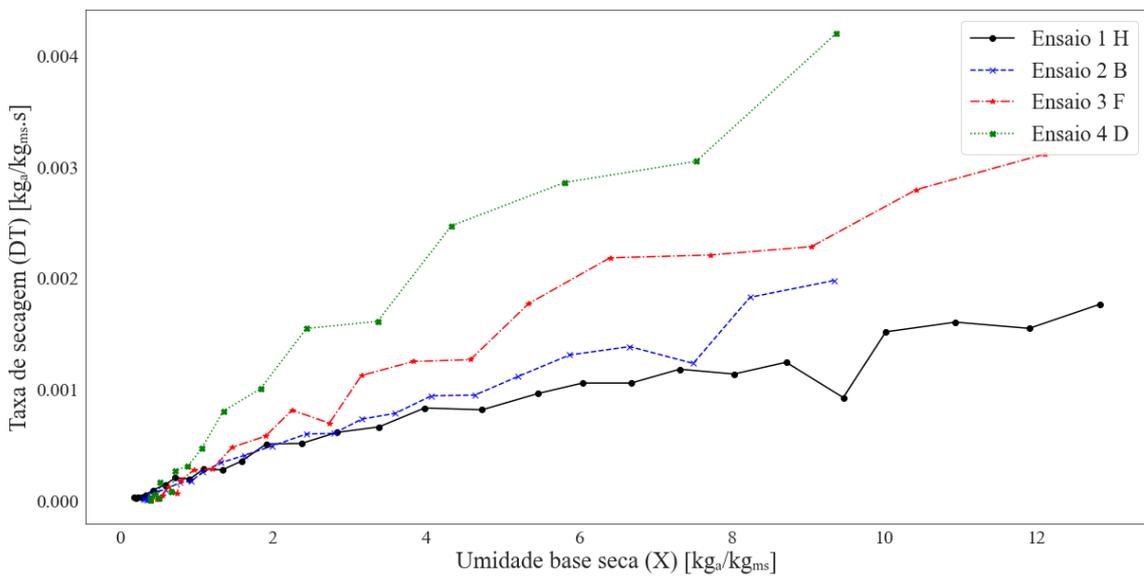


FIGURA III-E – Gráfico de taxa de secagem pela umidade por base seca dos ensaios 5, 6, 7 e 8 (axiais), referentes a câmara secundária.

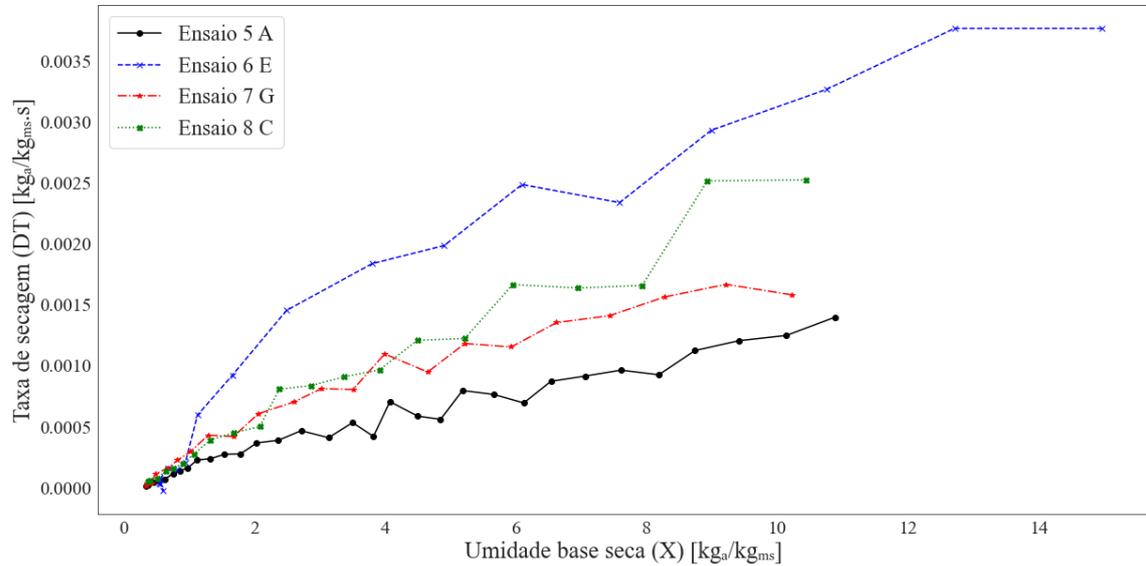
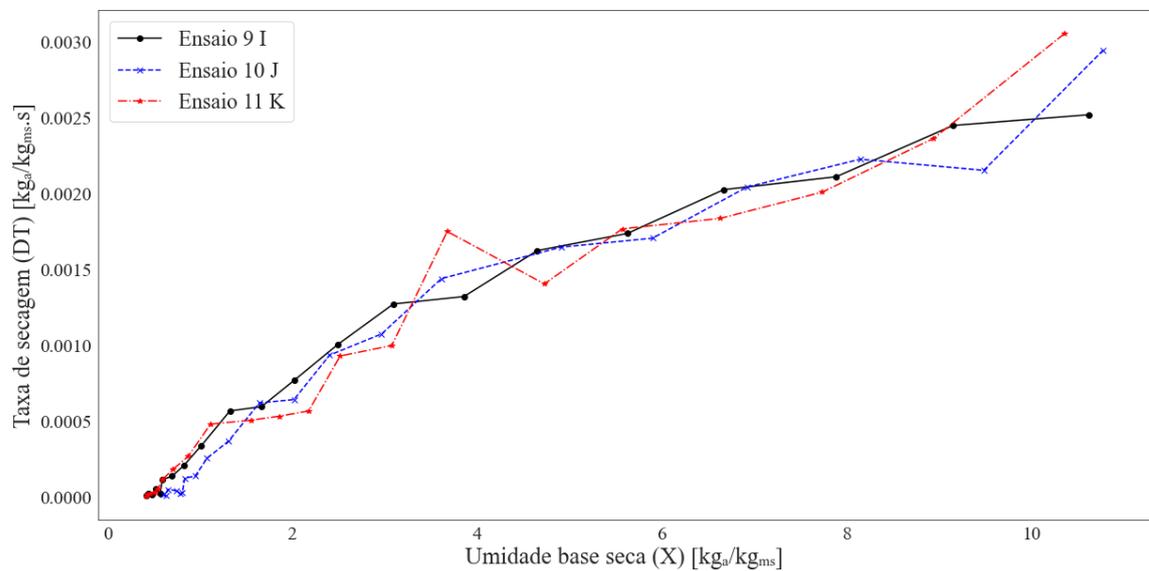


FIGURA III-F – Gráfico de taxa de secagem pela umidade por base seca dos ensaios 9, 10 e 11 (centrais), referentes a câmara secundária.



Apêndice III

FIGURA III-A – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 1 (H).

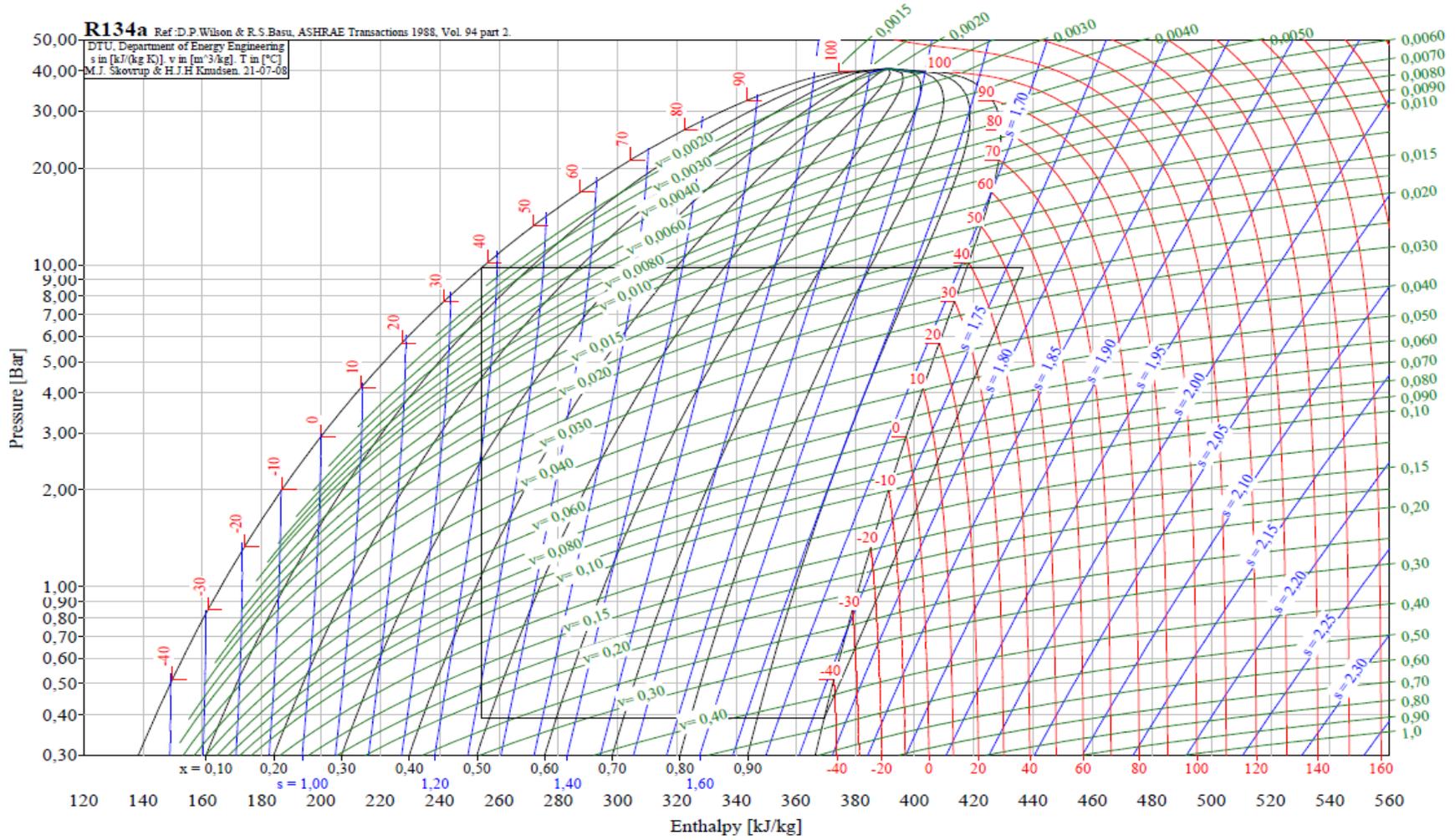


FIGURA III-B – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 2 (B).

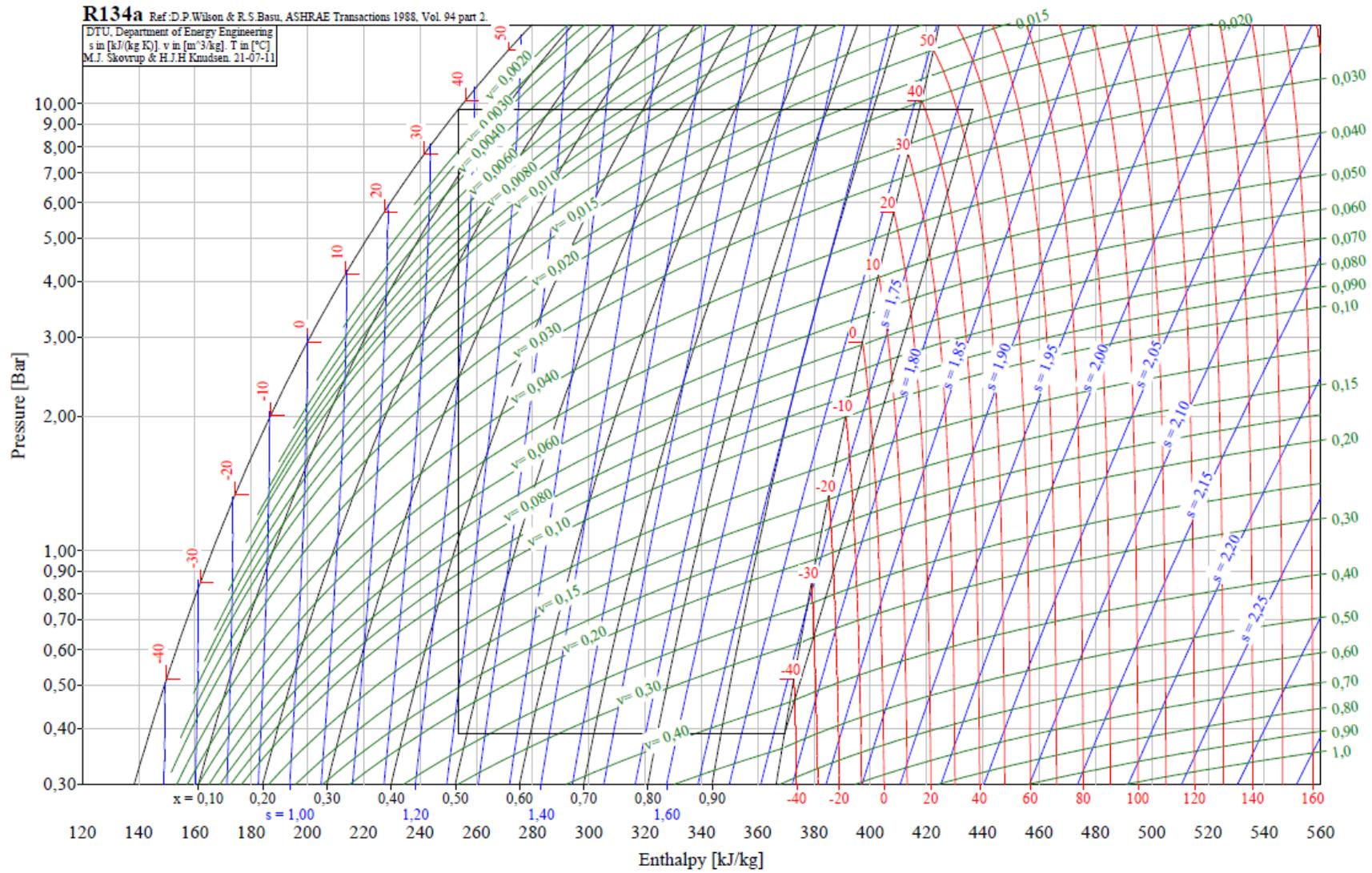


FIGURA III -C – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 3 (F).

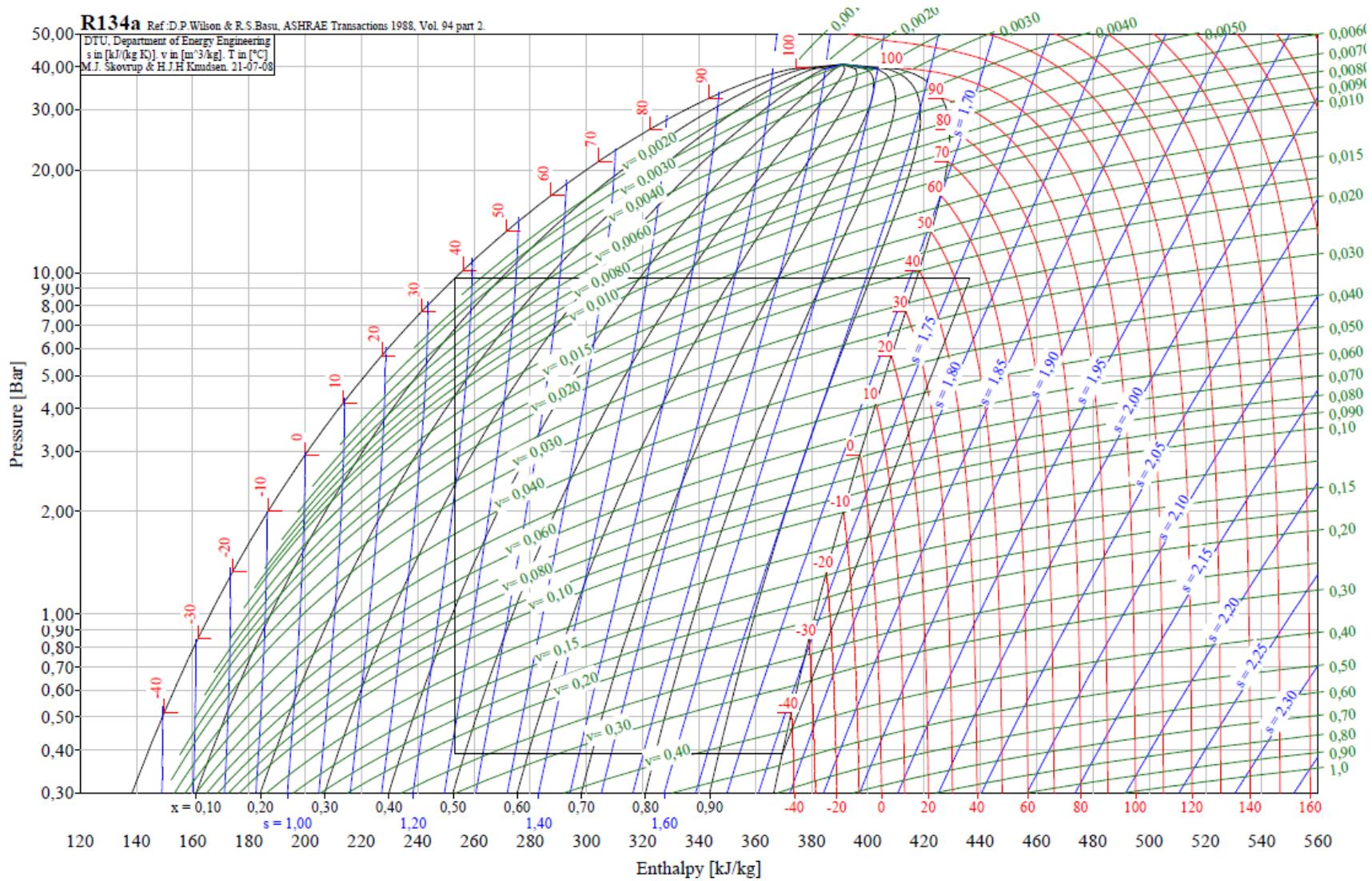


FIGURA III -D – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 4 (D).

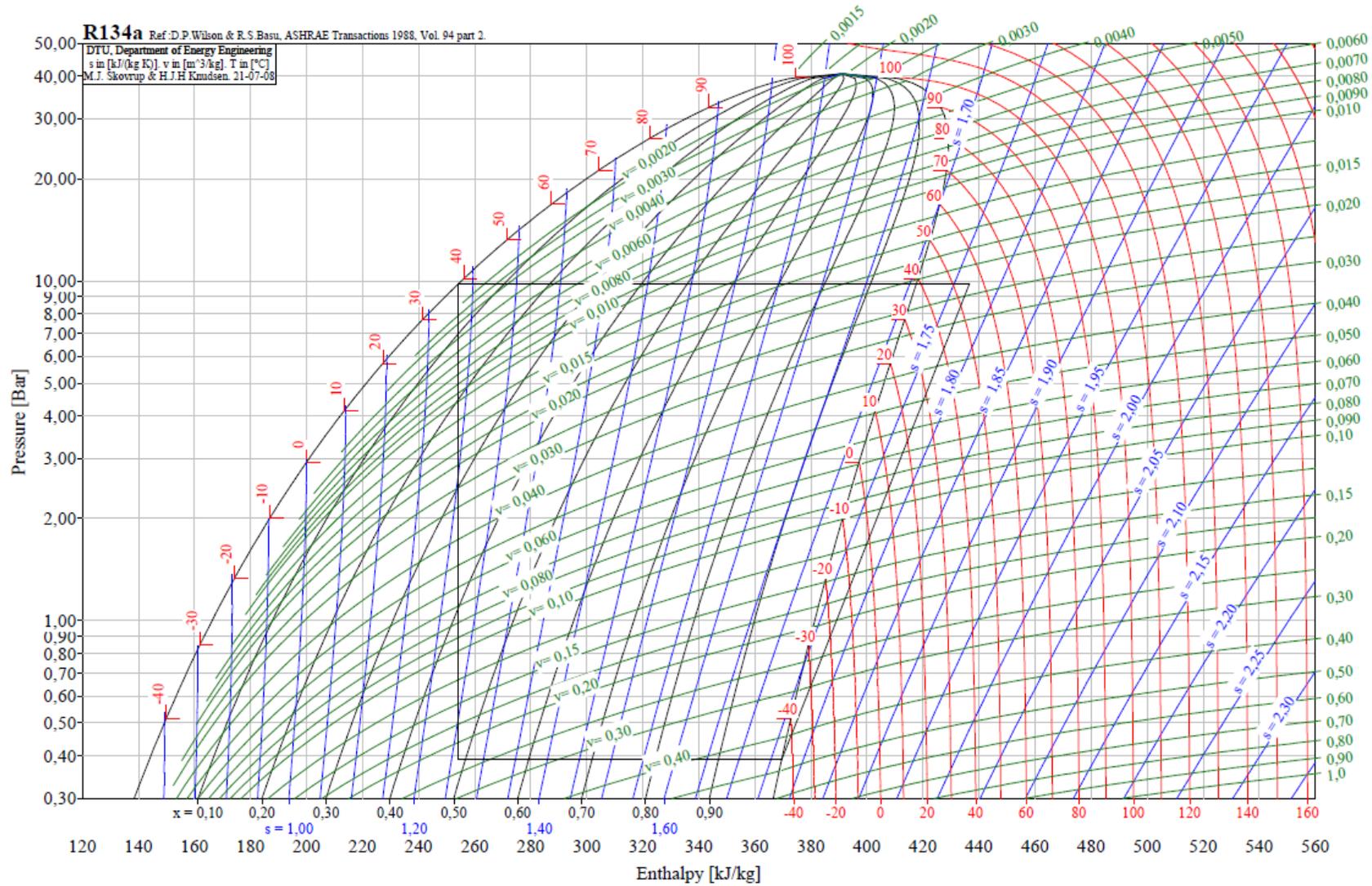


FIGURA III -E – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 5 (F).

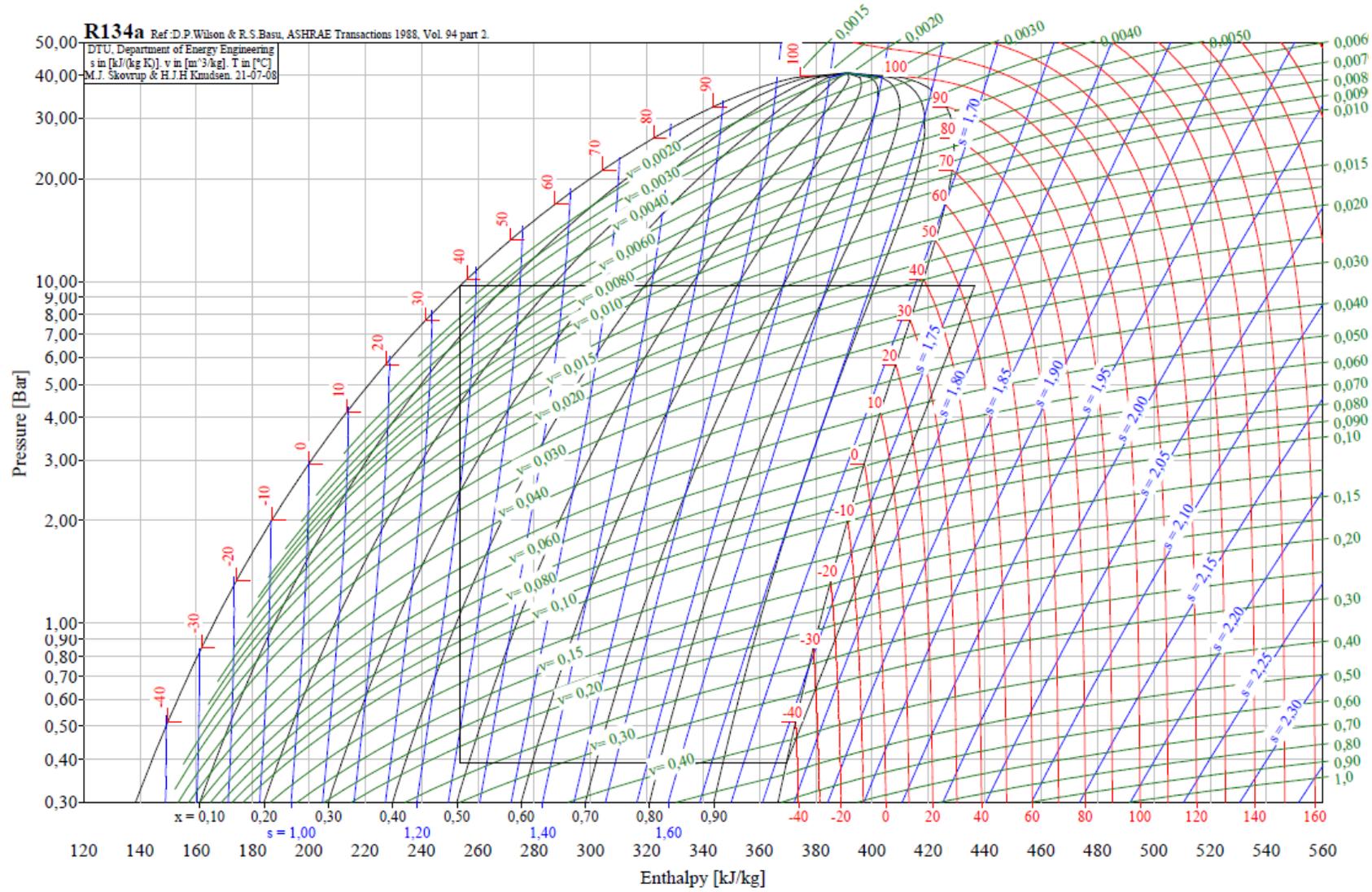


FIGURA III -F – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 6 (E).

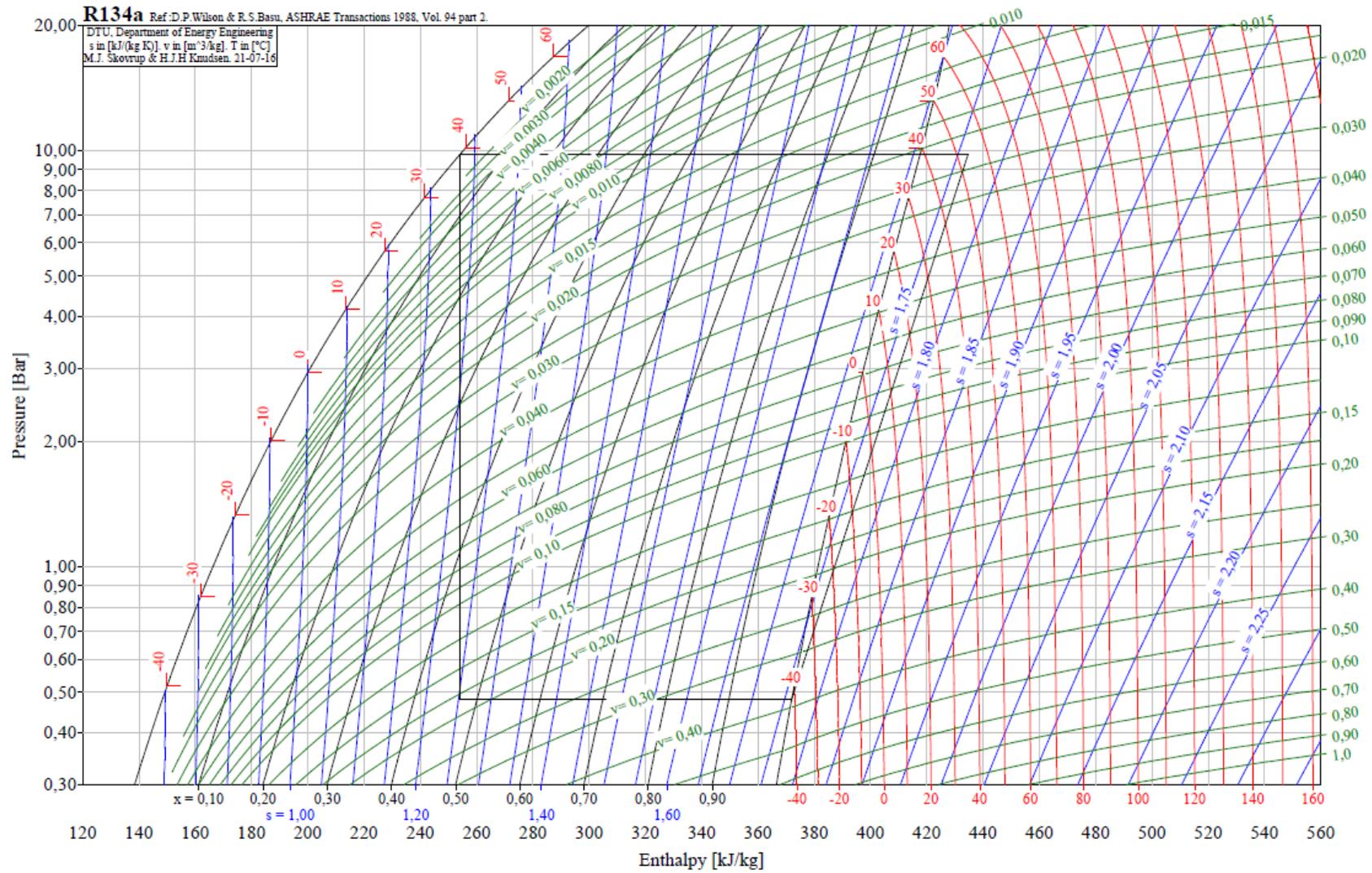


FIGURA III -G – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 7 (G).

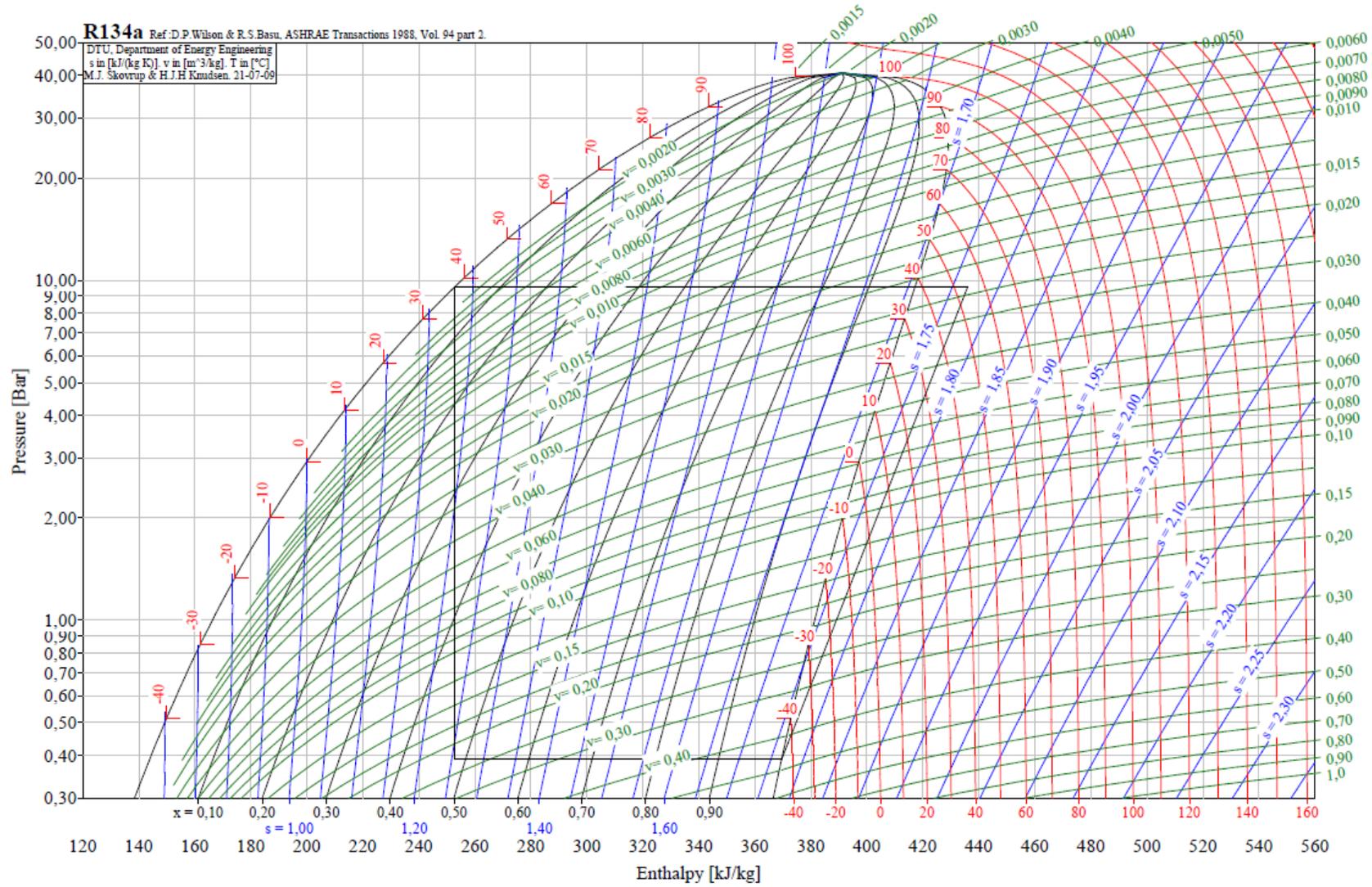


FIGURA III -H – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 8 (C).

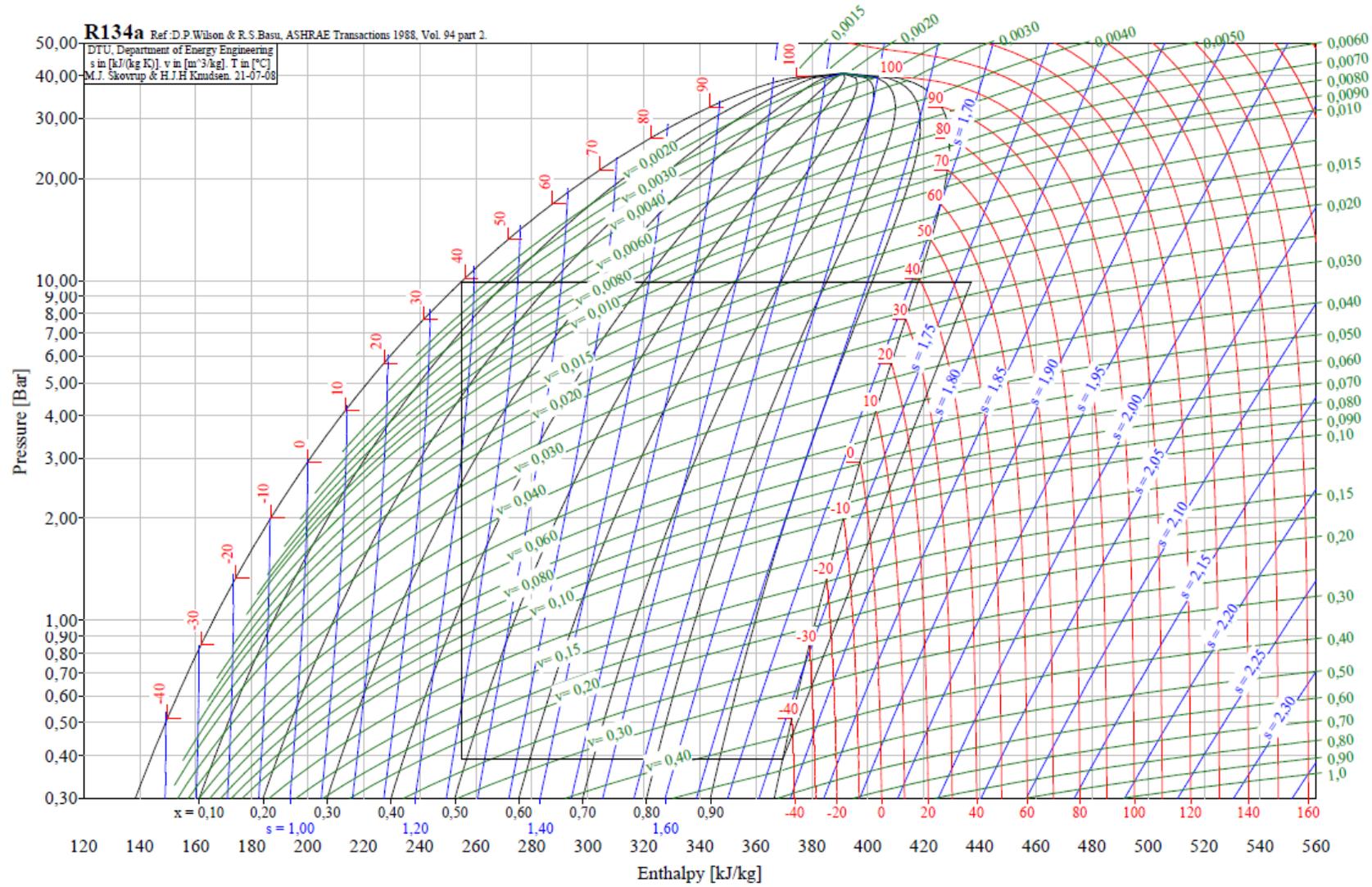


FIGURA III -I – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 9 (I).

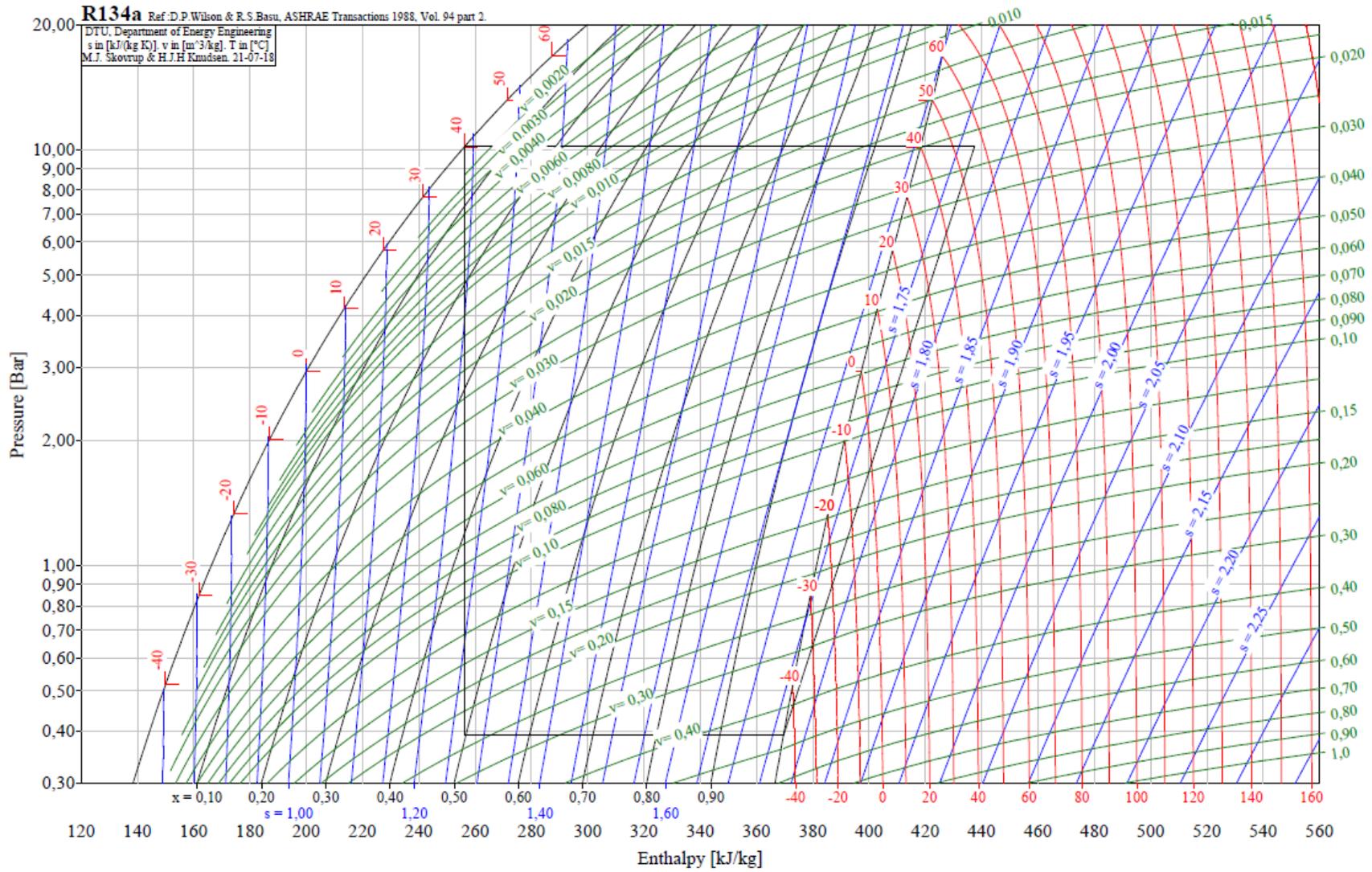


FIGURA III -J – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 10 (J).

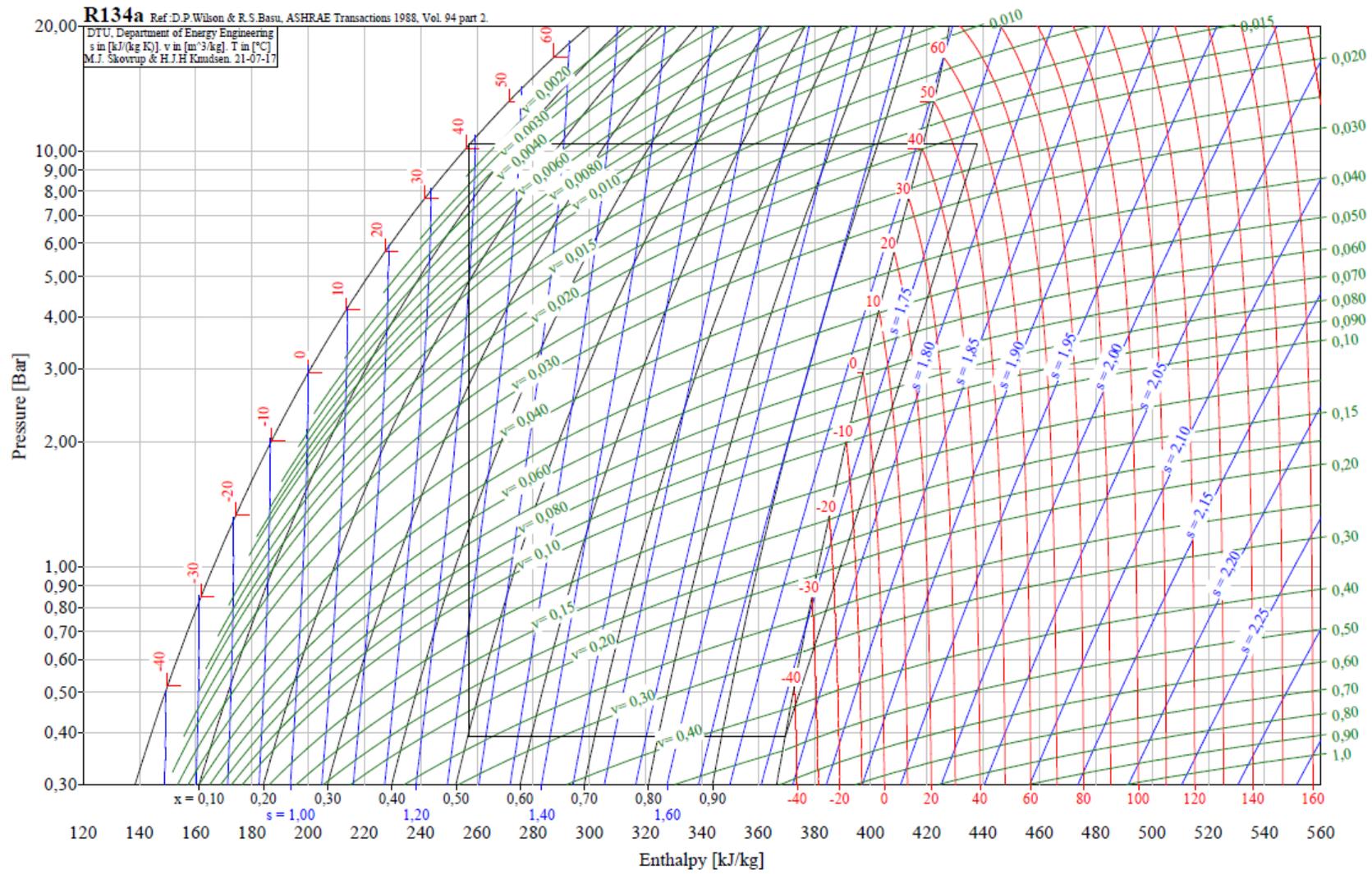


FIGURA III -K – Gráfico de entalpia-pressão do Ensaio 11 (K).

