

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DO
PROCESSO INDUSTRIAL DE FRITURA DE BATATAS-
PALHA

Arthur Aurélio de Almeida Freitas

Itajubá, Novembro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Arthur Aurélio de Almeida Freitas

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DO
PROCESSO INDUSTRIAL DE FRITURA DE BATATAS-
PALHA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como requisito à obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. José Henrique de Freitas Gomes

Itajubá, Novembro de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Arthur Aurélio de Almeida Freitas

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DO
PROCESSO INDUSTRIAL DE FRITURA DE BATATAS-
PALHA

Dissertação aprovada por banca examinadora em 04 de novembro de 2021, conferido ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Machado Fernandes (MF *Operational Excellence*)

Prof. Dr. Flávio Soares Silva (UNIFEI)

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi (UNIFEI)

Itajubá, Novembro de 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho para meus pais Cilene e Marcos para meu irmão Augusto que sempre me apoiaram e me incentivaram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por minha vida, por minha saúde e por proporcionar o convívio com pessoas grandiosas ao longo desta jornada.

Aos meus pais Cilene e Marcos, por não medirem esforços para me proporcionar uma educação de excelência e também por criarem um ambiente propício para meu desenvolvimento pessoal e profissional, sempre me orientando e apoiando nas mais complexas decisões. Também agradeço a eles pela paciência e compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao meu irmão Augusto, pela sincera amizade e companheirismo ao longo de minha vida.

Agradeço minha namorada Loiane Robles por ser minha incentivadora e aconselhadora ao longo desse tempo, pela compreensão e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço a toda sua família, principalmente pelos conselhos e apoios recebidos.

Especialmente ao professor e orientador José Henrique de Freitas Gomes, por abraçar a ideia deste projeto, sempre se colocando a minha disposição, pelo empenho, dedicação, paciência e por me guiar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Flávio Soares, que se interessou por este projeto desde seu início, sendo profundamente solícito e atencioso durante todo esse tempo, se colocando inteiramente à disposição e me orientando na realização das análises em laboratório. Agradeço ao engenheiro de alimentos Felipe Haddad, que auxiliou na execução dos testes realizados em laboratório e contribuiu com a troca de experiências que foram fundamentais para as análises realizadas neste estudo.

Aos técnicos e colaboradores do Laboratório de Química da UNIFEI, em especial ao professor Glauber Luz, pelo auxílio na realização dos experimentos, pela paciência e pela disponibilidade.

A meu amigo Raul Martinez, que esteve diretamente envolvido na construção do sistema de visão computacional para a análise de imagens e ao meu amigo Rodrigo Meirelles, que esteve envolvido na captação das imagens utilizadas neste trabalho.

Aos meus amigos Geovani Braga e Lucas Flauzino, pela sincera amizade e inspiração ao longo dos anos.

Aos professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, que proporcionaram a compreensão dos conceitos que foram utilizados como alicerce deste projeto.

Aos colaboradores da indústria em que os experimentos foram realizados, pelo empenho, paciência e disposição na realização dos ensaios.

Aos colegas de turma da UNIFEI e Fundação Getúlio Vargas, pela troca de experiências, pelo companheirismo e pelos ensinamentos.

À UNIFEI, por proporcionar os recursos necessários para a realização desse trabalho.

A todas as outras pessoas que estiveram envolvidas direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

A batata frita é um dos *snack foods* mais consumidos em todo o mundo. O tamanho do mercado global de batatas *chips* atingiu um valor de 31,2 bilhões de dólares em 2020, sendo considerado um dos alimentos mais importantes na indústria mundial de petiscos. O principal problema que acompanha o processo de fabricação desse produto é o alto teor de lipídios presente no produto final, que pode causar aumento dos níveis de pressão arterial e colesterol no sangue. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo a otimização do processo de fritura de batatas-palha por imersão em óleo. Assim, pretendeu-se identificar a combinação ótima dos parâmetros deste processo, proporcionando melhores resultados para as características do produto, sendo elas, o teor de umidade, teor de lipídios e coloração. Nesse contexto, pretendeu-se também minimizar o tempo de ciclo do processo. Os parâmetros do processo analisados foram: temperatura de operação, duração do processo de fritura e duração do escoamento do óleo após a fritura. Foram utilizadas batatas da espécie *Solanum tuberosum* (batata-inglesa) da variedade Asterix, em conjunto com óleo vegetal de palma. Para realizar o planejamento dos experimentos, coleta dos dados e análise dos experimentos foi utilizada a Metodologia da Superfície de Resposta. A otimização do modelo foi realizada utilizando o método do Erro Quadrático Médio Multivariado. Ao fim do trabalho, foi possível obter os valores ótimos das variáveis analisadas de 171,38 °C para temperatura de operação, 4,13 min para duração do processo de fritura e 32,27 s para duração do escoamento do óleo. Os valores ótimos obtidos para as respostas foram de 3,00% para teor de umidade, 29,57% para teor de lipídios, 1,75 para diferença total de cor e 280,05 s para o tempo de ciclo.

Palavras-Chave: Batatas fritas, Batata-palha, Fritura, Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia da Superfície de Resposta, Erro Quadrático Médio Multivariado, Otimização Multiobjetivo.

ABSTRACT

Fried potatoes are one of the most consumed snacks in the world. The size of the global potato chip market reached a value of 31.2 billion dollars in 2020, being considered one of the most important foods in the world snack industry. The main problem that accompanies the manufacturing process of this product is the high content of lipids in the finished product, which can cause an increase in blood pressure and cholesterol levels. In this context, this study aimed to optimize the frying process of shoestring potatoes using deep-fat frying process. Thus, it was intended the identification of the optimal combination of the process parameters, providing better results for the characteristics of the product, namely, moisture content, fat content and color. Also, it was intended the optimization of the process productivity by reducing cycle time. The parameters analyzed were temperature, duration of deep-fat frying process and duration of the oil drainage period after frying. Potatoes of the species *Solanum tuberosum* from Asterix variety and palm oil were used. The Response Surface Methodology was used in order to carry out the planning, data collection and analysis of the experiments. The model optimization was performed using the Multivariate Mean Square Error. At the end of this study, it was possible to obtain the optimized values of the analyzed inputs, which were 171.38 °C for temperature, 4.13 min for process duration and 32.27 s for oil drainage duration. The responses optimized values were 3.00% for moisture content, 29.57% for fat content, 1.75 for total color difference and 280.05 for cycle time.

Keywords: Fried potatoes, Shoestring potatoes, Deep-fat frying, Design of Experiments, Response Surface Methodology, Multivariate Mean Square Error Method, Multiobjective Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação do processo de fritura de batatas <i>chips</i> por imersão em óleo	7
Figura 2.2 - Sistemas de aquecimento por condução e micro-ondas.....	10
Figura 2.3 - Perda de umidade durante o processo de fritura de batatas a 180 °C	12
Figura 2.4 - Relação entre absorção de óleo e teor de umidade no processo de fritura de batatas a 180 °C	12
Figura 2.5 - Representação do olho humano em corte transversal	15
Figura 2.6 - Representação do sistema de cores $L^*a^*b^*$	17
Figura 2.7 - Representação de diferentes sistemas de visão computacional	19
Figura 2.8 - Variação de coloração em função da duração de fritura.....	20
Figura 2.9 - Evolução da quantidade de publicações relacionadas ao planejamento de experimentos e otimização do processo fritura	22
Figura 2.10 - Quantidade de publicações classificadas nas Categoria A, Categoria B e Categoria C.....	23
Figura 2.11 - Componentes de um processo.....	37
Figura 2.12 - Diagrama de Ishikawa	38
Figura 2.13 - Superfície de resposta apresentando o rendimento esperado (η) em função da temperatura (x_1) e da pressão (x_2)	40
Figura 2.14 - Plotagem do contorno da superfície de resposta.....	40
Figura 2.15 - Arranjo Composto Central (CCD) em um experimento com 2 ($k = 2$) e 3 ($k = 3$) fatores, respectivamente	41
Figura 3.1 - Representação do processo de fritura de batatas	46
Figura 3.2 – <i>Value Stream Mapping</i> com destaque para o objeto de estudo do trabalho.....	47
Figura 3.3 - Fluxograma do desenvolvimento do método experimental.....	49
Figura 4.1 - Processo de fritura em operação	54
Figura 4.2 - Painel eletrônico do equipamento, indicando a temperatura do óleo de fritura ...	54
Figura 4.3 - Batata crua em etapa anterior ao processo de fritura	54
Figura 4.4 - Batata frita após o processo	55
Figura 4.5 - Forno de convecção utilizado para determinação do teor de umidade das amostras	56
Figura 4.6 - Determinação do teor de umidade das amostras.....	57
Figura 4.7 - Filtragem e aquecimento da fase líquida em estufa.....	59
Figura 4.8 - Extração por micro-ondas e resfriamento em dessecador	60

Figura 4.9 - Lipídios obtidos após a extração e a após o resfriamento.....	60
Figura 4.10 - Sistema de visão computacional utilizado - vista superior	62
Figura 4.11 - Sistema de visão computacional utilizado - vista frontal	62
Figura 4.12 - Dimensões e ângulo de incidência de iluminação no sistema de visão computacional.....	63
Figura 4.13 - Seleção da área da amostra a ser segmentada.....	64
Figura 4.14 - Área da amostra após segmentação	65
Figura 4.15 - Imagem segmentada com eliminação de defeitos.....	65
Figura 4.16 - Imagem segmentada da amostra de referência e representação de sua coloração média	66
Figura 4.17 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para resíduos obtidos pelo modelo de teor de umidade.....	72
Figura 4.18 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para resíduos obtidos pelo modelo de teor de lipídios	73
Figura 4.19 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para resíduos obtidos pelo modelo de diferença total de cores	73
Figura 4.20 – Gráfico de resíduos versus ordem obtidos pelo modelo de teor de umidade.....	74
Figura 4.21 – Gráfico de resíduos versus ordem obtidos pelo modelo de teor de lipídios.....	74
Figura 4.22 – Gráfico de resíduos versus ordem obtidos pelo modelo de diferença total de cores.....	75
Figura 4.23 – Gráfico de resíduos versus valores ajustados obtidos pelo modelo de teor de umidade	76
Figura 4.24 – Gráfico de resíduos versus valores ajustados obtidos pelo modelo de teor de lipídios	76
Figura 4.25 – Gráfico de resíduos versus valores ajustados obtidos pelo modelo de diferença total de cores.....	77
Figura 4.26 - Efeitos principais para teor de umidade.....	78
Figura 4.27 - Efeitos principais para teor de lipídios	79
Figura 4.28 - Efeitos principais para diferença total de cor.....	81
Figura 4.29 - Efeitos principais para tempo de ciclo.....	82
Figura 4.30 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura (°C) e a duração do processo de fritura (min) sobre o teor de umidade (%) ($\Delta h = 30$ s)	83
Figura 4.31 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura (°C) e o tempo de escoamento do óleo (s) sobre o teor de umidade (%) ($\Delta t = 5,5$ min).....	84

Figura 4.32 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura (°C) e a duração do escamento de óleo (s) sobre o teor de lipídios (%) ($\Delta t = 5,5$ min).....	85
Figura 4.33 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura (°C) e a duração do processo de fritura (min) sobre a diferença total de cor ($\Delta h = 30$ s).....	86
Figura 4.34 - Efeito da interação entre a duração do processo de fritura (min) e a duração de escoamento do óleo (s) ($T = 160$ °C).....	87
Figura 4.35 – Gráfico de cargas fatoriais para CP1 e CP2.....	90
Figura 4.36 – Planilha utilizada na otimização empregando o EQMM.....	93
Figura 4.37 – Planilha utilizada para obtenção dos alvos em termos dos componentes principais.....	94
Figura 4.38 – Coloração teórica obtida pela otimização do modelo.....	95
Figura 4.39 – Coloração teórica obtida pela otimização do modelo.....	98
Figura 4.40 – Coloração obtida pelo experimento de confirmação.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com os métodos de fritura empregados	24
Tabela 2.2 - Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento de experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com o tipo de produto final fabricado	25
Tabela 2.3 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as matérias-primas utilizadas	26
Tabela 2.4 - Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com o tipo de óleo utilizado.....	28
Tabela 2.5 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com a escala do sistema.....	29
Tabela 2.6 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as variáveis analisadas no processo	31
Tabela 2.7 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as faixas de temperatura utilizadas	32
Tabela 2.8 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com a duração do processo de fritura	33
Tabela 2.9 - Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento de experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com os valores de espessura de corte utilizados.....	34
Tabela 2.10 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as respostas de interesse analisadas.....	35
Tabela 4.1 - Parâmetros variáveis e níveis de trabalho	52
Tabela 4.2 - Variáveis definidas como fixas	52
Tabela 4.3 - Determinação do tempo de ciclo da fabricação de cada amostra.....	67
Tabela 4.4 - Matriz experimental	68
Tabela 4.5 - Coeficientes obtidos para os modelos quadráticos completos	69
Tabela 4.6 - Análise de variância	70

Tabela 4.7 - Ajustes obtidos com os modelos completos e os modelos reduzidos	71
Tabela 4.8 - Teste de correlação entre as respostas analisadas	87
Tabela 4.9 - Autoanálise da Matriz de Correlação	89
Tabela 4.10 - Autovetores	89
Tabela 4.11 - Cálculo dos alvos em termos dos componentes principais	91
Tabela 4.12 – Parâmetros ótimos do processo de fritura de batatas palha utilizando o método de fritura por bateladas por imersão em óleo	94
Tabela 4.13 – Predição das respostas de interesse ótimas.....	96
Tabela 4.14 - Tamanho amostral e poderes de teste.....	96
Tabela 4.15 - Experimentos de confirmação	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Fatores utilizados como parâmetros variáveis e fixos no processo analisado.....51

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
ACP	Análise dos Componentes Principais
CCD	<i>Central Composite Design</i> (Arranjo Composto Central)
DOE	<i>Design of Experiments</i> (Planejamento de Experimentos)
EQMM	Erro Quadrático Médio Multivariado
RMS	Metodologia de Superfície de Resposta
R^2	Coefficiente de determinação
R^2 (adj.)	Coefficiente de determinação ajustado
R^2 (prev.)	Coefficiente de determinação para a previsão

LISTA DE SÍMBOLOS

Θ_{CP}	Alvo em termo dos componentes principais
λ_{CP}	Autovalores dos componentes principais
AD	Coefficiente de Anderson-Darling
R^2	Coefficiente de determinação
β	Coefficiente do modelo matemático a ser estimado
b^*	Componente tricromático padronizado de coloração (amarelo/azul)
a^*	Componente tricromático padronizado de coloração (vermelho/verde)
L^*	Componente tricromático padronizado de iluminação
σ_y	Desvio-padrão experimental da resposta
ΔE	Diferença total de cor
α	Distância dos pontos axiais em relação aos pontos centrais
Δt	Duração do processo de fritura
ε	Erro Experimental
E	Espessura do filete de batata
M_1	Massa (em gramas) do recipiente seco com amostra não seca
M_0	Massa (em gramas) do recipiente seco para determinação do teor de umidade
M_2	Menor massa (em gramas) do conjunto recipiente e amostra secos
CP	Modelo de superfície de resposta desenvolvido para os escores do componente principal
K	Potência do equipamento de fritura
Π	Produtório
y	Respostas de interesse
Σ	Somatório

T	Temperatura do processo de fritura
Tc	Tempo de ciclo do processo de fritura
L	Teor de lipídios
U	Teor de umidade
N	Tipo de óleo utilizado no processo de fritura
P	Tipo de pré-tratamento do processo de fritura
x	Variáveis independentes

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Relevância e justificativa.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Delimitação do tema.....	3
1.4. Estrutura do trabalho	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1. Fritura de alimentos	6
2.1.1. Conceitos e definições.....	6
2.1.2. Processo de fritura de batatas	6
2.2. Lipídios em alimentos	7
2.2.1. Conceitos e definições.....	7
2.2.2. Medição do teor de lipídios em alimentos	8
2.2.3. Vantagens da utilização da extração auxiliada por micro-ondas	9
2.3. Umidade em alimentos	11
2.3.1. Conceitos e definições.....	11
2.3.2. Medição do teor de umidade em alimentos.....	13
2.4. Coloração em alimentos	14
2.4.1. Conceitos e definições.....	14
2.4.2. Medição de coloração em alimentos	17
2.4.3. Vantagens de se utilizar o sistema de visão computacional.....	20
2.5. Pesquisas anteriores relacionadas a processos de fritura.....	21
2.5.1. Objetivos e critérios de busca	21
2.5.2. Classificação dos trabalhos quanto à data de publicação.....	21
2.5.3. Classificação dos trabalhos quanto ao tema abordado	22
2.5.4. Classificação dos trabalhos quanto aos processos de fritura utilizados	23
2.5.5. Classificação dos trabalhos por tipo de produto final fabricado	25
2.5.6. Classificação dos trabalhos pelo tipo de batata <i>in natura</i> utilizada	26
2.5.7. Classificação dos trabalhos pelo tipo de óleo utilizado	27
2.5.8. Classificação dos trabalhos quanto à escala de produção utilizada	29
2.5.9. Classificação dos trabalhos quanto às variáveis do processo de fritura.....	30
2.5.10. Classificação dos trabalhos quanto às respostas de interesse analisadas	34
2.6. Projeto e Análise de Experimentos.....	36
2.7. Metodologia de Superfície de Resposta	39

2.8. Múltiplas respostas	41
2.9. Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM)	42
2.10. Considerações finais	44
3. MÉTODO EXPERIMENTAL	45
3.1. Considerações iniciais	45
3.2. Objeto de estudo e problema de pesquisa	45
3.3. Método experimental	48
3.4. Considerações finais	49
4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL	50
4.1. Considerações iniciais	50
4.2. Metodologia de Superfície de Resposta	50
4.2.1. Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho	50
4.2.2. Escolha das respostas de interesse	52
4.2.3. Definição da matriz experimental	53
4.2.4. Execução dos experimentos e registro das respostas	53
4.2.5. Modelagem matemática das respostas	68
4.2.6. Ajuste dos modelos	69
4.2.7. Análise dos resíduos	72
4.2.8. Obtenção das superfícies de resposta	77
4.2.9. Análise dos efeitos principais dos parâmetros	77
4.2.10. Análise do efeito das interações entre os parâmetros	82
4.2.11. Análise da correlação entre as respostas	87
4.3. Formulação do EQMM	88
4.3.1. Análise de Componentes Principais	88
4.3.2. Modelos matemáticos para os componentes principais	90
4.3.3. Alvos em termos dos componentes principais	91
4.3.4. Formulação EQMM	91
4.4. Experimentos de confirmação	95
4.5. Considerações finais	98
5. CONCLUSÕES	100
5.1. Conclusões Gerais	100
5.2. Contribuições do trabalho	101
5.3. Sugestões para estudos futuros	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	108

ANEXO A - Obtenção do teor de umidade das amostras analisadas	108
ANEXO B - Determinação das massas utilizadas na obtenção do teor de lipídios das amostras analisadas.....	109
ANEXO C - Obtenção do teor de lipídios das amostras analisadas	110
ANEXO D - Obtenção dos valores de L^* , a^* , b^* e ΔE das amostras analisadas	111
ANEXO E - Relatório fotográfico da coloração obtida para as amostras analisadas.....	112
ANEXO F - Primeiro artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), publicado em outubro de 2020.	113
ANEXO G – Segundo artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), em outubro de 2021.	114
ANEXO H – Terceiro artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), em outubro de 2021.	115

1. INTRODUÇÃO

1.1. Relevância e justificativa

A batata-inglesa é um alimento consumido por mais de um bilhão de pessoas e sua produção mundial ultrapassou 370 milhões de toneladas por ano, sendo uma das maiores culturas agrícolas do mundo (FAO, 2019). A batata é um alimento altamente recomendado pela Food and Agriculture Organization (FAO) como cultura de segurança alimentar considerando as incertezas sobre o abastecimento de alimentos, crescimento populacional, taxas constantes de fome e de uma demanda crescente por alimentos (FAO, 2009).

Além da relevância em termos de sua produção, os sistemas de cultivo da batata também têm relevância na economia de pequenos agricultores de todo o mundo, proporcionando acesso a alimentos nutritivos e aumentando sua renda familiar (DEVAUX; KROMANN; ORTIZ, 2014). No Brasil, foram produzidas aproximadamente 3,7 milhões de toneladas de batatas em 2019 (FAO, 2019).

Nesse contexto, as batatas chips são um dos *snack foods* mais consumidos em todo o mundo. O tamanho do mercado global de batatas *chips* atingiu um valor de 31,2 bilhões de dólares em 2020 e espera-se que seja alcançado o valor de 39,8 bilhões de dólares até 2026. Para os próximos anos, é esperado que aumento do mercado global de batatas *chips* seja impulsionado por países em desenvolvimento (IMARC, 2020).

Uma das principais etapas do processo de fabricação das batatas é a etapa de fritura, que é um dos maiores dos fatores responsáveis pelas características organolépticas únicas desse tipo de alimento, tais como sabor, textura e aparência visual. Essa etapa consiste em um processo complexo que envolve a imersão do alimento em óleo quente em temperaturas acima do ponto de ebulição da água (PEDRESCHI, 2012). Devido sua influência na qualidade e segurança dos produtos fritos, a fritura é considerada a etapa mais crítica do processo de produção de batatas fritas, sendo influenciada por parâmetros como tempo de processamento, temperatura do óleo, composição do alimento, perfil de aquecimento dos produtos e oxidação do óleo (PICOUET *et al.*, 2019).

Recentemente, a preferência dos consumidores por produtos com baixo teor de gordura tem motivado as indústrias de produtos alimentícios a produzirem batatas fritas com teor reduzido de gorduras e, ao mesmo tempo, mantendo as características desejadas de textura e sabor (SONG *et al.*, 2007). As batatas *chips* possuem um teor de lipídios de aproximadamente 35% a 45% e, nos últimos tempos, esse fato tem sido o maior fator prejudicial a aceitação dos

produtos fritos pelo mercado consumidor (BUNGER *et al.*, 2003). Por esse motivo, a absorção de gordura pelas batatas se tornou uma importante resposta a ser controlada durante o processo de fritura (SONG *et al.*, 2007).

De acordo com Song *et al.* (2007), diversos fatores influenciam a absorção de óleo durante a fritura por imersão, entre os quais estão a qualidade do óleo utilizado, a temperatura de fritura, a duração do processo, o teor de umidade inicial do produto e a porosidade do produto. Recentemente, a demanda dos consumidores e comerciantes por alimentos mais seguros, nutritivos, saborosos e com preços acessíveis tem aumentando ininterruptamente (PICOUET *et al.*, 2019). Assim, para que seja possível reduzir o teor de óleo neste tipo de produto é extremamente importante entender os mecanismos envolvidos no processo de fritura (PARIKH e TAKHAR, 2016).

Além dos fatos mencionados, análises de trabalhos anteriores relacionados à fritura de batatas, planejamento de experimentos e otimização revelaram que a maioria dos trabalhos publicados analisaram processos de fritura em pequena ou média escala, desenvolvidos em laboratórios ou utilizando equipamentos de baixa capacidade produtiva, enquanto poucos trabalhos como Baumann e Escher (1995), Giri *et al.* (2019) e Parikh e Takhar (2016) analisaram a otimização do processo de fritura em ampla escala. Além deste fato, percebe-se que a maioria dos trabalhos analisados investigou a otimização do processo de fritura de batatas *chips*, enquanto apenas três trabalhos analisaram a otimização em batatas fritas em formato de palito e nenhum deles pesquisou sobre o processo de fritura de batatas-palha.

Dessa maneira, considerando a relevância da participação do objeto de estudo no mercado mundial de alimentos, em conjunto com a demanda exigida pelo mercado por produtos mais saudáveis e de notável qualidade, ao mesmo tempo em que se nota uma baixa quantidade de trabalhos relacionados a otimização do processo de fritura de batatas em escala industrial e a pequena quantidade de trabalhos sobre a fabricação de batata-palhas, o desenvolvimento desta investigação foi considerado de grande pertinência.

1.2. Objetivos

Este trabalho foi elaborado com o objetivo principal de realizar a análise, modelagem e otimização do processo de fritura de batatas-palha por meio da combinação dos parâmetros envolvidos neste processo que permitam a melhoria na qualidade dos produtos acabados. Os parâmetros do processo estudado incluíram a duração do processo de fritura, temperatura do

óleo de fritura e o tempo de escoamento do óleo após o processo. Os objetivos gerais também consideraram os seguintes objetivos específicos.

- Identificação dos parâmetros do processo de fritura de batatas que são significativos para as respostas de interesse;
- Estudo dos efeitos das variáveis de controle e suas interações;
- Desenvolvimento de modelos matemáticos relacionando os parâmetros de fritura com as respostas de interesse;
- Identificação de uma combinação ótima dos parâmetros de fritura visando a:
 - Minimização do teor de lipídios;
 - Minimização do teor de umidade;
 - Minimização da diferença total de cor (ΔE);
 - Minimização do tempo de ciclo do processo;
- Validação experimental dos resultados.

Este trabalho está relacionada à área de Pesquisa Operacional e subárea de Modelagem, Simulação e Otimização. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado a experimentação como método de pesquisa e a Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) para o planejamento e análise dos experimentos.

1.3. Delimitação do tema

Foram levadas em consideração algumas delimitações por características específicas deste estudo, classificadas conforme o processo de fabricação, matérias-primas utilizadas, tipo de produto fabricado, arranjo experimental, algoritmo de otimização, entre outros:

- **Método de fritura:** existem diversos métodos de fritura de alimentos, entre os quais podem ser citados a fritura por micro-ondas, fritura a vácuo e fritura contínua em óleo. O presente trabalho aborda somente o processo de fritura por imersão em óleo sob a forma de bateladas. Portanto, os resultados aqui obtidos não são necessariamente aplicáveis a outros tipos de processo;
- **Meio de fritura:** a fritura por imersão em óleo pode utilizar óleos e gorduras de diferentes origens, podendo ser fabricados a partir da soja, amendoim, girassol, algodão, entre outros. O presente estudo aborda somente processos de fritura que utilizaram óleo de palma. Dessa maneira, os resultados obtidos nestes estudos não são aplicáveis a processos de fritura que utilizam óleos e gorduras de outros tipos;

- **Espécie e variedade do produto:** neste trabalho foram utilizadas especificamente de batatas da espécie *Solanum tuberosum* e da variedade Asterix. Assim, os resultados obtidos não são necessariamente aplicáveis a outras espécies como batata-doce e a outras variedades como César, Ágata, Monalisa, entre outras;
- **Tipo de produto fabricado:** este trabalho foi desenvolvido considerando a fabricação de batatas-palha com espessura aproximada de 3 mm e comprimento aproximado de 30 mm. Logo, os resultados obtidos não podem abranger o processo de fabricação de batatas *chips*, batatas palito ou outros tipos de batatas fritas em formatos distintos;
- **Parâmetros do processo:** como parâmetros do processo, foram analisados somente a temperatura do óleo de fritura, duração do processo de fritura e tempo de escoamento do óleo após a fritura. Variáveis como variedade da batata, etapas de pré-processamento e potência do equipamento foram considerados como parâmetros fixos. Outras variáveis como temperatura do ambiente, umidade do ar e qualificação dos operadores foram consideradas como fatores incontroláveis.
- **Respostas do processo:** as respostas analisadas neste trabalho ficaram restritas ao teor de umidade, teor de lipídios, diferença de coloração e tempo de ciclo do processo. Sendo assim, outras características como textura e sabor não foram analisadas;
- **Os arranjos experimentais:** o planejamento e condução dos experimentos foram baseados no arranjo composto central, assim, os modelos matemáticos obtidos são restritos aos componentes destes arranjos;
- **Método de otimização:** este trabalho utilizou somente o método de otimização do Erro Quadrático Médio Multivariado. Assim, outros métodos de otimização não foram considerados;
- **Algoritmo de otimização:** neste trabalho foi utilizado exclusivamente o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) como algoritmo de otimização. Assim, outros algoritmos não foram utilizados.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos, formados por introdução, fundamentação teórica, método experimental, aplicação do método experimental e conclusões. O primeiro capítulo faz a inserção do objeto de estudo deste trabalho, realiza sua contextualização e justifica seu desenvolvimento. Neste capítulo são apresentados os resultados esperados com o desenvolvimento do trabalho e também são apresentadas as delimitações da pesquisa.

O Capítulo 2 consiste na fundamentação teórica sobre os assuntos abordados no trabalho. Ele compreende os conceitos utilizados em seu desenvolvimento, com o objetivo de sustentar os métodos e as etapas de desenvolvimento do estudo. Dessa maneira, neste capítulo são apresentados os conceitos relacionados ao processo de fritura de alimentos, além das características que impactam a qualidade dos resultados obtidos pelo processo, tais como o teor de lipídios, teor de umidade e coloração do produto fabricado. Nesse contexto, também são apresentados os principais conceitos e definições sobre cada uma das características da qualidade abordadas, bem como os métodos utilizados para a medição de cada uma dessas características. Neste capítulo também são apresentadas as principais pesquisas anteriores relacionadas ao tema de estudo.

O Capítulo 3 relata o método experimental utilizado pelo trabalho, apresenta o problema de pesquisa e também relata as etapas seguidas no desenvolvimento do estudo.

No Capítulo 4 é realizado o desenvolvimento da aplicação do método experimental. Nesse sentido, o capítulo relata os métodos utilizados, os registros obtidos e, por fim, os resultados obtidos são apresentados.

O Capítulo 5 faz a consolidação dos resultados obtidos com o desenvolvimento do estudo. Além disso, as principais contribuições do trabalho são apresentadas e também é realizada a proposição de algumas sugestões para estudos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fritura de alimentos

2.1.1. Conceitos e definições

A fritura por imersão em óleo pode ser definida como um processo em que ocorre a secagem e cozimento de um alimento por meio de seu contato com óleo quente (SAHIN *et al.*, 1999). O processo de fritura gera mudanças nas estruturas físico-químicas dos carboidratos, proteínas e gorduras presentes nos alimentos, além de mudanças microbiológicas como a gelatinização do amido, desnaturação da proteína, reação de *Maillard* e a reação de caramelização (ZHANG *et al.*, 2018). Giri *et al.* (2019) afirmam que a alta temperatura do processo de fritura gera uma elevada taxa de transferência de calor entre o alimento e o meio de fritura, fazendo com que ocorra um cozimento rápido, alterando as características de textura e coloração do alimento. De acordo com Baumann e Escher (1995), Hindra e Baik (2006), esse processo é caracterizado por causar a evaporação de grande quantidade de água presente nos alimentos, proporcionando alterações em suas propriedades mecânicas e estruturais

Devido à preparação rápida, fácil e econômica e devido ao sabor único que o processo proporciona aos produtos, a fritura por imersão em óleo se tornou um método muito popular no preparo de alimentos (ARSLAN *et al.*, 2018; GIRI *et al.*, 2019; RIMAC-BRNČIĆ *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2018).

2.1.2. Processo de fritura de batatas

A fabricação de batatas fritas por imersão em óleo ocorre por meio da transferência de calor proveniente do óleo quente, que resulta na remoção de água e absorção de óleo pelo produto (AGUILERA; GLORIA-HERNANDEZ, 2000). Com a evaporação da água após o contato da batata com o óleo aquecido, a camada externa do produto começa a secar, dando início a formação de uma crosta em sua superfície. Durante o processo de evaporação da água presente em seu interior é gerado um gradiente positivo de pressão que faz com que o vapor escape do alimento por meio de canais e capilares abertos na estrutura celular (GAMBLE *et al.*, 1987).

Quando a batata é removida do óleo, sua temperatura começa a reduzir, fazendo com que ocorra a condensação do vapor, gerando uma redução da pressão interna no produto, que faz

com que seja criado um vácuo de pressão, facilitando a absorção de óleo pelo produto. Nesse sentido, a quantidade de óleo que entra na batata apresenta uma relação direta com a quantidade de umidade perdida pelo produto (GAMBLE *et al.*, 1987).

Essas transformações químicas e físicas que ocorrem durante o processo de fritura são responsáveis por atribuir características sensoriais a este produto e, por isso, são de grande relevância. A fritura por imersão em óleo melhora as propriedades organolépticas da batata, proporcionando um sabor característico e melhoria na palatabilidade.

O principal problema que acompanha a fritura de batatas por imersão em óleo é o alto teor de lipídios presente no produto final. Este problema está relacionado a sua associação com a incidência de problemas de saúde, tais como a obesidade, hipertensão e altos níveis de colesterol (MELLEMA, 2003). Nesse contexto, é importante que os produtos produzidos utilizando esse tipo de processo satisfaçam tanto as exigências de saúde quanto os aspectos sensoriais esperados pelos consumidores (OZTOP *et al.*, 2007a). A representação do processo de fritura de batatas foi realizada na Figura 2.1, demonstrando os fenômenos de evaporação de umidade a absorção de óleo pelas batatas.

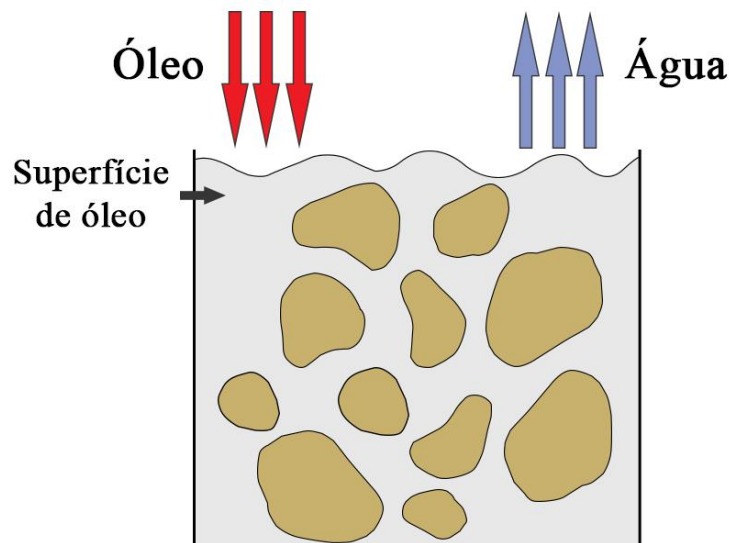


Figura 2.1 - Representação do processo de fritura de batatas *chips* por imersão em óleo

Fonte: Adaptado de Arslan *et al.* (2018)

2.2. Lipídios em alimentos

2.2.1. Conceitos e definições

De acordo com Song *et al.* (2007), alguns fatores que influenciam o teor de absorção de lipídios pelos alimentos são: a qualidade do óleo de fritura utilizado, a temperatura de fritura,

duração do processo de fritura, teor de umidade inicial do alimento, tensão interfacial inicial do alimento, porosidade do alimento e características de sua camada superficial. De acordo com Pedreschi (2012), outros fatores ainda podem influenciar o teor de absorção de lipídios pela batata, tais como a deterioração do óleo utilizado, pressão da fritura, geometria do alimento, composição química do alimento, pré-tratamentos e rugosidade da superfície do alimento.

Nas batatas *chips*, a fritura por imersão em óleo pode reduzir o teor de umidade de 80% para aproximadamente 2%. De acordo com Aguilera e Gloria-Hernandez (2000), conjuntamente com essa redução ocorre um aumento considerável no teor de óleo presente nas batatas, que atinge cerca de 35% da massa do produto final, podendo aproximar de 40% (KITA; LISIŃSKA; GOŁUBOWSKA, 2007). Uma outra característica do processo de absorção de óleo pelas batatas, apontada por diversos estudos, é que grande quantidade do óleo absorvido por esse produto fica retida em sua superfície e sua penetração ocorre somente durante seu resfriamento, após o processo de fritura (AGUILERA e GLORIA-HERNANDEZ, 2000; BOUCHON e AGUILERA, 2001; BOUCHON *et al.*, 2003).

O consumo excessivo de gordura é considerado uma importante causa para o aumento dos níveis de pressão arterial e colesterol no sangue, além de ser um dos fatores responsáveis pelo surgimento de doenças cardíacas coronárias. Dessa maneira, o interesse por produtos com teor reduzido de gorduras tem aumentado nos últimos tempos (SINGTHONG e THONGKAEW, 2009). Nesse contexto, é de grande importância que os produtos produzidos utilizando processos de fritura satisfaçam tanto as exigências de saúde quanto os aspectos sensoriais esperados pelos consumidores (OZTOP *et al.*, 2007a). Esse fato tem sido uma importante razão para que as indústrias produzam batatas fritas com teor reduzido de gorduras e que, ao mesmo tempo, mantenham boas características de textura e sabor (SONG *et al.*, 2007).

Nessa direção, métodos alternativos tem sido desenvolvidos para a obtenção de produtos fritos com menor absorção de óleo durante o processo. Entre as técnicas que já se mostraram eficientes na redução do teor de óleo absorvido pelos produtos estão: revestimento dos alimentos com hidrocoloides e amidos modificados, redução da umidade inicial da batata crua, desidratação osmótica anterior ao processo e fritura a vácuo (OZTOP *et al.*, 2007b; RIMAC-BRNČIĆ *et al.*, 2004; SONG *et al.*, 2007).

2.2.2. Medição do teor de lipídios em alimentos

A extração em amostras sólidas utilizando solvente, também conhecida como extração sólido-líquida, ou lixiviação, é uma das formas mais antigas de pré-tratamento de amostras

sólidas. Entre as técnicas utilizadas para a realização deste procedimento, a extração Soxhlet tem sido a técnica padrão durante mais de um século e, dessa maneira, foi o tipo de processo mais utilizado ao longo do tempo (CASTRO e GRACIA-AYUSO, 1998).

Na extração Soxhlet convencional, a amostra é colocada em um recipiente de papel, que é preenchido gradualmente com um solvente. Dessa maneira, no decorrer do processo, o solvente vai dissolvendo os componentes do composto e carregando os analitos extraídos. Essa operação é realizada por diversos ciclos, até que a extração completa seja realizada. Após a extração, é executada a etapa de aquecimento da mistura, como o objetivo de evaporar o solvente para isolar os analitos extraídos (CASTRO e GRACIA-AYUSO, 1998; CASTRO e PRIEGO-CAPOTE, 2010).

As desvantagens mais significativas da extração Soxhlet, quando comparada a outras técnicas utilizadas na preparação de amostras são o longo tempo demandado para a extração e a grande quantidade de solvente necessária, que possui elevado custo e pode causar problemas ambientais. Além disso, na extração Soxhlet, as amostras são usualmente extraídas no ponto de ebulição do solvente durante um longo período de tempo e, dessa maneira, existe a possibilidade de que aconteça a decomposição térmica de compostos alvos, quando se tratarem de analitos termolábeis. A dificuldade para que esta técnica seja automatizada para processamentos de diversas amostras também é uma desvantagem deste tipo de extração (CASTRO e GRACIA-AYUSO, 1998).

As características positivas e negativas da extração Soxhlet têm sido utilizadas como pontos iniciais para o desenvolvimento de uma variedade de modificações visando a melhoria do processo de extração. A maioria das modificações relatadas nas últimas décadas são relacionadas à redução dos tempos de extração com o uso de energias auxiliares e automatização do sistema (CASTRO e PRIEGO-CAPOTE, 2010). Entre elas, podem ser mencionadas a Extração por Fluido Supercrítico (SFE), Extração Assistida por Micro-ondas (MAE) e a Extração Pressurizada por Solvente (PSE) (KAUFMANN e CHRISTEN, 2002).

2.2.3. Vantagens da utilização da extração auxiliada por micro-ondas

A extração auxiliada por micro-ondas consiste no aquecimento, utilizando a energia de micro-ondas, de um agente extrator em contato com a amostra em que se deseja fazer a extração (JOCELYN PARÉ *et al.*, 1994).

O campo elétrico gerado pelo forno de micro-ondas causa o aquecimento por dois mecanismos diferentes que ocorrem simultaneamente: a rotação dipolar e a condução iônica (CAMEL, 2000). De acordo com Kaufmann e Christen (2002), o aquecimento utilizando micro-ondas acontece de maneira muito rápida. Diferentemente de métodos condutivos convencionais, as micro-ondas aquecem diversas regiões da amostra simultaneamente, conforme representado pela Figura 2.2.

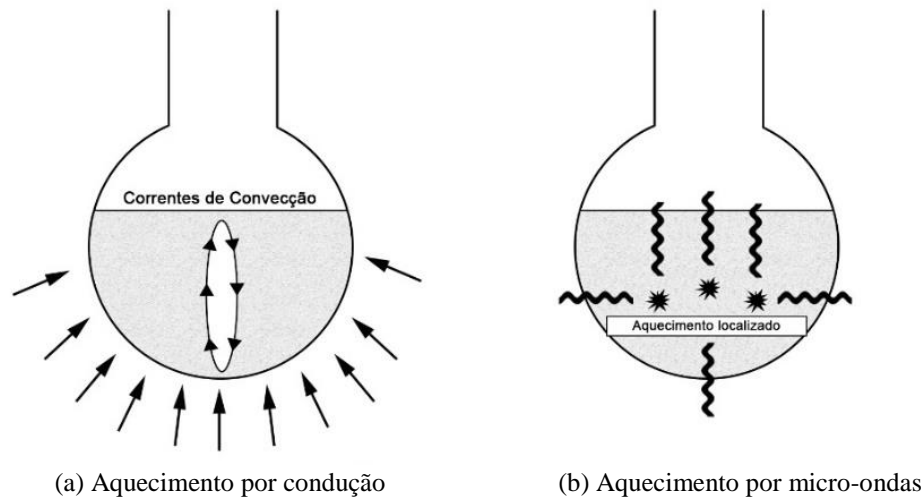


Figura 2.2 - Sistemas de aquecimento por condução e micro-ondas.

Fonte: Adaptado de Kaufmann e Christen (2002)

Durante o aquecimento por micro-ondas, a umidade presente nos tecidos da amostra sofre um superaquecimento localizado, causando uma rápida expulsão da gordura presente nas células adiposas. A elevação da temperatura de maneira repentina do material causa o rompimento de sua microestrutura e assim, ocorre a migração da gordura presente na amostra para o solvente. Posteriormente é realizada a filtragem e evaporação do solvente. Após esse processo, o material remanescente é pesado e o conteúdo de lipídios é calculado pela diferença de massas. É importante destacar que o efeito da energia de micro-ondas é fortemente dependente da natureza do solvente e da matriz sólida analisada. Assim, os solventes devem ser selecionados de acordo com a sua capacidade de dissolver o composto alvo, levando-se em consideração sua transparência às micro-ondas (PAR e JACQUELINE, 1997).

Par e Jacqueline (1997) defendem que a extração auxiliada por micro-ondas possui excelente precisão e reprodutibilidade, se equiparando ou excedendo as especificações da extração convencional Soxhlet. Os autores também destacam que a extração auxiliada por micro-ondas proporciona uma operação de extração mais rápida. Enquanto a extração Soxhlet pode demorar várias horas de processamento, a extração auxiliada por micro-ondas pode ser

completa em poucos minutos. Os principais benefícios possibilitados pela utilização da extração auxiliada por micro-ondas são:

- a) Permite a realização de extrações em amostras de diversos tamanhos;
- b) Possui uma operação sustentável, gerando menor quantidade de resíduos e menor consumo de energia;
- c) Possibilita que as extrações sejam concluídas com maior rapidez;
- d) Não necessita que as amostras sejam secas previamente, diferentemente de outros métodos;
- e) Necessita de menor tempo de pré-processamento.

As vantagens proporcionadas pela utilização da extração auxiliada por micro-ondas, considerando, principalmente, a possibilidade de processamento de várias amostras ao mesmo tempo e a operação com tempo reduzido contribuíram para que este método fosse escolhido para realizar o tratamento das amostras analisadas neste trabalho.

2.3. Umidade em alimentos

2.3.1. Conceitos e definições

Ao longo do processo de fritura de alimentos, parte da água presente em sua superfície é evaporada, gerando um aumento no gradiente de pressão em seu interior que restringe a absorção de óleo. Ao longo desse processo, também ocorre a formação de uma crosta externa no material (KROKIDA *et al.*, 2000). Durante a evaporação, a umidade presente no alimento se difunde por meio de fendas presentes em seu interior, criando canais para a absorção de óleo (DANA e SAGUY, 2006). Após a fritura, durante a etapa de resfriamento, o gradiente de pressão é perdido, fazendo com que ocorra uma significativa absorção do óleo (ISIK *et al.*, 2018). Assim, de acordo com Saguy e Dana (2003), a absorção de óleo ocorre por meio de dois mecanismos: da substituição contínua da umidade presente no alimento pelo óleo e por meio da absorção que ocorre após o fim do processo de fritura. Bouchon e Pyle (2005) destacam que apesar de os fenômenos de absorção de óleo e evaporação de umidade serem relacionados, eles não ocorrem simultaneamente, mas sim sequencialmente.

De acordo com Farkas *et al.* (1996a, 1996b) quando ocorre o fim da formação de bolhas durante o processo de fritura, ocorre uma aparente cessão da perda de umidade pelo alimento. No final do processo, as batatas *chips* atingem um teor de umidade de aproximadamente 1,8% (MOREIRA *et al.*, 1999).

A Figura 2.3, apresentada por Pedreschi e Moyano (2005a) apresenta a relação entre tempo de fritura e teor de umidade para batatas *chips* fabricadas utilizando o processo de branqueamento (processo utilizado com o objetivo de obter melhores condições de coloração e textura) e o processo sem branqueamento, caracterizado como controle. A figura revela que o teor de umidade presente em batatas *chips* com dimensões de 2,2 mm de espessura por 37 mm de diâmetro sofre reduções ao longo do processo de fritura. Além disso, a Figura 2.4 mostra que a absorção de óleo no processo de fritura a 180 °C aumentou à medida que ocorreu a redução do teor de umidade de 3,25 até 0,99 g de água/g de matéria seca.

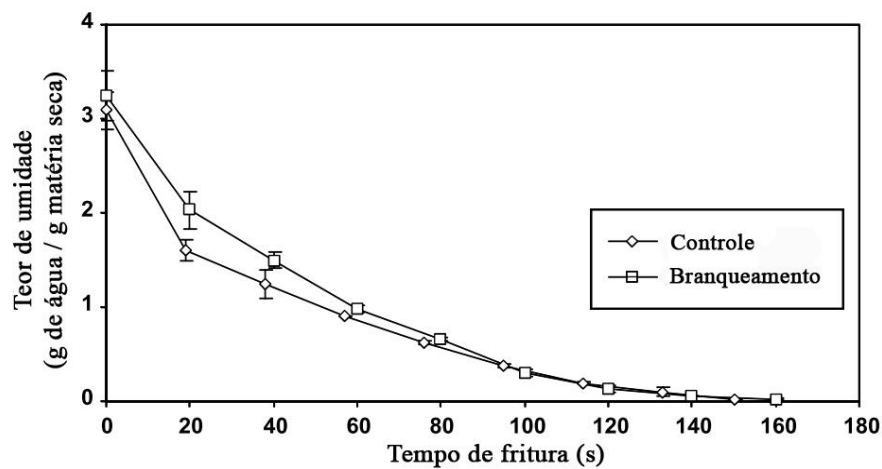


Figura 2.3 - Perda de umidade durante o processo de fritura de batatas a 180 °C

Fonte: Adaptado de Pedreschi e Moyano (2005)

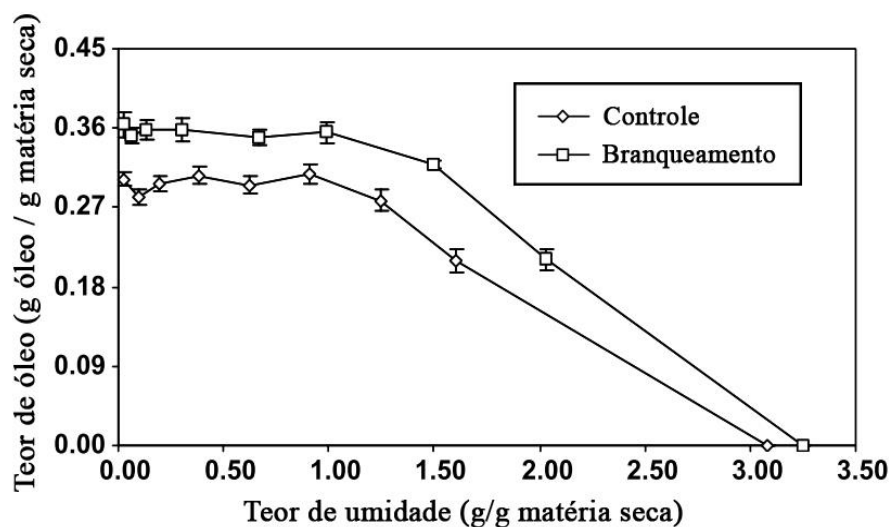


Figura 2.4 - Relação entre absorção de óleo e teor de umidade no processo de fritura de batatas a 180 °C

Fonte: Adaptado de Pedreschi e Moyano (2005)

Uma das características da qualidade que é diretamente afetada pela umidade nesse tipo de produto é a textura. A textura é uma característica conhecida em muitos cereais frescos, secos e em *snacks* fabricados de produtos à base de amido. A textura desses alimentos pode ser afetada pela ocorrência da absorção de água, que gera a plastificação e o amolecimento da matriz de amido e proteínas, alterando sua resistência mecânica. Dessa forma, é desejável que o teor de umidade desses alimentos seja controlado a fim de que esses alimentos possam apresentar uma textura desejável (KATZ e LABUZA, 1981).

Lawless e Heymann (1998) afirmam que a exposição de alimentos crocantes como biscoitos, cookies, batatas *chips*, torradas à umidade do ar faz com que a crocância percebida nos alimentos seja reduzida. De acordo com o autor, a estrutura desse tipo de produto é composta por cavidades de ar que são cercadas de paredes quebradiças. Assim, quando essas paredes são quebradas, seus fragmentos voltam à sua forma original, causando vibrações que geram ondas sonoras. Quando o teor de umidade desses alimentos aumenta, é menos provável que essas paredes se quebrem e assim, a intensidade do som é gerada com menor intensidade.

Seymour e Ann (1988) complementam que o aumento da umidade nos alimentos também faz com que os níveis de força e trabalho mecânico necessários para fragmentar o alimento também aumentem, fazendo com que o produto se torne mais resistente. Nesse sentido, Akinpelu *et al.* (2014) acrescentam que além de alterar a propriedade dos alimentos fritos, o teor de umidade pode afetar suas características de qualidade de armazenamento e ainda relata que variáveis de tempo de fritura, temperatura de fritura e pressão de fritura influenciam significativamente o teor de umidade de *chips* de plantain.

Gamble *et al.* (1987) explicam que durante o processo de produção de batatas *chips*, o teor de umidade inicial das batatas cruas de aproximadamente 80% é reduzido para aproximadamente 2% após o processo de fritura em um intervalo aproximado de 2 a 5 minutos. Pedreschi *et al.* (2004) ainda destacam em seu trabalho que o teor de umidade foi o principal fator que influenciou a textura final de batatas fritas.

2.3.2. Medição do teor de umidade em alimentos

Biltcliffe *et al.* (2020) estabelecem o método oficial para medição da umidade em batatas fritas congeladas. De acordo com o método, o teste deve ser realizado com uma replicação, por meio da pesagem de 10 gramas da amostra utilizando uma balança com precisão mínima de 0,1 mg. O método define que é necessário a utilização de recipientes dessecados, tarados, de preferência de níquel, alumínio, inox ou vidro. Dessa maneira, as amostras devem ser colocadas

em um forno de convecção a 103 ± 2 °C por 16 horas. Posteriormente, devem ser colocadas em um dessecador para resfriar. Após o resfriamento, as amostras devem ser pesadas e, em seguida, devem retornar ao forno por mais 2 horas, colocadas novamente no dessecador e novamente pesadas. Esse processo deve ser realizado até que a diferença entre duas pesagens consecutivas seja menor que 0,5 mg ou até que se perceba um aumento no valor da massa entre as pesagens. O método define que o resultado deve ser expresso com 2 casas decimais.

Dessa maneira, o cálculo do teor de umidade pode ser obtido conforme a Equação (2.1).

$$\text{Teor de umidade (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Em que

M_0 – Massa em gramas do recipiente seco;

M_1 – Massa em gramas do recipiente seco com a amostra não seca;

M_2 - Menor massa em gramas do conjunto recipiente e amostra secos.

2.4. Coloração em alimentos

2.4.1. Conceitos e definições

A cor é uma resposta da percepção mental ao espectro de luz visível que é emitida ou refletida por um objeto. No globo ocular do sistema de visão humano, esse sinal luminoso exerce interação com a retina e então é transmitido ao cérebro por meio do nervo óptico. Dessa maneira, o ser humano atribui cores aos sinais e, conseqüentemente, aos objetos. A cor não é uma propriedade intrínseca de um objeto, uma vez que ela pode mudar dependendo do tipo da fonte de iluminação utilizada para iluminá-lo (MELÉNDEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2005).

De acordo com Wu e Sun (2013), a percepção de cor é um fenômeno complexo que depende de vários fatores como: ambiente de iluminação do objeto, composição do objeto analisado, ângulo de iluminação e ângulo de observação.

O mecanismo de visualização das cores pelo sistema visual humano foi detalhado por Hunt e Pointer (2011) e representado pelo da Figura 2.5.

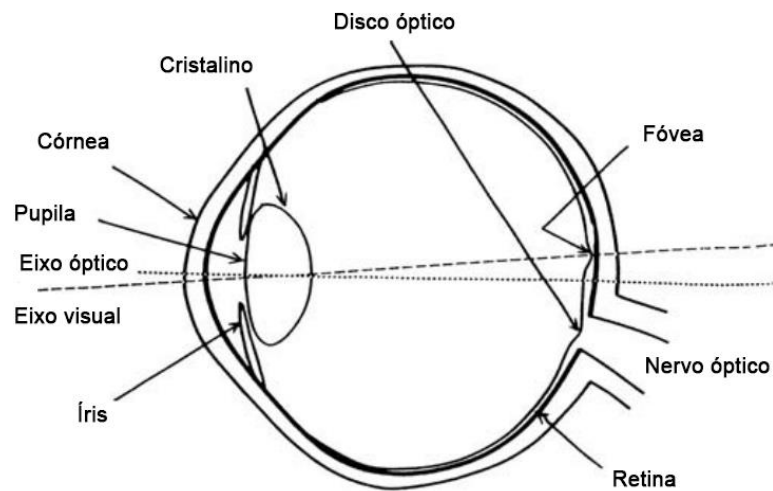


Figura 2.5 - Representação do olho humano em corte transversal

Fonte: Adaptado de Hunt e Pointer (2011)

De acordo com Hunt e Pointer (2011), algumas das principais estruturas que fazem parte do sistema visual humano são a córnea, pupila, íris, retina, nervo óptico, cristalino e a fóvea. A córnea é um tecido transparente pelo qual a potência óptica é fornecida ao olho humano. No cristalino, parte dessa potência óptica é alterada por meio da modificação de sua forma, o que possibilita o ajuste de foco para a visualização de objetos em diferentes distâncias. A íris é a parte colorida do olho, ela possui formato anular e sua abertura central é de aproximadamente 2 mm de diâmetro em ambientes bem iluminados e pode chegar a um tamanho de 8 mm em ambientes com pouca iluminação. A abertura da íris é chamada de pupila, que é a área em que ocorre a passagem da luz. A retina fica localizada no fundo do globo ocular, sendo a camada do olho sensível à luz. Na retina estão presentes os receptores de luz, que podem ser de dois tipos: cones e bastonetes. Os cones são as células com capacidade de reconhecer as cores, enquanto os bastonetes tem a capacidade de reconhecer a luminosidade. Existem três tipos de células fotorreceptoras coloridas, ou cônicas, que são células que respondem à luz de comprimentos de onda curtos (sensíveis à cor azul), células que respondem à luz de comprimentos de onda médios (sensíveis à cor verde) e células que respondem à luz de comprimentos de onda longos (sensíveis à cor vermelha).

Com a entrada da luz no globo ocular, ocorre a formação de uma pequena imagem invertida sobre a retina. Nela, a luz é absorvida pelos receptores, cujas moléculas são excitadas e então é produzida uma variação no potencial elétrico. Essa variação no potencial elétrico se transforma em uma série de pulsos que são transmitidos pelas fibras nervosas até o cérebro. O ritmo com que esses pulsos são produzidos fornecem a modulação de sinal. Dessa maneira, um

ritmo alto indica um sinal mais forte, enquanto um ritmo baixo indica um sinal mais fraco. Os pulsos são todos da mesma amplitude, somente sua frequência carrega informação ao cérebro. Desse modo, os olhos humanos diferenciam as cores de acordo com a sensibilidade de diferentes células cônicas na retina às luzes de diferentes comprimentos de onda (HUNT e POINTER, 2011).

Nessa conjuntura, para que seja possível analisar e comparar as cores observadas em diferentes produtos é necessário fazer o uso de representações matemáticas que permitam a padronização e reprodução das tonalidades. Essas representações matemáticas são denominadas sistemas de cores.

De acordo com Wu e Sun (2013) , os sistemas de cores são representações matemáticas utilizadas para associar os valores de componentes tricromáticos a uma cor. Alguns dos principais sistemas de cor são o RGB, CMYK e o $L^*a^*b^*$. De acordo com Yam e Papadakis (2004) , o RGB é um sistema de cores aditivas em que as cores são formadas por meio da mistura de três cores primárias (vermelho, verde e azul). Este modelo é utilizado em televisões e computadores e a exibição das cores depende do equipamento em que ela é realizada e, desse modo, sua gama de cores varia de acordo com o dispositivo no qual a imagem é exibida. O sistema de cor CMYK, de acordo com Yam e Papadakis (2004) , é um sistema baseado na cor refletida por um objeto. Esse sistema é formado por pigmentos sólidos (ciano, magenta, amarelo e preto) e é o principal sistema utilizado na impressão de materiais. A exibição de cores pelo sistema CMYK também se altera de acordo com o dispositivo em que o objeto é exibido. O sistema $L^*a^*b^*$ é um sistema constituído por um componente associado à luminosidade e dois componentes associados à coloração. Dessa maneira, a luminosidade é representada pelo componente L^* , que varia de 0 a 100, enquanto a coloração é representada pelos componentes a^* e b^* , ambos variando entre -120 e +120. O componente a^* indica a variação de coloração entre vermelho e verde, enquanto o componente b^* indica a variação da coloração entre amarelo e azul. O sistema de cores $L^*a^*b^*$ não depende do equipamento de visualização, o que proporciona a constância na observação das cores independentemente dos dispositivos em que elas são analisadas. O sistema de cores $L^*a^*b^*$ é comumente utilizado em pesquisas sobre alimentos (YAM e PAPADAKIS, 2004).

Entre os três modelos mencionados, o modelo $L^*a^*b^*$ possui a maior gama de cores, abrangendo todas as cores dos modelos RGB e CMYK. Dessa maneira, embora o espectro de cores visto pelos olhos humanos seja maior que a gama de cores disponível em qualquer um dos modelos, o sistema $L^*a^*b^*$ é considerado o sistema padrão para medição de cores em

alimentos (YAM e PAPADAKIS, 2004). A representação do sistema de cores $L^*a^*b^*$ foi demonstrada na Figura 2.6.

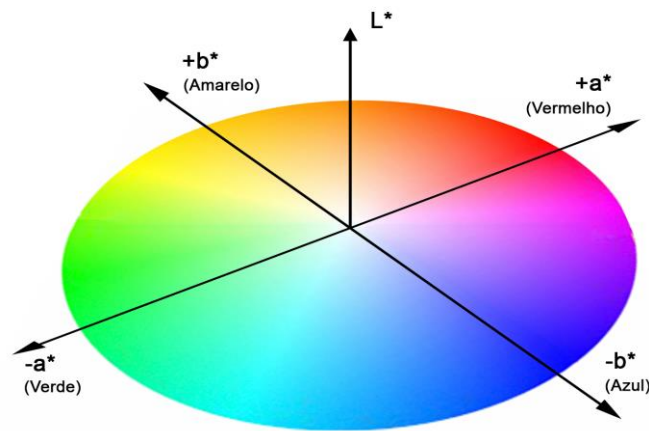


Figura 2.6 - Representação do sistema de cores $L^*a^*b^*$

Fonte: Adaptado de Pathare *et al.* (2012)

De acordo com Pedreschi *et al.* (2006), a coloração dos alimentos é uma das primeiras características da qualidade examinadas pelos consumidores. Sua avaliação ocorre ainda antes do momento em que o consumidor experimenta um produto e, dessa maneira, é um aspecto crítico para que tenha uma boa aceitação no mercado. A coloração também é geralmente associada a outros aspectos da qualidade, como características sensoriais, nutricionais e químicas. Wu e Sun (2013) afirmam que os consumidores avaliam primeiramente a coloração dos alimentos para, em seguida, avaliar as características de gosto e aroma e, por isso, consideram que ela interfere diretamente na aceitabilidade do produto. Dessa forma, a coloração do produto deve sempre estar adequada no momento em que o cliente for comprá-lo.

Segundo Kays (1999), a aparência dos alimentos é um fator de grande relevância para seus fabricantes, sendo analisada em diversas áreas de uma indústria, como produção, armazenamento e *marketing*. Alguns dos motivos para a ampla utilização da análise de coloração são a facilidade e a rapidez com que ela pode ser realizada.

Com o aumento da exigência dos consumidores pela alta qualidade dos produtos, a indústria de alimentos tem aplicado grandes esforços no desenvolvimento de procedimentos de medição e controle da coloração dos produtos fabricados (WU e SUN, 2013).

2.4.2. Medição de coloração em alimentos

O instrumento mais utilizado na medição de coloração em alimentos e outros produtos é o colorímetro. Este instrumento realiza a medição tanto de cores de fontes primárias de

radiação, nas quais ocorre a emissão de luz, quanto de fontes secundárias de radiação, nas quais ocorre a reflexão ou transmissão de luz externa (PATHARE *et al.*, 2012).

O colorímetro *tristimulus* é formado por três componentes principais: fonte de iluminação, filtros e um detector fotoelétrico que converte a luz refletida em sinal elétrico. Dessa maneira, o colorímetro é capaz de simular a cor percebida pelo observador (PATHARE *et al.* 2012).

De acordo com Yam e Papadakis (2004), a maioria dos instrumentos tradicionais utilizados para medição de coloração estabelecem dificuldades para utilização em pesquisas de alimentos devido ao fato de serem especialmente projetados para desempenhar atividades de controle de qualidade. Além desse fato, esses instrumentos também apresentam performance limitada para realização de medições de superfícies não uniformes e pequenas. Desse modo, quando a amostra possui coloração não homogênea, as medições devem ser repetidas para abranger toda a superfície, e dessa maneira, a obtenção da distribuição das cores na amostra se torna uma tarefa morosa (LEÓN *et al.*, 2006).

Para solucionar estes problemas, laboratórios de pesquisa em universidades têm desenvolvido sistemas de visão computacional adequados à realização de inspeção e classificação de cores em uma amostra. Nesse sentido, Pedreschi *et al.* (2006), Segnini *et al.* (1999a) afirmam que os sistemas baseados em processamento de imagem tem sido frequentemente empregados.

Os sistemas de visão computacional baseados em processamento de imagem podem ser desenvolvidos com baixo custo, são simples de serem operados e configurados (YAM e PAPADAKIS, 2004). De acordo com Wu e Sun (2013), o sistema possui a vantagem de ser rápido, consistente, objetivo, não invasivo e econômico. Nele, as cores são armazenadas nos *pixels* da imagem digital, o que permite que eles sejam analisados tanto individualmente quanto em conjunto. Dessa maneira, o sistema computacional extrai as informações quantitativas sobre as cores obtidas, como média e desvio padrão, proporcionando uma rápida obtenção dos dados, sem a necessidade de realizar o contato físico com a amostra. O sistema de visão computacional tem sido utilizado em indústrias para avaliações de qualidade, detecção de defeitos, identificação e classificação de frutas, vegetais e outros produtos (PEDRESCHI *et al.*, 2006).

O sistema de visão computacional geralmente é composto por um conjunto padronizado de iluminação, câmera digital e um *software* para análise das imagens (WU e SUN, 2013). De acordo com os autores, a padronização da iluminação possui extrema importância nesse sistema, uma vez que evita impactos nas análises realizadas. Por esse motivo, um sistema de iluminação deve ser bem projetado, a fim de que seja possível ter boa acurácia, reduzir o tempo demandado nas análises e a complexidade no processamento de imagens, contribuindo com o

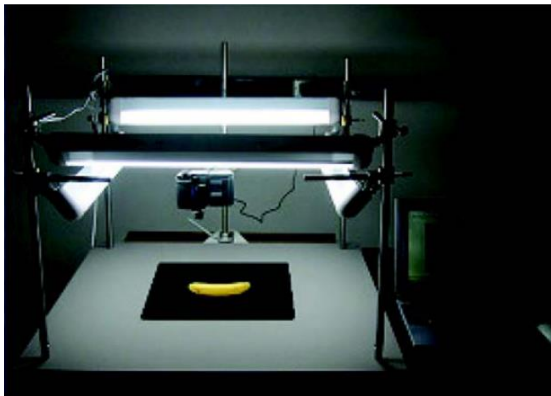
sucesso nas análises realizadas e permitindo a redução dos custos deste processamento (DU e SUN, 2004).

O CIE (Comissão Internacional de Iluminação) define diversos modelos padronizados de iluminação que podem ser adequados para serem utilizados em pesquisas com alimentos, sendo eles o modelo A (2856 K), C (6774 K), D65 (6500 K), e D (7500 K). Entre eles, as fontes C, D65 e D são adequadas para representar a iluminação da luz do dia (LAWLESS e HEYMANN, 1998). Para a montagem do sistema de visão computacional, Macdougall (2010) explica que o ângulo formado pelo cruzamento entre o eixo de visualização da câmera e o eixo de iluminação deve ser de 45°, enquanto o ângulo de observação da amostra deve ser de 0°. Em trabalhos como Yam e Papadakis (2004), Mendonza e Aguilera (2006) e Pedreschi *et al.* (2006) a câmera foi posicionada em uma distância entre 30,5 cm e 35 cm acima da amostra. Estes trabalhos utilizaram 2 ou 4 lâmpadas em tamanhos de 45 cm ou 60 cm e as estruturas foram montadas conforme a

(a) Mendoza e Aguilera (2006)

(b) Pedreschi *et al.* (2006)

Figura 2.7.



(a) Mendoza e Aguilera (2006)



(b) Pedreschi *et al.* (2006)

Figura 2.7 - Representação de diferentes sistemas de visão computacional

Fonte: Mendoza e Aguilera (2006) e Pedreschi *et al.* (2006)

Após a obtenção e análise das imagens, a comparação entre duas cores pode ser realizada por meio do cálculo do módulo da distância vetorial entre as coordenadas de cada uma delas. Esse conceito, denominado diferença total de cor, é representado pelo símbolo ΔE e é calculado pela Equação (2.2) (PEDRESCHI *et al.*, 2006).

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad (2.2)$$

Os valores de L^* , a^* e b^* são os valores obtidos pela análise da amostra, enquanto os valores de L_0^* , a_0^* e b_0^* são os valores de uma cor padrão (GIRI *et al.*, 2019). De acordo com Pedreschi *et al.* (2006) o valor do ΔE aumenta progressivamente com o tempo de fritura das batatas e, além disso, quanto maior for a temperatura de fritura, mais rápido ocorre seu aumento, conforme apresentado pela Figura 2.8.

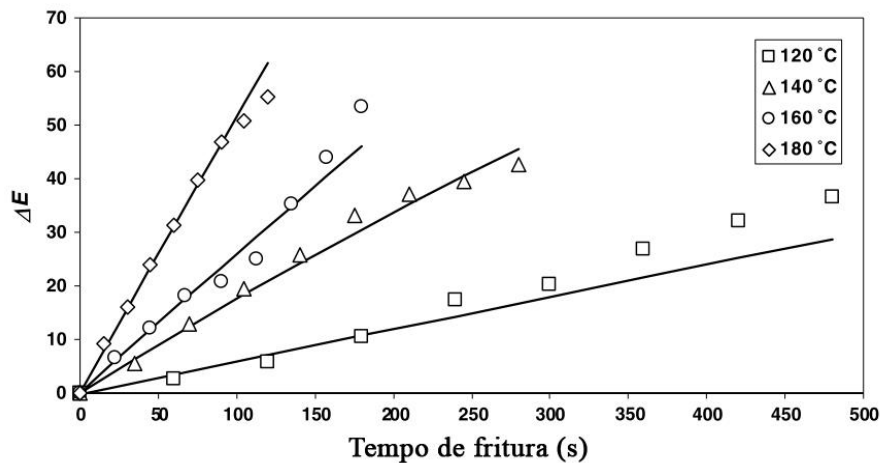


Figura 2.8 - Variação de coloração em função da duração de fritura

Fonte: Adaptado de Pedreschi *et al.* (2006)

De acordo com Pedreschi *et al.* (2006), após a obtenção da imagem, a análise deve passar por mais três etapas: pré-processamento da imagem, segmentação e conversão do formato RGB para $L^*a^*b^*$. Dessa maneira, após as etapas, é possível obter os valores médios de $L^*a^*b^*$ das amostras e calcular o valor de ΔE .

2.4.3. Vantagens de se utilizar o sistema de visão computacional

De acordo com Pedreschi *et al.* (2006), a utilização do sistema de visão computacional possui algumas vantagens quando comparado à utilização do colorímetro tradicional, entre elas estão a possibilidade de analisar toda a superfície do produto e de medir outras características como quantidade de defeitos e pontos escuros. Além disso, Yam e Papadakis (2004) defendem que os custos com equipamentos e *softwares* são baixos, além de que o *setup* dos equipamentos e sua operação são etapas simples. Wu e Sun (2013) destacam que as limitações impostas pelos métodos tradicionais fizeram com que surgisse a necessidade do desenvolvimento de um processo de medição de cores baseado em análise de imagens.

De acordo com Wu e Sun (2013), o sistema de visão computacional possui a vantagem de ser rápido, consistente, objetivo, não invasivo e econômico. No sistema computacional, a

alta resolução espacial permite a análise de cada pixel da superfície, além de permitir o cálculo de média e desvio padrão dos valores obtidos, isolando e especificando aparência, medindo formatos e cores não uniformes, selecionando regiões de interesse com flexibilidade, inspecionando mais que um objeto ao mesmo tempo, gerando mapas de distribuição de cor, além de permitir que os dados sejam armazenados permanentemente, por meio do armazenamento do arquivo digital (BALABAN e ODABASI, 2006; LEÓN *et al.*, 2006).

2.5. Pesquisas anteriores relacionadas a processos de fritura

2.5.1. Objetivos e critérios de busca

Com o objetivo de identificar o estado da arte sobre a o planejamento de experimentos e sua utilização na otimização de processos de fritura, foi realizada uma pesquisa no mês de Maio de 2020 na base acadêmica Scopus considerando, no campo títulos, os termos “*fried potato*” e suas variações “*potato frying*”, “*potato fries*” e “*potato fry*”. Além desse critério, foram selecionados artigos com algum dos seguintes termos presentes em título, resumo ou palavra-chave “*experiments*”, “*response surface*”, “*optimization*”, “*design of experiments*”, “*central composite designs*”. Nessa busca, foram desconsiderados artigos das áreas de conhecimento de Enfermagem, Medicina, Terra e Ciências, Farmacologia, Física e Psicologia.

Dessa maneira, foi identificado que no período compreendido de 1966 até 2019 foram publicados 70 trabalhos sobre o tema. Os trabalhos publicados em 2020 não foram considerados na pesquisa, uma vez que um dos objetivos da análise foi comparar a quantidade de artigos publicados em cada ano e, dessa maneira, o número de trabalhos em 2020 ainda não havia sido consolidado. Os trabalhos foram classificados de acordo com as seguintes características: ano de publicação, processo de fritura utilizado, matéria-prima utilizada, variedade de batata *in natura* utilizada, tipo de produto final produzido, espessura do filete de batata fabricado, tipo de óleo, escala de produção, variáveis do processo e respostas analisadas. As classificações foram detalhadas nas próximas sessões.

2.5.2. Classificação dos trabalhos quanto à data de publicação

A Figura 2.9 apresenta a quantidade de pesquisas publicadas sobre o assunto ao longo dos anos. Nota-se que houve um grande aumento na quantidade de trabalhos publicados e essa quantidade permaneceu elevada nos últimos anos. Esse fato pode traduzir um aumento do interesse deste tema no meio científico e industrial ao longo do tempo. Nota-se também que o

maior número de publicações sobre o tema ocorreu nos últimos 3 anos, compreendidos entre 2017 e 2019 (13 artigos), demonstrando a recente relevância do assunto.

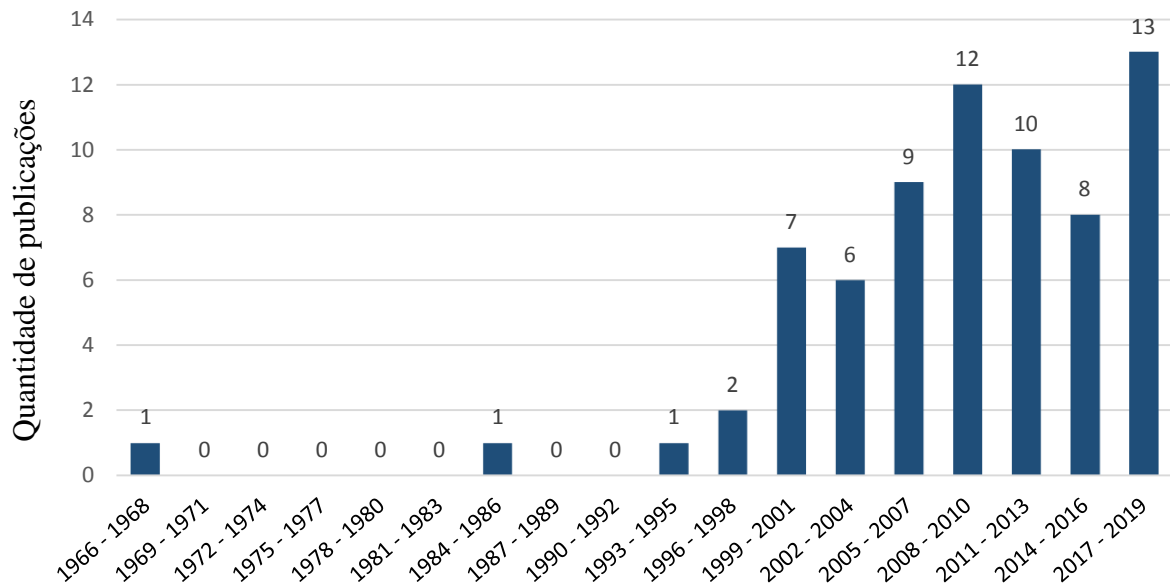


Figura 2.9 - Evolução da quantidade de publicações relacionadas ao planejamento de experimentos e otimização do processo de fritura

Fonte: Autoria própria (2021)

2.5.3. Classificação dos trabalhos quanto ao tema abordado

A partir dos artigos obtidos por meio da análise de pesquisas anteriores, foi realizada a classificação dos 70 trabalhos em três categorias: A, B e C. A classificação foi realizada a partir da análise dos assuntos abordados em cada um dos trabalhos.

- **Categoria A:** compreende os artigos que realizaram a otimização do processo de fritura. Também foram considerados neste grupo os trabalhos que realizaram o desenvolvimento do planejamento e análise de experimentos utilizando duas ou mais variáveis do processo;
- **Categoria B:** compõe-se dos artigos que realizaram análises sobre algumas variáveis do processo de fritura e sobre algumas respostas, porém não fizeram uso de uma sistemática para o planejamento e análise de experimentos;
- **Categoria C:** apresenta os trabalhos que possuem conteúdos gerais relacionados ao processo de fritura, não analisando as variáveis de processo e respostas. Os artigos deste grupo não realizaram o planejamento de experimentos e também não houve otimização do processo de fritura.

Com a classificação, 20 trabalhos foram associados na Categoria A, 12 trabalhos foram associados na Categoria B e 38 trabalhos foram associados na Categoria C, conforme a Figura 2.10.

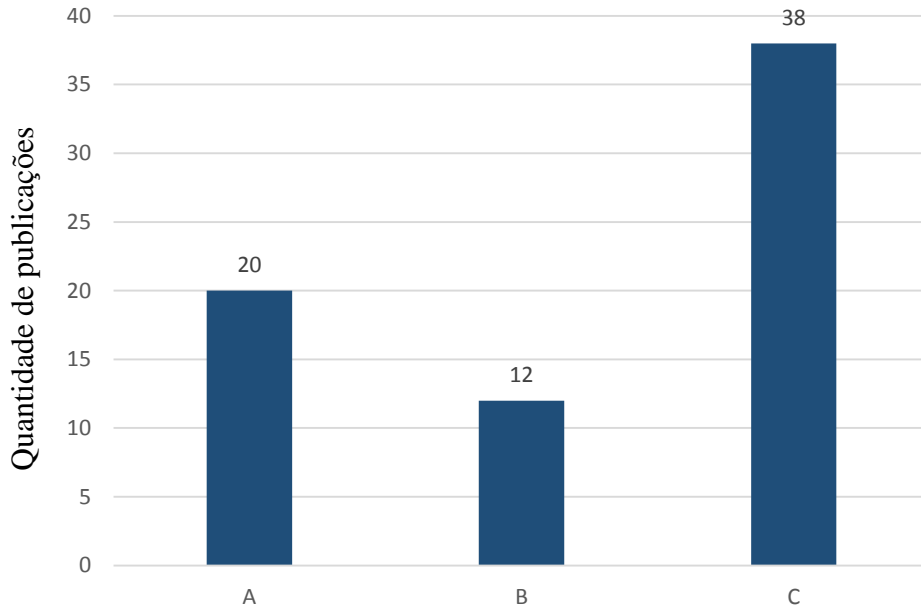


Figura 2.10 - Quantidade de publicações classificadas nas Categoria A, Categoria B e Categoria C

Fonte: Autoria própria (2021)

Dos 20 artigos selecionados na Categoria A, foram avaliados somente os artigos disponíveis eletronicamente, resultando em uma seleção de 15 artigos.

Pelo fato de os trabalhos classificados na Categoria B e Categoria C não serem relacionados com o assunto principal em estudo (planejamento, análise de experimentos e otimização do processo), eles não foram considerados neste trabalho.

2.5.4. Classificação dos trabalhos quanto aos processos de fritura utilizados

Os trabalhos agrupados na Categoria A foram classificados de acordo com o processo de fritura empregado. Os processos utilizados nestes estudos foram: fritura por imersão em óleo, fritura a vácuo e fritura por micro-ondas. A classificação dos trabalhos de acordo com o processo de fritura empregado foi demonstrada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com os métodos de fritura empregados

Referência	Fritura por imersão em óleo	Fritura a vácuo	Fritura por micro-ondas
Alvarez <i>et al.</i> (2000)	*		
Baumann e Escher (1995)	*		
Blibech <i>et al.</i> (2014)	*		
Fontes <i>et al.</i> (2011)	*		
Giri <i>et al.</i> (2019)		*	
Liu <i>et al.</i> (2013)	*		
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)	*		
Oladejo <i>et al.</i> (2017)	*		
Oztop <i>et al.</i> (2007a)			*
Oztop <i>et al.</i> (2007b)			*
Parikh e Takhar (2016)	*		*
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)	*		
Picouet <i>et al.</i> (2019)	*		
Pokharkar e Mahale (2001)	*		
Song <i>et al.</i> (2007)			*

Fonte: Autoria própria (2021)

A Tabela 2.1 mostra que o processo de fritura mais utilizado tem sido a fritura por imersão em óleo, estando presente em 11 trabalhos, correspondendo a 73% dos trabalhos analisados. Nas pesquisas, os processos de fritura por micro-ondas foram utilizados em 4 trabalhos, correspondendo a 27% dos trabalhos analisados, enquanto a fritura a vácuo foi utilizada em apenas um trabalho. Além disso, todos os estudos, com exceção de Parikh e Takhar (2016) fazem a utilização de apenas um tipo de processo de fritura. Parikh e Takhar (2016), por outro lado, utilizam tanto o processo de fritura por imersão em óleo quanto o processo de fritura por micro-ondas.

Além da classificação dos trabalhos de acordo com o tipo de processo de fritura empregado, eles também foram classificados de acordo com o tipo de produto final fabricado.

2.5.5. Classificação dos trabalhos por tipo de produto final fabricado

Os trabalhos alocados na Categoria A também foram classificados de acordo com o tipo de produto final fabricado em cada um dos trabalhos publicados. A Tabela 2.2 apresenta a classificação dos artigos analisados de acordo com o tipo de produto final fabricado.

Tabela 2.2 - Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento de experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com o tipo de produto final fabricado

Referência	Batata <i>chips</i>	Batata-palha	Batata Palito
Alvarez <i>et al.</i> (2000)			*
Baumann e Escher (1995)	*		
Blibech <i>et al.</i> (2014)	*		
Fontes <i>et al.</i> (2011)	*		
Giri <i>et al.</i> (2019)	*		
Liu <i>et al.</i> (2013)	*		
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)	*		*
Oladejo <i>et al.</i> (2017)	*		
Oztop <i>et al.</i> (2007a)	*		
Oztop <i>et al.</i> (2007b)	*		
Parikh e Takhar (2016)			*
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)	*		
Picouet <i>et al.</i> (2019)	*		
Pokharkar e Mahale (2001)	*		
Song <i>et al.</i> (2007)	*		

Fonte: Autoria própria (2021)

A Tabela 2.2 permite a constatação de que a batata *chips* foi o tipo de produto final mais utilizado nos trabalhos publicados, estando presente em 13 trabalhos, correspondendo a aproximadamente 87% de todos os trabalhos analisados. A batata palito foi utilizada em 3 estudos, representando 20% dos trabalhos. Por outro lado, a batata-palha não esteve presente em nenhum dos artigos analisados. Mestdagh *et al.* (2008) foi o único trabalho que utilizou os dois tipos de produtos em suas análises. A relevante diferença encontrada entre a quantidade de artigos para os diferentes tipos de produto revela que a batata *chips* tem sido objeto de maior

quantidade de estudos quando comparada à batata palito, o que pode representar o maior interesse científico e industrial pelo produto.

2.5.6. Classificação dos trabalhos pelo tipo de batata *in natura* utilizada

Os dois tipos de batatas *in natura* utilizadas nos artigos analisados foram a batata-inglesa (*Solanum tuberosum*) e a batata-doce (*Ipomoea batatas*). A representação do tipo de batata utilizada em cada um dos trabalhos foi demonstrada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as matérias-primas utilizadas

Referência	Batata-inglesa	Batata doce
Alvarez <i>et al.</i> (2000)	*	
Baumann e Escher (1995)	*	
Blibech <i>et al.</i> (2014)	*	
Fontes <i>et al.</i> (2011)		*
Giri <i>et al.</i> (2019)		*
Liu <i>et al.</i> (2013)	*	
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)	*	
Oladejo <i>et al.</i> (2017)		*
Oztop <i>et al.</i> (2007a)	*	
Oztop <i>et al.</i> (2007b)	*	
Parikh e Takhar (2016)	*	
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)	*	
Picouet <i>et al.</i> (2019)	*	
Pokharkar e Mahale (2001)	*	
Song <i>et al.</i> (2007)	*	

Fonte: Autoria própria (2021)

A análise da Tabela 2.3 demonstra que entre os trabalhos analisados, 12 utilizaram a matéria-prima batata-inglesa (*Solanum tuberosum*), representando 80% de todos os trabalhos analisados. O outro tipo de matéria-prima utilizada nos trabalhos foi a batata-doce (*Ipomoea batatas*), que esteve presente em 3 trabalhos, representando 20% do total de publicações

analisadas. A superioridade da quantidade de trabalhos que utilizam a batata-inglesa também pode representar o interesse industrial, comercial e científico sobre este produto, quando comparado à batata-doce.

2.5.7. Classificação dos trabalhos pelo tipo de óleo utilizado

O óleo é outro tipo de matéria-prima utilizada no processo de fabricação das batatas fritas. Os tipos de óleo utilizados nos artigos analisados foram: óleo de girassol, óleo de palma, óleo de milho, óleo de amendoim, óleo de soja e, além destes, *blends* de óleos, formados pela mistura de dois ou mais tipos. Alguns artigos fizeram uso específico de determinados tipos de óleo, enquanto outros artigos realizaram experimentos alternando o tipo de óleo utilizado. A representação do tipo de óleo utilizado em cada um dos trabalhos foi realizada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com o tipo de óleo utilizado

Referência	Óleo de girassol	Óleo de palma	Óleo de milho	Óleo de amendoim	Óleo de soja	Blends
Alvarez <i>et al.</i> (2000)	*					
Baumann e Escher (1995)				*		
Blibech <i>et al.</i> (2014)			*			
Fontes <i>et al.</i> (2011)		*				
Giri <i>et al.</i> (2019)	*					
Liu <i>et al.</i> (2013)		*				
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)						
Oladejo <i>et al.</i> (2017)	*					
Oztop <i>et al.</i> (2007a)	*		*	*		
Oztop <i>et al.</i> (2007b)	*					
Parikh e Takhar (2016)						*
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)						
Picouet <i>et al.</i> (2019)	*					
Pokharkar e Mahale (2001)				*		
Song <i>et al.</i> (2007)					*	

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 2.4 revela que o tipo de óleo mais utilizado pelos artigos analisados foi o óleo de girassol, estando presente em 6 artigos, representando 40% de todos os artigos analisados. Após o óleo de girassol, o segundo óleo mais utilizado pelos trabalhos foi o óleo de amendoim, sendo analisado por três trabalhos, representando 20% dos artigos analisados. Já os óleos de palma e milho foram utilizados em 2 trabalhos, representando, cada tipo de óleo, aproximadamente 13% de todos os artigos analisados. O óleo de soja foi utilizado apenas por Song *et al.* (2007), já o *blend* de óleo foi utilizado apenas em Parikh e Takhar (2016). Oztop *et al.* (2007a) utilizam em seu trabalho os óleos de girassol, milho e amendoim, neste estudo, as condições ótimas de fritura foram obtidas por meio da utilização do óleo de girassol. Mestdagh *et al.* (2008) e Pedreschi *et al.* (2008) não mencionaram o tipo de óleo utilizado. Todos os demais trabalhos fizeram a utilização de apenas 1 tipo de óleo em suas análises.

2.5.8. Classificação dos trabalhos quanto à escala de produção utilizada

Os artigos analisados também foram classificados considerando a escala de produção utilizada. Os trabalhos analisados fizeram a aplicação dos estudos em processos de fritura laboratoriais, de média escala ou processos industriais. Dessa maneira, eles foram classificados conforme a Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com a escala do sistema

Referência	Industrial	Média escala	Laboratorial
Alvarez <i>et al.</i> (2000)		*	
Baumann e Escher (1995)	*		
Blibech <i>et al.</i> (2014)			*
Fontes <i>et al.</i> (2011)		*	
Giri <i>et al.</i> (2019)	*		
Liu <i>et al.</i> (2013)			
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)		*	
Oladejo <i>et al.</i> (2017)			*
Oztop <i>et al.</i> (2007a)			*
Oztop <i>et al.</i> (2007b)			*
Parikh e Takhar (2016)	*		
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)			*
Picouet <i>et al.</i> (2019)		*	
Pokharkar e Mahale (2001)			*
Song <i>et al.</i> (2007)		*	

Fonte: Autoria própria (2021)

A análise da Tabela 2.5 permite observar que a maior parte dos trabalhos sobre planejamento, análise de experimentos e otimização do processo de fritura tem utilizado o processo de fritura laboratorial, este tipo de processo foi utilizado em 6 dos 15 trabalhos analisados, correspondendo a 40% do total de trabalhos. O segundo tipo de processo utilizado foi a fritura em média escala, este tipo de processo foi utilizado em 5 trabalhos, correspondendo a aproximadamente 33% dos trabalhos analisados. Por outro lado, o processo de fritura

industrial esteve presente em apenas 3 trabalhos, correspondendo a 20% dos trabalhos analisados.

2.5.9. Classificação dos trabalhos quanto às variáveis do processo de fritura

As principais variáveis de entrada do processo de fritura descritas nos trabalhos analisados compreendem a duração do processo de fritura, temperatura do óleo utilizado, tipo de pré-tratamento da batata, espessura do corte da batata, potência do equipamento e o tipo de óleo utilizado. As variáveis do processo de fritura empregadas em cada um dos trabalhos analisados foram descritas pela Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as variáveis analisadas no processo

Referência	Δt	T	P	E	K	N
Alvarez <i>et al.</i> (2000)	*	*	*			
Baumann e Escher (1995)	*	*		*		
Blibech <i>et al.</i> (2014)	*	*	*			
Fontes <i>et al.</i> (2011)	*	*				*
Giri <i>et al.</i> (2019)	*	*				
Liu <i>et al.</i> (2013)	*	*	*	*		
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)			*			
Oladejo <i>et al.</i> (2017)	*	*	*			
Oztop <i>et al.</i> (2007a)	*				*	*
Oztop <i>et al.</i> (2007b)	*		*		*	
Parikh e Takhar (2016)	*	*		*		
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)	*	*	*	*		
Picouet <i>et al.</i> (2019)	*	*				
Pokharkar e Mahale (2001)	*	*		*		
Song <i>et al.</i> (2007)	*	*			*	

Δt - Duração do processo de fritura; T - Temperatura do óleo; P - Tipo de pré-tratamento; E - Espessura do filete de batata; K - Potência do equipamento; N - Tipo de óleo utilizado

Fonte: Autoria própria (2021)

Observa-se que todos os trabalhos analisados, com exceção de Mestdagh *et al.* (2008), fizeram a análise da duração do processo de fritura, corroborando com a relevância deste parâmetro no processo. A segunda variável mais analisada foi a temperatura do óleo, analisada em 12 artigos, representando 80% dos trabalhos analisados. O tipo de pré-tratamento da batata também foi um fator analisado com frequência, uma vez que 47% dos trabalhos realizaram a análise dos efeitos desta variável. A análise da espessura do filete de batata foi considerada em 33% dos trabalhos analisados, a potência do equipamento foi estudada em 20% dos trabalhos e, por fim, a variável tipo de óleo foi a menor utilizada, sendo apresentada em apenas 2 trabalhos.

É possível observar que outros fatores não foram considerados em nenhum destes artigos, como a variedade da batata *in natura* utilizada para a fritura, tipo de embalagem, tempo de

escoamento do óleo após o processo de fritura, tempo de resfriamento da batata após o processo de fritura, temperatura do ambiente e umidade do ar.

Além desses fatos, a Tabela 2.6. também revela que Liu *et al.* (2013) e Pedreschi *et al.* (2008) foram os artigos que analisaram a maior quantidade de parâmetros do processo. Estes artigos realizaram a avaliação dos parâmetros de duração do processo de fritura, temperatura do óleo, tipo de pré-processamento e espessura do filete de batata, totalizando 4 variáveis do processo.

Com o objetivo de identificar o espaço experimental estudado por estes trabalhos, foi realizado a identificação das faixas de valores utilizados por cada um deles. A Tabela 2.7 apresenta as faixas de trabalho da variável temperatura do óleo de fritura utilizada em cada um dos trabalhos analisados.

Tabela 2.7 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as faixas de temperatura utilizadas

Referência	80 °C	100 °C	120 °C	140 °C	160 °C	180 °C	200 °C	220 °C
Alvarez <i>et al.</i> (2000)							██████████	
Baumann e Escher (1995)					██████████	██████████		
Blibech <i>et al.</i> (2014)						██████████	██████████	
Fontes <i>et al.</i> (2011)				██████████	██████████	██████████		
Giri <i>et al.</i> (2019)			██████████	██████████				
Liu <i>et al.</i> (2013)							██████████	
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)								
Oladejo <i>et al.</i> (2017)				██████████	██████████	██████████		
Oztop <i>et al.</i> (2007a)								
Oztop <i>et al.</i> (2007b)								
Parikh e Takhar (2016)							██████████	
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)				██████████	██████████	██████████		
Picouet <i>et al.</i> (2019)					██████████	██████████		
Pokharkar e Mahale (2001)					██████████	██████████		
Song <i>et al.</i> (2007)		██████████						

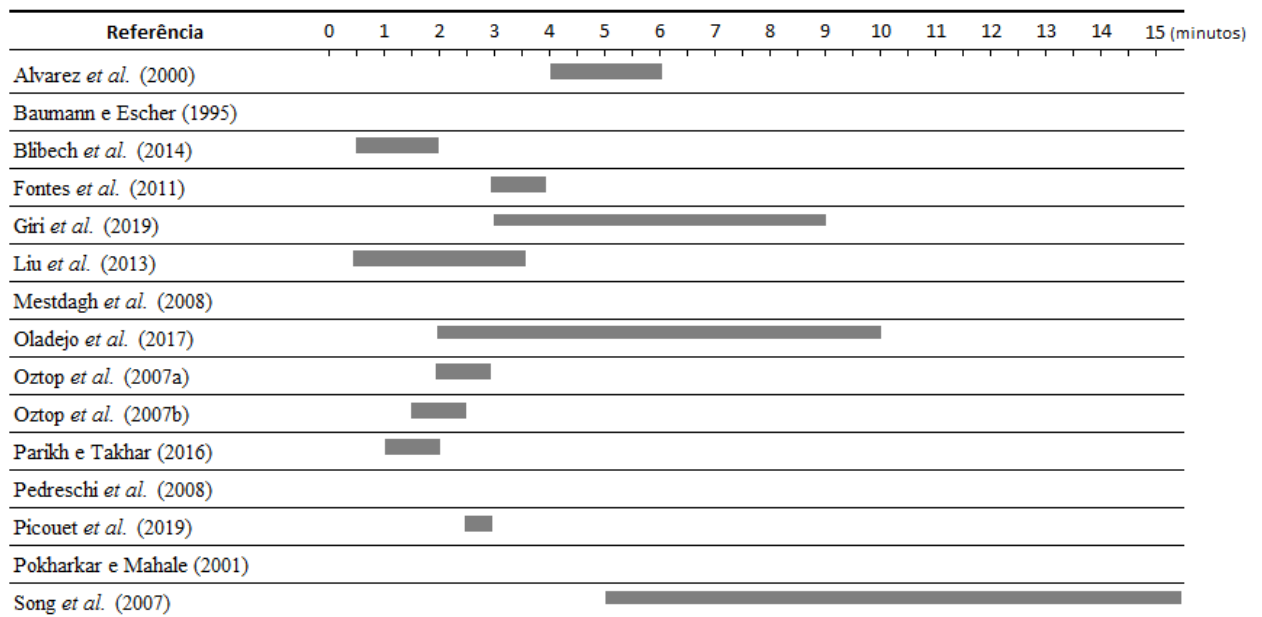
Fonte: Autoria própria (2021)

A Tabela 2.7 mostra que grande parte dos trabalhos concentrou os valores de temperatura do óleo de fritura entre 140 °C e 200 °C. Tal fato corrobora com Baumann e Escher (1995) que afirmam que temperaturas de óleo devem ser utilizadas entre 160 °C e 180 °C com o objetivo de se obter melhores propriedades mecânicas e estruturais para produto. De fato, 10 trabalhos utilizaram essa faixa de temperatura de óleo em suas análises e apenas Song *et al.* (2007) e Giri *et al.* (2019) utilizaram valores abaixo desta faixa. Os trabalhos de Oztop *et al.* (2007a, 2007b)

não foram considerados na Tabela 2.7, uma vez que esses artigos não analisaram a influência da variável de temperatura no processo.

Além do espaço experimental da variável de temperatura de fritura, o espaço experimental da variável de duração do processo de fritura também foi analisado. Pela Tabela 2.8 é possível obter os valores utilizados.

Tabela 2.8 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com a duração do processo de fritura



Fonte: Autoria própria (2021)

A análise da Tabela 2.8 permite observar que a maioria dos trabalhos analisados utilizaram duração de fritura superiores a 1 minuto e inferiores a 6 minutos. Giri *et al.* (2019), Oladejo *et al.* (2017), Song *et al.* (2007) foram os trabalhos que utilizaram maior amplitude para a duração de fritura. É possível observar que Song *et al.* (2007) também trabalharam com elevadas durações do processo de fritura quando comparada aos demais trabalhos, essa situação ocorreu pelo fato de que os autores utilizaram diferentes métodos de fritura, que exigem diferentes faixas de duração. É importante destacar que a duração do processo de fritura é influenciada por fatores como temperatura do óleo, potência do equipamento, quantidade de produto processado e outros fatores.

O espaço experimental da variável de espessura de corte também foi analisado e foi representado pela Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento de experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com os valores de espessura de corte utilizados

Referência	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alvarez <i>et al.</i> (2000)											■
Baumann e Escher (1995)		■	■								
Blibech <i>et al.</i> (2014)											
Fontes <i>et al.</i> (2011)				■							
Giri <i>et al.</i> (2019)			■								
Liu <i>et al.</i> (2013)		■	■	■	■	■					
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)		■									■
Oladejo <i>et al.</i> (2017)				■							
Oztop <i>et al.</i> (2007a)						■					
Oztop <i>et al.</i> (2007b)						■					
Parikh e Takhar (2016)									■		
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)				■							
Picouet <i>et al.</i> (2019)		■									
Pokharkar e Mahale (2001)			■	■							
Song <i>et al.</i> (2007)				■							

Fonte: Autoria própria (2021)

A Tabela 2.9 permite observar que os trabalhos analisados utilizaram diversas espessuras de corte de batata, variando entre 0,5 mm e 10 mm. Uma vez que Alvarez *et al.* (2000), Mestdagh *et al.* (2008) e Parikh e Takhar (2016) estudaram o processo de fritura de batatas palito, eles utilizaram as maiores espessuras de corte da batata, de 10 mm, 10 mm e 7 mm, respectivamente. Os demais autores utilizaram a batata *chips* como objeto de estudo e trabalharam com espessuras entre 0,5 mm e 5 mm. Liu *et al.* (2013) utilizaram a maior variedade de espessuras, utilizando as espessuras de 0,5 a 3,5 mm.

2.5.10. Classificação dos trabalhos quanto às respostas de interesse analisadas

A Tabela 2.10 foi desenvolvida com o objetivo de identificar as respostas de interesse utilizadas pelos autores na otimização do processo de fritura.

Tabela 2.10 – Classificação das pesquisas anteriores sobre planejamento e experimentos e otimização do processo de fritura de batatas de acordo com as respostas de interesse analisadas

Referência	Teor de gordura	Teor de umidade	Coloração	Textura	Análise sensorial
Alvarez <i>et al.</i> (2000)	*	*	*	*	
Baumann e Escher (1995)	*	*			
Blibech <i>et al.</i> (2014)	*	*			
Fontes <i>et al.</i> (2011)	*	*	*		
Giri <i>et al.</i> (2019)	*	*	*	*	
Liu <i>et al.</i> (2013)	*	*			*
Mestdagh <i>et al.</i> (2008)					
Oladejo <i>et al.</i> (2017)	*	*			
Oztop <i>et al.</i> (2007a)	*	*	*	*	
Oztop <i>et al.</i> (2007b)	*	*	*	*	
Parikh e Takhar (2016)	*	*	*	*	*
Pedreschi <i>et al.</i> (2008)	*	*			
Picouet <i>et al.</i> (2019)			*		*
Pokharkar e Mahale (2001)	*	*	*		*
Song <i>et al.</i> (2007)	*	*		*	

Fonte: Autoria própria (2021)

A análise da Tabela 2.10 revela que o teor de lipídios e o teor de umidade foram as respostas mais analisadas pelos trabalhos. Tanto o teor de lipídios quanto o teor de umidade foram estudados em 13 dos 15 artigos analisados, correspondendo a aproximadamente 87% dos artigos. A terceira respostas mais estudada pelos artigos foi a coloração, que foi analisada em aproximadamente 53% dos artigos analisados, seguida pela análise de textura, que foi estudada em aproximadamente 40% dos artigos. Por último, a análise sensorial foi estudada em aproximadamente 27% dos trabalhos analisados. Entre os trabalhos analisados, Parikh e Takhar (2016) estudaram todas as respostas mencionadas. Em seguida, Alvarez *et al.* (2000), Giri *et al.* (2019), Oztop *et al.* (2007a, 2007b) e Pokharkar e Mahale (2001) analisaram 4 das 5 respostas mencionadas.

2.6. Projeto e Análise de Experimentos

De acordo com Montgomery (2012) o planejamento estatístico de experimentos consiste no processo de planejamento de um experimento de modo que dados apropriados possam ser analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões objetivas. De acordo com o autor, quando os problemas utilizam dados que estão sujeitos a erros experimentais, o planejamento de experimentos é a única abordagem de análise objetiva. Montgomery (2012) destaca que existem 2 etapas em todos os procedimentos experimentais: o planejamento do experimento e a análise estatística dos dados. Esses dois assuntos são fortemente relacionados, uma vez que o método de análise depende diretamente do planejamento realizado.

De acordo com Montgomery (2012) existem três princípios básicos do planejamento de experimentos, que são: randomização, replicação e blocagem. Por meio da randomização, tanto a alocação do material experimental quanto a ordem de execução dos experimentos são determinadas aleatoriamente, uma vez que os métodos estatísticos requerem que os erros existentes sejam distribuídos aleatoriamente. Por meio dessa técnica, os efeitos dos fatores externos que podem existir são distribuídos. A replicação consiste em uma repetição do experimento em cada combinação de fatores, ela possui duas propriedades importantes, a primeira é que ela permite que o experimentador obtenha uma estimativa do erro experimental. Essa estimativa se torna uma medida para determinar se as diferenças observadas são estatisticamente diferentes. A outra propriedade consiste no fato de que se a média simples for utilizada para estimar a verdadeira média da resposta para um determinado nível dos fatores do experimento, a replicação permite que o experimentador obtenha uma estimativa mais precisa deste parâmetro. A blocagem é outra técnica do planejamento de experimentos utilizada para melhorar a precisão com que as comparações entre os fatores de interesse são realizadas. Geralmente a blocagem é utilizada para reduzir ou eliminar a variabilidade transmitida pelos fatores de ruído, que podem influenciar a resposta do experimento, mas que não são de interesse direto do experimentador.

Montgomery (2012) afirma que um sistema pode ser representado por uma combinação de operações, máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam algum *input* em *output* que possui uma ou mais variáveis de resposta, como apresentado pela Figura 2.11.

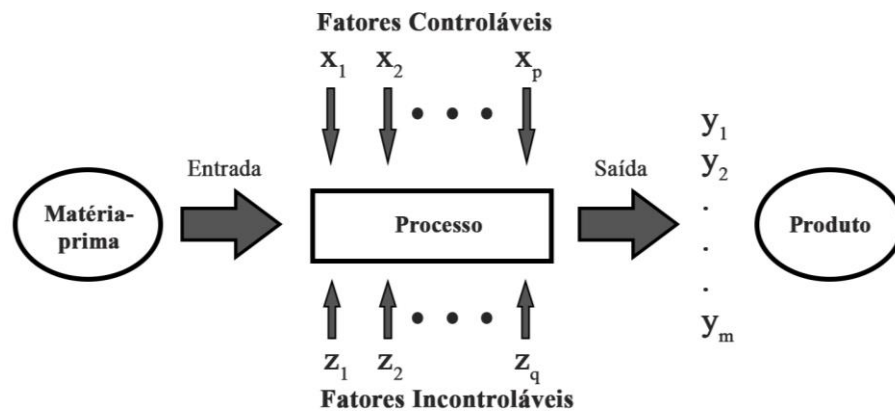


Figura 2.11 - Componentes de um processo

Fonte: Adaptado de Montgomery (2012)

De acordo com Montgomery (2012), algumas variáveis representadas no processo podem ser controladas (sendo representadas por x_1, x_2, \dots, x_p), enquanto outras são incontroláveis (representadas por z_1, z_2, \dots, z_q). As respostas do processo foram representadas por y_1, y_2, \dots, y_m . Dessa maneira, os objetivos de um experimento podem ser:

- Determinar quais variáveis são mais influentes na resposta y ;
- Determinar quais valores devem ser utilizados nas variáveis x para que o valor de y seja quase sempre perto do valor desejado;
- Determinar quais valores devem ser utilizados nas variáveis x para que a variabilidade da resposta seja mínima;
- Determinar quais valores devem ser utilizados nas variáveis x para que os efeitos das variáveis incontroláveis sejam minimizados.

As principais etapas para realizar o procedimento do planejamento estatístico de experimentos podem ser classificados da seguinte maneira.

- **Reconhecimento e declaração do problema:** uma correta declaração do problema contribui para o melhor entendimento do fenômeno que está sendo estudado. Nessa etapa é interessante a criação de uma lista de problemas específicos a serem esclarecidos após o projeto. Além disso, é muito importante que diversas áreas interessadas no resultado do problema sejam envolvidas nessa etapa, por exemplo: engenharia, qualidade, manufatura, *marketing*, atendimento ao consumidor, entre outras;
- **Seleção das variáveis de resposta:** o experimentador deve ter a certeza de que a resposta escolhida fornece informações importantes sobre o processo estudado. Nessa etapa, é

importante identificar a maneira que essa resposta de interesse é medida. Nesse contexto, também pode se optar pela análise de múltiplas respostas;

– **Escolha dos fatores, níveis e amplitudes:** Assim que os fatores são selecionados, o experimentador deve definir as amplitudes em que eles serão variados e níveis utilizados na realização dos experimentos. Nesse etapa, é importante ter amplo conhecimento sobre o processo em estudo, levando em consideração a experiência prática e o conhecimento teórico. Uma importante ferramenta a ser utilizada no planejamento pré-experimental é o Diagrama de Ishikawa que permite organizar as informações relacionadas ao experimento, conforme apresentado Figura 2.12;

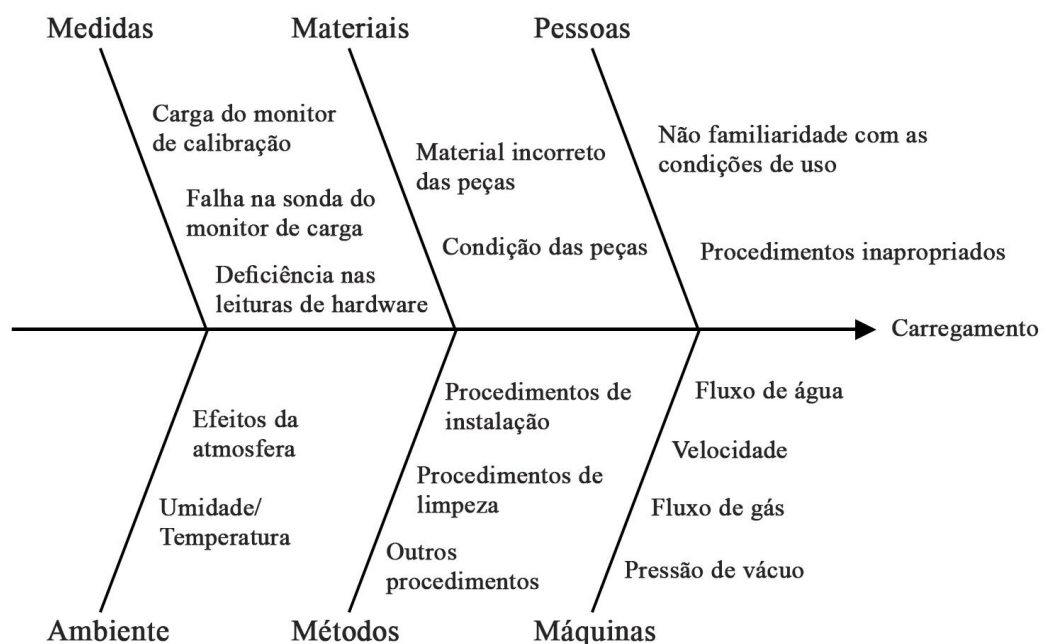


Figura 2.12 - Diagrama de Ishikawa

Fonte: Adaptado de Montgomery (2012)

– **Escolha do arranjo experimental:** a escolha do arranjo deve considerar a quantidade de experimentos, a seleção de uma ordem adequada para a execução dos experimentos e a necessidade de blocagem ou aleatorização. Existem diversos *softwares* estatísticos que auxiliam na escolha do arranjo experimental. Nesses casos, o experimentador aponta informações sobre o número de fatores, níveis e amplitudes e o *software* fornece uma lista de arranjos recomendados para utilização. Ao escolher o arranjo, é importante levar em consideração os objetivos do experimento;

– **Realização do experimento:** É recomendado que sejam realizados testes prévios antes de se iniciar a condução do experimento. Esses testes podem fornecer informações sobre a

estabilidade do material experimental, além de testar o sistema de medição utilizado. Além disso, também possibilitam uma caracterização do erro experimental e promovem o aprimoramento da prática experimental;

– **Análise estatística dos dados:** A análise estatística dos dados permite a apresentação dos resultados dos experimentos por meio de modelos empíricos, que apresentam a relação existente entre a resposta e os fatores do arranjo. Nesse contexto, a análise de resíduos e o teste de adequação do modelo são técnicas relevantes. Se um experimento foi projetado corretamente e se ele foi executado de acordo com o arranjo, os métodos estatísticos necessários não serão complicados;

– **Conclusões e recomendações:** a última etapa consiste na apresentação da conclusões práticas sobre os resultados e sua contribuição para a tomada de decisão. Testes de confirmação devem ser executados para validar as conclusões obtidas com o experimento.

2.7. Metodologia de Superfície de Resposta

Segundo Montgomery (2012), a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) é um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas utilizadas para realizar a modelagem e análise de problemas cuja resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e que possui o objetivo de otimizar a resposta do problema. De acordo com Myers *et al.* (2016) as aplicações mais amplas da Metodologia de Superfície de Resposta ocorrem no ambiente industrial, principalmente em situações em que diversas variáveis influenciam a performance de características da qualidade de um produto ou de um processo.

Na maioria das aplicações da Metodologia da Superfície de Resposta, a relação entre variáveis independentes e resposta de interesse não é conhecida. Dessa maneira, a primeira etapa deve consistir na busca de uma relação entre elas. Se essa relação puder ser modelada por uma função linear de variáveis independentes, é possível que ela seja aproximada por um modelo de primeira ordem, conforme a Equação (2.3) (MONTGOMERY, 2012).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.3)$$

Em que:

y – Resposta de interesse;

β – Coeficientes da equação;

x – Variáveis independentes;

k – Quantidade de variáveis independentes;

ϵ – Erro experimental.

Myers *et al.* (2016) destacam que frequentemente a existência de curvatura na superfície de resposta faz com que o modelo de primeira ordem seja inadequado para representar o problema. Nesse caso, pode ser necessário a utilização de um modelo de maior ordem, como apresentado pela Equação (2.4) (MONTGOMERY, 2012).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.4)$$

De acordo com Montgomery (2012), a maioria dos problemas que utilizam a Metodologia de Superfície de Resposta utiliza um dos dois modelos apresentados pela Equação (2.3) e Equação (2.4). É importante destacar que dificilmente um modelo polinomial irá representar o problema em todo o espaço experimental, porém ele possui boa aderência em uma região limitada do espaço. Dessa forma, uma vez que a região ótima foi encontrada, um modelo mais elaborado deve ser utilizado e uma nova análise deve ser executada a fim de se localizar o ponto ótimo. A representação gráfica da superfície de resposta pode ser representada pela Figura 2.13 e Figura 2.14.

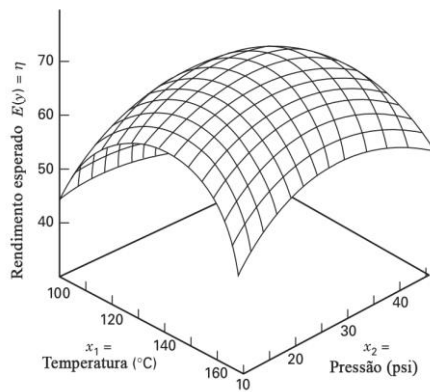


Figura 2.13 - Superfície de resposta apresentando o rendimento esperado (η) em função da temperatura (x_1) e da pressão (x_2)

Fonte: Adaptado de Montgomery (2012)

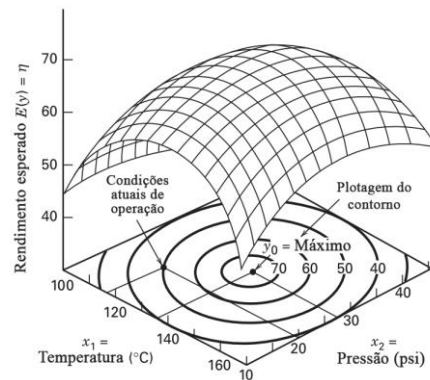


Figura 2.14 - Plotagem do contorno da superfície de resposta

Fonte: Adaptado de Montgomery (2012)

De acordo com Myers *et al.* (2009), o Central Composite Design (CCD) é o tipo de arranjo mais popular para ajuste em modelos de segunda ordem. A implementação prática do CCD geralmente surge por meio da experimentação sequencial. Ele é formado por uma matriz composta por um arranjo fatorial de dois níveis (2^k), ou arranjo fatorial fracionado, juntamente com $2k$ pontos axiais e um conjunto de pontos centrais. Os pontos centrais fornecem

informações sobre a existência de curvatura no sistema e, assim, caso a curvatura seja encontrada no sistema, o acréscimo de pontos axiais irá permitir a estimação dos termos quadráticos puros.

De acordo com Montgomery (2012), existem dois parâmetros neste arranjo que devem ser especificados que são a distância α dos pontos axiais ao ponto central e o número de pontos centrais. A Figura 2.15 apresenta o arranjo CCD para um experimento com 2 fatores e 3 fatores, respectivamente.

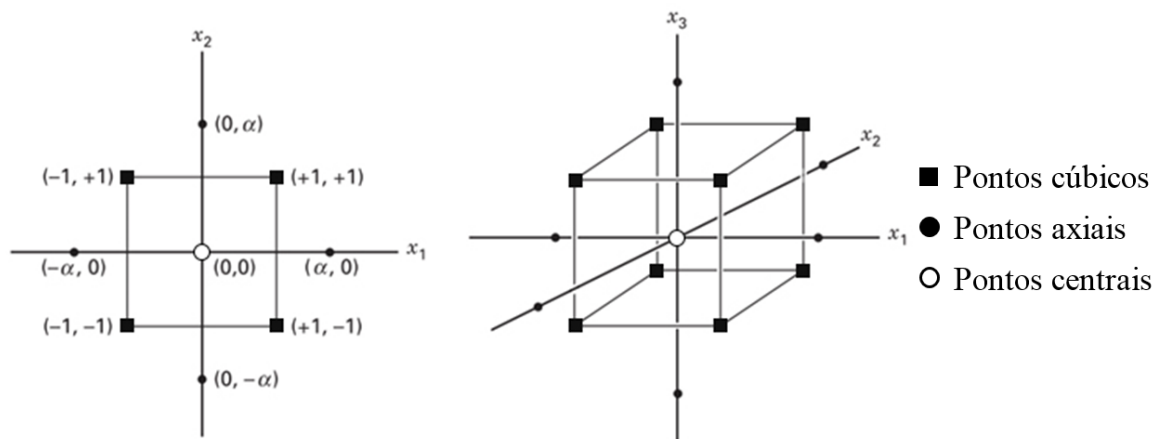


Figura 2.15 - Arranjo Composto Central (CCD) em um experimento com 2 ($k=2$) e 3 ($k=3$) fatores, respectivamente

Fonte: Adaptado de Montgomery (2012)

2.8. Múltiplas respostas

Segundo Montgomery (2012), a necessidade de se analisar problemas com múltiplas respostas utilizando a metodologia da superfície de resposta é frequente. A análise de múltiplas respostas envolve primeiramente a construção de modelos de superfície de resposta para cada uma das respostas necessárias e, então, tentar encontrar um conjunto de condições operacionais que, de alguma forma, otimize todas as respostas ou, pelo menos, as mantêm em intervalos desejados.

De acordo com Myers *et al.* (2009), em muitas situações que envolvem produtos de consumo como alimentos ou bebidas, pesquisadores precisam lidar, por exemplo, com a resposta sabor, mas também precisam considerar outras respostas como cor e textura. Uma abordagem que otimiza múltiplas respostas e que funciona bem quando existem poucas variáveis de processo é a sobreposição de gráficos de contorno para cada uma das respostas.

Com isso, o experimentador pode examinar o gráfico para determinar as regiões apropriadas de operação.

De acordo com Myers *et al.* (2009), quando existe mais do que três variáveis em estudo, a análise por meio sobreposição do gráfico de contorno se torna dificultosa devido à elevada quantidade de traços sobrepostos que prejudicam a identificação das áreas adequadas. Outras abordagens que podem ser utilizadas para problemas de otimização de múltiplas respostas são o Erro Quadrático Médio Multivariado, Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado (EQMMP), Método do Critério Global (MCG) e o *Desirability*.

A abordagem escolhida para o presente trabalho foi o método do Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), que permite a otimização de problemas de múltiplas respostas correlacionadas.

2.9. Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM)

O Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM), desenvolvido por Paiva (2012) é uma ferramenta utilizada para a otimização de problemas multivariados que considera a estrutura de correlação existente entre as respostas de interesse, permitindo a redução da dimensionalidade dos dados.

De acordo com Paiva (2012), após o desenvolvimento da Projeto e Análise de Experimentos (DOE), Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) e a Análise de Componentes Principais (ACP), uma superfície de resposta ajustada para os escores dos componentes principais deve ser obtida e então é aplicado o Erro Quadrático Médio Multivariado.

Essa abordagem é capaz de agregar diversas respostas num único índice, ao mesmo tempo em que trata das estruturas de variância-covariância e dos desvios individuais de cada valor alvo. Dessa forma, é possível promover a independência numérica e a integração computacional das funções de integração multivariadas, enquanto a Metodologia de Superfície de Resposta é utilizada na estimação das equações de regressão multivariadas com os dados obtidos experimentalmente. Assim, utilizando a Análise dos Componentes Principais, é possível que o conjunto das respostas originais se transforme em um conjunto não correlacionado de variáveis (PAIVA, 2012).

Dependendo da força da estrutura de variância-covariância, o número de equações obtidas pode ser inferior que o número inicial de equações. Nesse contexto, os alvos do conjunto de dados inicial são transformados por meio da fatorização das variáveis. Após a obtenção dos

escores multivariados, o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários é estabelecido para definir os parâmetros independentes do processo e o escore do componente principal. O número de equações a serem utilizadas no modelo é relacionado ao número de componentes principais significativos, sendo que nesse contexto geralmente uma ou duas equações são suficientes para representar o sistema original (PAIVA, 2012). Com a associação de algumas restrições, o sistema de otimização fica pronto para ser utilizado.

De acordo com Paiva (2012), o alvo do i -ésimo componente principal pode ser escrito conforme a Equação (2.5).

$$\begin{aligned}\theta_{CP_i} &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q e_{ij} [Z(Y_p | \theta_{Y_p})] \\ i &= 1, 2, \dots, p; \\ j &= 1, 2, \dots, q\end{aligned}\tag{2.5}$$

Em que e_i representa o autovetor do conjunto associado ao i -ésimo componente principal e θ_{Y_p} é o valor alvo para cada uma das p respostas originais. Já o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) é obtido conforme a Equação (2.6).

$$EQMM_i = (CP_i - \theta_{CP_i})^2 + \lambda_i\tag{2.6}$$

Dessa forma, o modelo de otimização pode ser representado pela Equação (2.7).

$$\begin{aligned}\text{Minimizar } EQMM &= \left\{ \prod_{i=1}^k \left[(CP_i - \theta_{CP_i})^2 + \lambda_i \mid \lambda_i \geq 1 \right] \right\}^{\left(\frac{1}{k}\right)} \\ i &= 1, 2, \dots, k; \\ k &\leq p; \\ \text{Sujeito a: } &x^T x \leq \rho^2\end{aligned}\tag{2.7}$$

Em que:

CP_i – Modelos de superfície de resposta desenvolvidos para os escores dos componentes principais;

θ_{CP_i} – Alvos em termos dos componentes principais;

λ_{CP_i} – Autovalores dos componentes principais;

k – Número de respostas consideradas;

$x^T x \leq \rho^2$ – Restrição do espaço experimental para regiões esféricas

2.10. Considerações finais

O Capítulo 2 teve como objetivo fornecer o embasamento teórico para a preparação dos experimentos, interpretação dos resultados e aplicação da otimização das principais características da qualidade de batatas fritas.

Primeiramente, foi possível entender sobre a importância da participação batata inglesa na produção mundial de alimentos e sua ampla relevância no mercado de consumo, principalmente sob a forma de batata processada. Também foi possível assimilar características estruturais físicas das batatas fritas, sobretudo em relação ao teor de lipídios que representa em torno de 35% a 40% da massa total do produto, bem como compreender o recente aumento da atenção mundial ao consumo de alimentos com elevado teor de lipídios, considerando a mudança no hábito alimentar de consumidores preocupados com a saúde. Dessa maneira, foi possível enxergar a atenção das indústrias alimentícias em fabricar produtos que sejam saudáveis e, ao mesmo tempo, que apresentem as características organolépticas desejadas pelos consumidores. Dessa maneira, foi possível compreender sobre a necessidade de um rigoroso controle dos parâmetros do processo de fritura de batatas.

A fundamentação teórica permitiu realizar o levantamento dos principais fatores influentes nas características da qualidade de batatas fritas, entre os quais estão a duração do processo de fritura, a temperatura do óleo, sua qualidade, o teor de umidade inicial da batata, porosidade entre outros. Além disso, foi possível assimilar como cada uma das características da qualidade pode ser mensurada objetivamente e, com isso, estabelecer métodos padrões para a realização de cada tipo de análise e comparação dos valores encontrados. Foi possível averiguar que as principais características da qualidade analisadas por outros trabalhos foram o teor de lipídios, umidade e coloração.

Por fim, foram apresentados os conceitos de Projeto e Análise de Experimentos, evidenciando sua importância para obtenção de conclusões objetivas por meio da utilização de métodos estatísticos. Também foram apresentados os principais conceitos referentes à Metodologia da Superfície de Resposta e à Otimização de Múltiplas Respostas. Tais fatos contribuíram para a compreensão dos benefícios de sua aplicação em problemas de engenharia, principalmente problemas relacionados à qualidade de produtos, com enfoque nos produtos alimentícios.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Considerações iniciais

O objetivo deste capítulo consiste em realizar a descrição do método experimental utilizado no desenvolvimento deste trabalho. A utilização do método experimental garante que o processo seja tratado de forma sistemática e com relevância científica. Assim, o presente capítulo inicialmente apresenta o problema de pesquisa e, em seguida, apresenta o procedimento experimental utilizado em seu desenvolvimento.

3.2. Objeto de estudo e problema de pesquisa

O presente trabalho tem como objeto de estudo o processo de fritura de batatas em formato de palha por meio da fritura por imersão em óleo. O problema de pesquisa consiste em identificar a combinação dos parâmetros do processo que possibilitem o alcance de condições ótimas de qualidade do produto ao final do processo. É esperado que ao final do processo, o produto fabricado consiga atingir condições de:

- Minimização do teor total de lipídios;
- Minimização do teor de umidade;
- Minimização da diferença total de cores (ΔE);
- Minimização do tempo de ciclo do processo.

Este problema é caracterizado como uma situação complexa de otimização, uma vez que se deseja otimizar simultaneamente diversas respostas, ao mesmo tempo em que considera a influência de múltiplos parâmetros de entrada no processo, conforme representado pela Figura 3.1. Dessa maneira, é importante que seja realizada uma abordagem científica com o objetivo de que as ferramentas de análise sejam corretamente definidas para que os resultados alcançados sejam significativos e coerentes.

A escolha dos fatores controláveis de temperatura do óleo de fritura e duração do processo de fritura foi realizada levando em consideração a relevância de ambos fatores em trabalhos sobre otimização de processos de fritura, conforme apresentado pela Tabela 2.6, que mostra a preponderância da utilização de ambos fatores. O fator tempo de escoamento foi escolhido considerando sua importância na composição do tempo de ciclo, que é uma das respostas analisadas neste trabalho e, por isso, também apresenta grande relevância. A escolha dos fatores controláveis mencionados também ocorreu em função da estrutura da linha de produção que foi

analisada. Dessa forma, outros fatores não puderam ser analisados devido à impossibilidade de modificação nos níveis de trabalho utilizados.

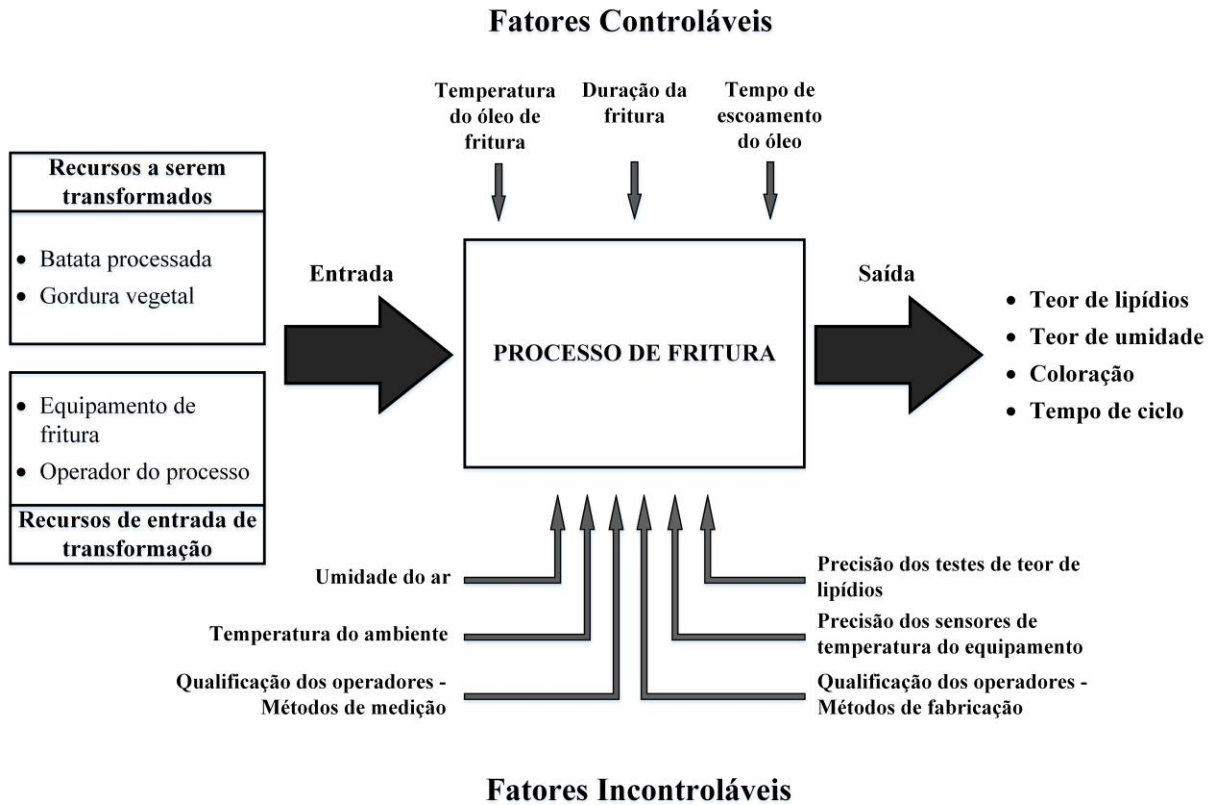


Figura 3.1 - Representação do processo de fritura de batatas

Fonte: Autoria própria (2021)

O objeto de estudo deste trabalho foi representado na Figura 3.2 que apresenta o *Value Stream Mapping* do processo de fabricação do produto analisado, bem como realizada a delimitação da área de estudo deste trabalho, destacando que o trabalho focou na análise e otimização do processo de fritura.

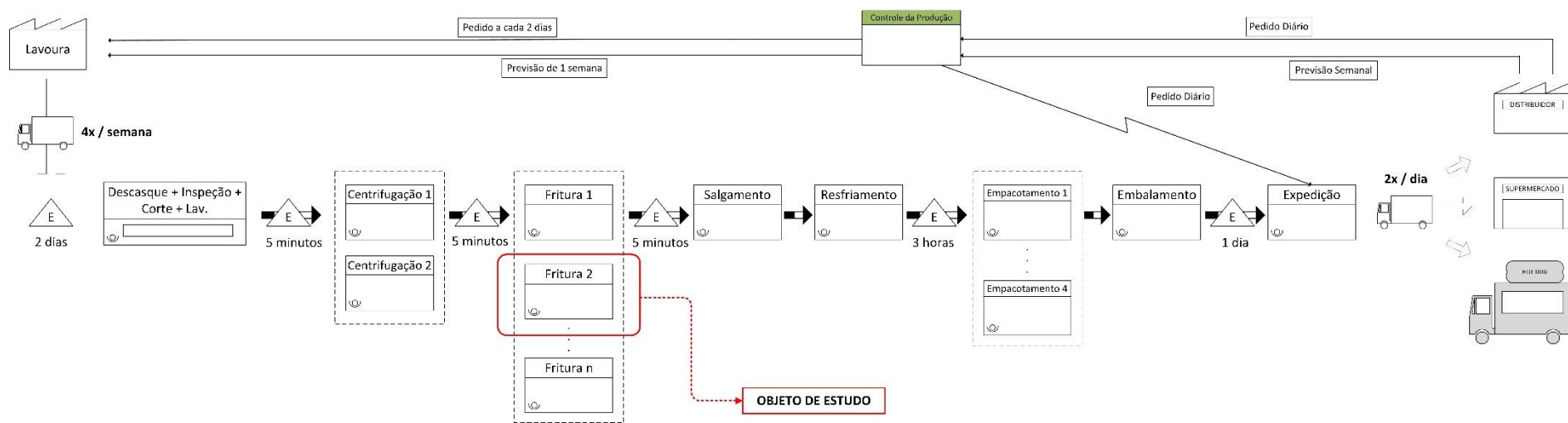


Figura 3.2 – Value Stream Mapping com destaque para o objeto de estudo do trabalho.

Fonte: Autoria própria (2021)

3.3. Método experimental

O presente trabalho utilizou a experimentação como método de pesquisa, sendo classificado como pesquisa aplicada, explicativa e quantitativa. O Projeto e Análise de Experimentos (DOE) foi utilizado como técnica para coleta e análise de dados por meio de métodos estatísticos, possibilitando o alcance de conclusões válidas e objetivas sobre o processo (MONTGOMERY, 2005). Em seguida, a Metodologia da Superfície de Resposta (RSM) foi utilizada com a finalidade de modelar e analisar o problema de otimização, identificando as superfícies formadas pelos parâmetros do problema e as respostas de interesse. O presente trabalho não utilizou o desenvolvimento de experimentos de *screening*, uma vez que, foram realizadas análises de diversos trabalhos publicados sobre o tema, assegurando que os fatores analisados são notadamente relevantes para o tipo de processo analisado. Dessa forma, decidiu-se utilizar a Metodologia da Superfície de Resposta para a modelagem e análise do problema.

Para a otimização do modelo, foi utilizado o Erro Quadrático Médio Multivariado (PAIVA et al., 2018) com o objetivo de realizar a otimização de um problema com respostas correlacionadas. Dessa maneira, o método experimental foi dividido em duas fases:

- **1ª Fase - Metodologia da Superfície de Resposta:** nesta fase foram desenvolvidas as etapas de definição dos parâmetros analisados, fixação dos níveis de trabalho, escolha das respostas de interesse, definição da matriz experimental, execução dos experimentos e registro das respostas, modelagem das respostas, adequação e ajuste dos modelos, obtenção das superfícies de resposta, análise dos efeitos principais dos parâmetros, análise dos efeitos das interações entre os parâmetros e análise da correlação entre as respostas.
- **2ª Fase - Otimização:** etapa em que foi possível obter a combinação ótima dos parâmetros do processo com o objetivo de potencializar as respostas de qualidade, bem como reduzir o tempo de ciclo do processo.

O fluxograma contendo as etapas do método experimental foi representado pela Figura 3.3.

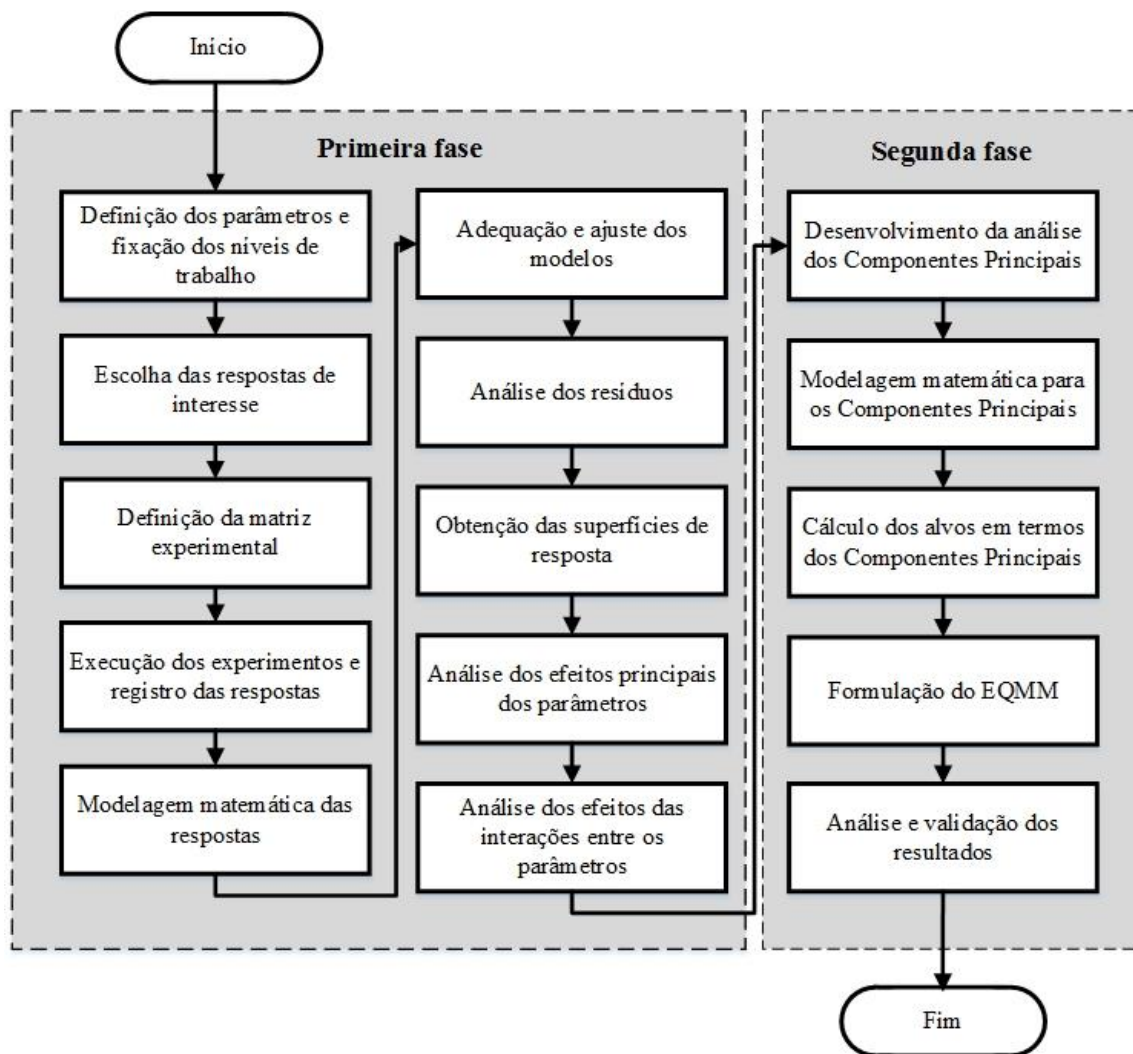


Figura 3.3 - Fluxograma do desenvolvimento do método experimental

Fonte: Autoria própria (2021)

3.4. Considerações finais

O presente capítulo realizou a apresentação do método experimental utilizado neste trabalho. Em seu desenvolvimento, foi apresentado o objeto de estudo, o problema de pesquisa, além do processo de fritura analisado e de algumas variáveis importantes para o processo. Posteriormente o método experimental foi dividido em duas etapas: a etapa da Metodologia da Superfície de Resposta e a etapa de Otimização, com o objetivo de identificar a combinação das variáveis de entrada que proporcionem condições ótimas de qualidade do produto e a redução do tempo de ciclo do processo.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1. Considerações iniciais

O Capítulo 4 trata da aplicação do método experimental desenvolvido com o objetivo de realizar a otimização do processo de fritura de batatas-palha utilizando a fritura por imersão em óleo em um processo de fabricação industrial por bateladas. As etapas desenvolvidas, bem como os resultados alcançados foram detalhados ao longo deste capítulo.

4.2. Metodologia de Superfície de Resposta

4.2.1. Definição dos parâmetros e fixação dos níveis de trabalho

Conforme apresentado no Capítulo 2, algumas das variáveis do processos de fritura abordadas em trabalhos anteriores são: tipo de processo de fritura, tipo de matéria-prima, espessura o filete da batata, tipo de óleo de fritura utilizado, proporção entre óleo e batata utilizada no processo, escala de produção, potência do equipamento, temperatura do óleo de fritura, duração do processos de fritura, tipo de pré-processamento e temperatura de pré-processamento.

No desenvolvimento deste trabalho, as variáveis de tipo de processo de fritura, tipo de matéria-prima, espessura do filete de batata, tipo de óleo de fritura utilizado, proporção de óleo e batata durante a fritura, escala de produção, potência do equipamento foram mantidas constantes devido às condições associadas ao ambiente de fabricação. Dessa maneira, o tipo de processo de fritura utilizado foi a fritura por imersão em óleo por bateladas em equipamento industrial. A batata *in natura* utilizada foi a batata-inglesa (*Solanum tuberosum*) da variedade Asterix e o óleo utilizado no processo foi o óleo vegetal de palma. A espessura e comprimento do filete de batatas foram de aproximadamente 3 mm e 30 mm respectivamente, enquanto a proporção de óleo/batata durante o processo de fritura foi mantida fixa em 15,5 L/kg. Considerando que o presente estudo analisou um único equipamento, o parâmetro escala de produção também foi mantido fixo, sendo caracterizado como escala industrial. A potência do equipamento também se manteve fixa. Por fim, devido às condições relacionadas à estrutura da linha de produção, não foi realizado nenhum tipo de pré-tratamento nas amostras e, pela mesma razão, também não houve tratamento térmico das amostras antes do processos de fritura.

Os parâmetros do processo de fritura que sofreram variações foram a temperatura do óleo de fritura, a duração do processo de fritura e o tempo de escoamento do óleo após o

procedimento de fritura. A escolha das variáveis de temperatura do óleo e duração do processo de fritura foi realizada com base em suas predominâncias em artigos publicados sobre o tema, conforme apresentado Tabela 2.6, indicando a relevância de ambas variáveis em problemas de otimização de fritura de batatas fritas. A escolha da duração de escoamento foi realizada considerando que essa variável compõe o tempo de ciclo de processo, que é uma das respostas a serem otimizadas neste problema. Os níveis dessas variáveis, representados na Tabela 4.1, foram definidas de acordo com as faixas de valores apresentados em pesquisas anteriores sobre este processo e após a confirmação por meio de testes realizados preliminarmente. O Quadro 4.1, por sua vez, apresenta os parâmetros do processo que foram variados e os parâmetros que foram mantidos fixos.

Quadro 4.1 - Fatores utilizados como parâmetros variáveis e fixos no processo analisado

Parâmetros Variáveis	Parâmetros Fixos
Temperatura do óleo	Tipo de processo de fritura
Duração do processo de fritura	Tipo de batata utilizada
Duração do escoamento de óleo	Variedade da batata utilizada
	Espessura do filete da batata
	Tipo de óleo utilizado
	Proporção de batata/óleo
	Escala de produção
	Potência do equipamento
	Tipo de pré-tratamento
	Temperatura de pré-tratamento

Fonte: Autoria própria (2021)

Os parâmetros definidos como variáveis, bem como seus níveis de trabalho, foram representados pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros variáveis e níveis de trabalho

Parâmetros	Notação	Níveis de trabalho				
		- α	-1	0	+1	+ α
Temperatura do óleo (°C)	T	140	148	160	172	180
Duração de fritura (min)	Δt	3,8	4,5	5,5	6,5	7,2
Tempo de escoamento de óleo (s)	Δh	13	20	30	40	47

Fonte: Autoria própria (2021)

Os valores das demais variáveis mantidas fixas foram detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Variáveis definidas como fixas

Parâmetro	Valor/tipo adotado
Tipo de processo de fritura	Fritura por imersão em óleo por bateladas
Tipo de batata utilizada	Batata-inglesa (<i>Solanum tuberosum</i>)
Variedade da batata utilizada	Asterix
Espessura de corte da batata	3 mm
Comprimento do filete da batata	30 mm
Tipo de óleo utilizado	Óleo de palma
Proporção de óleo/batata	15,5 L/kg
Escala de produção	Industrial
Tipo de pré-tratamento	Sem pré-tratamento
Temperatura de pré-tratamento	Sem pré-tratamento

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.2. Escolha das respostas de interesse

As respostas de interesses avaliadas neste trabalho foram: teor de umidade presente no produto final (U), teor de lipídios presente no produto final (L), coloração (ΔE) e tempo de ciclo do processo (Tc).

4.2.3. Definição da matriz experimental

O arranjo composto central (CCD) foi utilizado como matriz experimental para este estudo. Para isso, foram utilizados três fatores em dois níveis ($2^k = 2^3 = 8$), 6 pontos axiais ($2k = 6$), seis pontos centrais e sem replicação, resultando em um total de 20 experimentos. Nesse caso, o valor adotado de α foi de 1,682.

4.2.4. Execução dos experimentos e registro das respostas

A execução dos experimentos ocorreu no dia 01 de setembro de 2020 em uma indústria de batatas fritas de médio porte. Os experimentos foram realizados durante funcionamento da fábrica. Para isso, uma das fritadeiras utilizadas no processo de fritura foi utilizada como objeto de análise. Os demais setores da empresa, incluindo processos anteriores e posteriores ao processo de fritura foram mantidos em condições normais de operação. A realização dos testes durante o expediente da fábrica contribuiu para que não fosse necessário realizar a contratação de horas extras de mão de obra para realização do experimento, não foi necessário a realização de *setups* de máquinas e também não houve a necessidade de realizar o carregamento da linha de produção, uma vez que ela já estava em funcionamento. Além dos fatos mencionados, a realização dos experimentos durante o expediente de produção também teve o objetivo de manter as condições normais de operação do processo, evitando que possíveis distorções causadas pelo funcionamento parcial da linha de produção afetassem o resultado dos experimentos.

Em cada experimento foram utilizados 60 kg de batatas cortadas, conforme apresentado na Figura 4.3 O equipamento utilizado, bem como o *setup* do processo de fritura pode ser observado na Figura 4.1.



1. Operador;
2. Fritadeira;
3. Coifa de exaustão.

Figura 4.1 - Processo de fritura em operação

Fonte: Autorial própria (2021)

Os equipamentos e materiais utilizados no processo de fritura foram representados pela Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4. Os componentes destacados nas figuras são:

- Item 1** - Visor digital representando a temperatura do óleo de fritura, medida por sensor;
- Item 2** - Batata crua já processada, na etapa anterior à fritura;
- Item 3** – Batata-palha após o processo de fritura.

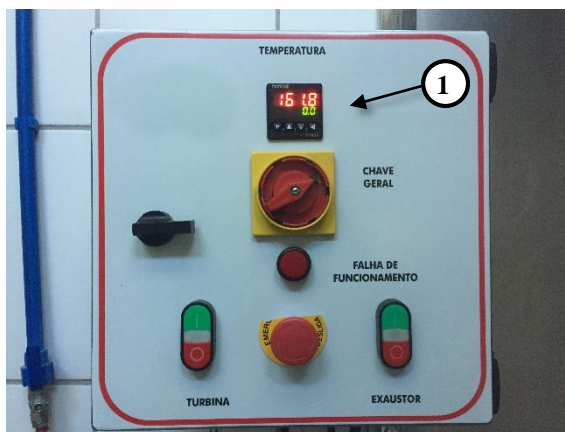


Figura 4.2 - Painel eletrônico do equipamento, indicando a temperatura do óleo de fritura

Fonte: Autorial própria (2021)

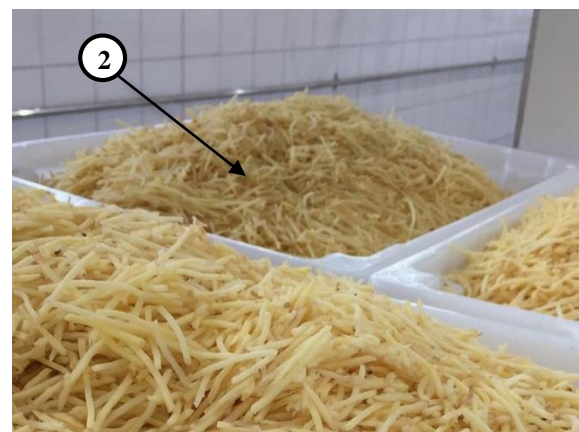


Figura 4.3 - Batata crua em etapa anterior ao processo de fritura

Fonte: Autorial própria (2021)

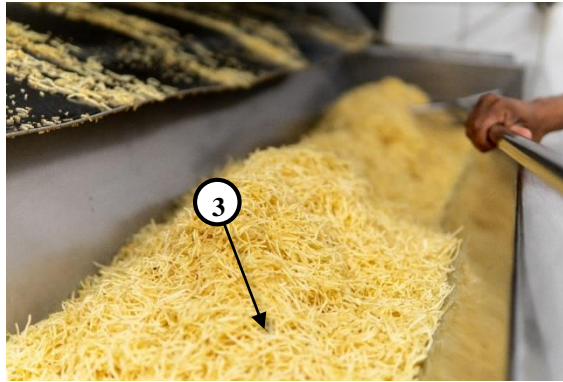


Figura 4.4 - Batata frita após o processo

Fonte: Aatoria própria (2021)

Após a finalização do processo de fritura, representada pela Figura 4.4, as amostras foram resfriadas em temperatura e umidade ambiente por 5 minutos e foram acondicionadas em embalagens metalizadas de polipropileno biorientado (BOPP) com o intuito de fornecer barreiras contra luz, umidade e oxigênio. Após o acondicionamento, as embalagens foram seladas e armazenadas.

4.2.4.1. Registro das respostas de teor de umidade

O procedimento utilizado para determinação do teor de umidade das amostras foi baseado no método oficial AOAC 984.25 detalhado em Biltcliffe *et al.* (2020) para determinação do teor de umidade em batatas fritas. Devido à quantidade de amostras analisadas, foi necessário fazer a substituição dos cadinhos, conforme indicado no método, por béqueres.

Sete dias após sua fabricação, as amostras foram transportadas até o laboratório em um recipiente de isopor. O procedimento foi realizado no Laboratório de Química Analítica no Instituto de Física e Química da Universidade Federal de Itajubá. Para a realização do procedimento foi necessário a utilização de um forno de convecção do fabricante Biopar Equipamentos Eletroeletrônicos e modelo S300SD, de 2.000W, representado pela Figura 4.5.



Figura 4.5 - Forno de convecção utilizado para determinação do teor de umidade das amostras

Fonte: Autoria própria (2021)

Os itens destacados na figura correspondem aos seguintes componentes do sistema:

- **Item 1** - Cavidade interna do forno;
- **Item 2** - Controlador digital de temperatura;
- **Item 3** - Bandeja de apoio.

O forno de convecção foi pré-aquecido em temperatura de 103 °C. Em seguida, as batatas foram trituradas em pedaços de aproximadamente 3 mm utilizando-se um triturador elétrico. As amostras foram dispostas nos béqueres, que haviam sido previamente identificados e pesados. Considerando que o teste foi realizado com réplica, foram utilizados 2 cadinhos de 10 g para a análise de cada amostra. A disposição dos béqueres e amostras no interior do forno de convecção foi apresentada pela Figura 4.6.



Figura 4.6 - Determinação do teor de umidade das amostras

Fonte: A autoria própria (2021)

Os recipientes com as amostras foram posicionados no interior do forno de convecção pré-aquecido e mantidos em temperatura de 103°C durante 16 horas. Após esse período, os recipientes e amostras foram retirados do forno e mantidos em dessecadores para resfriamento durante 2 horas. Após esse período, eles foram pesados e as massas obtidas foram anotadas.

Logo após a pesagem, os recipientes retornaram ao interior do forno de convecção em 103°C por mais 2 horas. Após esse período, os recipientes e amostras foram colocados novamente em dessecadores por mais 2 horas e, em seguida, foram novamente pesados. Considerando que a diferença dos valores entre as duas pesagens foi inferior a 0,5 mg, o processo de secagem foi concluído.

O cálculo para determinação do teor de umidade das amostras foi realizado utilizando-se a Equação (2.1). Os valores obtidos para o teor de umidade das amostras foram apresentados na Tabela 4.4.

4.2.4.2. Registro das respostas de teor de lipídios

A determinação do teor de lipídios das amostras foi realizada no Laboratório de Química Analítica do Instituto de Física e Química da Universidade Federal de Itajubá. Sete dias após sua fabricação, as amostras foram transportadas para o laboratório em um recipiente de isopor com o objetivo de manter sua temperatura preservada durante o transporte. As embalagens foram abertas e, com auxílio de um triturador elétrico, as batatas fritas foram trituradas em formato de grãos de aproximadamente 3 mm de diâmetro. Foram utilizados 5 gramas de

amostra para cada análise. As partículas foram acondicionadas em béqueres e pesadas em uma balança analítica da marca Marte e modelo AY220. As massas dos béqueres vazios e dos béqueres com as amostras foram registradas. As análises também foram realizadas em duplicatas.

Após a pesagem, as amostras foram colocadas no interior dos tubos de micro-ondas da marca MARS e modelo X-press com o auxílio de uma espátula. Em seguida, 20 ml de solvente Hexano P.A, da marca Neon, de pureza > 99,8%, foram adicionados no interior de cada tubo. Os tubos foram agitados manualmente e posicionados no carrossel do forno micro-ondas, sendo mantidos abertos. O forno micro-ondas foi parametrizado para seguir o ciclo de 20 segundos de radiação, seguidos por 30 segundos de resfriamento. Este ciclo foi repetido por 5 vezes, totalizando 100 segundos de radiação na potência de 400 W. Após o término da radiação, aguardou-se o resfriamento dos tubos e então eles foram retirados do forno micro-ondas.

A próxima etapa consistiu na agitação dos tubos utilizando o agitador Vortex por 4 minutos, posteriormente procedeu-se com a filtração da mistura obtida. Com a filtração, houve a separação da fase sólida que ficou retida no filtro, da fase líquida que passou pelo filtro e foi acondicionada em um novo béquer de massa conhecida. A fração sólida do material recebeu mais 10 ml de Hexano P.A., da marca Neon, e foi macerada com o auxílio de um bastão de vidro. Posteriormente, a mistura foi agitada com auxílio do agitador Vortex por mais 4 minutos. Após a agitação, a mistura passou por um novo processo de filtração, de forma que a fase líquida foi acondicionada no mesmo béquer, enquanto a fase sólida ficou retida no filtro de papel.

Os béqueres foram identificados e levados à estufa a uma temperatura de 68 °C. Aguardou-se 5 horas até que todo o solvente fosse evaporado e, em seguida, os béqueres foram resfriados em um dessecador por 1 hora. Após o processo de resfriamento, o óleo presente no interior do béquer se solidificou. Os béqueres foram novamente pesados e os valores obtidos foram anotados. A massa total do óleo extraído foi obtida pela diferença entre a massa do béquer com óleo, após a dessecação, e a massa do béquer vazio, obtida anteriormente, conforme a Equação (4.1).

$$m_{\text{óleo}} = m_{(\text{béquer vazio} + \text{óleo})} - m_{\text{béquer vazio}} \quad (4.1)$$

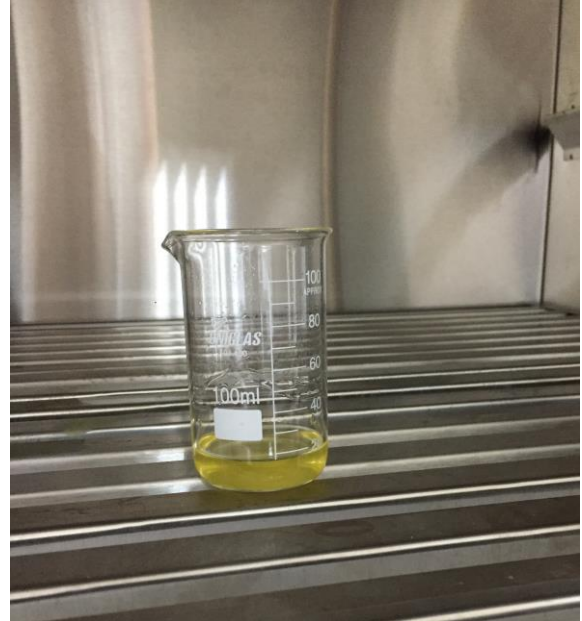
O teor de lipídios presente na amostra foi calculado pela divisão entre a massa de óleo encontrada em cada amostra pela massa inicial dessas amostras, conforme a Equação (4.2).

$$\text{Teor de óleo (\%)} = \frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\text{amostra}}} \quad (4.2)$$

Os valores encontrados para o teor de lipídios de cada amostra foram representados na Tabela 4.4. As etapas desenvolvidas neste procedimento foram representadas pela Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9.



(a) Etapa de filtragem



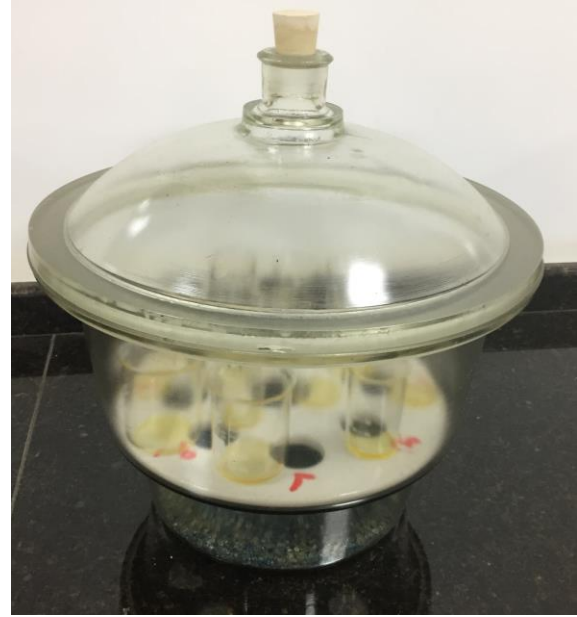
(b) Etapa de aquecimento

Figura 4.7 - Filtragem e aquecimento da fase líquida em estufa

Fonte: Autoria própria (2021)



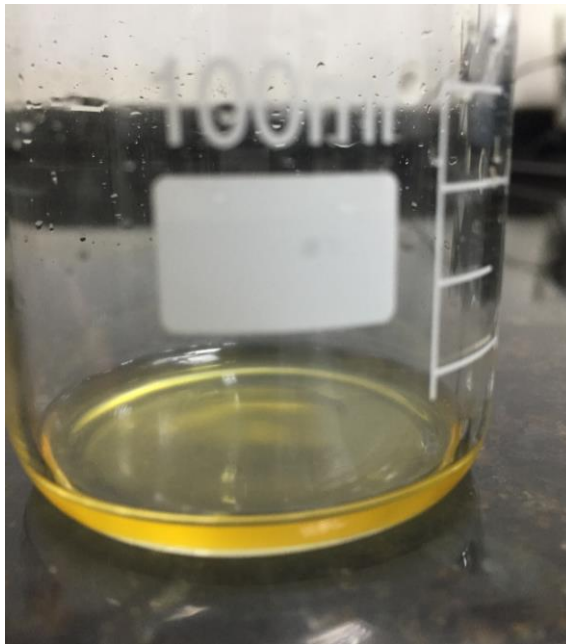
(a) Processamento em forno micro-ondas



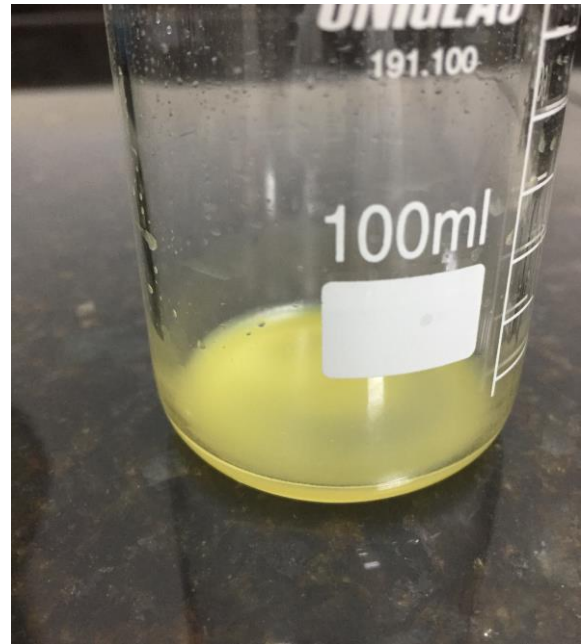
(b) Etapa de resfriamento

Figura 4.8 - Extração por micro-ondas e resfriamento em dessecador

Fonte: Autoria própria (2021)



(a) Lipídios totais após extração



(b) Lipídios totais após resfriamento

Figura 4.9 - Lipídios obtidos após a extração e a após o resfriamento

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.4.3. Registro das respostas de coloração

A análise da coloração das batatas fritas foi realizada utilizando-se imagens obtidas por meio de um sistema de visão computacional construído com o objetivo de padronizar a incidência de luminosidade sobre as amostras e, com isso, coletar imagens com coloração análoga à coloração observada pelo sistema de visão humano. A construção desse sistema foi fundamentada nos principais trabalhos publicados sobre o tema.

O sistema de visão computacional desenvolvido foi constituído de 4 lâmpadas tubulares LED de 60 cm, de temperatura de 6.500 K e da marca Wintral. As lâmpadas foram posicionadas em uma altura de 30 cm em relação ao plano em que a amostra foi fixada, formando um ângulo de incidência de iluminação de 45°. As quatro lâmpadas foram dispostas perpendicularmente entre si, em um mesmo plano, formando a figura de um quadrado, conforme observado na Figura 4.10. A superfície em que as amostras foram posicionadas foi pintada com tinta preta fosca, com o objetivo reduzir a reflexão da luz emitida pelas lâmpadas. Além disso, o centro da superfície foi sinalizado, a fim de que todas as amostras pudessem ser posicionadas no mesmo local. Para o acondicionamento das amostras, foram utilizadas tampas plásticas circulares transparentes. Um suporte para fixação da câmera também foi acoplado ao sistema. Dessa forma, o sistema de visão computacional construído foi apresentado na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12

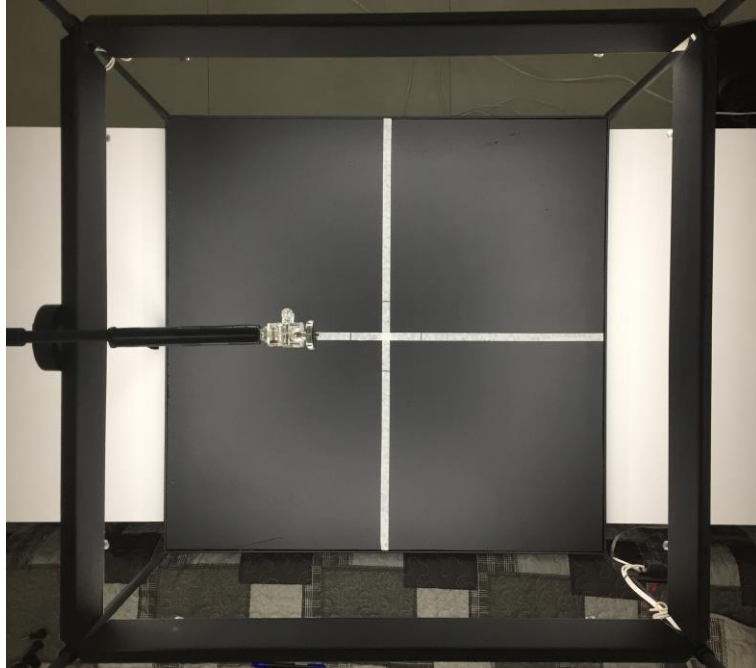


Figura 4.10 - Sistema de visão computacional utilizado - vista superior
Fonte: Aatoria própria (2021)

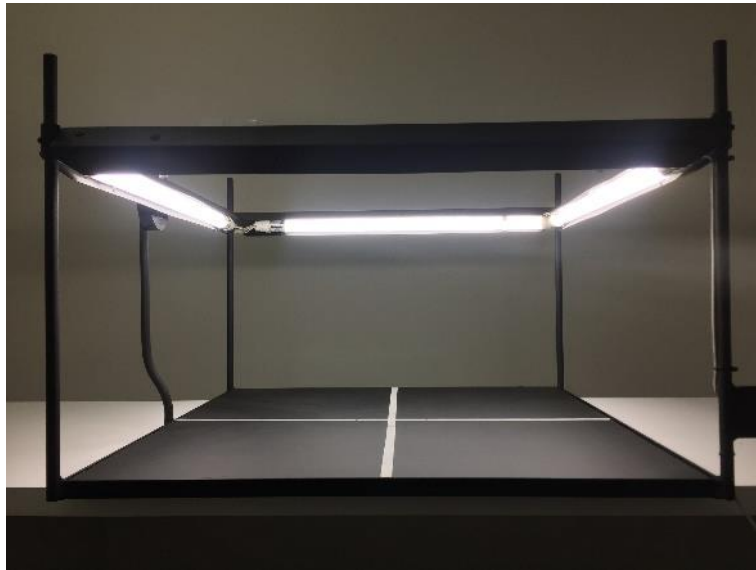


Figura 4.11 - Sistema de visão computacional utilizado - vista frontal
Fonte: Aatoria própria (2021)

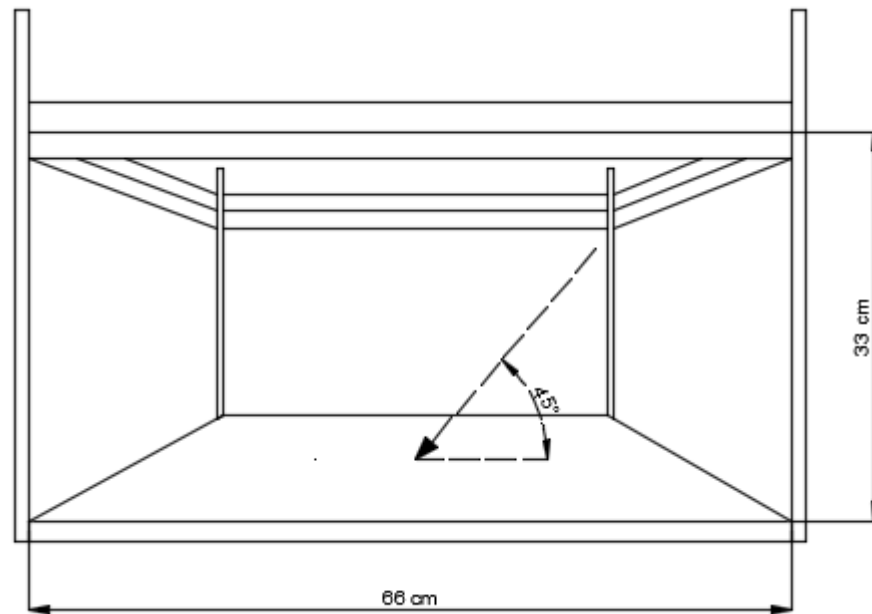


Figura 4.12 - Dimensões e ângulo de incidência de iluminação no sistema de visão computacional

Fonte: Autoria própria (2021)

Para a obtenção das imagens foi utilizada uma câmera fotográfica digital Canon T7i, de 24,2 MP, com lentes de distância focal de 55 mm, com abertura F11 e com as seguintes configurações: resolução de 6.000 x 4.000 pixels, ISO 100, velocidade do obturador 1/6 s, equilíbrio de branco: luz do dia, sem flash, com controle remoto, os arquivos foram salvos em formato RAW. A câmera foi fixada no suporte e posicionada de maneira que o eixo da observação formasse um ângulo de 90° com o plano em que a amostra estava posicionada, além disso, o centro da lente da câmera foi posicionado de maneira centralizada em relação à base em que a amostra foi posicionada. O sistema foi instalado em uma sala totalmente escura e foi coberto por tecido preto para evitar a interferência de iluminação externa e também evitar a reflexão da luz produzida pelo sistema. Assim, foi possível realizar a obtenção das imagens de cada uma das amostras.

A primeira etapa após a obtenção das imagens consistiu na segmentação das imagens. Essa etapa foi realizada utilizando o *software* Adobe Photoshop. Os arquivos em formato RAW foram abertos e o *software* foi parametrizado com a configuração de balanço de branco de luz do dia e calibração da câmera padrão. A ferramenta *Elliptical Marquee Tool* foi utilizada para selecionar a área da imagem a ser analisada. Dessa maneira, foi criada a seleção de uma área circular, com diâmetro de 1.700 *pixels* e 83 mm, que foi posicionada no centro da amostra, conforme a Figura 4.13. Após a delimitação, a área selecionada foi extraída da imagem original, conforme apresentado na Figura 4.14. Posteriormente, a ferramenta *Magic Wand Tool* foi

utilizada para remover pontos escuros da imagem originados por pequenos espaços existentes entre as partículas que compõe a amostra. Nessa etapa também foram removidos alguns defeitos provenientes da matéria-prima, que causaram escurecimentos pontuais em algumas regiões da amostra e que não eram de interesse para a análise realizada. As imagens apresentadas pela Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 demonstram as etapas realizadas durante o processamento das imagens.

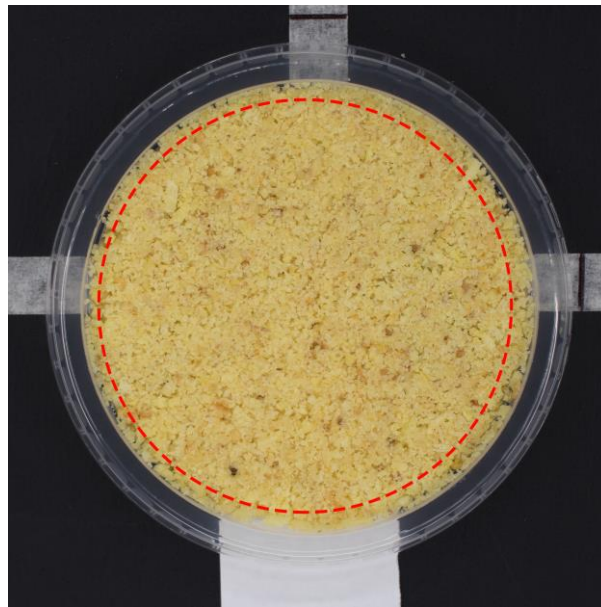


Figura 4.13 - Seleção da área da amostra a ser segmentada

Fonte: Autoria própria (2021)



Figura 4.14 - Área da amostra após segmentação
Fonte: Autoria própria (2021)



Figura 4.15 - Imagem segmentada com eliminação de defeitos
Fonte: Autoria própria (2021)

Após a segmentação das imagens e eliminação dos defeitos, foi realizada a obtenção das médias dos parâmetros de coloração L^* , a^* e b^* . Nesta etapa, foi utilizada a ferramenta Histograma, que possibilitou a obtenção dos valores médios de L , a e b . Os valores obtidos foram anotados e, posteriormente, convertidos em valores padronizados L^* , a^* e b^* por meio das Equação (4.3), Equação (4.4) e Equação (4.5).

$$L^* = \frac{Lightness}{255} \times 100 \quad (4.3)$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120 \quad (4.4)$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120 \quad (4.5)$$

Após a obtenção dos valores médios de L^* , a^* e b^* para cada amostra, foi possível calcular o valor da diferença total de cores entre a cor de cada uma das amostras e a cor de uma amostra padrão. Para a definição da amostra padrão, foi utilizado um lote de fabricação cuja coloração foi considerada ótima pelos responsáveis pela área de controle de qualidade da indústria. Assim, os valores médios de L^* , a^* e b^* do lote padrão foram mensurados utilizando o sistema de visão computacional. Os valores encontrados foram:

$$L_0^* = 72,91;$$

$$a_0^* = 2,75;$$

$$b_0^* = 38,71.$$

A cor formada pela combinação desses componentes, bem como a imagem tratada da amostra padrão foram representadas na Figura 4.16.

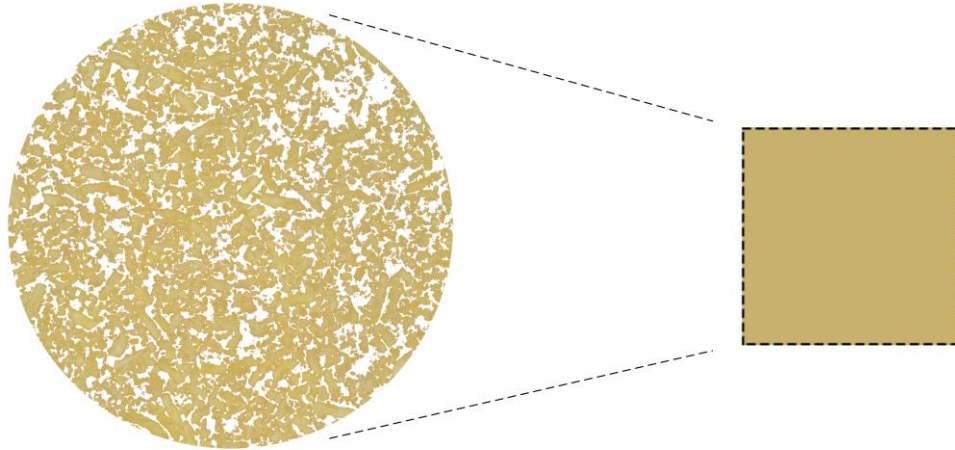


Figura 4.16 - Imagem segmentada da amostra de referência e representação de sua coloração média

Fonte: Autoria própria (2021)

Após a definição componentes da coloração da amostra de referência, foi realizado o cálculo do parâmetro da diferença total de cor, que indica a diferença existente entre a coloração de cada uma das 20 amostras obtidas pelos experimentos e a coloração da amostra de referência. O valor de ΔE foi calculado conforme a Equação (2.2). Por fim, os valores obtidos de cada uma das amostras foram listados na Tabela 4.4.

4.2.4.4. Registro da resposta do tempo de ciclo

O processo de fritura de alimentos por meio da fritura por imersão em óleo em bateladas pode ser dividido em duas etapas: etapa de fritura por imersão e etapa de escoamento do óleo. Dessa maneira, o tempo de ciclo do processo de fritura é composto pela soma do período demandado por essas duas fases. Considerando que o tempo de fritura, representado pela sigla Δt foi denotado em minutos e considerando que o tempo de escoamento do óleo, representado pela sigla Δh , foi representado em segundos, o tempo de ciclo, em segundos, é obtido por meio da Equação (4.6).

$$Tc = \Delta t * 60 + \Delta h \quad (4.6)$$

Dessa maneira, os valores de tempo de ciclo de cada um dos 20 experimentos realizados foram representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Determinação do tempo de ciclo da fabricação de cada amostra

Número da amostra	Δt (min)	Δh (s)	T_c (s)
1	4,50	20,00	290,00
2	4,50	20,00	290,00
3	6,50	20,00	410,00
4	6,50	20,00	410,00
5	4,50	40,00	310,00
6	4,50	40,00	310,00
7	6,50	40,00	430,00
8	6,50	40,00	430,00
9	5,50	30,00	360,00
10	5,50	30,00	360,00
11	3,82	30,00	259,09
12	7,18	30,00	460,91
13	5,50	13,18	343,18
14	5,50	46,82	376,82
15	5,50	30,00	360,00
16	5,50	30,00	360,00
17	5,50	30,00	360,00
18	5,50	30,00	360,00
19	5,50	30,00	360,00
20	5,50	30,00	360,00

Fonte: Autoria própria (2021)

Após a obtenção dos valores das respostas de interesse para cada uma das amostras, foi possível elaborar a matriz experimental, representada pela Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Matriz experimental

Número da amostra	Parâmetros			Respostas			
	T	Δt	Δh	U (%)	L (%)	ΔE	Tc (s)
1	-1,00	-1,00	-1,00	18,05%	25,86%	4,11	290,00
2	1,00	-1,00	-1,00	3,06%	32,98%	3,09	290,00
3	-1,00	1,00	-1,00	3,61%	31,29%	1,47	410,00
4	1,00	1,00	-1,00	0,70%	35,06%	10,53	410,00
5	-1,00	-1,00	1,00	19,79%	27,34%	4,60	310,00
6	1,00	-1,00	1,00	2,02%	29,60%	2,28	310,00
7	-1,00	1,00	1,00	5,19%	29,73%	3,47	430,00
8	1,00	1,00	1,00	0,81%	34,60%	15,00	430,00
9	-1,68	0,00	0,00	20,70%	25,34%	9,23	360,00
10	1,68	0,00	0,00	1,11%	34,99%	9,92	360,00
11	0,00	-1,68	0,00	10,73%	31,15%	4,23	259,09
12	0,00	1,68	0,00	1,03%	33,21%	8,07	460,91
13	0,00	0,00	-1,68	2,47%	33,45%	2,30	343,18
14	0,00	0,00	1,68	2,30%	30,43%	1,32	376,82
15	0,00	0,00	0,00	3,03%	28,61%	1,87	360,00
16	0,00	0,00	0,00	2,51%	28,33%	1,17	360,00
17	0,00	0,00	0,00	3,07%	29,97%	4,66	360,00
18	0,00	0,00	0,00	2,75%	30,83%	1,13	360,00
19	0,00	0,00	0,00	2,92%	31,69%	0,00	360,00
20	0,00	0,00	0,00	2,51%	29,53%	0,50	360,00

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.5. Modelagem matemática das respostas

Após a obtenção dos dados experimentais descritos na Tabela 4.4, um modelo de superfície de resposta de segunda ordem foi utilizado para representar a relação entre as respostas de interesse analisadas neste estudo e as variáveis do processo. Nessa etapa, as variáveis do processo utilizadas na modelagem foram: temperatura do óleo (T), duração do processo de fritura (Δt), e duração do procedimento de escoamento do óleo (Δh). As respostas de interesse analisadas foram: teor de umidade (U), teor de lipídios (L), diferença total de cor (ΔE) e tempo de ciclo (Tc). O modelo foi obtido a partir da Equação (4.7).

$$y = \beta_0 + \beta_1.T + \beta_2.\Delta t + \beta_3.\Delta h + \beta_{11}.T^2 + \beta_{22}.\Delta t^2 + \beta_{33}.\Delta h^2 + \beta_{12}.T.\Delta t + \beta_{13}.T.\Delta h + \beta_{23}.\Delta t.\Delta h \quad (4.7)$$

Em que:

y – Resposta de interesse;

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ – Coeficientes a serem estimados ($i = 1, 2, 3$ e $i < j$);

T – Temperatura do óleo de fritura;

Δt – Duração do processo de fritura;

Δh – Duração do escoamento do óleo.

Para a estimação dos coeficientes do modelo, foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados, que foi aplicado utilizando-se o software Minitab®. Os valores obtidos para os coeficientes do modelo completo foram descritos na Tabela 4.5. Os valores marcados com * são valores significativos, apresentando P-Value menor que o nível de significância de 0,05.

Tabela 4.5 - Coeficientes obtidos para os modelos quadráticos completos

Coeficiente	Respostas		
	U (%)	L (%)	ΔE
Constante	0,028*	0,298*	1,574*
T	-0,053*	0,025*	1,348*
Δt	-0,036*	0,013*	1,674*
Δh	0,002	-0,007	0,330
T*T	0,029*	0,000	2,722*
$\Delta t*\Delta t$	0,011*	0,007	1,510*
$\Delta h*\Delta h$	-0,001	0,006	-0,024
T* Δt	0,032*	-0,001	2,992*
T* Δh	-0,005	-0,005	0,147
$\Delta t*\Delta h$	0,001	0,000	0,849

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.6. Ajuste dos modelos

Com a modelagem matemática das respostas de interesse foi possível obter um equacionamento que possibilitou identificar relação entre as respostas de interesse e as variáveis do processo. Para a realização da análise de variância foi utilizado o software Minitab®. Os dados obtidos por meio dessa análise foram descritos na Tabela 4.6. O fato de todos os modelos obtidos apresentarem P-Value inferior ao nível de significância de 5% indica que os modelos obtidos são apropriados para representar as respostas de interesse. O estágio seguinte consistiu em eliminar os termos não significativos dos modelos obtidos com o objetivo de obter melhores ajustes.

Tabela 4.6 - Análise de variância

Resposta	Graus de liberdade		Adj. SS		Adj. MS		F	P	Falta de ajuste	R ² (adj.) (%)
	Regressão	Residual	Regressão	Residual	Regressão	Residual				
U	9	10	0,078	0,001	0,009	0,000	110,16	0,000	0,002	98,10%
L	9	10	0,013	0,002	0,001	0,000	6,71	0,003	0,317	73,01%
ΔE	9	10	273,731	35,402	30,415	3,540	8,59	0,001	0,310	78,24%

Fonte: Autoria própria (2021)

Por meio da análise da Tabela 4.6 observa-se que foi obtido um elevado valor de R² adj. de 98,10% para o teor de umidade, indicando que o modelo se ajustou muito bem aos valores obtidos experimentalmente. O valor de R² adj. obtido para a resposta de diferença total de cor foi de 78,24%, indicando um bom ajuste, enquanto o R² adj. obtido para o teor de lipídios foi de 73,01%. Com o objetivo de melhorar a qualidade dos ajustes obtidos e de reduzir a variância S dos modelos, foi realizada a remoção dos termos menos significativos dos modelos, transformando-os em modelos reduzidos. Dessa maneira, os termos com maiores valores de P-Value foram removidos do modelo. Após a remoção de cada termo do modelo, o valor de R² adj. foi novamente calculado e seu valor foi analisado: se o valor de R² adj. tivesse aumentado, a remoção do termo seria validada e o próximo termo de maior P-value seria removido, fazendo-se uma nova análise de R² adj. Esse procedimento foi repetido até a obtenção do maior valor de R² adj. possível. Caso o valor de R² adj. sofresse redução, a remoção do termo não seria validada e o termo voltaria a fazer parte do modelo. Especificamente para a resposta teor de lipídios, além da redução dos modelos, outro procedimento adotado para melhorar o valor do R² adj. foi a remoção da observação atípica do modelo apresentada no experimento número 11, que resultou em um teor de lipídios de 31,15%.

Uma vez que a resposta de tempo de ciclo (T_c) foi obtida por meio da soma das variáveis de entrada do processo de duração de fritura e duração de escoamento, o valor de R² adj. obtido foi de 100%. Assim, não foi necessário realizar a redução do modelo para essa resposta, tampouco realizar a análise de resíduos.

Após a definição dos modelos reduzidos, foi possível obter as novas equações, em unidades codificadas, para cada uma das respostas de interesse, que foram representadas pelas Equação (4.8), Equação (4.9), Equação (4.10) e Equação (4.11).

$$U = 0,0268 - 0,0534T - 0,0358\Delta t + 0,0015\Delta h + 0,0289T^2 + 0,0111\Delta t^2 + 0,0318T*\Delta t - 0,0053T*\Delta h \quad (4.8)$$

$$L = 0,2998 + 0,0251T + 0,0188\Delta t - 0,0066\Delta h + 0,0074\Delta h^2 - 0,0047T*\Delta h \quad (4.9)$$

$$\Delta E = 1,5542 + 1,3476T + 1,6744\Delta t + 0,3295\Delta h + 2,7248T^2 + 1,5123\Delta t^2 + 2,9920T*\Delta t + 0,8492\Delta t*\Delta h \quad (4.10)$$

$$Tc = 360 + 60\Delta t + 10\Delta h \quad (4.11)$$

A Tabela 4.7 apresenta a comparação dos valores de R² adj. e S obtidos entre os modelos completos e reduzidos.

Tabela 4.7 - Ajustes obtidos com os modelos completos e os modelos reduzidos

Resposta	R ² (adj.) (%)		S	
	Modelo completo	Modelo reduzido	Modelo completo	Modelo reduzido
U	98,10%	98,34%	0,0089	0,0083
L	73,01%	86,22%	0,0127	0,0107
ΔE	78,24%	81,78%	1,8815	1,7220

Fonte: Autoria própria (2021)

Com a transformação dos modelos completos em modelos reduzidos, foi possível aumentar significativamente os ajustes obtidos, principalmente das respostas de teor de lipídios e diferença total de cor. Assim, foram obtidos ajustes satisfatórios e os modelos foram considerados fidedignos para as respostas analisadas.

4.2.7. Análise dos resíduos

A definição de resíduos é descrita como o resultado obtido pela diferença entre o valor que foi previsto pelo modelo proposto e o valor que realmente foi obtido por meio da experimentação. A fim de que seja possível assegurar que os modelos matemáticos retratem

adequadamente as respostas de interesse, é de grande importância a execução da análise dos resíduos do modelo. Dessa maneira, a análise dos resíduos foi executada com auxílio do software Minitab®.

– **Gráficos de probabilidade normal de resíduos:**

A análise dos gráficos de probabilidade normal dos resíduos, conforme apresentados pela Figura 4.17, Figura 4.18 e Figura 4.19 indicam a pressuposição de que os resíduos obtidos pelos modelos são distribuídos normalmente, uma vez que eles seguem aproximadamente uma linha reta.

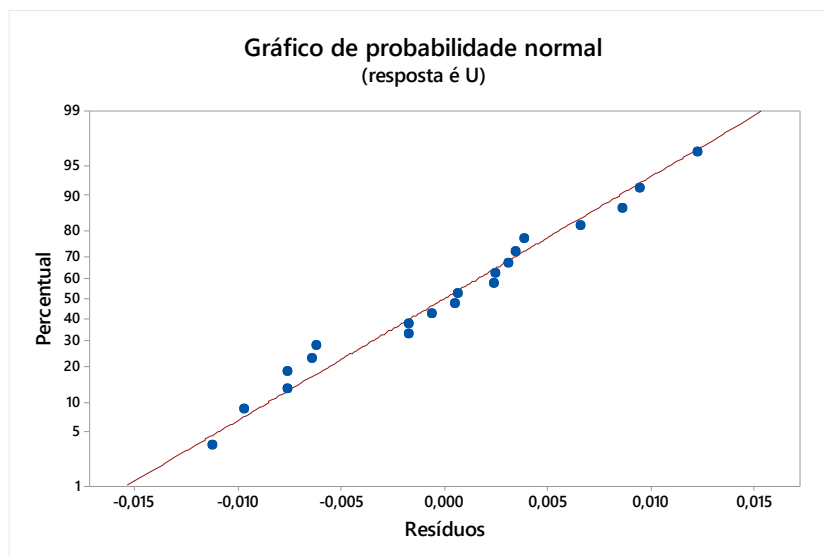


Figura 4.17 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para resíduos obtidos pelo modelo de teor de umidade

Fonte: Aatoria própria (2021)

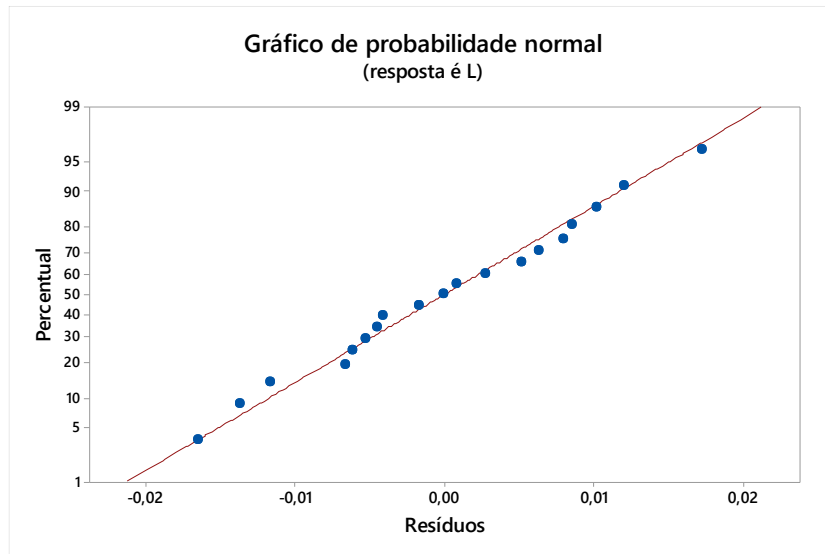


Figura 4.18 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para resíduos obtidos pelo modelo de teor de lipídios

Fonte: Autoria própria (2021)

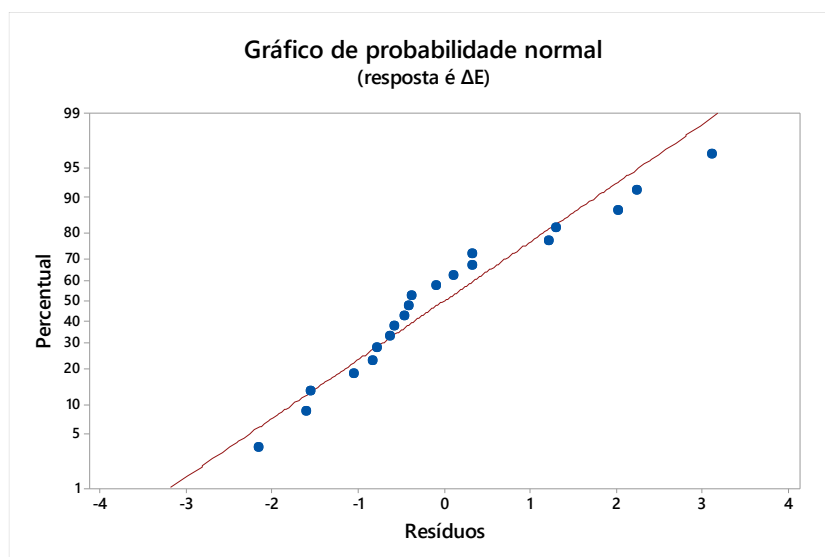


Figura 4.19 – Gráfico de probabilidade de distribuição normal para resíduos obtidos pelo modelo de diferença total de cores

Fonte: Autoria própria (2021)

– **Gráficos de resíduos versus ordem:**

A análise dos gráficos de resíduos versus ordem, conforme apresentados pela Figura 4.20, Figura 4.21 e Figura 4.22 indicam a pressuposição de que os resíduos são independentes uns dos outros, uma vez que não apresentam tendências e nem padrões, sendo apresentados aleatoriamente em torno da linha central.

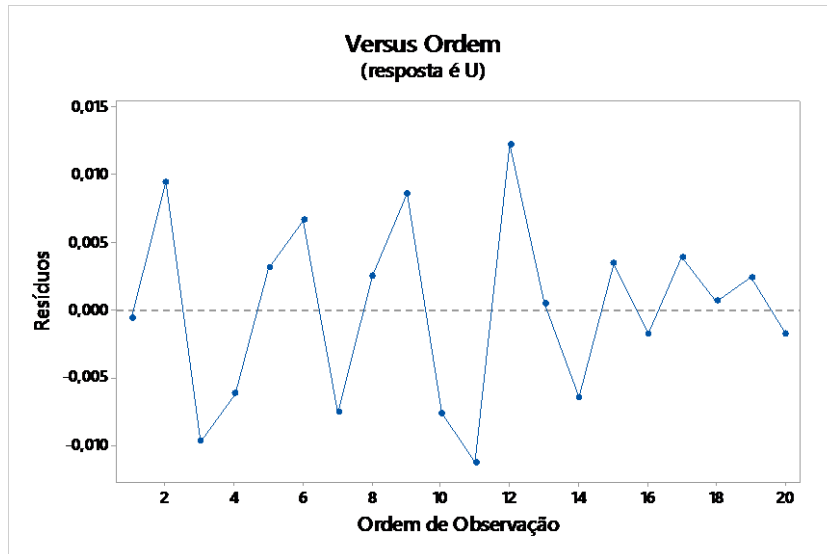


Figura 4.20 – Gráfico de resíduos versus ordem obtidos pelo modelo de teor de umidade

Fonte: Autoria própria (2021)

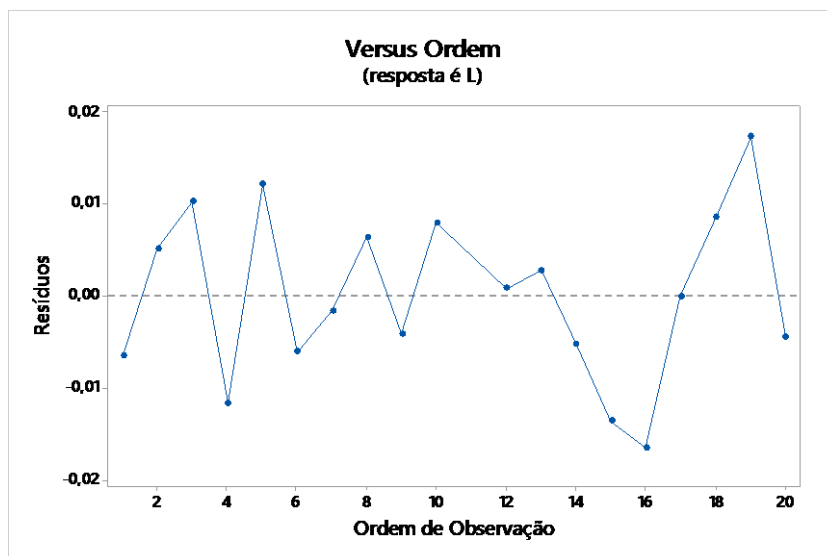


Figura 4.21 – Gráfico de resíduos versus ordem obtidos pelo modelo de teor de lipídios

Fonte: Autoria própria (2021)

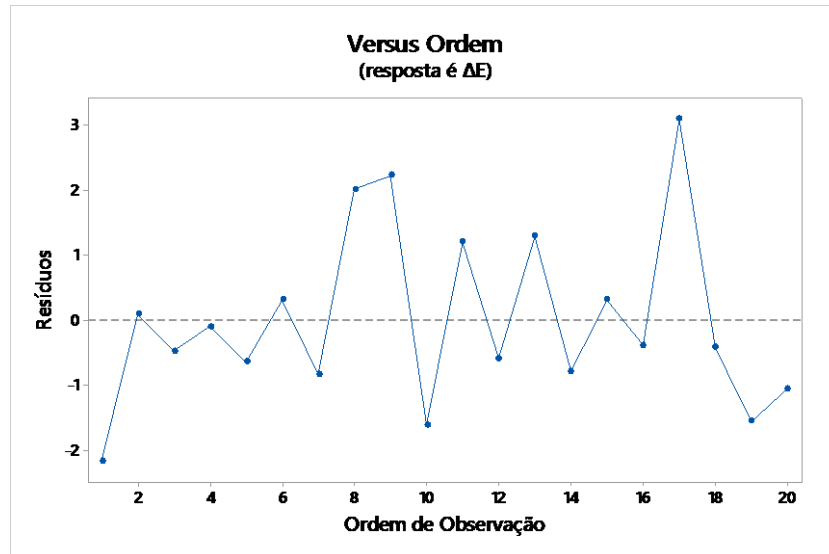


Figura 4.22 – Gráfico de resíduos versus ordem obtidos pelo modelo de diferença total de cores

Fonte: Autoria própria (2021)

– **Gráficos de resíduos versus ajustes:**

A análise dos gráficos de resíduos versus valores ajustados, conforme apresentados pela Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25 indicam a pressuposição de que os resíduos são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, uma vez que os pontos aparecem aleatoriamente em ambos os lados de zero, sem padrões reconhecíveis nos pontos.

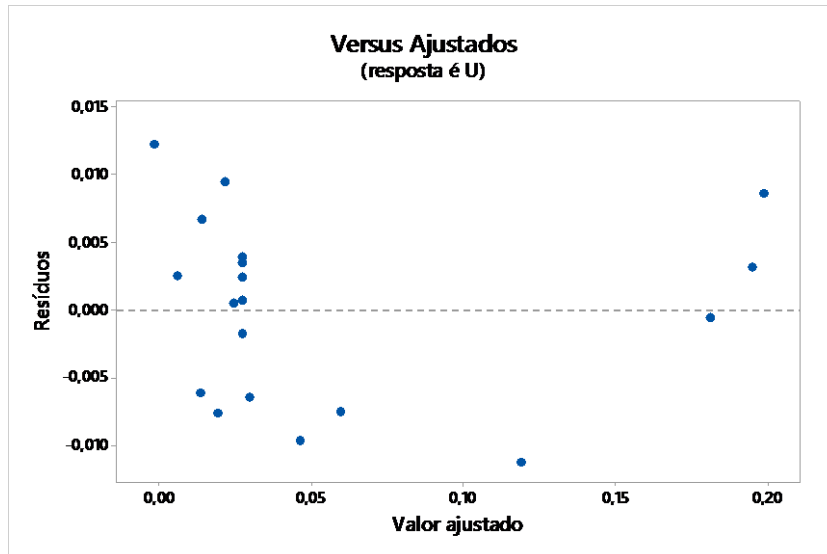


Figura 4.23 – Gráfico de resíduos versus valores ajustados obtidos pelo modelo de teor de umidade

Fonte: Autoria própria (2021)

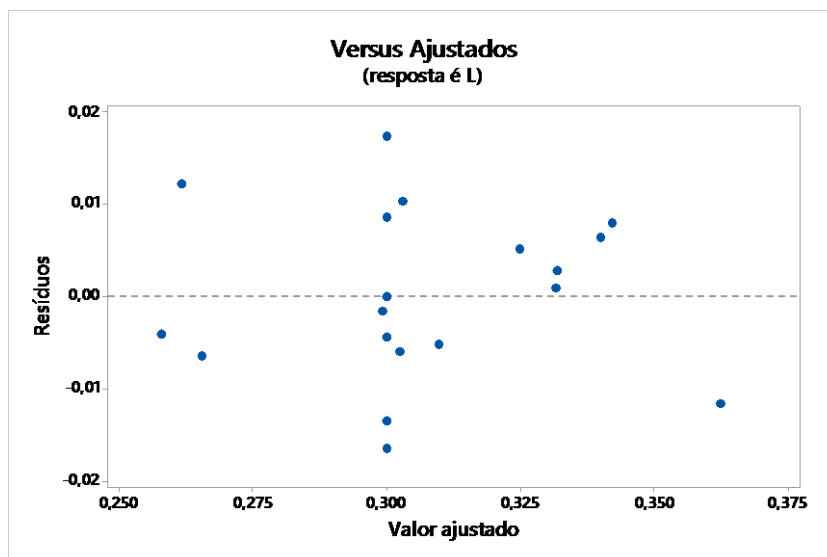


Figura 4.24 – Gráfico de resíduos versus valores ajustados obtidos pelo modelo de teor de lipídios

Fonte: Autoria própria (2021)

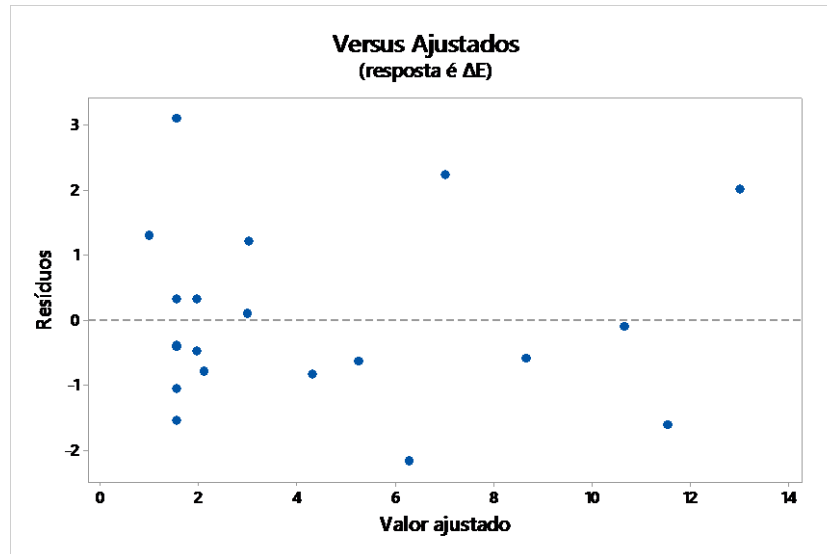


Figura 4.25 – Gráfico de resíduos versus valores ajustados obtidos pelo modelo de diferença total de cores

Fonte: Autoria própria (2021)

Em virtude das análises realizadas, é possível caracterizar os modelos como sendo adequados para a representação do processo analisado.

4.2.8. Obtenção das superfícies de resposta

A obtenção da superfície de resposta foi fundamental para a compreensão da relação existente entre as respostas do modelo desenvolvido (teor de umidade, teor de lipídios, diferença total de cor e tempo de ciclo) com os parâmetros estudados no processo (temperatura do óleo, duração do processo de fritura e duração do escoamento do óleo).

A construção das superfícies de resposta foi realizado por meio do *software* estatístico Minitab® em conjunto com Matlab®. Após a obtenção das superfícies de resposta foi possível realizar análises importantes, tais como as análises dos efeitos principais dos parâmetros e as análises do efeito de suas interações, conforme detalhado nas próximas sessões.

4.2.9. Análise dos efeitos principais dos parâmetros

A influência das variáveis do processo de fritura sobre as respostas de teor de umidade, teor de lipídios, diferença total de cor e tempo de ciclo foi analisada nesta sessão. Por meio da análise, foi possível identificar quais foram as principais variações dos efeitos ocorridas devido à alteração dos níveis das variáveis do processo que foram analisadas. Para realizar esta análise, as variáveis em estudo foram sendo modificadas enquanto as demais variáveis se mantiveram constantes. As análises foram detalhadas nos próximos tópicos.

4.2.9.1. Efeitos principais dos parâmetros sobre o teor de umidade

A Figura 4.26 retrata os efeitos dos parâmetros do processo de fritura sobre a resposta teor de umidade. É possível notar que tanto o aumento da temperatura de fritura, quanto o aumento do duração do processo contribuem com a redução do teor de umidade do produto. Por outro lado, a duração do escoamento do óleo não influenciou significativamente o teor de umidade, apresentando um P-Value de 0,509, extrapolando o nível de significância de 0,05.

A relação entre temperatura de fritura e teor de umidade do produto foi esclarecida por Krokida *et al.* (2000), que explicam que a temperatura do processo de fritura possui um efeito negativo no teor de umidade das batatas fritas, dessa maneira, o teor de umidade é reduzido de acordo com o aumento da temperatura de fritura. Gamble *et al.* (1987) ainda destacam que processos de fritura realizados em temperaturas maiores geram uma maior queda no teor de umidade quando comparados a processos de fritura que ocorrem em temperaturas menores.

O fato do aumento da duração do processo de fritura contribuir com a redução do teor de umidade do produto foi ao encontro do trabalho de Gamble *et al.* (1987) que explica que no decorrer do processo de fritura, a umidade existente no interior do alimento é convertida em vapor, gerando um gradiente de pressão que ocorre em conjunto com a desidratação do alimento. Nesse aspecto, o modelo proposto por Krokida *et al.* (2000) também evidencia a queda no teor de umidade no alimento com o aumento da duração do processo.

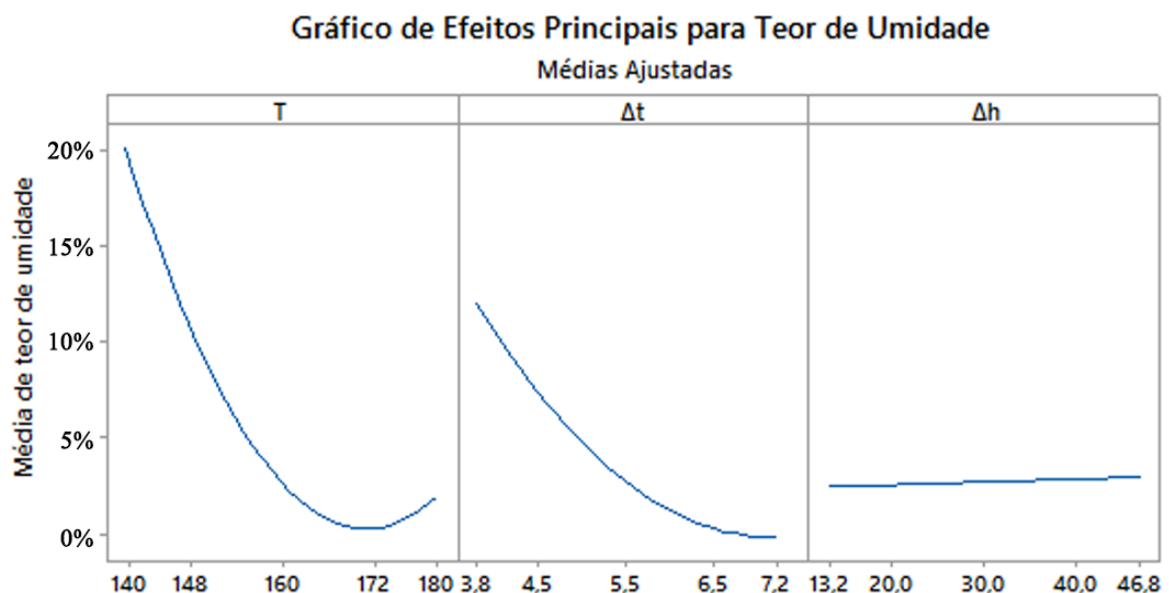


Figura 4.26 - Efeitos principais para teor de umidade

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.9.2. Efeitos principais dos parâmetros sobre o teor de lipídios

A Figura 4.27 revela que o teor de lipídios totais presentes no produto após o processo de fritura é fortemente relacionado com a temperatura e tempo de fritura. É possível constatar que maiores temperaturas de fritura favorecem o aumento do teor de lipídios do produto. Do mesmo modo, o aumento da duração do processo também favorece o aumento do teor total de lipídios. A duração do escoamento do óleo também impactou o teor de lipídios do alimento, de modo que até aproximadamente 35 segundos de escoamento, o teor de lipídios reduziu à medida que o tempo de escoamento aumentava.

Os resultados obtidos para a relação entre temperatura do processo e teor de lipídios foram de encontro ao trabalho de Baumann e Escher (1995) que evidencia que temperaturas de óleo mais altas levam à aceleração do desenvolvimento das propriedades da superfície da batata que favorecem a absorção de óleo, fazendo com que esse efeito seja positivamente relacionado à temperatura do óleo.

A relação entre a duração do processo de fritura e o teor de lipídios foi apresentada por Alvarez *et al.* (2000) que também constatou a elevação do teor de lipídios com o aumento da duração do processo.

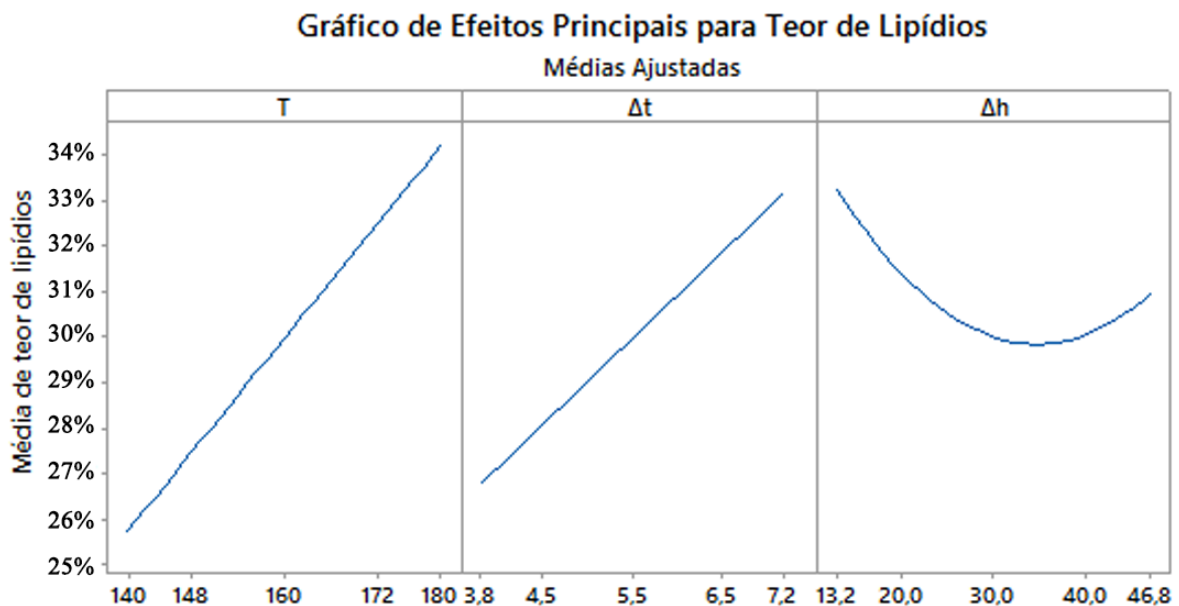


Figura 4.27 - Efeitos principais para teor de lipídios

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.9.3. Efeitos principais sobre a coloração

A análise dos efeitos dos parâmetros de fritura na alteração da cor dos produtos mostrou que a diferença total de cor sofre influência significativa tanto da temperatura do óleo, quanto da duração do processo de fritura.

Em relação à temperatura, foi possível perceber pelo gráfico representado na Figura 4.28 a formação de uma curvatura com ponto de mínimo, representando a temperatura em que é possível obter a menor diferença total de cor. Dessa maneira, o afastamento dos níveis de temperatura em relação a este ponto gera a elevação da diferença total de cor.

Os efeitos principais da diferença total de cor relacionada à duração do processo de fritura apresentou comportamento semelhante ao efeito relacionado à temperatura. Dessa maneira, a Figura 4.28 demonstra a existência de uma curvatura com ponto de mínimo que representa a faixa de duração da fritura em que é possível obter os menores níveis da diferença total de cor. Da mesma forma, o afastamento dos valores de duração da fritura contribuem com o aumento dos valores da diferença total de cor.

Por outro lado, o tempo de escoamento não se mostrou significativo na mudança total de cor dos produtos, apresentando um P-Value de 0,493, superior ao nível de significância de 0,05.

A relação entre a variação da coloração e a duração do processo de fritura também foi esclarecida por Pedreschi *et al.* (2007). De acordo com os autores, devido à reação de Maillard, reação responsável pelo escurecimento não enzimático da superfície das batatas, esses produtos se tornam mais escuros com o aumento da duração do processo de fritura, aumentando o valor da diferença total de cor.

A relação entre a variação da coloração de batatas fritas e a temperatura de fritura também foi descrita por Pedreschi *et al.* (2007) que explica que quanto maior for a temperatura de fritura, maior é o escurecimento da batata, uma vez que as reações de escurecimento são altamente dependentes da temperatura do processo.

O aumento da diferença total de cor para valores de duração de fritura e temperatura de fritura abaixo ponto de mínimo das curvas ocorre porque as batatas ainda não atingiram a coloração característica do produto acabado, apresentando um aspecto de coloração mais clara que a coloração ótima. Dessa maneira, nessas etapas, as diferenças totais de cor também são elevadas.

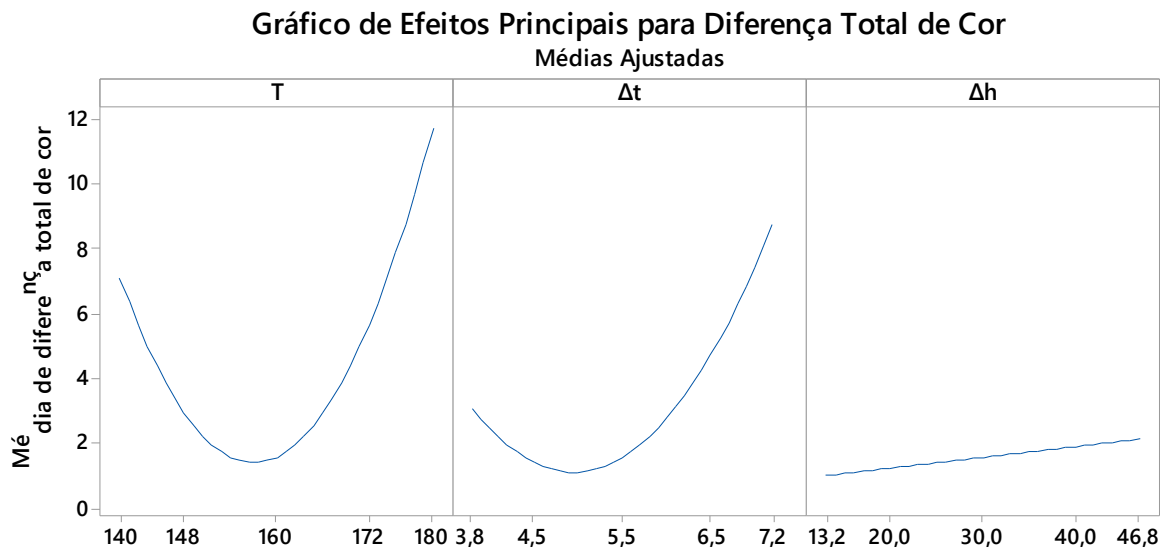


Figura 4.28 - Efeitos principais para diferença total de cor

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.9.4. Efeitos principais sobre o tempo de ciclo

Uma vez que o tempo de ciclo é obtido por meio da soma das variáveis de duração do processo de fritura e duração do escoamento, o gráfico de efeitos principais para essa resposta mostra que essa resposta é influenciada positivamente e linearmente pelas duas variáveis. Assim, quanto maior for a duração do processo de fritura e quanto maior for a duração do escoamento, maior será o tempo de ciclo do processo.

Por meio do gráfico de efeitos principais apresentado pela Figura 4.29, também foi possível comprovar que a alteração da temperatura do processo de fritura não interfere no tempo de ciclo.

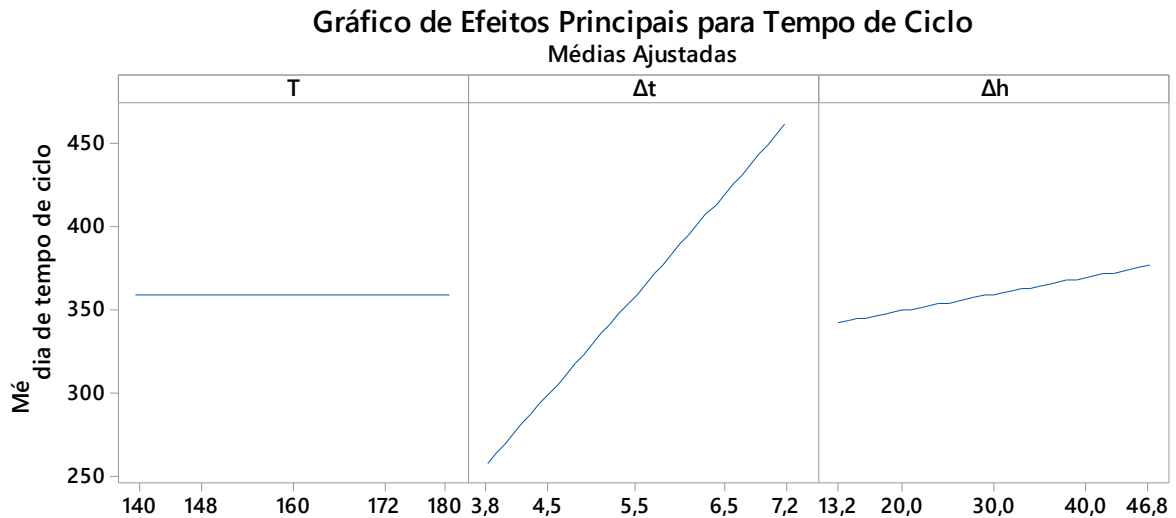


Figura 4.29 - Efeitos principais para tempo de ciclo

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.10. Análise do efeito das interações entre os parâmetros

A partir da análise da Tabela 4.5, foi possível perceber que a interação entre algumas variáveis no processo também são influentes nas respostas de interesse. Como observado, a resposta de umidade é influenciada pela interação entre T e Δt , apresentando P-Value de 0,000 no modelo reduzido, assim como ΔE também é influenciada pela interação entre T e Δt , com P-Value de 0,000.

A análise dos efeitos das interações entre os parâmetros por meio dos gráficos de superfície permite a visualização da forma como a interação entre essas variáveis influenciam as respostas analisadas.

4.2.10.1. Efeitos das interações sobre o teor de umidade

O efeito da temperatura do óleo (T) e da duração do processo (Δt) sobre o teor de umidade é apresentado pela Figura 4.30. Nota-se que, de modo geral, o aumento da temperatura, juntamente com o aumento da duração do processo geram produtos com reduzido teor de umidade. Pela análise da figura, é possível identificar que o inverso também é verdadeiro, ou seja, maiores níveis de umidade podem ser obtidos com a utilização de temperaturas baixas (T) e curta duração do processo (Δt). Também é possível observar que a interação entre os dois fatores é relevante.

Ao analisar o efeito da temperatura do óleo (T) juntamente com a duração do processo de escoamento (Δh), pela Figura 4.31, é possível perceber que o efeito da interação entre as duas

variáveis é fraco, de modo que as alterações dos efeitos no teor de umidade ocorrem em função somente da mudança dos níveis da variável temperatura do óleo. Assim, a interação entre as duas variáveis não gera grandes impactos no teor de umidade.

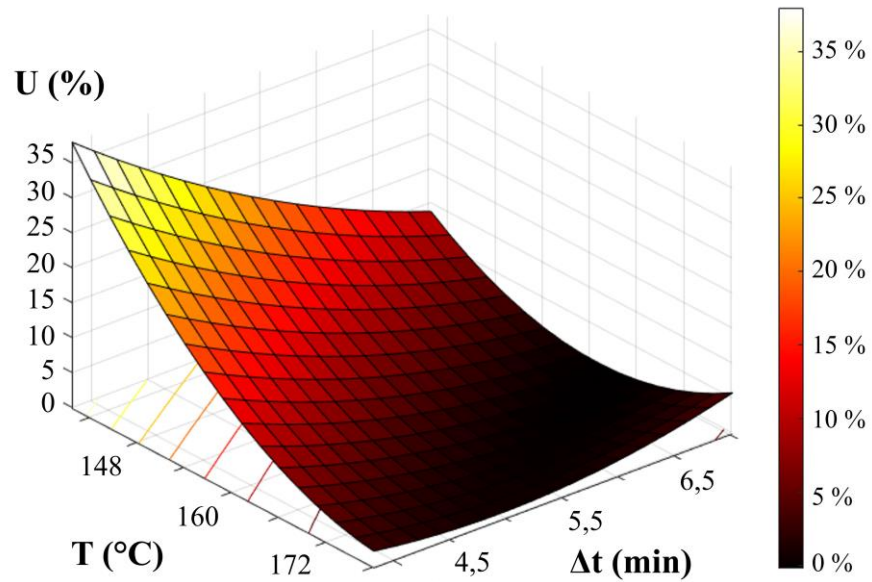


Figura 4.30 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura ($^{\circ}\text{C}$) e a duração do processo de fritura (min) sobre o teor de umidade (%) ($\Delta h = 30$ s)

Fonte: Autoria própria (2021)

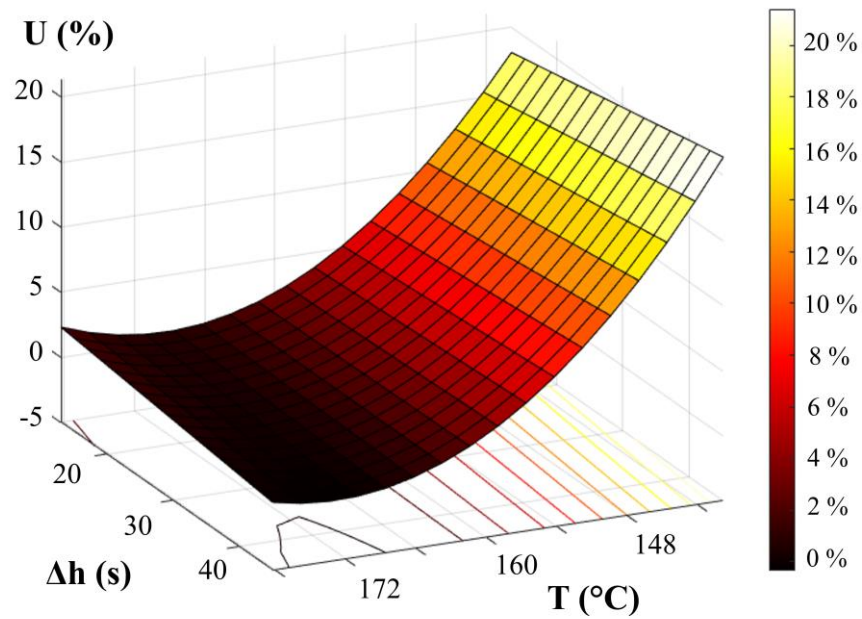


Figura 4.31 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura ($^{\circ}\text{C}$) e o tempo de escoamento do óleo (s) sobre o teor de umidade (%) ($\Delta t = 5,5 \text{ min}$)

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.10.2. Efeito das interações sobre o teor de lipídios

A superfície apresentada pela Figura 4.32 apresenta o teor de lipídio em função da temperatura do óleo (T) e da duração do processo de escoamento de óleo (Δh). É possível observar que maiores teores de lipídios podem ser obtidos em curtas durações de escoamento e elevadas temperaturas de fritura.

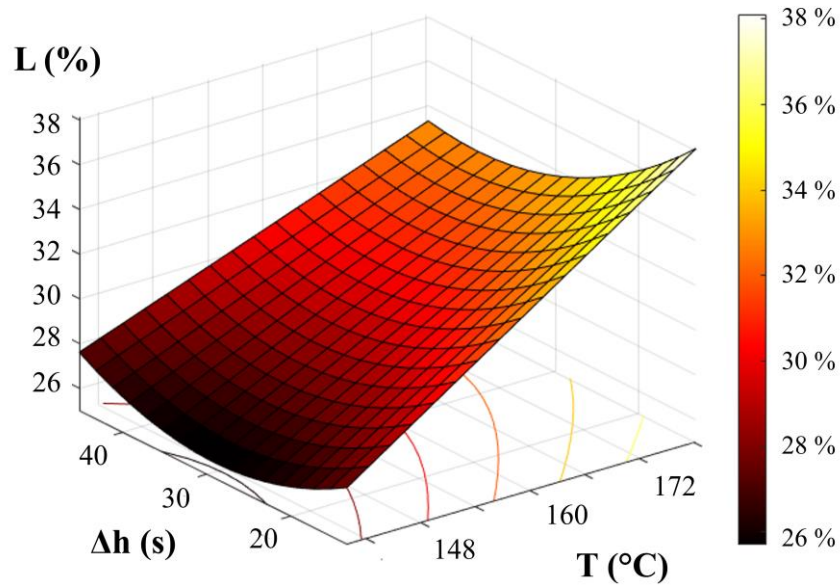


Figura 4.32 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura ($^{\circ}\text{C}$) e a duração do escamento de óleo (s) sobre o teor de lipídios (%) ($\Delta t = 5,5 \text{ min}$)

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.10.3. Efeito das interações sobre a mudança total de cor

Por meio da análise da Figura 4.33 é possível observar o efeito das variáveis temperatura de fritura (T) e duração do processo (Δt) sobre a resposta da diferença total de cor (ΔE). A superfície mostra que elevados valores de temperatura e longa duração do processo de fritura favorecem o aumento da diferença total de cor (ΔE), caracterizado pelo distanciamento da coloração do produto em relação à sua coloração ótima ($\Delta E = 0$), ocasionando seu escurecimento.

Observa-se que a região intermediária da superfície apresenta menores valores de ΔE , ou seja, valores mais próximos do ponto de ótimo. Essa região é formada pela ponderação entre os níveis das variáveis temperatura do óleo e duração do processo. Essa região compreende tanto altas temperaturas e baixa duração do processo, quanto baixas temperaturas e elevada duração do processo. Como exemplo, menores valores de ΔE podem ser obtidos tanto nas combinações dos parâmetros em 180°C e 4 minutos de fritura, quanto em 140°C e 7 minutos de fritura.

Por fim, a região formada pela curta duração do processo e baixas temperaturas também favorecem o afastamento da cor obtida em relação à cor ótima ($\Delta E = 0$), representando um produto com uma coloração muito clara, característica de um processo de fritura ainda não

finalizado devido à reduzida temperatura de fritura e à falta de tempo para a execução do processo.

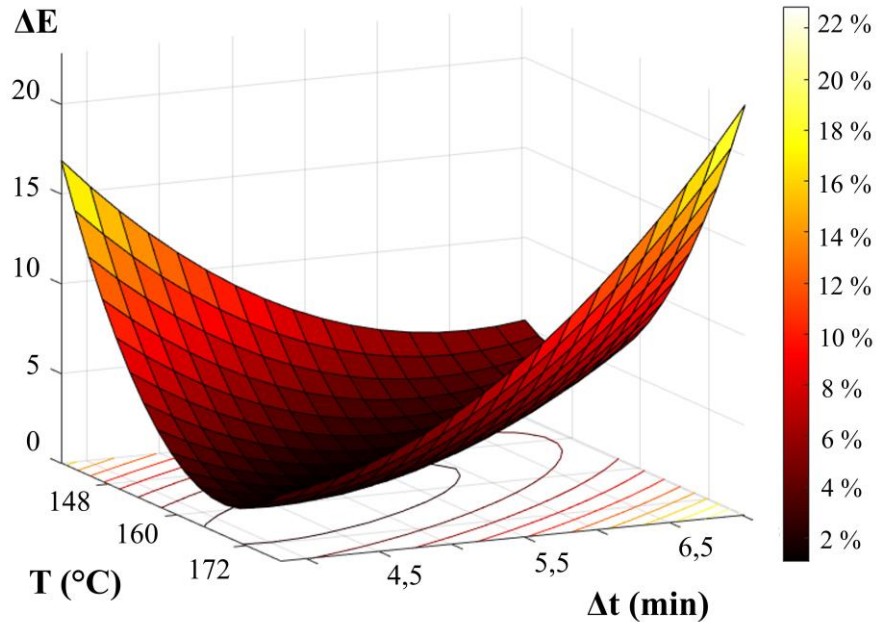


Figura 4.33 - Efeito da interação entre a temperatura do óleo de fritura ($^{\circ}\text{C}$) e a duração do processo de fritura (min) sobre a diferença total de cor ($\Delta h = 30$ s)

Fonte: A autoria própria (2021)

4.2.10.4. Efeito das interações sobre o tempo de ciclo

A Figura 4.34 apresenta a superfície que caracteriza a equação do tempo de ciclo do processo. Uma vez que o tempo de ciclo é função da soma do tempo do processo de fritura (Δt) com o tempo de escoamento do óleo (Δh) é possível observar que o maiores valores para o tempo de ciclo podem ser obtidos quando ambas as variáveis encontram-se em seus níveis máximos. No mesmo sentido, quando as duas variáveis apresentam valores reduzidos, o tempo de ciclo do processo também é reduzido.

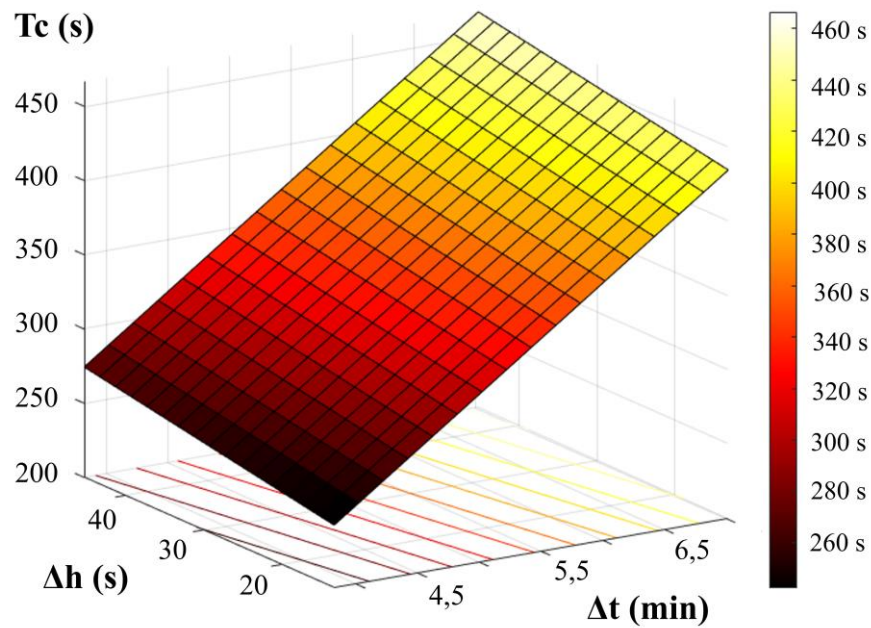


Figura 4.34 - Efeito da interação entre a duração do processo de fritura (min) e a duração de escoamento do óleo (s) ($T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fonte: Autoria própria (2021)

4.2.11. Análise da correlação entre as respostas

Com o objetivo de verificar a adequação do método de otimização do Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM) ao problema, foi realizada a análise de correlação entre as repostas de interesse. Essa análise utilizou o *software* Minitab® que apresentou a estrutura de correlação entre as repostas ilustrada pela Tabela 4.8. Os valores superiores da célula correspondem à correlação de Pearson, enquanto os valores em negritos correspondem ao P-Value.

Tabela 4.8 - Teste de correlação entre as repostas analisadas

	U	L
L	-0,754 0,000	
ΔE	0,065 0,786	0,380 0,109

Fonte: Autoria própria (2021)

Por meio dos dados apresentados pela Tabela 4.8 nota-se que o P-Value do teste de correlação entre as respostas teor de umidade (U) e teor de lipídios (L) é menor que o nível de significância de 0,05. Dessa maneira, constata-se a existência de correlação entre as duas respostas. O coeficiente de correlação de Pearson, no valor de -0,754, indica a existência de uma correlação negativa moderada entre elas. Essa correlação negativa indica que conforme o teor de umidade é reduzido, o teor de lipídios aumenta.

Os testes de correlação entre as respostas teor de umidade e diferença total de cor, assim como teor de lipídios e diferença total de cor, resultaram em P-value superiores ao nível de significância de 0,05, constatando-se e não existência de correlação entre as respostas que seja estatisticamente significativa.

4.3. Formulação do EQMM

O desenvolvimento da modelagem matemática nas sessões anteriores permitiu a compreensão da influência dos parâmetros de fritura sobre as respostas analisadas, possibilitando identificar as variáveis mais influentes no processo, bem como o modo como essas variáveis interferem nas respostas de interesse. Considerando a existência de correlação negativa moderada entre as respostas de interesse, o desenvolvimento da otimização do modelo utilizou o Erro Quadrático Médio Multivariado (EQMM).

Neste problema, o objetivo da otimização consistiu em obter baixos teores de umidade, lipídios, diferença total de cor e tempo de ciclo. Foi estabelecido uma restrição para o teor de umidade máxima de 3% e uma restrição de valor máximo para a diferença total de cor (ΔE) de 5, que são os limites utilizados para a aceitação do produto, definidos pelos especialistas responsáveis pelo processo.

Dessa forma, o EQMM foi aplicado sobre todas as respostas analisadas.

4.3.1. Análise de Componentes Principais

A primeira etapa no desenvolvimento do EQMM consistiu no desenvolvimento da Análise dos Componentes Principais utilizando o *software* estatístico Minitab®. Os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Autoanálise da Matriz de Correlação

	CP1	CP2	CP3	CP4
Autovalor	2,223	1,100	0,569	0,107
Proporção	0,556	0,275	0,142	0,027
Acumulado	0,556	0,831	0,973	1,000

Fonte: Autoria própria (2021)

O desenvolvimento da análise dos componentes principais indicou que a utilização dos dois componentes principais de maior autovalor (*CP1* e *CP2*) resulta uma proporção acumulada de 83,09%, indicando que 83,09% da variação dos dados pode ser explicada por dois componentes. Dessa maneira, as análises foram realizadas considerando apenas os componentes principais *CP1* e *CP2*.

A análise dos autovetores possibilitou a interpretação de cada componente principal por meio da análise da magnitude e da direção dos coeficientes das variáveis originais, conforme resultados apresentados pela Tabela 4.10 e o gráfico de carga fatorial apresentado pela Figura 4.35.

Tabela 4.10 - Autovetores

Variável	CP1	CP2	CP3	CP4
U	-0,529	-0,549	-0,026	0,646
L	0,604	0,132	0,476	0,626
ΔE	0,321	-0,792	0,334	-0,397
Tc	0,503	-0,231	-0,813	0,183

Fonte: Autoria própria (2021)

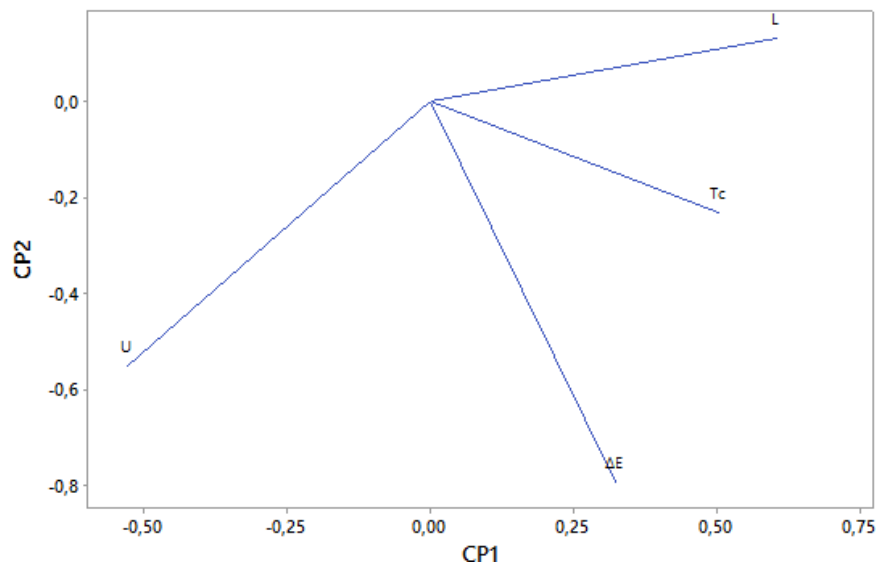


Figura 4.35 – Gráfico de cargas fatoriais para CP1 e CP2

Fonte: Autoria própria (2021)

Pela análise da Figura 4.35 e da Tabela 4.10 e é possível constatar que o *CP1* possui importante associação negativa com a umidade (*U*), importantes associações positivas com teor de lipídios (*L*) e tempo de ciclo (*Tc*) e fraca associação positiva com a diferença total de cor (ΔE). O *CP2*, por sua vez, possui considerável associação negativa com a diferença total de cor (ΔE), umidade (*U*), e associações fracas com o tempo de ciclo (*Tc*) e o teor de lipídios (*L*).

Após a análise dos componentes principais, a etapa seguinte consistiu na obtenção dos *scores* para esses componentes.

4.3.2. Modelos matemáticos para os componentes principais

Com a obtenção dos *scores* dos componentes principais, foi possível desenvolver os modelos matemáticos para a superfície de resposta. Tal procedimento foi realizado seguindo os mesmos procedimentos do processo desenvolvido nas sessões 4.2.5 e 4.2.6.

A análise de variância desenvolvida para os modelos resultou em *P-values* de regressão inferiores a 5% para ambos os componentes principais. Os modelos apresentaram ajustes de 97,63% para *CP1* e 87,23% para *CP2*. Dessa maneira, os modelos finais codificados para *CP1* e *CP2* foram apresentados pelas Equação (4.12) e Equação (4.13).

$$CP1 = -0,2625 + 1,0632T + 1,5003\Delta t - 0,0175\Delta h + 0,1804\Delta h^2 \quad (4.12)$$

$$CP2 = 0,7689 + 0,3083T - 0,2735\Delta t - 0,1550\Delta h - 0,7756T^2 - 0,3285\Delta t^2 - 0,8454T \cdot \Delta t - 0,1736\Delta t \cdot \Delta h \quad (4.13)$$

4.3.3. Alvos em termos dos componentes principais

Para o cálculo dos alvos em termos dos componentes principais foram utilizadas as Equação (2.5). Nesse cálculo são utilizados os coeficientes dos autovetores dos componentes principais e os valores padronizados das respostas em relação aos alvos (obtidos a partir dos alvos definidos para cada resposta, da média e do desvio padrão obtidos pela matriz experimental). Os alvos para as respostas foram determinados por meio da minimização individual de cada uma das respostas de interesse. Os dados utilizados para o desenvolvimento desta etapa foram apresentados pela Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Cálculo dos alvos em termos dos componentes principais

	U	L	ΔE	Tc
Média	5,42%	30,68%	4,45	360,00
Desvio Padrão	0,064	0,029	4,034	51,570
Alvo	1,00%	24,71%	0,451	257,7
Objetivo	Minimização	Minimização	Minimização	Minimização
Escore	-0,685	-2,063	-0,991	-1,984
Autovetor CP1	-1,000	0,008	-0,001	0,004
Autovetor CP2	0,004	0,383	0,807	0,449

Fonte: Autoria própria (2021)

Assim, os valores obtidos para os alvos em termos dos componentes principais foram: - 2,197 para *CP1* e 1,348 para *CP2*.

4.3.4. Formulação EQMM

Aplicando-se os valores obtidos nas etapas anteriores na equação do EQMM definida pelas Equação (2.7), obtêm-se a seguinte formulação para o EQMM:

$$\text{Min EQMM} = \{[(CP1 + 2,197)^2 + 2,223] \cdot [(CP2 - 1,348)^2 + 1,100]\}^{(1/2)} \quad (4.14)$$

Sujeito a:

$$x^T x \leq 2,828 \quad (4.15)$$

$$U \leq 3\% \quad (4.16)$$

$$\Delta E \leq 5 \quad (4.17)$$

Em que:

EQMM – Erro Quadrático Médio Multivariado;

CP1, *CP2* – Funções objetivas definidas para os Componentes Principais;

$x^T x \leq 2,828$ – Restrição esférica para o arranjo CCD;

$U \leq 3\%$ – Limite superior de aceitação para teor de umidade;

$\Delta E \leq 5$ – Limite superior de aceitação para diferença total de cor

Desta maneira, a ferramenta Solver do *software* Microsoft Excel 2013 foi utilizada na a resolução deste problema. O *software* foi parametrizada para utilizar o método GRG. Assim, foi possível obter os valores ótimos para as respostas de interesse. A apresentação dos coeficientes do modelo e dos componentes principais, bem como os alvos, autovetores, autovalores dos componentes principais e cálculo do *EQMM* após a otimização do modelo foi realizada pela Figura 4.36 e Figura 4.37.

Termo	U	L	ΔE	Tc	CP1	CP2
Constante	0,0268	0,2998	1,5542	360,0000	-0,2625	0,7689
T	-0,0534	0,0251	1,3476	0,0000	1,0632	0,3083
Δt	-0,0358	0,0188	1,6744	60,0000	1,5003	-0,2735
Δh	0,0015	-0,0066	0,3295	10,0000	-0,0175	-0,1550
T*T	0,0289	0,0000	2,7248	0,0000	0,0000	-0,7756
$\Delta t*\Delta t$	0,0111	0,0000	1,5123	0,0000	0,0000	-0,3285
$\Delta h*\Delta h$	0,0000	0,0074	0,0000	0,0000	0,1804	0,0000
T* Δt	0,0318	0,0000	2,9920	0,0000	0,0000	-0,8454
T* Δh	-0,0053	-0,0047	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$\Delta t*\Delta h$	0,0000	0,0000	0,8492	0,0000	0,0000	-0,1736

Respostas	U	L	ΔE	Tc	CP1	CP2
Modelo	3,00%	29,57%	1,75	280,05	-1,31	1,24
Alvo	1,00%	24,71%	0,45	257,70	-2,20	1,35
R ²	98,34%	86,22%	81,78%	100%	97,63%	87,23%

Variáveis	T	Δt	Δh	Autovalores e explicação	
				CP1	CP2
Coded	0,948	-1,370	0,227		
Uncoded	171,38	4,13	32,27	2,22	1,10
				55,59%	27,50%
				55,59%	83,09%

Restrições					
XTX	2,8284	<=	2,83		
Umidade	3,00%	>=	0,00	EQMM =	1,8318
Umidade	3,00%	<=	3,00%		
ΔE	1,75	<=	5,00		

Figura 4.36 – Planilha utilizada na otimização empregando o EQMM

Fonte: Autoria própria (2021)

	U	L	ΔE	Tc
Média	5,42%	30,68%	4,4475	360,0000
Desvio Padrão	0,0645	0,0289	4,0336	51,5703
Alvo	1,00%	24,71%	0,4512	257,7005
Escore	-0,6853	-2,0625	-0,9908	-1,9837
Autovet. CP1	-0,5295	0,6035	0,3208	0,5025
Autovet. CP2	-0,5491	0,1318	-0,7924	-0,2309

Figura 4.37 – Planilha utilizada para obtenção dos alvos em termos dos componentes principais

Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa maneira, os resultados ótimos obtidos foram apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Parâmetros ótimos do processo de fritura de batatas palha utilizando o método de fritura por bateladas por imersão em óleo

T (°C)	Δt (min)	Δh (s)	U (%)	L (%)	ΔE	Tc
171,38	4,13	32,27	3,00%	29,57%	1,75	280,05

Fonte: Autoria própria (2021)

Os resultados obtidos após a otimização do modelo foram muito satisfatórios. Em termos das características da qualidade do produto, foi possível obter uma significativa redução do teor de lipídios, enquanto o teor de umidade foi mantido em um valor satisfatório de 3%. Além disso, o valor obtido para a diferença total de cor foi notadamente reduzido, ficando próximo de zero, indicando que a cor obtida pela otimização foi muito semelhante à cor definida como ótima ($\Delta E = 0$). Em termos de duração do processo, foi possível reduzir o tempo de ciclo (T_c) de 360 segundos utilizados na condição de ponto central da matriz experimental para 280 segundos, representando uma redução de 22% no tempo de ciclo do processo. Todos os resultados obtidos também se aproximaram dos valores alvos definidos no problema. Dessa forma, a condição de ótimo obtida, bem como a utilização do *EQMM* para a otimização do problema foram considerados satisfatórios. Nessa direção, a Figura 4.38 apresentou uma simulação da coloração obtida pela condição de ótimo, exibindo ótimas características de luminosidade e tonalidade, permitindo observar que o resultado esperado apresentado pela figura está em conformidade com o valor previsto de ΔE .



Figura 4.38 – Coloração teórica obtida pela otimização do modelo

Fonte: Autoria própria (2021)

4.4. Experimentos de confirmação

Com o objetivo de validar os resultados encontrados após a otimização do problema, foram realizados 9 experimentos de confirmação. A determinação da quantidade de experimentos de confirmação foi realizada por meio do cálculo de Poder e Tamanho de Amostra utilizando o *software* estatístico Minitab®, empregando o Teste t para 1 amostra. Para esse cálculo, foram utilizados o valor do desvio padrão dos *Center Points* de cada resposta de interesse e o valor da margem de erro de cada uma das respostas. O valor da margem de erro foi obtido por meio do cálculo da diferença entre o limite superior do intervalo de confiança obtido para a resposta e o valor esperado. Assim, os valores das margens de erro obtidas foram detalhados na Tabela 4.13. Nesses experimentos, os valores utilizados para os parâmetros do processo de fritura foram os mesmos valores obtidos pela otimização utilizando o método EQMM ($T = 171,38^{\circ}\text{C}$; $\Delta t = 4,13$ min; $\Delta h = 32,27$ s).

Tabela 4.13 – Predição das respostas de interesse ótimas

	U (%)	L (%)	ΔE
Valor Esperado	3,00	29,57	1,75
IC de 95%	(1,62; 4,37)	(28,15; 31,00)	(-1,12; 4,62)
IP de 95%	(0,72; 5,27)	(26,85; 32,29)	(-2,97; 6,47)
Margem de Erro	2,27	2,72	4,72
Desvio Padrão CP	0,25	1,29	1,65

Fonte: Autoria própria (2021)

Dessa maneira, foi possível calcular o poder de teste para cada uma das respostas de interesse, em função do tamanho amostral, conforme apresentado pela Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Tamanho amostral e poderes de teste

Tamanho amostral	Poder do teste para U	Poder do teste para L	Poder do teste para ΔE
4	100,00%	79,35%	95,37%
5	100,00%	93,31%	99,57%
6	100,00%	98,15%	99,97%
7	100,00%	99,54%	100,00%
8	100,00%	99,89%	100,00%
9	100,00%	99,98%	100,00%

Fonte: Autoria própria (2021)

Assim sendo, optou-se pela realização de 9 experimentos de confirmação, uma vez que essa quantidade proporciona elevados valores para o poder de teste para as respostas de umidade e diferença total de cor e teor de lipídios.

Após a realização dos experimentos de confirmação, os resultados obtidos foram detalhados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Experimentos de confirmação

Experimento	U (%)	L (%)	ΔE
1	1,23	35,81	2,31
2	1,28	36,09	3,29
3	1,59	34,05	3,96
4	0,93	33,72	2,90
5	0,98	33,37	2,24
6	1,16	33,79	3,41
7	1,74	36,32	4,08
8	1,67	34,22	3,72
9	1,53	35,85	3,86
Média	1,35	34,80	3,31

Fonte: Aatoria própria (2021)

A partir dos resultados obtidos pelos experimentos de confirmação, foi possível verificar que os valores obtidos para teor de umidade e diferença total de cor encontraram dentro do intervalo de predição fornecido pelo modelo, conforme apresentado pela Tabela 4.13. Nota-se, entretanto, que os valores para teor de lipídios obtidos nos experimentos de confirmação foram superiores ao limite superior do intervalo de predição fornecido pelo modelo. O tempo de ciclo, por outro lado, resultou exatamente no valor esperado, uma vez que é resultante da soma entre o tempo de fritura e o tempo de escoamento do óleo após o processo,

A análise da Figura 4.39 e da Figura 4.40 permite observar a semelhança de coloração entre um exemplo de coloração teórica esperada pela otimização do modelo ($\Delta E = 1,78$) e a coloração obtida em um dos experimentos de confirmação ($\Delta E = 2,24$). É possível notar que a coloração obtida pelos experimentos de confirmação foi próxima do valor esperado.



Figura 4.39 – Coloração teórica obtida pela otimização do modelo

Fonte: Autoria própria (2021)



Figura 4.40 – Coloração obtida pelo experimento de confirmação

Fonte: Autoria própria (2021)

Entre os possíveis fatores que podem ter colaborado para a obtenção dos teores de lipídios fora do intervalo de predição podem ser mencionados:

- a) **Lote da batata *in natura*:** apesar dos experimentos de confirmação terem sido realizados utilizando batatas da mesma variedade das utilizadas no planejamento de experimentos, as batatas utilizadas para a realização dos experimentos de confirmação são de lotes diferentes, que podem apresentar diferentes propriedades físico-químicas;
- b) **Lote de óleo vegetal:** apesar do tipo de óleo utilizado nos experimentos de confirmação ser da mesma origem do óleo utilizado no planejamento de experimentos, eles foram provenientes de diferentes lotes de fabricação e, conseqüentemente, também podem apresentar diferentes propriedades físico-químicas, que podem ter influenciado nos resultados obtidos nos experimentos de confirmação;
- c) **Desgaste do equipamento:** apesar dos experimentos de confirmação terem sido realizados utilizando o mesmo equipamento de fritura utilizado no planejamento de experimentos, o equipamento foi continuamente utilizado durante o intervalo da realização dos experimentos e, em consequência, passou por manutenções e sofreu desgaste relacionado ao uso, que podem ter contribuído para a alteração de suas condições de funcionamento.

4.5. Considerações finais

O objetivo deste capítulo consistiu em realizar a aplicação do método experimental para se obter o modelo e as condições ótimas do processo de fritura de batatas considerando as

variáveis de temperatura do óleo de fritura, duração do processo de fritura e duração do escoamento do óleo após a fritura. Assim, todas as etapas necessárias detalhadas no método experimental discriminado no Capítulo 3 foram realizadas, tornando-se possível a obtenção dos resultados ótimos para a fabricação deste produto.

Ao final, com o objetivo de validar o modelo obtido por meio da otimização, foram realizados os experimentos de confirmação, comprovando que o modelo desenvolvido foi válido para a representação das respostas de teor de umidade e diferença total de cor, apesar de não ter sido possível validar a resposta de teor de lipídios. Além desse fato, também foi possível confirmar a importância da aplicação da estratégia de ponderação das respostas, que permitiu priorizar as respostas mais importantes do problema e, dessa maneira, possibilitou que os resultados obtidos fossem apropriados para as necessidades do processo estudado.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões Gerais

Por meio do desenvolvimento deste estudo, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- Os modelos matemáticos obtidos para as respostas de interesse de teor de umidade, teor de lipídios e coloração apresentaram bons ajustes, uma vez que os valores obtidos foram de 98,10%, 86,22% e 81,78%;
- A variável duração do escoamento de óleo não se mostrou significativa para as respostas de teor de umidade, teor de lipídios e coloração. A interação entre essa variável e as demais variáveis estudadas também não foi significativa para as respostas analisadas. No entanto, sua consideração é de grande relevância neste problema para a minimização do tempo de ciclo do processo;
- A partir da análise da influência das variáveis do processo sobre os efeitos nas respostas de interesse, foi possível notar que:
 - A redução do teor de umidade é obtida com o aumento da temperatura de fritura e com o aumento da duração do processo;
 - A redução do teor de lipídios é proporcionada pela redução da temperatura do óleo de fritura e pela redução da duração do processo. É possível observar que as respostas de interesse teor de umidade e teor de lipídios são respostas conflitantes, reforçando a necessidade de uma relevante ponderação das respostas para a obtenção dos resultados almejados;
 - A otimização da coloração, obtida por meio da minimização da diferença total de cor, é obtida em uma faixa intermediária de temperatura do óleo e duração do processo de fritura. Essa região compreende tanto altas temperaturas e baixa duração do processo, quanto baixas temperaturas e elevada duração do processo. Como exemplo, menores valores de ΔE podem ser obtidos tanto nas combinações dos parâmetros em 180°C e 4 minutos de fritura, quanto em 140°C e 7 minutos de fritura;
- A análise de correlação entre as respostas do modelo permitiu observar a correlação negativa forte existente entre as respostas de teor de umidade e teor de lipídio. Corroborando com a necessidade de um *trade-off* durante a otimização do processo. Também foi possível observar uma correlação negativa fraca entre as respostas de umidade e tempo de ciclo;
- A utilização do EQMM foi adequada para a otimização do processo;

- Após a aplicação do método de otimização, foi possível identificar a combinação ótima das variáveis do processo. Dessa maneira, os seguintes valores foram obtidos: $T = 171,38$ °C, $\Delta t = 4,13$ min, $\Delta h = 32,27$ s;
- Os valores obtidos para as respostas após a otimização foram: $U = 3,00\%$, $L = 29,57\%$, $\Delta E = 1,75$ e $T_c = 280$ segundos;
- Com a realização dos experimentos de confirmação, foi possível obter resultados próximos aos valores previstos pelo modelo para as respostas de teor de umidade e diferença total de cor.

5.2. Contribuições do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho contribuiu com a construção e consolidação de conceitos relacionados à otimização do processo de fritura de batatas por imersão em óleo. Entre as contribuições observadas, podem ser destacadas:

- Definição das condições ótimas para fritura de batatas em formato de palha, possibilitando a fabricação de batatas fritas com teores reduzidos de gordura, ótimos teores de umidade, baixos valores para a diferença total de cor, garantindo excelente coloração ao produto e redução no tempo de ciclo;
- Obtenção de maior receita para a empresa, uma vez que a fritura é o processo gargalo da linha de produção. A otimização do tempo de fritura resultou em redução de 22% no tempo de ciclo (quando comparado ao tempo praticado pela empresa), que possibilitou o aumento na quantidade de produtos produzidos pela empresa;
- Consolidação de procedimentos padronizados para a definição do teor de lipídios, teor de umidade e coloração de batatas fritas;
- Identificação dos principais fatores do processo de fritura que influenciam as características da qualidade de batatas fritas e entendimento dos efeitos dessas variáveis sobre cada resposta;
- Consolidação do EQMM como método de otimização adequado para a otimização de problemas multiobjetivos;
- Estabelecimento de modelos matemáticos confiáveis que possibilitam o controle das respostas em função dos parâmetros analisados no processo.

5.3. Sugestões para estudos futuros

O desenvolvimento deste trabalho proporcionou a identificação de oportunidades de desenvolvimento de pesquisas futuras relacionadas ao tema. Entre as oportunidades, podem ser citadas:

- Elaboração de uma revisão sistemática da literatura e criação de um procedimento padronizado para a extração total de lipídios em batatas fritas utilizando a extração auxiliada por micro-ondas;
- Criação de um projeto de otimização do processo de extração de lipídios totais auxiliada por micro-ondas, analisando a influência das variáveis do processo de extração, tais como: tempo de radiação, intervalo entre ciclos de radiação, quantidade de ciclos, temperatura de extração, tipo de solvente utilizado e proporção entre solventes e amostra, com o objetivo de melhorar o rendimento da extração de lipídios;
- Construção de uma revisão sistemática da literatura e criação de um procedimento padronizado para medição das características de textura em batatas fritas, do tipo palha, utilizando o equipamento texturômetro;
- Produção de um estudo de comparação dos resultados de textura obtidos por meio de testes utilizando o equipamento texturômetro e análises sensoriais;
- Concepção de uma revisão sistemática da literatura e criação de um procedimento padronizado para análise de coloração em batatas fritas em formato de palha utilizando sistema de visão computacional;
- Desenvolvimento de um estudo de comparação entre os métodos de análise de coloração por meio de sistema de visão computacional e por meio do uso do equipamento colorímetro em batatas-palha;
- Análise de outras respostas de interesse para o problema estudado, tais como o teor de acrilamida e sabor por meio da realização de análises sensoriais;
- Análise da influências de outras variáveis do processo de fritura, entre as quais estão o tipo de pré-tratamento da batata, espessura e comprimento do filete de batata, potência do equipamento de fritura e tipo de óleo utilizado nas características da qualidade;
- Utilização de covariáveis no planejamento de experimentos com o objetivo de melhorar a precisão dos modelos desenvolvidos;
- Aplicação do roadmap Six Sigma, com a implantação de etapas como a análise dos sistemas e medição, análise do controle estatístico do processo e estudo de capacidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILERA, J. M.; GLORIA-HERNANDEZ, H. Oil absorption during frying of frozen parfried potatoes. **Journal of Food Science**, v. 65, n. 3, p. 476–479, 2000.
- AKINPELU, O. R. et al. Optimization of processing conditions for vacuum frying of high quality fried plantain chips using response surface methodology (RSM). **Food Science and Biotechnology**, v. 23, n. 4, p. 1121–1128, 2014.
- ALVAREZ, M. D.; MORILLO, M. J.; CANET, W. Characterization of the frying process of fresh and blanched potato strips using response surface methodology. **European Food Research and Technology**, v. 211, n. 5, p. 326–335, 2000.
- ARSLAN, M. et al. Oil Uptake by Potato Chips or French Fries: A Review. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 120, n. 10, p. 1–17, 2018.
- BALABAN, M. O.; ODABASI, A. Z. Measuring color with machine vision. **Food Technology**, v. 60, n. 12, p. 32–36, 2006.
- BAUMANN, B.; ESCHER, F. Mass and heat transfer during deep-fat frying of potato slices - I. Rate of drying and oil uptake. **LWT - Food Science and Technology**, v. 28, n. 4, p. 395–403, 1995.
- BILTCLIFFE, D. O. et al. Convection Oven Determination of Loss of Mass on Drying of Quick Frozen French Fried Potatoes: Collaborative Study. **Journal of Association of Official Analytical Chemists**, v. 67, n. 3, p. 635–636, 15 fev. 2020.
- BOUCHON, P.; AGUILERA, J. M. Microstructural analysis of frying potatoes. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 36, n. 6, p. 669–676, 2001.
- BOUCHON, P.; AGUILERA, J. M.; PYLE, D. L. Structure Oil – Absorption Relationships During Deep-Fat Frying. 2003.
- BOUCHON, P.; PYLE, D. L. Modelling oil absorption during post-frying cooling II: Solution of the mathematical model, model testing and simulations. **Food and Bioproducts Processing**, v. 83, n. 4 C, p. 261–272, 2005.
- BUNGER, A.; MOYANO, P.; RIOSECO, V. NaCl soaking treatment for improving the quality of french-fried potatoes. **Food Research International**, v. 36, n. 2, p. 161–166, 2003.
- CAMEL, V. Microwave-assisted solvent extraction of environmental samples. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, v. 19, n. 4, p. 229–248, 2000.
- CASTRO, M. . L. DE; GRACIA-AYUSO, L. . Soxhlet extraction of solid materials : an outdated technique with a promising innovative future. **Analytica Chimica Acta**, v. 369, n. 1–2, p. 1–10, 1998.
- CASTRO, M. D. L. DE; PRIEGO-CAPOTE, F. Soxhlet extraction: Past and present panacea. **Journal of Chromatography A**, v. 1217, n. 16, p. 2383–2389, 2010.
- DANA, D.; SAGUY, I. S. Review: Mechanism of oil uptake during deep-fat frying and the

surfactant effect-theory and myth. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 128–130, p. 267–272, 2006.

DEVAUX, A.; KROMANN, P.; ORTIZ, O. Potatoes for Sustainable Global Food Security. **Potato Research**, v. 57, n. 3–4, p. 185–199, 2014.

DU, C. J.; SUN, D. W. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. **Trends in Food Science and Technology**, v. 15, n. 5, p. 230–249, 2004.

FAO. **International year of the potato 2008: new light on a hidden treasure**. [s.l: s.n.].

FAO. **FAO Statistical Databases**, 2019. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/>>

FARKAS, B. E.; SINGH, R. P.; RUMSEY, T. R. Modeling heat and mass transfer in immersion frying. I, model development. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 2, p. 211–226, 1996a.

FARKAS, B. E.; SINGH, R. P.; RUMSEY, T. R. Modeling heat and mass transfer in immersion frying. II, model solution and verification. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 2, p. 227–248, 1996b.

GAMBLE, M. H.; RICE, P.; SELMAN, J. D. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c. v. Record U.K. tubers. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 22, n. 3, p. 233–241, 1987.

GIRI, N. A.; PRADEEPIKA, C.; SAJEEV, M. S. Process optimization by response surface methodology and quality attributes of orange fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) vacuum fried chips. **Journal of Food Measurement and Characterization**, n. 0123456789, 2019.

HINDRA, F.; BAIK, O. D. Kinetics of quality changes during food frying. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 46, n. 3, p. 239–258, 2006.

HUNT, R. W. G.; POINTER, M. R. **Measuring Colour**. 4th. ed. [s.l.] John Wiley and Sons, 2011.

IMARC. **Potato Chips Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2021-2026**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.imarcgroup.com/potato-chips-manufacturing-plant>>.

ISIK, B.; SAHIN, S.; OZTOP, M. H. Determination of oil and moisture distribution in fried potatoes using magnetic resonance imaging. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 6, p. 1–8, 2018.

JOCELYN PARÉ, J. R.; BÉLANGER, J. M. R.; STAFFORD, S. S. Microwave-assisted process (MAPTM): a new tool for the analytical laboratory. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 13, n. 4, p. 176–184, 1994.

KATZ, E. E.; LABUZA, T. P. Effect of Water Activity on the Sensory Crispness and Mechanical Deformation of Snack Food Products. **Journal of Food Science**, v. 46, n. 2, p. 403–409, 1981.

- KAUFMANN, B.; CHRISTEN, P. Recent extraction techniques for natural products: Microwave-assisted extraction and pressurised solvent extraction. **Phytochemical Analysis**, v. 13, n. 2, p. 105–113, 2002.
- KAYS, S. J. Preharvest factors affecting appearance. **Postharvest Biology and Technology**, v. 15, n. 3, p. 233–247, 1999.
- KITA, A.; LISIŃSKA, G.; GOŁUBOWSKA, G. The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps. **Food Chemistry**, v. 102, n. 1, p. 1–5, 2007.
- KROKIDA, M. K.; OREOPOULOU, V.; MAROULIS, Z. B. Water loss and oil uptake as a function of frying time. **Journal of Food Engineering**, v. 44, n. 1, p. 39–46, 2000.
- LAWLESS, H. T.; HEYMANN, H. **Sensory Evaluation of Food**. [s.l: s.n.].
- LEÓN, K. et al. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. **Food Research International**, v. 39, n. 10, p. 1084–1091, 2006.
- LIU, Y.; YUAN, Y. H.; LIU, Y. F. Optimization for Production Process Conditions of High Temperature Frying Potato Chips. **Advanced Materials Research**, v. 781–784, p. 1444–1447, 2013.
- MACDOUGALL, D. B. **Colour measurement of food: principles and practice**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2010.
- MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A. J.; VICARIO, I. M.; HEREDIA, F. J. Instrumental measurement of orange juice colour: A review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, n. 6, p. 894–901, 2005.
- MELLEMA, M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. v. 14, p. 364–373, 2003.
- MENDOZA, F.; AGUILERA, J. M. Application of Image Analysis for Classification of Ripening Bananas. **Journal of Food Science**, v. 69, n. 9, p. E471–E477, 2006.
- MESTDAGH, F. et al. Optimization of the blanching process to reduce acrylamide in fried potatoes. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 9, p. 1648–1654, 2008.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. [s.l: s.n.].
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. [s.l: s.n.]. v. 2
- MOREIRA, R. G.; CASTELL-PEREZ, M.; ELENA, BARRUFET, M. **Deep Fat Frying: Fundamentals and Applications**. 1. ed. [s.l: s.n.].
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. 4th. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2016.
- OLADEJO, A. O. et al. Effects of ultrasound pretreatments on the kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of sweet potato (*Ipomea batatas*). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 43, n. July, p. 7–17, 2017.

OZTOP, M. H.; SAHIN, S.; SUMNU, G. Optimization of microwave frying of potato slices by using Taguchi technique. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 83–91, 2007a.

OZTOP, M. H.; SAHIN, S.; SUMNU, G. Optimization of microwave frying of osmotically dehydrated potato slices by using response surface methodology. **European Food Research and Technology**, v. 224, n. 6, p. 707–713, 2007b.

PAIVA, A. P. DE et al. Aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para Otimização do Processo de Solda a Ponto no Aço Galvanizado AISI 1006. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 2, p. 129–142, 2018.

PAIVA, E. J. Erro Quadrático Médio Multivariado na otimização do torneamento do aço ABNT 52100 endurecido Erro Quadrático Médio Multivariado na otimização do torneamento do aço ABNT 52100 endurecido. **Universidade Federal de Itajubá**, p. 194, 2012.

PAR, J. R. J.; JACQUELINE, M. R. B. Microwave-Assisted Process (MAPTM) : Principles and Applications. 1997.

PARIKH, A.; TAKHAR, P. S. Comparison of Microwave and Conventional Frying on Quality Attributes and Fat Content of Potatoes. **Journal of Food Science**, v. 81, n. 11, p. E2743–E2755, 2016.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods : A Review. 2012.

PEDRESCHI, F. et al. Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. **Food Research International**, v. 39, n. 10, p. 1092–1098, 2006.

PEDRESCHI, F. et al. Color development and acrylamide content of pre-dried potato chips. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 3, p. 786–793, 2007.

PEDRESCHI, F. et al. Oil distribution in potato slices during frying. **Journal of Food Engineering**, v. 87, n. 2, p. 200–212, 2008.

PEDRESCHI, F. Frying of Potatoes: Physical, Chemical, and Microstructural Changes. **Drying Technology**, v. 30, n. 7, p. 707–725, 2012.

PEDRESCHI, F.; MOYANO, P. Oil uptake and texture development in fried potato slices. **Journal of Food Engineering**, v. 70, n. 4, p. 557–563, 2005.

PEDRESCHI, F.; SEGNINI, S.; DEJMEK, P. Evaluation of the texture of fried potatoes. **Journal of Texture Studies**, v. 35, n. 3, p. 277–291, 2004.

PICOUET, P. A. et al. Implementation of a quality by design approach in the potato chips frying process. **Journal of Food Engineering**, v. 260, n. October 2018, p. 22–29, 2019.

POKHARKAR, S.; MAHALE, D. Optimization of process variables for preparation of fresh fried potato chips. **Journal of Food Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 369–370, 2001.

RIMAC-BRNČIĆ, S. et al. Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 2, p. 237–241, 2004.

- SAGUY, I. S.; DANA, D. Integrated approach to deep fat frying: Engineering, nutrition, health and consumer aspects. **Journal of Food Engineering**, v. 56, n. 2–3, p. 143–152, 2003.
- SAHIN, S.; SASTRY, S. K.; BAYINDIRLI, L. Heat transfer during frying of potato slices. **LWT - Food Science and Technology**, v. 32, n. 1, p. 19–24, 1999.
- SEGNINI, S.; DEJMEK, P.; ÖSTE, R. A low cost video technique for colour measurement of potato chips. **LWT - Food Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 216–222, 1999.
- SEYMOUR, S. K.; ANN, D. D. H. Crispness and Crunchiness of Selected Low Moisture Foods. **Journal of Texture Studies**, v. 19, n. 1, p. 79–95, 1988.
- SINGTHONG, J.; THONGKAEW, C. Using hydrocolloids to decrease oil absorption in banana chips. **LWT - Food Science and Technology**, v. 42, n. 7, p. 1199–1203, 2009.
- SONG, X. J.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Optimization of vacuum microwave predrying and vacuum frying conditions to produce fried potato chips. **Drying Technology**, v. 25, n. 12, p. 2027–2034, 2007.
- WU, D.; SUN, D. W. Colour measurements by computer vision for food quality control - A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 29, n. 1, p. 5–20, 2013.
- YAM, K. L.; PAPADAKIS, S. E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. **Journal of Food Engineering**, v. 61, n. 1 SPEC., p. 137–142, 2004.
- ZHANG, Y. et al. The description of oil absorption behavior of potato chips during the frying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 96, n. April, p. 119–126, 2018.

ANEXOS

ANEXO A - Obtenção do teor de umidade das amostras analisadas

Amostra	Replicação 1				Replicação 2				Média
	M0 (g)	M1 (g)	M2 (g)	%	M0 (g)	M1 (g)	M2 (g)	%	%
1	52,593	62,552	60,828	17,31%	52,457	62,469	60,588	18,79%	18,05%
2	54,431	64,457	64,152	3,04%	50,598	60,615	60,306	3,08%	3,06%
3	51,848	61,864	61,506	3,58%	44,120	54,119	53,755	3,64%	3,61%
4	53,158	63,197	63,122	0,75%	69,148	79,174	79,110	0,64%	0,70%
5	68,659	78,700	76,739	19,53%	68,342	78,344	76,339	20,04%	19,79%
6	52,140	62,184	61,982	2,02%	48,969	59,027	58,823	2,03%	2,02%
7	66,719	76,748	76,236	5,11%	67,259	77,257	76,730	5,27%	5,19%
8	72,750	82,749	82,666	0,83%	47,853	57,885	57,805	0,80%	0,81%
9	52,455	62,533	60,494	20,24%	75,139	85,178	83,053	21,16%	20,70%
10	53,060	63,113	62,994	1,17%	52,237	62,271	62,167	1,04%	1,11%
11	58,495	68,522	67,454	10,66%	71,350	81,380	80,296	10,81%	10,73%
12	67,009	77,007	76,900	1,08%	71,044	81,041	80,943	0,98%	1,03%
13	50,367	60,376	60,122	2,53%	46,864	56,870	56,628	2,42%	2,47%
14	70,150	80,177	79,948	2,29%	67,373	77,372	77,142	2,30%	2,30%
15	70,487	80,502	80,201	3,00%	68,369	78,370	78,065	3,05%	3,03%
16	68,640	78,707	78,457	2,49%	50,324	60,334	60,081	2,52%	2,51%
17	53,815	63,833	63,522	3,10%	50,929	60,931	60,627	3,04%	3,07%
18	66,687	76,689	76,407	2,82%	66,745	76,761	76,493	2,67%	2,75%
19	51,683	61,687	61,398	2,89%	53,566	63,567	63,272	2,96%	2,92%
20	64,195	74,247	73,992	2,54%	48,737	58,745	58,497	2,48%	2,51%

ANEXO B - Determinação das massas utilizadas na obtenção do teor de lipídios das amostras analisadas

Amostra	Replicação 1			Replicação 2		
	m _{béquer vazio} (g)	m _(béquer + amostra) (g)	m _{amostra} (g)	m _{béquer vazio} (g)	m _(béquer + amostra) (g)	m _{amostra} (g)
1	35,811	40,843	5,031	33,102	38,150	5,048
2	36,781	41,807	5,026	33,243	38,242	4,999
3	33,938	38,942	5,004	33,319	38,321	5,002
4	43,632	48,625	4,993	48,511	53,525	5,014
5	49,244	54,247	5,003	43,228	48,282	5,054
6	52,758	57,797	5,039	52,269	57,330	5,061
7	69,328	74,370	5,042	102,200	107,227	5,026
8	53,713	58,738	5,025	52,219	57,258	5,039
9	47,585	52,613	5,028	49,330	54,389	5,059
10	49,853	54,851	4,999	47,841	52,859	5,018
11	33,556	38,586	5,031	46,600	51,592	4,992
12	44,215	49,242	5,027	52,248	57,296	5,047
13	44,148	49,158	5,010	33,619	38,656	5,038
14	49,574	54,592	5,018	50,293	55,305	5,012
15	66,914	71,917	5,002	48,931	53,981	5,050
16	68,862	73,916	5,054	100,869	105,868	4,999
17	33,592	38,634	5,042	27,766	32,811	5,044
18	53,806	58,834	5,029	48,414	53,485	5,070
19	34,104	39,115	5,011	53,009	58,031	5,021
20	105,295	110,363	5,067	100,851	105,864	5,013

ANEXO C - Obtenção do teor de lipídios das amostras analisadas

Amostra	Replicação 1 1				Replicação 2				Média
	m(béquer +óleo) (g)	m(béquer (g)	m(óleo (g)	%	m(béquer +óleo) (g)	m(béquer (g)	m(óleo (g)	%	%
1	37,136	35,811	1,325	26,33%	34,383	33,102	1,281	25,38%	25,86%
2	38,515	36,781	1,734	34,51%	34,815	33,243	1,573	31,46%	32,98%
3	35,514	33,938	1,576	31,50%	34,874	33,319	1,555	31,09%	31,29%
4	45,434	43,632	1,802	36,09%	50,217	48,511	1,706	34,03%	35,06%
5	50,630	49,244	1,386	27,71%	44,592	43,228	1,364	26,98%	27,34%
6	54,244	52,758	1,486	29,49%	53,773	52,269	1,504	29,71%	29,60%
7	70,833	69,328	1,506	29,86%	103,688	102,200	1,488	29,59%	29,73%
8	55,434	53,713	1,721	34,24%	53,980	52,219	1,762	34,96%	34,60%
9	48,845	47,585	1,260	25,06%	50,627	49,330	1,296	25,62%	25,34%
10	51,672	49,853	1,820	36,41%	49,525	47,841	1,684	33,56%	34,99%
11	35,220	33,556	1,664	33,08%	48,059	46,600	1,459	29,22%	31,15%
12	45,912	44,215	1,697	33,76%	53,897	52,248	1,649	32,66%	33,21%
13	45,825	44,148	1,677	33,47%	35,303	33,619	1,684	33,43%	33,45%
14	51,116	49,574	1,541	30,71%	51,804	50,293	1,511	30,15%	30,43%
15	68,338	66,914	1,424	28,47%	50,383	48,931	1,452	28,75%	28,61%
16	70,330	68,862	1,468	29,05%	102,249	100,869	1,380	27,60%	28,33%
17	35,104	33,592	1,513	30,00%	29,277	27,766	1,510	29,94%	29,97%
18	55,379	53,806	1,574	31,29%	49,954	48,414	1,540	30,37%	30,83%
19	35,609	34,104	1,505	30,04%	54,684	53,009	1,675	33,35%	31,69%
20	106,784	105,295	1,489	29,38%	102,338	100,851	1,488	29,67%	29,53%

ANEXO D - Obtenção dos valores de L*, a*, b* e ΔE das amostras analisadas

Amostra	L*	a*	b*	ΔE
1	70,737	1,656	35,398	4,109
2	70,306	2,842	37,054	3,088
3	71,451	2,579	38,598	1,473
4	64,804	9,384	39,784	10,530
5	69,745	1,393	35,661	4,599
6	70,980	3,934	38,485	2,276
7	69,996	2,842	36,828	3,470
8	59,682	9,826	38,438	15,004
9	66,161	1,958	32,461	9,232
10	65,671	9,280	40,536	9,920
11	73,980	0,969	35,031	4,225
12	67,176	8,358	39,576	8,068
13	71,133	3,944	37,873	2,299
14	72,871	3,021	37,421	1,319
15	73,561	2,871	36,960	1,872
16	71,847	3,247	38,664	1,175
17	68,612	3,539	37,082	4,664
18	72,451	3,642	38,193	1,130
19	72,910	2,748	38,711	0,000
20	73,165	2,908	38,315	0,497

ANEXO E - Relatório fotográfico da coloração obtida para as amostras analisadas

Amostra 1



Amostra 2



Amostra 3



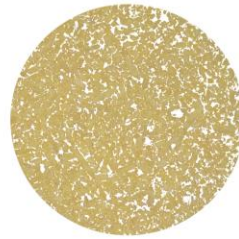
Amostra 4



Amostra 5



Amostra 6



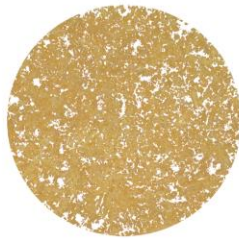
Amostra 7



Amostra 8



Amostra 9



Amostra 10



Amostra 11



Amostra 12



Amostra 13



Amostra 14



Amostra 15



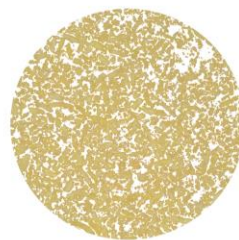
Amostra 16



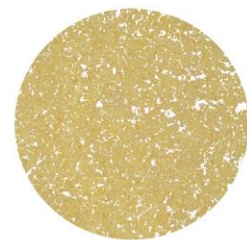
Amostra 17



Amostra 18



Amostra 19



Amostra 20

ANEXO F - Primeiro artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGETP), publicado em outubro de 2020.



XL ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
 “Contribuições da Engenharia de Produção para a Gestão de Operações Energéticas Sustentáveis”
 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 20 a 23 de outubro de 2020.

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FRITURA DE BATATAS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

Arthur Aurélio de Almeida Freitas (Universidade Federal de Itajubá)
 arthur.almeida7@gmail.com

José Henrique de Freitas Gomes (Universidade Federal de Itajubá)
 ze_henriquefg@unifei.edu.br

O processo de fritura de batatas possui variáveis de operação que impactam diretamente nas qualidades dos produtos acabados. Algumas dessas variáveis são: temperatura do óleo, duração do processo de fritura, método de fritura, tipo de pré-processamento, tipo de matéria-prima, entre outros. Diante do desafio atual de se fabricar produtos com teor reduzido de gorduras ao mesmo tempo em que se deseja manter excelentes propriedades de sabor, crocância e coloração, este trabalho realiza uma revisão da literatura com o objetivo de identificar como este assunto vem sendo abordado pelos principais autores e compreender os mecanismos que influenciam o processo de fritura de batatas.

Palavras-chave: Planejamento de Experimentos, Análise de Experimentos, Otimização, Fritura, Batata Frita.

ANEXO G – Segundo artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGETP), em outubro de 2021.



XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
 “Contribuições da Engenharia de Produção para a Gestão de Operações Energéticas Sustentáveis”
 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 18 a 21 de outubro de 2021.

APLICAÇÃO DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E DA METODOLOGIA DA SUPERFÍCIE DE RESPOSTA EM UM PROCESSO DE FRITURA DE BATATAS

Arthur Aurélio de Almeida Freitas (Universidade Federal de Itajubá)
 arthur.almeida7@gmail.com

José Henrique de Freitas Gomes (Universidade Federal de Itajubá)
 ze_henriquefg@unifei.edu.br

Batatas-fritas são consideradas um dos alimentos mais importantes na indústria mundial de snack foods. Nos Estados Unidos, sua receita de vendas atingiu a marca de 33% de participação no mercado de snacks. Um dos maiores problemas que acompanha o processo de fabricação desse produto é o elevado teor de lipídios presente no produto final que, se consumido em excesso, pode acarretar aumento nos níveis de colesterol no sangue e pressão arterial. Considerando o notável aumento da demanda mundial por produtos mais saudáveis e saborosos, o presente trabalho tem como objetivo utilizar o Planejamento e Análise de Experimentos em conjunto com a Metodologia da Superfície de Resposta para obter uma melhor compreensão de como a qualidade final do produto é afetada pelas variáveis desse processo. O objeto de estudo utilizado foi a batata-palha e os parâmetros do processo analisados foram: temperatura de óleo, duração do processo de fritura e duração do escoamento de óleo após o processo. As respostas analisadas foram: teor de umidade e teor de lipídios do produto final. Foram utilizadas batatas da espécie Solanum tuberosum da variedade Asterix e óleo vegetal de palma. Ao final do trabalho foi possível obter os modelos matemáticos para as respostas de interesse e assim, identificar de que maneira elas são afetadas pela mudança dos níveis das variáveis analisadas.

Palavras-chave: Batatas-fritas, Batata-palha, Fritura, Projeto e Análise de Experimentos, Metodologia da Superfície de Resposta

ANEXO H – Terceiro artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), em outubro de 2021.



XLI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
 “Contribuições da Engenharia de Produção para a Gestão de Operações Energéticas Sustentáveis”
 Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, 18 a 21 de outubro de 2021.

OTIMIZAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E LIPÍDIOS EM BATATAS-PALHAS UTILIZANDO A METODOLOGIA DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Arthur Aurélio de Almeida Freitas (Universidade Federal de Itajubá)
 arthur.almeida7@gmail.com

José Henrique de Freitas Gomes (Universidade Federal de Itajubá)
 ze_henriquefg@unifei.edu.br

Este trabalho teve como objetivo realizar a otimização do processo de fritura de batatas-palhas por imersão em óleo utilizando o processo de fritura por bateladas. Pretendeu-se identificar a combinação dos parâmetros que proporcionasse resultados ótimos para as respostas de teor de umidade e teor de lipídios. Os parâmetros do processo analisados foram: temperatura do óleo (140-180 °C), duração do processo de fritura (3,8-7,2 min) e duração do escoamento do óleo (13-47 s). A Metodologia da Superfície de Resposta foi utilizada para a execução do planejamento dos experimentos, coleta dos dados e análises. A otimização foi realizada utilizando o método do Erro Quadrático Médio Multivariado Ponderado. No final do trabalho, foi possível identificar os valores ótimos das variáveis do processo e das respostas de interesse.

Palavras-chave: Batatas fritas, batata-palha, fritura, projeto e análise de experimentos, otimização, metodologia de superfície de resposta, erro quadrático médio multivariado ponderado.