

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Rachel Campos Sabioni

**Otimização de um Processo Industrial de
Filagem: uma Comparação entre Métodos
Multiobjetivo**

Itajubá, fevereiro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Rachel Campos Sabioni

**Otimização de um Processo Industrial de
Filagem: uma Comparação entre Métodos
Multiobjetivo**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Qualidade e Produtos

Orientador: Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Campos

Itajubá, fevereiro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Rachel Campos Sabioni

**Otimização de um Processo Industrial de
Filagem: uma Comparação entre Métodos
Multiobjetivo**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 08 de fevereiro de 2018, conferindo à autora o título **de Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ítalo Tuler Perrone (UFV)

Prof. Dr. Anderson Paulo de Paiva (UNIFEI)

Prof. Dr. Pedro Paulo Balestrassi (Orientador)

Itajubá, fevereiro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Gustavo e Roselena, pelo apoio e amor incondicionais, sempre me inspirando a fazer o melhor possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por guiar os meus passos e me dar a força e a sabedoria necessárias para encarar as adversidades ao longo da jornada do conhecimento.

Aos meus pais, Gustavo e Roselena, por terem sido meus alicerces ao longo dessa caminhada, me apoiando e motivando, incansavelmente, nos momentos difíceis, e vibrando comigo à cada pequena conquista. Agradeço imensamente a vocês pela parceria, paciência e compreensão, nos meus momentos de ausência.

Ao meu irmão, Bruno, por ser minha inspiração diária de ousadia e coragem, sempre me impulsionando a ir além do que eu acredito ser capaz.

Ao meu orientador, Pedro Paulo Balestrassi, pela amizade, motivação e ensinamentos científicos e de vida. Agradeço a confiança depositada em mim para com a realização deste trabalho. Ao meu coorientador, Paulo Henrique da Silva Campos, pelo apoio e motivação durante todo o mestrado.

Ao professor Anderson Paulo de Paiva pelas importantes contribuições científicas e por ter aceitado o meu convite para ser avaliador deste trabalho. Agradeço igualmente ao professor Ítalo Tuler Perrone pelas contribuições e por também ter aceitado ser um dos meus avaliadores.

Aos professores José Henrique de Freitas Gomes, Carlos Eduardo Sanches da Silva, Carlos Henrique Pereira Mello, Luiz Gonzaga Mariano de Souza e João Batista Turrioni pelos ensinamentos, orientações e contribuições para meu crescimento acadêmico.

Aos irmãos Alvimar, Aparecida e Custódia pela confiança depositada. Ao João Bosco e a todos os funcionários do laticínio pela abertura, paciência e cooperação ao longo do desenvolvimento da minha pesquisa.

À professora e amiga Edmar Aparecida Filomeno Fontes, pela confiança depositada, oferecendo todas as condições para que eu desenvolvesse a parte laboratorial da minha pesquisa. À amiga Talita Silva por todo o suporte, dedicação e bom humor durante as análises do meu trabalho.

Aos amigos da pós-graduação da UNIFEI pela amizade, cooperação, ensinamentos e por tornarem essa jornada mais leve e divertida. Em especial, agradeço à Gabriela Belinato, Taynara Incerti, Fabrício Almeida, Vinícius Renó, Raquel Félix, Gabriela Amorim, Juliana Gaudêncio e Mariângela de Oliveira-Abans.

Às minhas amigas e companheiras de república pela amizade, parceria e todos os bons

momentos compartilhados, em especial, agradeço à Clara Almeida e Yasmim Sumitani, por me acompanharem do início ao fim do mestrado.

À toda minha família e amigos pela torcida, apoio e carinho ao longo desta trajetória.

Aos demais professores do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da UNIFEI, pela formação e conhecimento adquirido.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

EPÍGRAFE

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

Albert Einstein

RESUMO

Um dos principais indicadores de eficiência dos laticínios é o rendimento, principalmente quando se trata da fabricação de queijos, uma vez que esta se dá pela concentração dos nutrientes do leite. Além do rendimento, existem fatores relacionados à qualidade e composição do produto final que não podem ser negligenciados, visto que a modificação de uma determinada variável, pode implicar na alteração das demais. Um dos queijos mais consumidos no mundo é a mussarela, pertencente à variedade *pasta-filata*, a qual é composta por queijos que apresentam um processo adicional de estiramento e aquecimento da coalhada, chamado filagem. Neste contexto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de otimizar um processo industrial de filagem de queijo mussarela, com o intuito de aumentar o rendimento, em termos de recuperação de gordura do leite, e padronizar o teor de umidade dos produtos. Para tal, utilizou-se a Metodologia de Superfície de Resposta, como técnica de planejamento de experimentos, assumindo-se duas variáveis de entrada: tempo de filagem e volume de água. Após a modelagem das funções, foi realizada a comparação entre dois métodos de otimização multiobjetivo: *Desirability* e o método de Interseção Normal à Fronteira. A partir dos resultados obtidos, é possível inferir que, se os parâmetros ótimos forem aplicados ao processo de filagem, o rendimento, em termos de recuperação de gordura, pode aumentar em quase 10%, atingindo-se, simultaneamente, o teor de umidade desejado para o queijo mussarela. Observou-se também que ambos os métodos de otimização utilizados apresentaram desempenho semelhante no presente estudo.

Palavras-Chave: Processo de filagem, Metodologia de Superfície de Resposta, *Desirability*, Interseção Normal à Fronteira, otimização bi-objetivo.

ABSTRACT

One of the main performance indicators of dairy products is cheese yield, since this product is made by concentrating milk nutrients. In addition, there are some factors related to cheese quality and composition that cannot be neglected, seeing that changing an input may alter the others. One of the most consumed cheeses in the world is mozzarella, belonging to the *pasta-filata*. This variety consists of a cheese process that present an additional step of curd stretching in hot water, which may increase fat losses, and consequently, lead to a low process yield. In this context, the present work was developed with the purpose of improving the cooking-stretching curd stage of a manufacturing process of mozzarella, with the aims of increase the cheese yield in terms of fat recovery and standardize the cheese moisture. For that, the Response Surface Methodology was employed, by considering two input factors: cooking-stretching time and quantity of water. After equations modeling, two multiobjective optimization methods were compared: Desirability and Normal Boundary Intersection. From the results obtained, it is possible to infer that the cheese yield, in terms of fat recovery, can increase by almost 10%, keeping the cheese moisture content close to the target. It was also observed that both optimization methods presented similar performance in this research.

Keywords: *Pasta-filata* process, Response Surface Methodology, Desirability, Normal Boundary Intersection, bi-objective optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fluxograma de fabricação do queijo até a etapa de formação da coalhada. Adaptado de Fox <i>et al.</i> (2000).	28
Figura 2.2. Esquema ilustrativo da mudança estrutural que ocorre na matriz de paracaseína em decorrência do processo de filagem a) Micrografia eletrônica da coalhada após drenagem do soro (FOX <i>et al.</i> , 2000); b) Micrografia eletrônica da massa após processo de filagem (FOX <i>et al.</i> , 2000); c) Imagem da coalhada após drenagem do soro; d) Imagem das “fibras” do queijo mussarela.	31
Figura 2.3. Fluxograma geral do processamento de queijo mussarela. Adaptado de Fox <i>et al.</i> (2000) e Silva (2005).	32
Figura 2.4. Representação de um modelo geral de processo. Adaptado de Montgomery (2013).	45
Figura 2.5. Exemplo de modelo tridimensional de superfície de resposta e gráfico de contorno para uma resposta $E(y)$ dada em função de duas variáveis independentes x_1, x_2 . Adaptado de Montgomery (2013).	46
Figura 2.6. Diferentes tipos de arranjo composto central (CCD) (GOMES, 2013).	49
Figura 2.7. Ilustração de um arranjo composto central a) Rotacionalidade; b) Arranjo Composto Central para 2 fatores (PAIVA, 2006).	50
Figura 2.8. Exemplo de sobreposição de gráficos de contorno.	52
Figura 2.9. Representação gráfica do Método de Interseção Normal à Fronteira (NBI).	59
Figura 2.10. Artigos publicados na base <i>Web of Science</i> que aplicam o método NBI.	60
Figura 3.1. Fluxograma do método experimental.	64
Figura 3.2. Gráfico do teste de normalidade para a distribuição dos dados históricos de gordura em extrato seco (GES).	66
Figura 3.3. Gráfico do teste de normalidade para a distribuição dos dados históricos de umidade (U).	67
Figura 3.4. Gráfico de capacidade do processo em termos de teor de gordura em extrato seco total.	68
Figura 3.5. Gráfico de capacidade do processo em termos de teor de umidade.	69
Figura 3.6. Gráfico boxplot dos dados da porcentagem do teor de umidade.	69

Figura 3.7. Cartas de controle dos valores individuais e de média móvel do rendimento, em termos de recuperação de gordura, obtidos ao longo de dois meses de produção.	71
Figura 3.8. Cartas de controle dos valores individuais e de média móvel da porcentagem de umidade obtidos ao longo de dois meses de produção.	71
Figura 3.9. Fluxograma do processo de fabricação de mussarela da fábrica estudada.	72
Figura 3.10. Esquema visual do processo de fabricação de queijo mussarela na fábrica estudada.	73
Figura 3.11. Esquematização do objeto de estudo.....	74
Figura 3.12. Tacho de filagem de mussarela da fábrica estudada.	74
Figura 4.1. Gráfico dos resíduos padronizados <i>versus</i> o valor ajustado para a resposta R_{MG} .	83
Figura 4.2. Gráfico dos resíduos padronizados <i>versus</i> o valor ajustado para a resposta U	84
Figura 4.3. Efeitos principais sobre a porcentagem de recuperação de gordura do leite para o queijo (R_{MG}).	88
Figura 4.4. Efeitos principais sobre o teor de umidade do queijo mussarela (U).	89
Figura 4.5. Efeitos da interação sobre a porcentagem de recuperação de gordura do leite para o queijo (R_{MG}).	89
Figura 4.6. Efeitos da interação sobre o teor de umidade do queijo mussarela (U).	90
Figura 4.7. Superfícies de resposta em função dos parâmetros V e t para (a) Resposta U . (b) Resposta R_{MG}	91
Figura 4.8. Gráfico de otimização simultânea das respostas R_{MG} e U pelo método <i>Desirability</i>	94
Figura 4.9. Fronteira de Pareto obtida pela otimização biobjetivo de U e R_{MG}	96
Figura 4.10. Representação gráfica da sobreposição dos gráficos de contorno das respostas R_{MG} e U	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1. Artigos encontrados no levantamento bibliográfico, que aplicam Metodologia de Superfície de Resposta para experimentação em processo de fabricação de queijo.....	22
Quadro 1.2. Trabalhos que avaliaram o impacto dos parâmetros de filagem nas propriedades do queijo e rendimento do processo.....	23
Quadro 2.1. Detalhamento da relação de importância entre o alvo (<i>target</i>) e os limites no método <i>Desirability</i> (PAIVA, 2006).....	55
Quadro 2.2. Objetivos de otimização do método <i>Desirability</i> . Adaptado de Salgado Júnior (2010).	56
Quadro 3.1. Relação dos dados coletados pelo controle de qualidade da fábrica.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Artigos encontrados no levantamento bibliográfico, que aplicam Metodologia de Superfície de Resposta para experimentação em processo de fabricação de queijo.	22
Tabela 2.1. Classificação dos tipos de queijo quanto ao teor de gordura e de umidade (BRASIL, 1996).	27
Tabela 2.2. Classificação dos diferentes tipos de mussarela, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Gunasekaran e Ak (2003).	29
Tabela 2.3. Requisitos físico-químicos do queijo mussarela.	30
Tabela 2.4. Faixas de temperatura da massa e da água durante a etapa de filagem encontradas na literatura.	34
Tabela 2.5. Valores de pH da massa antes da filagem, encontrados na literatura.	35
Tabela 3.1. Dados históricos de dois meses fornecidos pelo controle de qualidade do laticínio estudado.	65
Tabela 3.2. Parâmetros utilizados no processo de filagem e níveis de trabalho.	75
Tabela 3.3. Intervalo de variação das variáveis não controláveis do processo.	76
Tabela 3.4. Matriz experimental.	78
Tabela 4.1. Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos de cada resposta de interesse.	80
Tabela 4.2. Análise de Variância para Recuperação de gordura (R_{MG}).	81
Tabela 4.3. Análise de Variância para porcentagem de umidade dos queijos (U).	81
Tabela 4.4. Novos valores de R^2 obtidos após a redução dos modelos de regressão das respostas R_{MG} e U	82
Tabela 4.5. Cálculo do peso para as variáveis de resposta U e R_{MG} de acordo com o modelo ajustado pelo OLS.	86
Tabela 4.6. Comparação entre modelos obtidos pelos métodos OLS e WLS para as respostas R_{MG} e U	87
Tabela 4.7. Autovalores e convexidade das funções objetivo.	91
Tabela 4.8. Resultado da análise de correlação entre as respostas U e R_{MG}	92
Tabela 4.9. Resultados da otimização individual das funções objetivo pelo método <i>Desirability</i>	93

Tabela 4.10. Matriz <i>Payoff</i> das respostas de interesse.	94
Tabela 4.11. Resultado da otimização das respostas U e R_{MG} pelo método NBI.	95
Tabela 4.12. Cálculo do Erro Percentual Global (EPG) para as soluções Pareto-ótimas.	97
Tabela 4.13. Comparação dos resultados otimizados obtidos pelos métodos <i>Desirability</i> e NBI.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIA	Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> – Análise de variância
CCC	Arranjo composto circunscrito
CCD	<i>Central Composite Design</i> - Arranjo Composto Central
CCF	Arranjo de face centrada
CCI	Arranjo composto inscrito
CHIM	<i>Convex Hull of Individual Minima</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LOF	<i>Lack-of-fit</i>
NBI	<i>Normal Boundary Intersection</i> - Interseção Normal à Fronteira
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> – Mínimos Quadrados Ordinários
RSM	<i>Response Surface Methodology</i> - Metodologia de Superfície de Resposta
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
WLS	<i>Weighted Least Squares</i> – Mínimos Quadrados Ponderados

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Nível de significância
β	Coefficientes estimados do modelo polinomial
ϵ	Erro experimental
e_i	Resíduo
k	Número de variáveis independentes
d_i	Índice <i>Desirability</i> individual
D	Índice <i>Desirability</i> global
f^U	Vetor ponto de Utopia
f^N	Vetor ponto de Nadir
H	Limite superior da função <i>Desirability</i>
L	Limite inferior da função <i>Desirability</i>
n	Número de experimentos
R_{MG}	Porcentagem de recuperação de gordura
$\%R_{nut}$	Porcentagem recuperada de um determinado nutriente
T	Valor alvo
t	Tempo de filagem
U	Teor de umidade do queijo (%)
V	Volume de água adicionado na etapa de filagem
x^*	Conjunto de pontos ótimos
x_i	Variáveis de controle
X	Vetor das variáveis de controle
X^T	Vetor transposto das variáveis de controle
$\chi_{1,\alpha}^2$	Valor crítico de uma distribuição Qui-Quadrado com 1 grau de liberdade
Y	Vetor de variáveis de resposta
y_i	Valor real das variáveis de resposta
\hat{y}_i	Valor ajustado
w_i	Peso atribuído às funções
W	Vetor de ponderação
Ω	Espaço amostral

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Contexto.....	19
1.2 Justificativa	21
1.3 Objetivos.....	24
1.3.1 Objetivo geral	24
1.3.2 Objetivos específicos.....	24
1.4 Limitações.....	25
1.5 Estrutura do trabalho.....	25
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 Definição e propriedades de queijo.....	27
2.2 Queijo mussarela.....	28
2.2.1 Definição	28
2.2.1 Processo de filagem.....	32
2.2.1.1 Temperatura da água e massa.....	33
2.2.1.2 pH da massa	34
2.2.1.3 Tempo.....	36
2.2.1.4 Volume de água.....	38
2.3 Rendimento do processo de fabricação de queijo.....	39
2.3.1 Fatores que influenciam o rendimento	41
2.3.2 Rendimento do processo de fabricação de queijo mussarela	43
2.4 Projeto e análise de experimentos.....	44
2.4.1 Metodologia de Superfície de Resposta	46
2.4.1 Método para estimação dos coeficientes do modelo de regressão	50
2.5 Otimização de processos com múltiplas respostas	51
2.5.1 Método <i>Desirability</i>	53
2.5.2 Método de Interseção Normal à Fronteira.....	56
3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	61
3.1 Classificação da pesquisa científica.....	61
3.2 Problema de pesquisa.....	61

3.2.1	Seleção da empresa estudada.....	61
3.2.2	Método experimental.....	63
3.2.3	Definição do problema de pesquisa.....	64
3.2.4	Mapeamento do processo	72
3.2.5	Detalhamento do objeto de estudo.....	74
3.2.6	Procedimento experimental	75
3.2.7	Coleta de dados.....	76
3.2.7.1	Análise físicas e químicas	76
3.2.7.2	Cálculos do rendimento.....	77
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1	Modelagem das funções objetivo	79
4.2	Adequação e ajuste dos modelos	80
4.2.1	Análise de variância (ANOVA)	80
4.2.2	Análise de heteroscedasticidade dos resíduos	83
4.2.3	Aplicação do método WLS	85
4.3	Análise dos efeitos dos parâmetros.....	87
4.3.1	Análise dos efeitos principais sobre R_{MG} e U	88
4.3.2	Análise dos efeitos da interação sobre R_{MG} e U	89
4.4	Identificação da convexidade das funções de R_{MG} e U	90
4.5	Otimização das respostas	91
4.5.1	Método <i>Desirability</i>	92
4.5.2	Método de Interseção Normal à Fronteira (NBI)	94
4.5.3	Comparação entre os métodos de otimização.....	98
5.	CONCLUSÃO.....	100
5.1	Contribuições do trabalho	100
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Em um contexto de crescente globalização, o aumento da competitividade tem levado os consumidores a serem cada vez mais exigentes, forçando as empresas a voltarem seus esforços para a melhoria da eficiência operacional dos processos e da qualidade dos produtos, em vista de atender as necessidades dos clientes e se manter no mercado (HUNG E SUNG, 2011; PAIVA, 2013).

De acordo com Paiva (2013), o conceito de qualidade do produto alimentício pode ser definido como aquele que “é adequado às necessidades do consumidor”. Tal definição leva em consideração dois aspectos principais: as características do produto que satisfazem as expectativas do cliente bem como a ausência de defeitos. O primeiro deles se refere às características intrínsecas do produto, tais como atributos sensoriais do alimento, sua disponibilidade no mercado com preços acessíveis e embalagem adequada. Já o segundo aspecto está relacionado à ausência de defeitos, isto é, à capacidade do produto em atender suas especificações, tanto de acordo com a legislação quanto com o que é descrito na embalagem (PAIVA, 2013).

Embora a melhoria constante da qualidade seja crucial para toda e qualquer empresa, de um modo geral, as indústrias do setor alimentício ainda são muito conservadoras e apresentam resistência em implementar práticas de melhoria de processos e produtos para reduzir perdas e variabilidade (HUBBARD, 2003; HUNG E SUNG, 2011; ABDUL *et al.*, 2016). Quando se trata de indústrias de pequeno porte, essas iniciativas de melhoria da qualidade enfrentam ainda mais dificuldades devido à falta de experiência e de habilidade dos funcionários com métodos estatísticos mais complexos, uma vez que o custo para manter especialistas capazes de se dedicarem somente à melhoria de processos é muito elevado (CAGNAZZO E TATICCHI, 2010; HUNG E SUNG, 2011).

Tal realidade é muito evidente no setor de laticínios que, embora seja o terceiro maior da indústria de alimentos em termos de faturamento, é constituído basicamente por empresas de pequeno e médio porte (ABIA, 2017; IBGE, 2017b). Neste contexto, muitos laticínios acabam apresentando um desempenho abaixo do esperado o que, segundo Lima (2015), pode estar relacionado à baixa integração das empresas com instituições de ensino, pesquisa e extensão, decorrendo no uso de conhecimentos empíricos, em detrimento de informações técnico-científicas.

Além disso, nas indústrias alimentícias, principalmente as de pequeno e médio porte, a percepção do termo qualidade, por parte dos responsáveis pela produção de alimentos, é muito mais voltada para a garantia da segurança e higiene dos produtos alimentícios, com foco na saúde do consumidor, do que para a melhoria de processos e produtos, aumento da rentabilidade e eficiência operacional (DORA E GELLYNCK, 2015a). De um modo geral, a associação do termo qualidade à higiene e segurança alimentar dos produtos é uma tendência ainda mais dominante no setor de lácteos, uma vez que o leite, sua principal matéria-prima, é altamente perecível e possui uma composição muito variável em função da alimentação e raça do animal produtor, sazonalidade, grau de higiene durante a retirada do leite, dentre outros aspectos (SKEIE, 2010).

Evidentemente, a qualidade do leite vai afetar de forma direta a segurança alimentar e qualidade do produto final, todavia ela também exerce grande influência no rendimento do processo produtivo, fator chave na economia e rentabilidade das indústrias lácteas (EMMONS *et al.*, 1990; MURPHY *et al.*, 2016). Dentre os diversos produtos lácteos, o queijo se destaca como um dos mais consumidos, sendo responsável pelo consumo de quase 35% do leite mundialmente produzido (BANKS, 2007). A elevada quantidade de leite direcionada à fabricação de queijos se deve, não só à ampla variedade deste produto ao longo do mundo todo, mas também ao grande volume de leite gasto no seu processo de fabricação, uma vez que ele consiste na concentração dos componentes do leite, tais como proteína e gordura, os quais são constituintes essenciais na determinação da eficiência e do rendimento do processo global.

Embora a qualidade do leite tenha um papel importante no rendimento do processo de fabricação de queijos, existem fatores relacionados às condições de processamento que também podem impactar este indicador de produtividade (CECCHINATO *et al.*, 2013). Em se tratando de queijos do tipo *pasta-filata*, como a mussarela, por exemplo, os parâmetros de processo podem exercer influência ainda mais relevante no rendimento, uma vez que, além das etapas de produção comum às demais variedades de queijo, eles também passam por um processo de estiramento e aquecimento da massa chamado filagem que, se não for otimizado, pode acabar contribuindo para o aumento da perda de gordura e de outros nutrientes decorrendo em um menor rendimento global.

De acordo com Banks (2007), existem diversas formas de aumentar o rendimento do processo de produção de queijos, entretanto a maximização deste indicador de produtividade só é rentável se o custo para implementar novas tecnologias e procedimentos for economicamente viável e trazer ganhos significativos. Neste sentido, antes de pensar em investir em novos equipamentos, é interessante buscar o aumento do rendimento através da

melhoria do processo nas suas condições atuais; o que pode ser feito por meio da investigação dos parâmetros de processo que impactam neste indicador de produtividade, através do uso de métodos estatísticos.

Um método amplamente utilizado na melhoria de processos é o planejamento de experimentos, tal como a Metodologia de Superfície de Resposta (do inglês, *Response Surface Methodology* - RSM), que consiste em um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas na modelagem e análise de problemas em que se deseja otimizar uma resposta de interesse influenciada por diversas variáveis de entrada do processo (MONTGOMERY E RUNGER, 2011; MONTGOMERY, 2013).

De um modo geral, os processos de manufatura, tal como o de produção de alimentos, são multivariados, ou seja, possuem duas ou mais características de interesse, geralmente com objetivos divergentes; portanto, nestes casos, faz-se necessário adotar métodos de otimização que sejam aptos a identificar os níveis dos parâmetros de processo capazes de otimizar todas as respostas de interesse simultaneamente ou, pelo menos, de fazer com que elas atinjam níveis satisfatórios (MYERS *et al.*, 2009).

Existem diversos métodos de otimização disponíveis na literatura, dentre eles destaca-se o *Desirability*, um dos primeiros desenvolvidos para otimizar problemas de múltiplas respostas, sendo amplamente difundido tanto na área acadêmica quanto industrial. Um método relativamente mais recente é o de Interseção Normal à Fronteira (do inglês, *Normal Boundary Intersection* – NBI), considerado mais eficiente em otimizações multiobjetivo, devido à sua capacidade de obter várias respostas ótimas para um mesmo problema de otimização. Nota-se que em otimizações na área alimentícia o *Desirability* é amplamente utilizado, entretanto, o número de trabalhos que utilizam NBI ainda é muito restrito.

Desta forma, o presente trabalho objetiva aumentar o rendimento de um processo industrial, em batelada, de fabricação de queijo mussarela, por meio da aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta para a modelagem das funções objetivo, seguida da otimização destes modelos por meio do emprego dos métodos *Desirability* e NBI.

1.2 Justificativa

A mussarela, além de ser um dos queijos do tipo *pasta-filata* mais populares, é também um dos mais consumidos no mundo e o seu sucesso se deve, basicamente, ao fato de ela ser apreciada tanto quando consumida diretamente, na sua forma fresca, quanto quando utilizada

como ingrediente em determinados tipos de alimentos, como nas pizzas, por exemplo (FRANCOLINO *et al.*, 2010; ANGELIS E GOBBETTI, 2016).

A engenharia envolvida na fabricação do queijo mussarela consiste de um conjunto de diversas operações unitárias de aquecimento, estiramento e amassamento da massa durante o processo de filagem, etapa tipicamente presente na fabricação de queijos do tipo *pasta-filata* (BÄHLER *et al.*, 2016). Apesar da complexidade envolvida no processamento de queijo mussarela, poucos trabalhos tem sido publicados com o enfoque na avaliação do impacto dos parâmetros de processo no rendimento e nas propriedades do produto (YU E GUNASEKARAN, 2005).

A fim de analisar como os trabalhos tem avaliado a relação entre parâmetros de entrada e o rendimento do processo de fabricação de queijos em geral e de mussarela, utilizando metodologia de superfície de resposta, foi realizada uma busca nas bases *Web of Science*, *Scopus* e *Science Direct* com os termos “*Response Surface Methodology*”, “*Cheese Yield*” e “*Mozzarella*”.

A partir do levantamento nas 3 bases, foram selecionados aqueles artigos que abordavam temas relacionados à melhoria ou modificação do processo de fabricação de queijo, conforme disposto na Tabela 1.1. Por meio dela, é possível perceber, que ainda existem poucos trabalhos que aplicam a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) para a condução de experimentos na fabricação de queijos, em geral e, quando se trata de queijo mussarela, especificamente, este número é ainda menor, uma vez que apenas um artigo foi encontrado.

Tabela 1.1. Artigos encontrados no levantamento bibliográfico, que aplicam Metodologia de Superfície de Resposta para experimentação em processo de fabricação de queijo.

Autor	Tipo de queijo
Rashid <i>et al.</i> (2017)	Ricota
Khetra <i>et al.</i> (2016)	Cheddar
Chavhan <i>et al.</i> (2015)	Mussarela processada
Guiama <i>et al.</i> (2014)	Coalhada
Farbod <i>et al.</i> (2014)	Feta
Fagan <i>et al.</i> (2007)	Coalhada
Gomes e Malcata (1998)	Queijo de cabra

Tal estudo, todavia, não aborda o processo de fabricação da mussarela tradicional, mas sim da *Processed Mozzarella* (Mussarela Processada), a qual é produzida a partir da mussarela

tradicional conjugada com sais emulsificantes, em vista de aumentar seu prazo de validade. Desta forma, o enfoque do trabalho foi em avaliar como a substituição parcial dos sais de cloreto por sais emulsificantes afetavam as propriedades sensoriais, texturizadas e funcionais do queijo mussarela processado, e não de como essas propriedades e o rendimento eram impactados pelo processo de filagem propriamente dito.

Além da busca nas bases científicas, durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram encontrados alguns trabalhos que objetivavam estabelecer relações entre os parâmetros do processo de filagem e o rendimento e propriedades do queijo mussarela (Quadro 1.1). Observa-se que nenhum dos trabalhos detalhou o delineamento experimental empregado, o que indica que a Metodologia de Superfície de Resposta não foi utilizada no planejamento experimental por nenhum dos autores. Além disso, também foi possível notar que nenhum dos trabalhos empregou algum método de otimização multi-objetivo, todos apenas sugeriram melhores combinações de parâmetros para cada uma das respostas separadamente.

Quadro 1.1. Trabalhos que avaliaram o impacto dos parâmetros de filagem nas propriedades do queijo e rendimento do processo.

Autor	Método de experimentação	Variáveis independentes avaliadas	Respostas avaliadas
Bähler et al. (2016)a	Não explicitado	Tempo de filagem Concentração de cloreto de cálcio	Composição Dureza Rendimento
Bähler <i>et al.</i> (2016)b	Não explicitado	Tempo de filagem Temperatura de filagem	Rendimento Composição
Ma <i>et al.</i> (2013)	Não explicitado	Velocidade de filagem Temperatura de filagem pH de drenagem do soro Ratio (ptn/gordura) no leite	Propriedades funcionais Microestrutura
Yu e Gunasekaran (2005)	Não explicitado	Velocidade do “parafuso” Temperatura de filagem	Composição Reologia Propriedades funcionais
Renda <i>et al.</i> (1997)	Não explicitado	Velocidade do “parafuso” Temperatura de filagem	Composição Propriedades funcionais Proteólise

Nota-se ainda que os trabalhos disponíveis na literatura são, em sua grande maioria, desenvolvidos em escala laboratorial, em pequenos volumes e sob condições totalmente controladas o que, de certa forma, não retrata a realidade vivida pelos laticínios de pequeno porte no Brasil.

Com o intuito de avaliar como os trabalhos tem aplicado a Metodologia de Superfície de Resposta combinada com algum método de otimização na produção de queijos em geral, uma nova busca foi feita com os termos “*Response Surface Methodology*”, “*Cheese*” e “*Desirability*”, onde foram encontrados um total de apenas 10 artigos, sendo que nenhum deles tratava do processamento de queijos do tipo *pasta-filata*. A mesma pesquisa foi feita substituindo-se o termo “*Desirability*” por “*Normal Boundary Intersection*” e, desta vez, nenhum trabalho foi encontrado.

Neste sentido, ressalta-se a singularidade deste trabalho, tendo em vista que ele aborda os parâmetros da etapa de filagem da fabricação de queijos do tipo *pasta-filata*, utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta conjugada com os métodos *Desirability* e NBI para a otimização de um processo de produção do queijo mussarela em um laticínio de pequeno porte, algo que, aparentemente, ainda não foi desenvolvido por nenhum trabalho disponível na literatura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Otimizar o processo de filagem de queijo *pasta-filata*, com o intuito de i) aumentar o seu rendimento baseado na recuperação de gordura do leite, e ii) padronizar o teor de umidade dos produtos.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Estudar e compreender como as variáveis volume de água e tempo de filagem, impactam na concentração de água dos queijos e no rendimento, em termos de recuperação de gordura do leite no queijo;
2. Comparar qual dos métodos, *Desirability* e NBI, apresenta melhor desempenho na otimização do processo de filagem;

3. Avaliar a viabilidade de se melhorar processos de produção de alimentos de indústrias de pequeno porte, por meio da aplicação de uma abordagem estruturada, baseada em técnica de planejamento de experimentos e métodos de otimização multi-objetivo.

1.4 Limitações

Levando em consideração que o objetivo principal do presente trabalho é otimizar um processo de fabricação de queijo mussarela em um laticínio de pequeno porte, os resultados que serão apresentados aqui estão delimitados por algumas características específicas desta pesquisa, as quais podem ser classificadas conforme:

- **O processo de fabricação:** existem diversos processos de fabricação de mussarela: manual e semi-automatizado, que são realizados em batelada e os contínuos, totalmente automatizados. Esta pesquisa aborda somente o processo de batelada, semi-automatizado, em que a etapa de filagem ocorre em um tacho aberto. Portanto, os resultados aqui obtidos não são necessariamente aplicáveis aos processos em que a etapa de filagem é realizada manualmente ou em um processo contínuo.
- **Os arranjos experimentais:** o planejamento e condução dos experimentos foram baseados no arranjo composto central (CCD), desta forma, os modelos matemáticos obtidos estão restritos aos comportamentos destes arranjos.
- **Os algoritmos de otimização:** o presente trabalho se utilizou do algoritmo de otimização disponível no *software* Minitab® (versão 17) para o método *Desirability*, bem como o algoritmo GRG, disponível no pacote de suplementos do Microsoft Excel, versão 2013, para a otimização pelo método de Interseção Normal à Fronteira (*Normal Boundary Intersection* - NBI). Sendo assim, a identificação dos pontos ótimos apresentados é dependente do desempenho destas ferramentas estatísticas.

1.5 Estrutura do trabalho

Com o intuito de atender aos objetivos propostos, o presente trabalho é dividido em 5 capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução geral do trabalho por meio da contextualização do tema, justificativa e detalhamento do objetivo geral e objetivos específicos que se deseja alcançar.

No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica contendo todo o detalhamento do

embasamento bibliográfico utilizado na condução deste estudo. Desta forma, em um primeiro momento são abordados os aspectos relacionados ao processo de fabricação e rendimento de queijos do tipo *pasta-filata*, tomando-se como exemplo o processamento da mussarela. Em um segundo momento, são apresentados os conceitos relacionados à modelagem e análise de dados de processo e aos métodos de otimização empregados.

Em seguida, no capítulo 3, é apresentada a classificação desta pesquisa científica, bem como o detalhamento do problema de pesquisa, objeto de estudo e procedimento experimental utilizado para a condução dos experimentos e coleta dos dados.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos, detalhando a modelagem e a análise das respostas do processo de fabricação de queijo mussarela, bem como a aplicação dos métodos de otimização para a identificação do valor ótimo de cada parâmetro de entrada, em vista de otimizar as variáveis de interesse previamente estabelecidas.

Por fim, o capítulo 5 encerra o trabalho, apresentando as conclusões, contribuições desta pesquisa, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição e propriedades de queijo

De acordo com Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade de Queijos (BRASIL, 1996), o queijo é definido como todo produto fresco ou maturado obtido pela separação parcial do soro do leite ou leite reconstituído, ou ainda de soros lácteos coagulados pela ação física do coalho, enzimas, bactérias e ácido orgânico. Os queijos podem ou não serem adicionados de condimentos ou especiarias, aromatizantes ou matérias corantes, mas a sua base deve, impreterivelmente, ser de origem láctea, sendo que qualquer aditivo precisa ser apto ao consumo humano.

Fox *et al.* (2000) complementam ainda que queijo é o nome genérico dado ao grupo de produtos fermentados produzidos a base de leite, que apresenta uma grande diversidade de texturas, sabores e formas ao longo de todo o mundo.

Os queijos frescos são aqueles que podem ser consumidos logo após terem sido fabricados, já os queijos maturados necessitam sofrer reações bioquímicas ou trocas físicas para atingir as características desejáveis de consumo (BRASIL, 1996). Eles podem ser classificados tanto em relação ao seu teor de umidade quanto ao teor de gordura, conforme detalhado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Classificação dos tipos de queijo quanto ao teor de gordura e de umidade (BRASIL, 1996).

Classificação	Teor de Umidade (%)	Classificação	Teor de Gordura (%)
Baixa	≤ 35,9	Extragordo	≥ 60
Média	36,0 a 45,9	Gordo	45,0 a 59,9
Alta	46,0 a 54,9	Semigordo	25,0 a 44,9
Muito alta	≥ 55,0	Magros	10,0 a 24,9
		Desnatados	<10

O queijo é um produto mundialmente popular, o que se justifica tanto pela imagem saudável e positiva associada a ele, quanto à grande variedade disponível no mundo todo. Embora seja um produto muito rico em nutrientes, sua composição nutricional pode variar conforme o tipo e qualidade de leite utilizado (espécie, raça, estágio de lactação e teor de gordura) ou ainda em função dos processos de fabricação e maturação aos quais eles são submetidos (FOX *et al.*, 2000; SKEIE, 2010).

Todas as variedades de queijo precisam passar pela etapa de coagulação, a qual é responsável pela transformação do leite em coalhada, um gel constituído, basicamente, por

caseína (proteína insolúvel do leite), gordura, água e uma pequena quantidade de lactose e vitaminas. Este processo de transformação do leite cru em coalhada está representado, de maneira simplificada, na Figura 2.1.

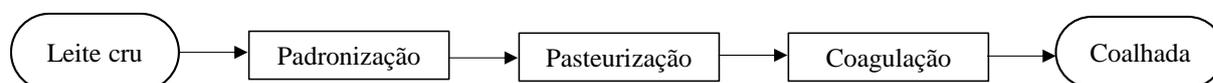


Figura 2.1. Fluxograma de fabricação do queijo até a etapa de formação da coalhada. Adaptado de Fox *et al.* (2000).

A etapa de padronização é responsável por padronizar o leite em termos do seu teor de gordura; na pasteurização é feito o tratamento térmico do leite e por fim, na coagulação, tem-se a formação da coalhada. Vale ressaltar que existem diferentes métodos para a coagulação do leite, tal como a coagulação ácida ou ácida conjugada com aquecimento, por concentração (cristalização) e por fim, a coagulação por meio da adição de coalho, que é o método mais comumente empregado no processamento de queijos (FOX *et al.*, 2000).

2.2 Queijo mussarela

2.2.1 Definição

A mussarela, um dos queijos mais consumidos em todo o mundo, é uma variedade de queijo suave não maturado, originalmente fabricado na Itália através do processamento de leite de búfala, o que lhe dava uma característica esbranquiçada, com superfície brilhante e textura macia (CITRO, 1981; FRANCOLINO *et al.*, 2010). Posteriormente, outros países, como Brasil e Estados Unidos, começaram a fabricar este queijo e, por conveniência, passaram a adaptar seus processos de fabricação, substituindo o leite de búfala pelo leite de vaca, o que levou a mussarela a apresentar uma coloração mais amarelada (GHOSH, SINGH E KANAWIJA, 1990).

De acordo com os padrões do *Codex Alimentarius* estabelecidos pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* – FAO), a mussarela é classificada em dois tipos: (1) mussarela com alta-umidade (*high-moisture*), que geralmente é produzida para consumo direto, na sua forma fresca e (2) mussarela de baixa umidade (*low-moisture*) também conhecida por *Pizza-Cheese*, uma vez que é comumente empregada como um ingrediente alimentício em pratos quentes, principalmente nas pizzas, o que contribuiu para um aumento considerável da sua produção em escala mundial, nas últimas décadas (CLARK *et al.*, 2009; ANGELI E GOBBETTI, 2016).

A mussarela de baixa umidade constitui-se de aproximadamente 47% de água, 24% de gordura e 21% de proteína e pH mais baixo (5,2-5,4); já a de alta umidade, como é de se esperar, apresenta maior concentração de água (50 a 60%), menor teor de gordura (~18%), 22% de proteína, em média, e pH variando entre 5,6 e 5,8 (KOSIKOWSKI, 1979; CLARK *et al.*, 2009; ANGELIS E GOBBETTI, 2016).

Nos Estados Unidos, o Departamento de Agricultura estabeleceu padrões de identidade para o queijo mussarela, classificando-o em quatro tipos diferentes, com base no conteúdo de umidade e no teor de gordura em extrato seco, conforme apresentado na Tabela 2.2. Em geral, os trabalhos científicos se baseiam nestes padrões para caracterizar os queijos mussarela utilizados como objeto de estudo.

Tabela 2.2. Classificação dos diferentes tipos de mussarela, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Gunasekaran e Ak (2003)

Classificação	Teor de umidade (%)	Gordura em extrato seco (%)
Queijo mussarela (<i>mozzarella cheese</i>)	> 52 e ≤ 60	≥ 45
Queijo mussarela de baixa umidade (<i>Low-moisture Mozzarella cheese</i>)	> 45 e ≤ 52	≥ 45
Queijo mussarela parcialmente desnatado (<i>Part-skim Mozzarella cheese</i>)	> 52 e ≤ 60,0	≥ 30 e < 45
Queijo mussarela parcialmente desnatado de baixa umidade (<i>Low-moisture, part-skim Mozzarella cheese</i>)	> 45 e ≤ 52	≥ 30 e < 45

Vale ressaltar que o teor de gordura em extrato seco é dado pela razão entre a massa total de matéria gorda (gordura) presente no queijo e a massa seca total, a qual corresponde à massa total do produto menos a água, conforme descrito na Equação (2.1).

$$GES (\%) = \frac{MG}{(M_Q - U)} \quad (2.1)$$

- Onde:
- MG : Massa total de matéria gorda presente no queijo
 - M_Q : Massa total do queijo
 - U : Quantidade de água (umidade) do queijo
 - GES : Teor de gordura em extrato seco

Já no Brasil, a classificação do queijo mussarela é baseada no Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade para Queijos (BRASIL, 1996). De acordo com este regulamento, o queijo mussarela pode ser classificado como de média, alta ou muito alta umidade e extra gordo, gordo e semigordo, conforme classificação disposta na Tabela 2.1, devendo sempre obedecer aos requisitos físico-químicos descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Requisitos físico-químicos do queijo mussarela.

Requisitos	Mínimo	Máximo
Teor de Umidade (%)	-	60,0
Teor de Matéria Gorda ¹ em Extrato Seco ² (%)	35,0	-

Nota-se assim que a classificação generalista quanto ao teor de umidade de queijos no Brasil não é condizente com a classificação americana específica para queijo mussarela, uma vez que ela considera como mussarela de baixa umidade aquelas que apresentam teores acima de 45 e até 52% de água. Em contrapartida, a legislação brasileira define como queijos de alta umidade aqueles que possuem concentração de água variando entre 46 e 54,9%, sendo classificados como de baixa umidade os que possuem teor igual ou menor que 35,9% de água.

Além da classificação, o Regulamento Técnico de Identidade e Qualidade para Queijos também fornece a definição do queijo Mussarela (Muzzarella ou Mozzarella), o qual é definido como aquele que é obtido pela filagem de uma massa acidificada, a qual é previamente produzida por meio da coagulação do leite através da ação de coalho e/ou outras enzimas coagulantes apropriadas, completada ou não pela ação de bactérias específicas.

Segundo Kosikowski (1982), filagem é o nome dado à principal etapa do processamento de queijos do tipo *pasta-filata*, que consiste no cozimento e estiramento da coalhada ácida em água quente, com o objetivo químico de transformar cálcio coloidal (presente na massa) em cálcio solúvel.

Em geral, os queijos da variedade *pasta-filata*, termo italiano que significa “estiramento da coalhada”, tem suas coalhadas aquecidas em água quente até que elas atinjam um estado fundido moldável e são amassadas até que alcancem uma textura adequada, podendo adquirir diversos formatos diferentes (YU E GUNASEKARAN, 2005; ANGELIS E GOBBETTI, 2016). Segundo Angelis e Gobbetti (2016) e Fox *et al.* (2000), um dos queijos do tipo *pasta-filata* mais populares é a mussarela.

O processo de filagem transforma a matriz de paracaseína tridimensional amorfa da coalhada em uma estrutura orientada e laminada, constituída por fibras de proteínas alinhadas paralelamente e separadas por longos canais, que retêm gordura e água em seu interior, conferindo características estruturais e de textura bem peculiares à esta classe de queijo, conforme representado no esquema da Figura 2.2 (MCMAHON *et al.*, 1999; FOX *et al.*, 2000; JOSHI *et al.*, 2003; YU; GUNASEKARAN, 2005; ANGELIS E GOBBETTI, 2016).

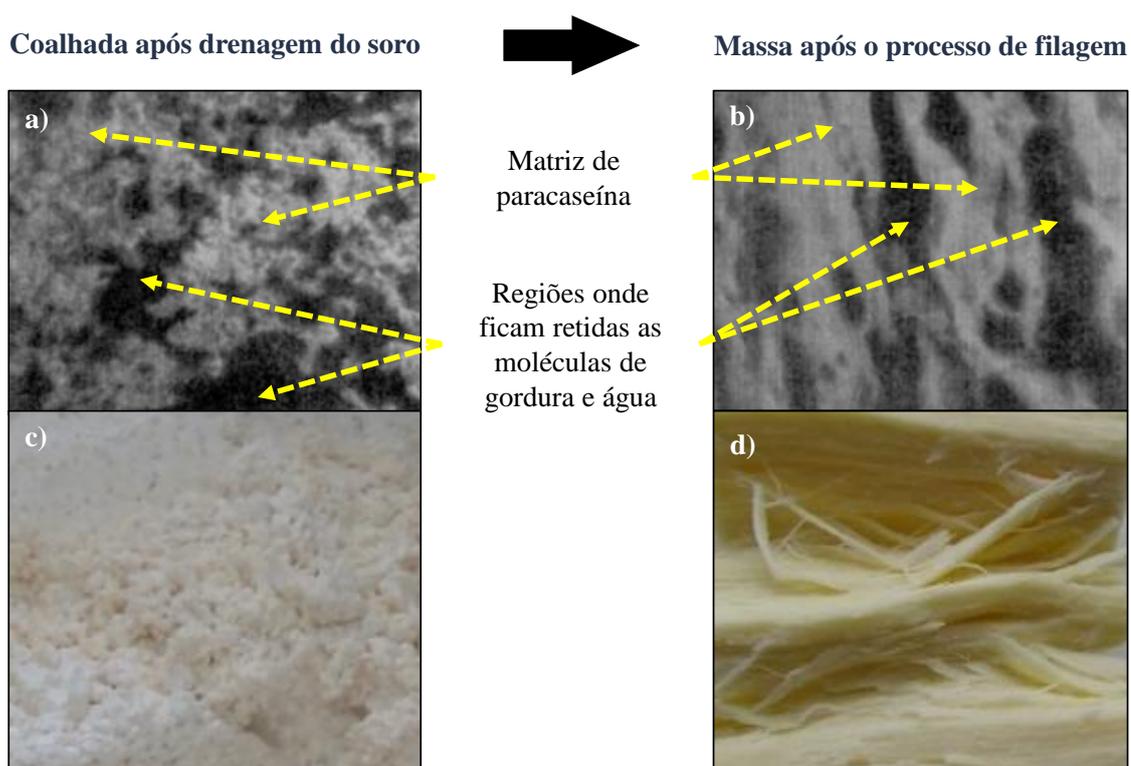


Figura 2.2. Esquema ilustrativo da mudança estrutural que ocorre na matriz de paracaseína em decorrência do processo de filagem a) Micrografia eletrônica da coalhada após drenagem do soro (FOX *et al.*, 2000); b) Micrografia eletrônica da massa após processo de filagem (FOX *et al.*, 2000); c) Imagem da coalhada após drenagem do soro; d) Imagem das “fibras” do queijo mussarela.

Segundo Angelis e Gobbetti (2016), a conformação molecular da coalhada decorrente da filagem dá origem a características funcionais importantes, tanto para as mussarelas de alta umidade quanto às de baixa. A mussarela de alta umidade, por exemplo, a qual é geralmente moldada em formato de uma bola, possui uma textura macia e ligeiramente elástica, com uma superfície que pode ser facilmente removida em camadas, assim como se descasca uma cebola. Já a mussarela de baixa umidade é extremamente elástica e se descasca com facilidade em camadas ao longo do eixo paralelo às fibras de proteína, ou seja, ela desfia como um fio de

tecido, o que lhe proporciona uma boa capacidade de derretimento, tornando-a um excelente aperitivo e ingrediente para pratos quentes, em especial as pizzas (ANGELIS E GOBBETTI, 2016).

Embora existam diferentes formas de produzir o queijo mussarela, em função dos ingredientes que são utilizados (cultura *starter*, cloreto de cálcio, tipo de coágulo) ou ainda dos equipamentos utilizados, isto é, sistemas automatizados, semi-automatizados ou manuais, o fluxograma geral do processamento de queijo mussarela consiste, basicamente nas etapas descritas na Figura 2.3.

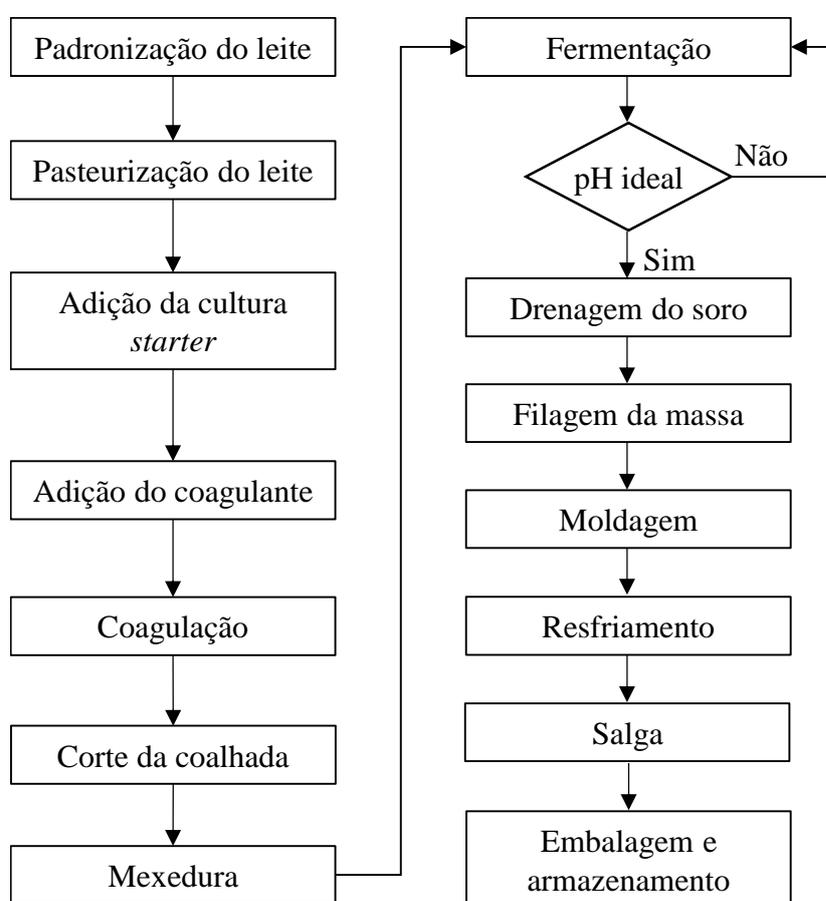


Figura 2.3. Fluxograma geral do processamento de queijo mussarela. Adaptado de Fox *et al.* (2000) e Silva (2005).

2.2.1 Processo de filagem

Como detalhado anteriormente, todos os queijos do tipo *pasta-filata*, assim como a mussarela, apresentam em seu processo de fabricação uma etapa específica denominada filagem, a qual é responsável por aportar características especiais à esta classe de queijo, como por exemplo, boa elasticidade e boa capacidade de derretimento.

O processamento do queijo mussarela pode acontecer de dois modos: contínuo, típico de grandes indústrias ou por batelada, muito comum em laticínios de pequeno porte. Em geral, quando os processos são contínuos, na etapa de filagem a coalhada é esticada e amassada em um misturador fechado com dois parafusos, o que favorece a extrusão da massa e um maior controle de vazão e temperatura. Já em processos por batelada, o estiramento da massa é feito manualmente em um tanque ou de forma semi-automatizada em um tacho encamisado aberto, dotado de dois garfos encaixados, um fixo e outro giratório com reversão, o que promove o estiramento da massa, sob um menor controle, uma vez que a temperatura é monitorada manualmente pela inserção de vapor na camisa do tacho e, por isso, dificilmente é mantida constante ao longo do processo.

De uma perspectiva de engenharia de processamento de alimentos, a fabricação de queijos do tipo *pasta-filata* é desafiadora, uma vez que este processo consiste de uma diversidade de operações unitárias de aquecimento, amassamento e mistura de uma complexa matriz coloidal composta por proteína, gordura e soro, também conhecida como coalhada (BÄHLER *et al.*, 2016). Apesar da complexidade deste processo, segundo Yu e Gunasekaran (2005), tem-se publicado poucas pesquisas voltadas para a avaliação do impacto dos parâmetros de processo de queijos do tipo *pasta-filata* nas propriedades do produto final, como por exemplo composição e funcionalidade do queijo ou ainda do rendimento do processo global.

De acordo com Citro (2010), existem diversos fatores que podem influenciar especificamente a etapa de filagem, os quais podem estar relacionados tanto à composição do leite, a qual varia em função da raça produtora (leite de búfala ou de vaca) ou ainda em função de alguns parâmetros do processo, como o pH da coalhada e o tempo de filagem, por exemplo. Nos tópicos a seguir, serão abordados, de forma mais detalhada, alguns dos aspectos referentes aos parâmetros de processo, que estão intimamente relacionados à etapa de filagem.

2.2.1.1 Temperatura da água e massa

Conforme afirma Citro (2010), a filagem é uma das etapas mais delicadas do processamento do queijo mussarela e, embora ela seja crítica, segundo Yu e Gunasekaran (2005) as relações entre as condições operacionais de aquecimento-estiramento e as propriedades funcionais da mussarela ainda não estão bem esclarecidas.

Sabe-se que o processo de amassar e esticar a coalhada ocorre em água quente, porém ainda não foi estabelecida uma padronização do valor da temperatura da água utilizada; diversos autores sugerem temperaturas diferentes, que variam dentro de uma faixa considerável, de 55 a

88 °C, conforme exposto na Tabela 2.4. Ainda na mesma tabela, é possível verificar que também não há um valor estabelecido para a temperatura da massa da coalhada durante e/ou ao final da etapa de filagem.

Tabela 2.4. Faixas de temperatura da massa e da água durante a etapa de filagem encontradas na literatura.

Autor	Temperatura da água	Temperatura da massa
Bähler <i>et al.</i> (2016)	55 – 80 °C	-
Ma <i>et al.</i> (2013)	58 °C	55,3 – 70,4 °C
Banville <i>et al.</i> (2013)	65 °C	-
Jana e Mandal (2011)	60 - 85 °C	50 - 65 °C
Citro (2010)	75 - 85 °C	40 - 50 °C
Francolino <i>et al.</i> (2010)	88 °C	-
Zisu e Shah (2007)	75 °C	-
Silva (2005)	80 - 85 °C	-
Yu e Gunasekaran (2005)	55 - 72 °C	-
Pizaia <i>et al.</i> (2003)	80 °C	-
Shakeel-Ur-Rehman <i>et al.</i> (2003)	82,3 °C	-
Guinee <i>et al.</i> (2002)	-	58,1 °C
Fox <i>et al.</i> (2000)	78 °C	58 - 60 °C
Renda <i>et al.</i> (1997)	65 - 85 °C	50 - 65 °C
Barbano <i>et al.</i> (1994)	57 °C	-

De acordo com Yu e Gunasekaran (2005), a temperatura durante a etapa de filagem tem uma influência significativa na composição e nas propriedades funcionais da mussarela. Segundo os mesmos autores, é importante que a temperatura seja bem ajustada para evitar a destruição da microestrutura do queijo, o que pode afetar diretamente no rendimento do processo.

2.2.1.2 pH da massa

Outro parâmetro importante no processo de fabricação de mussarela, que está intimamente relacionado ao processo de filagem é o pH da coalhada antes de ela ser filada. Quando a massa é filada antes da hora, isto é, com baixa acidez (pH > 5,4), ela não consegue plastificar corretamente, requerendo mais água e mais tempo para ser processada, o que leva à produção de um queijo mais firme, de consistência áspera e superfície irregular, com menor teor de gordura (FOX *et al.* 2000; CITRO, 2010). Da mesma forma, quando a coalhada é filada mais ácida do que o ideal, produz-se um queijo com massa mais granular, compacto e com baixo teor de gordura (CITRO, 2010). Em ambos os casos, há uma redução no rendimento do processo e na qualidade da mussarela fabricada.

Moynihan *et al.* (2016) reiteram que a massa da coalhada precisa atingir um determinado valor de pH durante a fermentação, isto é, antes da drenagem do soro, para que na etapa de filagem ela consiga estar em um estado suficientemente flexível para sofrer as operações de amassamento e estiramento. Citro (2010) complementa ainda que, se não for atingido o pH ideal para a filagem (ou fiação) da coalhada, ela perde sua capacidade de alongamento máximo desejável o que, conseqüentemente, leva à redução da incorporação de gordura (habilidade de emulsão), acarretando numa perda adicional de gordura e num menor rendimento do processo de fabricação de mussarela.

Diversos trabalhos na literatura discorrem sobre os valores de pH ideais para que a massa seja filada de forma a se obter um maior rendimento do processo e melhor qualidade do produto final, considerando o método de acidificação da massa tradicional, ou seja, pela fermentação da massa por meio da ação de bactérias lácteas.

Tabela 2.5. Valores de pH da massa antes da filagem, encontrados na literatura.

Autor	pH
Sales <i>et al.</i> (2017)	4,79 a 5,4
Moynihan <i>et al.</i> (2016)	5,2
Banville <i>et al.</i> (2013)	5,2
Ma <i>et al.</i> (2013)	5,3
Citro (2010)	4,9 a 5,1*
Francolino <i>et al.</i> (2010)	5,82
Zisu e Shah (2007)	5,2
Silva (2005)	5,2*
Shakeel-Ur-Rehman <i>et al.</i> (2003)	5,3
Pizaia <i>et al.</i> (2003)	4,9
Guinee <i>et al.</i> (2002)	5,14
Fox <i>et al.</i> (2000)	5,15*
Barbano <i>et al.</i> (1994)	5,3
YUN <i>et al.</i> (1993)	5,25

*Valores de pH da massa sugeridos pelos autores como ideais para a filagem (não foram obtidos experimentalmente).

A Tabela 2.5 apresenta um levantamento das faixas de pH sugeridas e/ou utilizadas ao longo do desenvolvimento de diversos trabalhos científicos, disponíveis na literatura, na qual é

possível notar que, embora haja variação no valor de pH proposto por diferentes autores, a média dele gira em torno de 5,2.

2.2.1.3 Tempo

Segundo Citro (2010), o tempo é um fator que influencia diretamente a filagem da massa, devendo variar, no máximo, ente 5 e 10 minutos. Jana e Mandal (2011), por sua vez, em um trabalho de revisão sobre produção e qualidade de queijo mussarela, sugerem que, a uma temperatura da água variando de 80 a 85 °C, o tempo gasto para a filagem da massa acidificada deve ser de 2 a 3 minutos.

Embora estes autores sugiram tempos para a etapa de filagem, ambos não detalham o porquê destes e nem especificam qual tipo de processo utilizado, ou seja, se é contínuo ou por batelada; portanto torna-se inviável inferir à qual variedade de equipamento os autores fazem referência, se é a um misturador mecânico de dois parafusos, ou à uma filadeira do tipo tacho aberto ou ainda se o processo é executado manualmente, por exemplo. Levando em consideração que a mudança de equipamento implica diretamente nos parâmetros de processo, muito provavelmente, quando eles forem diferentes, os tempos dispendidos também o serão.

Apesar de o tempo ser um fator muito importante na etapa de filagem, segundo Bähler *et al.* (2016), ainda existem poucos estudos focados em avaliar o impacto do tempo de estiramento da coalhada isoladamente. Além disso, a literatura apresenta uma diversidade de trabalhos que não detalharam a duração desta etapa em seus estudos (KINDSTEDTZ, 1993; PIZAIA *et al.*, 2003; SHAKEEL-UR-REHMAN *et al.*, 2003; SILVA, 2005; MA *et al.*, 2013). Em contrapartida, existem trabalhos que sugerem tempos de filagem mais adequados, entretanto ainda há uma disparidade nos intervalos de tempo utilizados ou propostos por cada autor. Além disso, alguns dos trabalhos encontrados não detalham o equipamento utilizado na etapa de estiramento da coalhada.

Existem ainda, trabalhos que não especificam o tempo gasto na etapa de filagem, mas sim a taxa com que a coalhada (ou massa acidificada) entra na misturadora, uma vez que se tratam de processos contínuos. Renda *et al.* (1997), por exemplo, utilizaram uma taxa de inserção da massa acidificada de 2kg/min, com circulação de água à uma temperatura de 57 °C. Yu e Gunasekaran (2005) utilizaram a mesma taxa de entrada da coalhada na misturadora, porém com temperaturas variando entre 55 °C e 72 °C.

Em um estudo desenvolvido por Guinee *et al.* (2002), no qual foi utilizada uma máquina misturadora automática (em que a etapa de filagem é acoplada à moldagem), foi despendido

um tempo total de 30 minutos para filar e moldar peças de mussarela de 2-3 kg, produzidas a partir de uma coalhada obtida da coagulação de 450 litros de leite. Banville *et al.* (2013), por sua vez, produziram peças de 2-3 kg de mussarela em uma filadeira de escala piloto, gastando, em média, 5 minutos para filar a massa.

Moynihan *et al.* (2016) desenvolveram um trabalho utilizando bateladas de 272 kg de leite, em que ele gastou 7 minutos para filar a massa acidificada em uma misturadora de escala piloto específica para a fabricação de queijos do tipo *pasta-filata*. Da mesma forma, Zisu e Shah (2007) fizeram experimentos em escala laboratorial utilizando 20-30 litros de leite por batelada, em que gastaram 7 minutos para filar a massa, entretanto os autores não especificaram a forma com que foi conduzida esta etapa (manual ou automatizada), nem o equipamento utilizado. Já Francolino *et al.* (2010), em um experimento de batelada desenvolvido em escala laboratorial, despenderam uma média de 5 ($\pm 0,5$) minutos para filar uma coalhada produzida a partir de 200 kg de leite.

No trabalho desenvolvido por Sales *et al.* (2017), que se objetivava identificar a relação entre o rendimento do processo de fabricação de mussarela e diversos parâmetros de processo, gastou-se, em média, aproximadamente 45 minutos para filar toda a coalhada produzida a partir de uma média de 738 litros de leite. Ainda neste trabalho, foi identificado que o tempo despendido no processo de filagem do queijo era um parâmetro significativo no rendimento, todavia os autores não estabeleceram qual seria o tempo ótimo de filagem capaz de maximizar esse indicador de produtividade.

Bähler *et al.* (2016) por sua vez, buscaram avaliar a influência de 3 temperaturas (55, 60 e 70 °C) e tempos diferentes (3, 7 e 10 minutos) em um processo de fabricação de queijo do tipo *pasta-filata* em escala laboratorial, com objetivo de estabelecer relações ótimas de tempo e temperatura. Os autores identificaram que, para uma mesma temperatura, a perda de água e de gordura da massa ao longo da etapa de estiramento não apresentaram diferenças significativas entre os tempos 7 e 10 minutos. No que tange ao rendimento em termos de recuperação de sólidos, este se mostrou mais elevado quanto mais baixa a temperatura (55 °C) e menor o tempo de filagem (3 minutos).

Finalmente, nota-se que a maioria dos trabalhos ou não fundamenta o porquê da escolha do tempo de filagem durante o desenvolvimento dos experimentos ou não busca avaliar a influência deste parâmetro no rendimento do processo, levando à inferência de que a maioria dos autores define os tempos de filagem com base no manual dos equipamentos ou ainda em função de técnicas qualitativas de análise da massa, isto é, métodos visuais de se avaliar se ela já se apresenta filada ou não. Além disso, ambos os autores que buscaram avaliar a influência

do tempo de filagem no rendimento, concluíram que este parâmetro exerce influência significativa no rendimento, embora não tenham sugerido uma relação ótima de tempo (SALES *et al.*, 2017; BÄHLER *et al.*, 2016).

Desta forma, evidencia-se a necessidade de se desenvolver estudos mais aprofundados que estabeleçam relações ótimas entre tempo de filagem e saídas do processo como, por exemplo, o rendimento em termos de recuperação de gordura.

2.2.1.4 Volume de água

Embora muitos trabalhos façam referência à temperatura ideal da água durante a etapa de filagem, conforme levantamento feito na Tabela 2.4, ainda são escassos os estudos que relacionam a quantidade de água utilizada nessa fase do processamento de queijo mussarela. Uma das possíveis explicações para isto pode ser o fato de alguns trabalhos utilizarem métodos contínuos de estiramento da coalhada, como os experimentos feitos por YUN *et al.* (1993), Renda *et al.* (1997) e Yu e Gunasekaran (2005), os quais utilizaram sistemas de aquecimento baseados na circulação de água quente.

Todavia, ainda se encontram trabalhos recentes na literatura que utilizam métodos descontínuos de produção mas não detalham a relação de volume de água e quantidade de coalhada ácida na etapa de filagem (MOYNIHAN *et al.*, 2016; SALES *et al.*, 2017).

Em geral, quando os trabalhos tratam do volume de água utilizado no processo de filagem, eles descrevem a quantidade de água com base na sua relação com a quantidade de coalhada. Exemplo disso é o trabalho desenvolvido por Zisu e Shah (2007), que utilizaram um volume de água correspondente à 2,5 vezes o peso da coalhada. Existem ainda trabalhos desenvolvidos em escala laboratorial que optam por estabelecer um *ratio*, isto é, uma fração do volume de água em relação à massa da coalhada como, por exemplo, Guinee *et al.* (2002) que utilizaram *ratio*=1,4, Francolino *et al.* (2010) que consideraram *ratio*=1,2; ou ainda Pizaia *et al.* (2003), que empregaram um *ratio*=3,0. Bähler *et al.* (2016), por sua vez utilizaram um *ratio* correspondente à 1 (um), justificando esta escolha pela redução da falta de uniformidade do processo de filagem, já que o equipamento utilizado na condução dos seus experimentos apresentava suas lâminas de estiramento da coalhada concentradas na parte inferior.

O que se pode perceber, através destes trabalhos, é que ainda há uma disparidade quanto à relação de quantidade de água utilizada para filar uma determinada medida de coalhada. Da mesma forma, nota-se ainda que, com exceção de Bähler *et al.* (2016), todos os trabalhos encontrados, ao estabelecerem estas relações, não detalharam os motivos pelos quais

escolheram tais volumes. Desta forma, este levantamento bibliográfico aponta para uma lacuna científica: ainda é escassa a parcela de trabalhos que abordam o volume de água utilizado na filagem, e como este pode impactar tanto na etapa de filagem quanto no processo global, isto é, no rendimento ou ainda nas características funcionais do produto final.

2.3 Rendimento do processo de fabricação de queijo

O processo de fabricação do queijo consiste na concentração dos componentes do leite, em especial, proteína e gordura, os quais são constituintes determinantes na eficiência e no rendimento do processo global (BANKS *et al.*, 1981). Uma vez que o rendimento é dado pela recuperação dos componentes sólidos do leite, ele também está intimamente relacionado à parcela de nutrientes que é perdida para o soro. Deste modo, o interesse pelo aumento do rendimento deste processo nos laticínios não é motivado só por questões econômicas, mas também ambientais, uma vez que o soro de leite, por ser rico em nutrientes, representa um potencial contaminante para cursos de água, quando descartado de maneira inadequada (MONTEIRO *et al.*, 2007).

De acordo com Sales *et al.* (2016), o rendimento da fabricação de produtos lácteos fornece uma medida da eficiência do leite utilizado no processo produtivo e pode ser usado tanto em condições industriais quanto experimentais. Banks (2007) e Cecchinato *et al.* (2013) complementam ainda que o rendimento do queijo representa a característica tecnológica mais importante do leite, porque o seu processo de fabricação utiliza uma vasta proporção do leite mundialmente produzido, correspondendo à mais de 35% do volume total de leite gerado no mundo todo. Somado a isso, tem-se o fato de que, no processo produtivo, para a fabricação de um quilograma de queijo são consumidos por volta de 8 a 10 litros de leite, dependendo da variedade produzida.

Justamente pela elevada quantidade de leite que é destinada e consumida durante a fabricação de queijos, que o rendimento deste processo representa um indicador altamente relevante nas indústrias de laticínios, sendo que a maximização do rendimento, juntamente com a otimização do conteúdo de umidade do queijo e da qualidade do produto final, tem se tornado cada vez mais importantes dentro da indústria láctea (BANKS, 2007; FAGAN *et al.*, 2007).

O rendimento é um indicador que pode fornecer evidências quanto à produtividade e a eficiência do processo, em termos práticos e objetivos, contribuindo para a identificação das causas das ineficiências do processo e, conseqüentemente, para a eliminação ou redução do efeito delas (BANKS, 2007; ABD EL-GAWAD E AHMED, 2011).

Além disso, o rendimento do queijo é uma medida que também pode ser utilizada para avaliar a efetividade de modificações nos parâmetros do processo, do uso de novos ingredientes ou ainda para apoiar as tomadas de decisão visando a melhoria da gestão (BANKS, 2007; SALES *et al.*, 2016). Banks (2007) complementa que, embora seja possível maximizar o rendimento do processo de fabricação de queijo por meio da implementação de novas tecnologias e equipamentos muitas vezes o ganho, em termos de rendimento do processo, não é economicamente viável. Neste sentido, ressalta-se que, antes de implementar novos equipamentos em uma linha de produção, os laticínios devem buscar pela melhoria de seus processos nas condições atuais.

Embora existam diversos autores que busquem desenvolver equações para a previsão do rendimento do processo de fabricação de queijos (EMMONS *et al.*, 1990; MELILLI *et al.*, 2002; ZENG *et al.*, 2007; EMMONS E MODLER, 2010), a equação mais conhecida e utilizada nas indústrias para o cálculo de rendimento do processo produtivo de queijos, em geral, é o rendimento atual (ou econômico), empregado para calcular os custos de produção com base no valor atual do litro de leite utilizado no processamento (FURTADO, 2005).

De acordo com Abd El-Gawad e Ahmed (2011), o rendimento atual é extremamente importante para as indústrias, pois quanto maior a quantidade de sólidos recuperados no processo, maior será a quantidade de queijo produzida e, conseqüentemente, os ganhos econômicos serão mais elevados. Segundo Banks (2007), a equação para o cálculo do rendimento econômico do queijo é baseada na relação entre o que sai do processo (queijo) e todos os componentes que entram: leite, *cultura starter* e sal, conforme descrito na Equação (2.2).

$$R_a = \frac{M_Q}{M_L + M_{CS} + M_S} \quad (2.2)$$

Em que,

- R_a : Rendimento atual (ou econômico);
- M_Q : Massa de queijo fabricada (kg);
- M_L : Massa de leite utilizado no processamento (kg);
- M_{CS} : Massa de *cultura starter*;
- M_S : Massa de sal.

Embora esta equação seja muito útil para se ter uma noção do rendimento do processo e seja comumente aplicada nas indústrias, ela nem sempre retrata o rendimento real, uma vez que

este é dependente de diversos fatores, tais como composição do leite utilizado (concentração de gordura e proteína), variedade e composição do queijo (teor de umidade, por exemplo) e taxa de perda de nutrientes da coalhada para o soro durante o processamento (BANKS, 2007; ABD EL-GAWAD E AHMED, 2011).

Neste sentido, uma alternativa é o cálculo do rendimento com base na porcentagem de nutrientes do leite recuperados no queijo, uma vez que quanto mais eles forem recuperados, maior será a quantidade de queijo produzida e, por conseguinte, mais elevado o rendimento. Alguns exemplos de trabalhos que basearam o rendimento do seu processo de fabricação de queijo na recuperação de nutrientes do leite são encontrados em: Verdier-metz *et al.* (2001), Shakeel-Ur-Rehman *et al.* (2003), Govindasamy-Lucey *et al.* (2007), Perrone *et al.*, (2010), Francolino *et al.* (2010), Cecchinato *et al.* (2013) e Margolies *et al.* (2017).

Sabendo-se que um dos nutrientes do leite mais importantes na produtividade do processo de fabricação de queijos é a gordura, o rendimento pode ser dado em função da recuperação deste nutriente. Para tal, deve-se levar em consideração a concentração da matéria-gorda na entrada e saída do processo, conforme descrito na Equação (2.3) (FOX *et al.*, 2000; BANKS, 2007).

$$\%Rec_{nut} = 100 \cdot \left[\frac{(M_Q) \cdot (C_{nutQ})}{(M_L) \cdot (C_{nutL} + C_S)} \right] \quad (2.3)$$

Em que,

- M_Q : Massa de queijo
- M_L :: Massa de leite
- C_{nutQ} : Concentração do nutriente no queijo
- C_{nutL} : Concentração do nutriente no leite
- C_S : Concentração do nutriente na cultura *starter*
- $\%R_{nut}$: Porcentagem do nutriente recuperado

2.3.1 Fatores que influenciam o rendimento

Durante a fabricação de queijo, existem diversos fatores que interagem entre si influenciando a composição da coalhada e, conseqüentemente, do produto final; alguns deles são facilmente manipulados, enquanto outros são mais difíceis de se controlar ou até mesmo impossíveis (FOX *et al.*, 2000). Estes fatores podem estar relacionados à composição e à qualidade do leite; aos parâmetros de processo, como tempo, temperatura, pH, tratamento

térmico e homogeneização do leite; bem como aos demais ingredientes adicionados ao longo do processamento, como o coágulo e a cultura *starter* (SHAKERIAN *et al.*, 2016).

Embora sejam diferentes, Gunasekaran e Ak (2003) afirmam que os fatores relacionados à composição do leite e aos parâmetros de processo não são independentes, eles possuem interações complexas entre si. Qualquer mudança de concentração de um dos constituintes do leite (teor de gordura, por exemplo), vai afetar sua composição global, isto é, o teor dos demais componentes. Além disso, as alterações nos processos de fabricação podem interagir com as mudanças da composição do leite, levando a um efeito combinado e complexo nas propriedades do queijo final.

Conforme detalhado por Fox *et al.* (2000), a composição química do leite, principalmente a concentração de caseína, gordura, cálcio e pH possui elevada influência em diversos aspectos da produção de queijos, tal como na capacidade de coagulação do coalho, na resistência do gel formado, na sinérese da coalhada ou ainda na composição do queijo e no rendimento do processo. Os autores afirmam ainda que é possível reduzir, mas não eliminar, a variabilidade dos principais componentes do leite, por meio da padronização deles. Tal afirmativa justifica o fato de a grande maioria dos laticínios padronizar o teor de gordura do leite antes da sua pasteurização, em processos de fabricação de queijo mussarela.

No que tange especificamente ao rendimento do processo de fabricação de queijo, alguns dos fatores que impactam diretamente neste indicador e que merecem destaque são: a composição do leite (concentração de proteína e gordura); fatores fisiológicos tais como a raça, estágio de lactação, idade do animal, mastite, contagem de células somáticas etc.; parâmetros e condições de processo como o pH e padronização do leite, tipo de cultura *starter* e coagulante utilizados, tratamento térmico, tempo de coagulação e firmeza da coalhada salga, perda de umidade durante a maturação etc. (BANKS, 2007; FAGAN *et al.*, 2007; ABD EL-GAWAD E AHMED, 2011; SHAKERIAN *et al.*, 2016; SALES *et al.*, 2016)

O leite é um produto que varia sazonalmente e regionalmente e, dentre os seus nutrientes, os que mais afetam o rendimento do processo de fabricação de queijo são a gordura e proteína, uma vez que quanto maior a quantidade de proteína e gordura no leite, maior será a parcela incorporada pelo queijo e, portanto, menor será o consumo de leite para a produção de uma determinada quantidade de queijo (BARBANO, 1987; VERDIER-METZ *et al.*, 2001; BANKS, 2007; FRANCOLINO *et al.*, 2010; SALES *et al.*, 2016).

Fagan *et al.* (2007), Cecchinato *et al.* (2013) e Sales *et al.* (2016), no entanto, sugerem que a porcentagem de recuperação dos nutrientes do leite no queijo não depende apenas da

concentração deles na matéria-prima, mas também de outros fatores tais como os parâmetros de processo, tipos de equipamentos e ingredientes utilizados.

Segundo Banks (2007), outro componente importante do leite que está intimamente relacionado ao rendimento do queijo é a água retida na coalhada, uma vez que, além de contribuir diretamente para o rendimento em termos de volume e massa, ela também colabora na solubilização de diversos componentes solúveis do soro, tais como proteínas e sais. Fagan *et al.* (2007) corroboram essa afirmativa em um trabalho onde ele conclui que os parâmetros de processo têm influência direta na quantidade de água que é retida na coalhada e, conseqüentemente no rendimento.

2.3.2 Rendimento do processo de fabricação de queijo mussarela

As perdas de gordura durante a fabricação de queijos do tipo *pasta-filata*, como a mussarela, são mais elevadas do que na produção de outras variedades de queijo, uma vez que, somada à perda de gordura ao longo da fabricação da coalhada, tem-se as perdas deste nutriente durante a etapa de filagem, que é fortemente influenciada pelas tecnologias de processo aplicadas (CITRO, 2010; FRANCOLINO *et al.*, 2010; BÄHLER *et al.*, 2016; MARGOLIES *et al.*, 2017). Bähler *et al.* (2016) complementam ainda que, o estiramento da coalhada contribui para sua sinérese, isto é, há uma perda de água da massa que, somada às perdas de gordura, implicam num menor rendimento do processo.

De acordo com Margolies *et al.* (2017), é possível obter uma porcentagem de recuperação de gordura na faixa de 85 a 90%, dependendo do tipo de tecnologia aplicada no processo, porém os trabalhos disponíveis na literatura retratam uma realidade, por vezes, controversa. Barbano *et al.* (1994), por exemplo, apresentaram uma recuperação de gordura próxima a 84% enquanto Banville *et al.* (2013) atingiram uma recuperação de gordura média de aproximadamente 89%. Já Shakeel-Ur-Rehman *et al.* (2003) obtiveram porcentagens de recuperação de matéria-gorda variando entre 77 e 86%. Francolino *et al.* (2010), por sua vez, alcançaram valores próximos a 71%, sugerindo que um rendimento mais elevado poderia ser obtido por meio da modificação de parâmetros da filagem.

A elevada variação na porcentagem de perda de gordura no processo de fabricação de queijo mussarela encontrada em diferentes trabalhos da literatura, bem como a relevância deste componente nas características do produto final, evidenciam que há uma necessidade de se compreender melhor como os parâmetros da etapa de filagem interagem entre si e impactam o rendimento do processo. Entretanto, ainda é limitado o número de trabalhos que avaliam o

impacto da filagem da coalhada e, mais especificamente, da perda de gordura que ocorre durante esta etapa no rendimento do processo total.

Renda *et al.* (1997), por exemplo, avaliaram a influência da velocidade de estiramento da coalhada nas características do queijo mussarela, identificando que velocidades mais elevadas provocaram perdas maiores de gordura e menor retenção de água. Yu e Gunasekaran (2005) investigaram a influência de tratamentos termomecânicos na composição e propriedades do queijo mussarela e concluíram que eles são significativos, sugerindo que a otimização destes parâmetros poderia aumentar o rendimento. Ma *et al.* (2013), também buscaram relacionar os parâmetros de processo com as propriedades do queijo mussarela e identificaram que, quando a filagem ocorria em temperaturas próximas à 68 °C, alcançava-se uma maior recuperação de gordura e um elevado teor de umidade o que, conseqüentemente, impactava num maior rendimento.

Sales *et al.* (2017), por sua vez, monitoraram a produção de queijo mussarela em uma indústria de laticínios durante 9 meses, identificando que, dentre outros fatores, o tempo da filagem impactava diretamente no rendimento do processo, entretanto ele não sugeriu qual seria o tempo ideal.

Pela revisão de literatura conduzida no presente trabalho foi possível chegar a duas conclusões importantes. A primeira delas é que nenhum dos trabalhos que buscaram estabelecer a relação de parâmetros de processo com o rendimento do processo de fabricação de mussarela detalhou seu delineamento experimental e/ou apresentou um arranjo baseado na Metodologia de Superfície de Resposta para a análise e modelagem dos seus dados. A segunda, é que nenhum deles buscou avaliar como o tempo e o volume de água utilizado na etapa da filagem interagem entre si e impactam no rendimento, em termos de recuperação de gordura e retenção de umidade no queijo mussarela. Desta forma, torna-se evidente a importância de se investigar a influência destes parâmetros de forma mais aprofundada.

2.4 Projeto e análise de experimentos

Observar um processo ou sistema durante a sua operação é uma parte muito importante na etapa de aprendizagem e compreensão de seu funcionamento. Entretanto, conforme afirma Montgomery (2013), para melhorá-lo é preciso entender as relações de causa e efeito dentro deste sistema, ou seja, é necessário realizar experimentos para avaliar como as mudanças nas variáveis de entrada do processo irão afetar as variáveis de saída.

Segundo Montgomery (2013), um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de alterações intencionais feitas nas variáveis de entrada (controláveis e incontroláveis) de um processo, com o intuito de observar e identificar o que está promovendo as mudanças nas variáveis de saída (Figura 2.4). Por meio da experimentação é possível determinar quais variáveis de entrada são responsáveis pelas alterações nas variáveis de saída e como elas interagem; a partir destas relações são desenvolvidos modelos matemáticos que podem ser utilizados para a melhoria de processo.

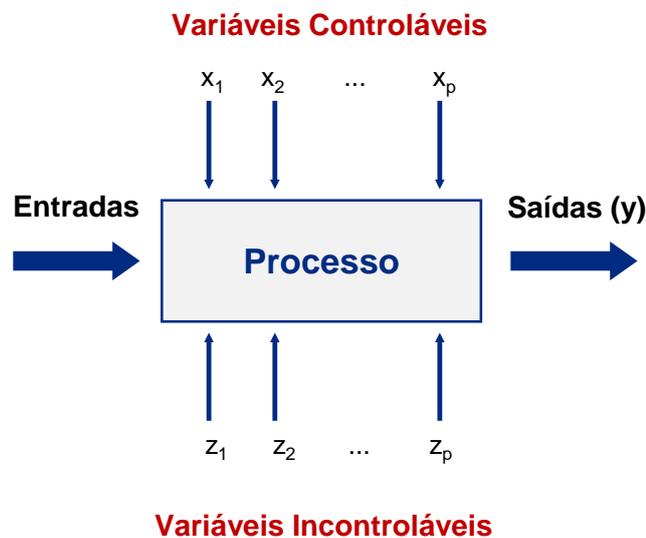


Figura 2.4. Representação de um modelo geral de processo. Adaptado de Montgomery (2013).

Os experimentos podem ser aplicados em uma diversidade de áreas com diferentes enfoques como por exemplo, melhoria de processo, desenvolvimento de novos processos ou na gestão, podendo conduzir a inúmeros benefícios, tais como: aumento do rendimento de processo, redução de variabilidade e custos, identificação dos parâmetros chave que impactam na performance do produto, dentre outros (MONTGOMERY, 2013).

Embora os experimentos variem conforme a área em que é aplicado, todos necessitam passar por uma etapa essencial onde são definidos os arranjos experimentais, conhecida como planejamento de experimentos (do inglês, *Design of Experiments* – DOE). Existem diversos tipos de arranjos experimentais, porém o presente trabalho dará enfoque no Arranjo Composto Central (CCD), largamente aplicado quando a Metodologia de Superfície de Resposta é utilizada.

2.4.1 Metodologia de Superfície de Resposta

Montgomery e Runger (2011) e Montgomery (2013) definem a Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology – RSM*) como um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizadas para modelar e analisar problemas em que se deseja otimizar respostas de interesse, as quais são influenciadas por diversas variáveis.

Graficamente, a superfície de resposta pode ser representada conforme a Figura 2.5, a qual exemplifica o relacionamento entre duas variáveis independentes (x_1 e x_2) e uma resposta esperada, $E(x)$. Ainda na mesma figura, está representado o gráfico de contorno, onde cada círculo representa uma resposta constante, ou seja, uma altura específica da superfície de resposta, desenhada no plano x_1, x_2 (MONTGOMERY, 2013).

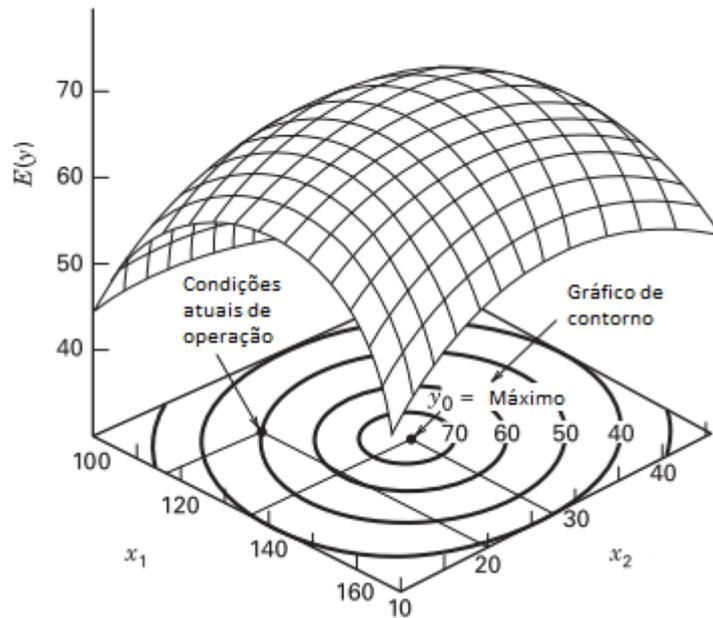


Figura 2.5. Exemplo de modelo tridimensional de superfície de resposta e gráfico de contorno para uma resposta $E(y)$ dada em função de duas variáveis independentes x_1, x_2 . Adaptado de Montgomery (2013).

Na grande maioria dos processos industriais, a relação entre as variáveis de entrada e de saída é desconhecida; sendo assim, para resolver problemas de RSM, o primeiro passo consiste em estabelecer uma aproximação adequada entre as variáveis independentes e dependentes a qual, normalmente, é descrita por polinômios de baixa ordem (MONTGOMERY, 2013). Nos casos em que a resposta é bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, o modelo mais adequado é o de primeira ordem, conforme descrito pela Equação (2.4).

$$y(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2.4)$$

Em que, $y(x)$: Resposta de interesse
 x_i : Variáveis independentes
 β_i : Coeficientes estimados pelo modelo
 k : Número de variáveis independentes
 ϵ : Erro experimental

Para problemas em que existe curvatura na relação entre as variáveis, equações polinomiais de ordem mais elevada são necessárias como, por exemplo, o modelo de segunda ordem descrito na Equação (2.5).

$$y(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i>j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.5)$$

Embora os modelos descritos acima sejam aplicáveis para quase todos os problemas de RSM, é pouco provável que os mesmos descrevam uma boa aproximação da relação entre as variáveis em todo o espaço amostral, porém, para uma região relativamente pequena, eles costumam funcionar muito bem (MONTGOMERY E RUNGER, 2011; MONTGOMERY, 2013).

Segundo Montgomery (2013) e Paiva (2006), o método dos mínimos quadrados ordinários (do inglês: *Ordinary Least Square – OLS*), é o mais utilizado na estimação dos coeficientes β do polinômio de superfícies de resposta. Tal relação e pode ser descrita de forma matricial, conforme Equação (2.6), onde \mathbf{X} é a matriz de fatores codificados e \mathbf{Y} o vetor de resposta.

$$\beta = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (2.6)$$

Em que \mathbf{X} é a matriz de variáveis de controle codificadas e \mathbf{Y} é a resposta de interesse.

Embora o OLS seja o método mais utilizado na estimação de coeficientes, para casos em que a variância não é constante o método dos mínimos quadrados ponderados (*Weighted Least Squares – WLS*) é mais indicado (NEWBOLD, 1995). Neste método, incorpora-se um vetor de ponderação \mathbf{W} composto de coeficientes não negativos, que podem ser representados pelo

inverso do quadrado dos resíduos do modelo ajustado, pelo inverso da incerteza de medição ou ainda pela variância proveniente das replicatas dos experimentos (CHO E PARK, 2005). Desta forma, os coeficientes de regressão podem ser estimados conforme a Equação (2.7).

$$\beta = (\mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad (2.7)$$

Após a determinação dos coeficientes, é necessário fazer a verificação da significância estatística do modelo por meio da Análise de Variância (do inglês, *Analysis of Variance* - ANOVA), em que será possível verificar tanto se o modelo é significativo ou não, quanto se existem termos não-significativos passíveis de serem removidos.

O ajuste do modelo é sempre descrito pelo coeficiente de determinação (R^2), que retrata qual porcentagem de dados observados na resposta é explicada pelo modelo matemático encontrado. Uma medida alternativa ao R^2 é o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}), o qual desconsidera os termos pouco explicativos ou não-significativos, a fim de reduzir a superestimação dos dados, causada pelo R^2 . Por fim, tem-se ainda o coeficiente de determinação previsto (R^2_{prev}), o qual representa a qualidade do modelo em prever as respostas para novas observações, quanto maior o R^2 previsto, maior a capacidade preditiva do modelo.

Para a modelagem de funções de superfície de resposta, é necessário que os experimentos sejam estruturados e organizados em vista de que os dados gerados através deles sejam analisados devidamente. Em geral, o arranjo composto central (*Central Composite Design* – CCD) é o mais utilizado na coleta de dados para elaboração da superfície de resposta (MONTGOMERY, 2013).

Considerando k fatores, isto é, k variáveis independentes, o CCD pode ser descrito como uma matriz constituída de três grupos diferentes de elementos experimentais, são eles: o conjunto de pontos fatoriais, completo (2^k) ou fracionado (2^{k-p} , em que p é a fração do experimento), conjunto de pontos centrais (do inglês, *center point* – cp) e, finalmente, o conjunto de pontos axiais ($2k$), os quais se encontram à uma distância α dos pontos centrais, a qual é dada em função de algumas propriedades desejáveis para o experimento e do número de fatores envolvidos (MONTGOMERY, 2013). Sendo assim, o número total de experimentos pode ser dado pela soma destes conjuntos: $2^k(\text{ou } 2^{k-p}) + cp + 2k$ (GOMES, 2013; MONTGOMERY, 2013).

Existem três tipos diferentes de arranjos compostos, que são definidos em função da localização dos pontos axiais (Figura 2.6). O primeiro deles é o CCC, também conhecido como

o CCD original, um arranjo que demanda 5 níveis para cada fator, sendo que cada um dos seus pontos axiais está localizado a uma distância α do centro. Já o CCI, arranjo composto inscrito, também requer 5 níveis, mas é utilizado em casos onde os limites especificados não podem ser extrapolados, seja por medida de segurança ou por capacidade física da realização dos experimentos. Por fim, tem-se o arranjo composto de face centrada (CCF), caracterizado por possuir todos os pontos axiais sobre o centro de cada face no espaço fatorial, isto é, fixando o valor de α em -1 ou +1, requerendo assim, apenas 3 níveis para cada fator (PAIVA, 2006).

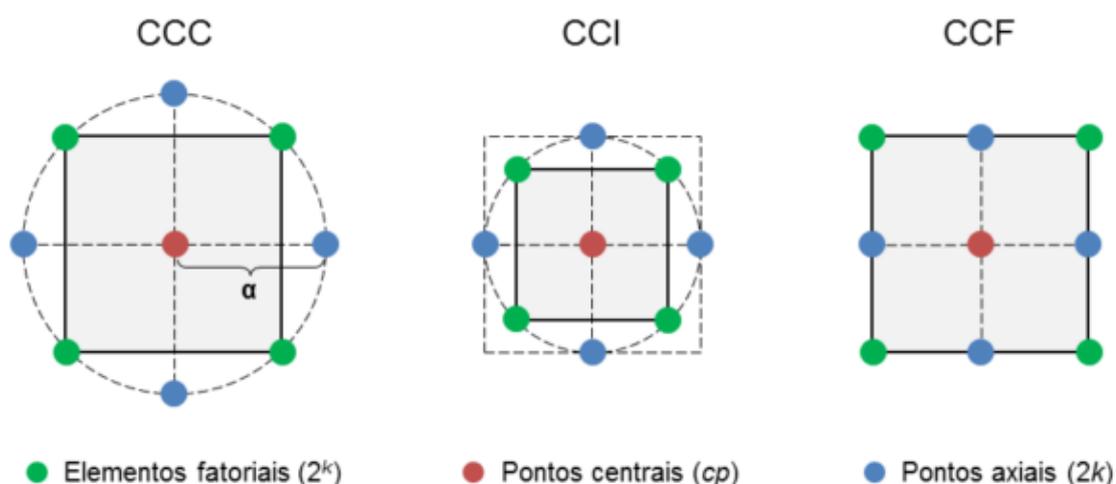


Figura 2.6. Diferentes tipos de arranjo composto central (CCD) (GOMES, 2013).

De acordo com Montgomery (2013), um bom CCD possui uma variância predita constante ao longo de toda a esfera de raio α , neste sentido, a variância de uma resposta prevista em um determinado ponto \mathbf{x} , pode ser descrita conforme Equação (3.1).

$$V[\hat{y}(\mathbf{x})] = \sigma^2 \mathbf{x}^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x} \quad (3.1)$$

Tal propriedade é denominada rotacionalidade e, segundo Box e Hunter (1957), para que um arranjo seja rotacionável o valor de α deve ser dependente do número de experimentos (k) da porção fatorial do CCD, tal que $\alpha = (2^k)^{1/4}$ (Figura 2.7).

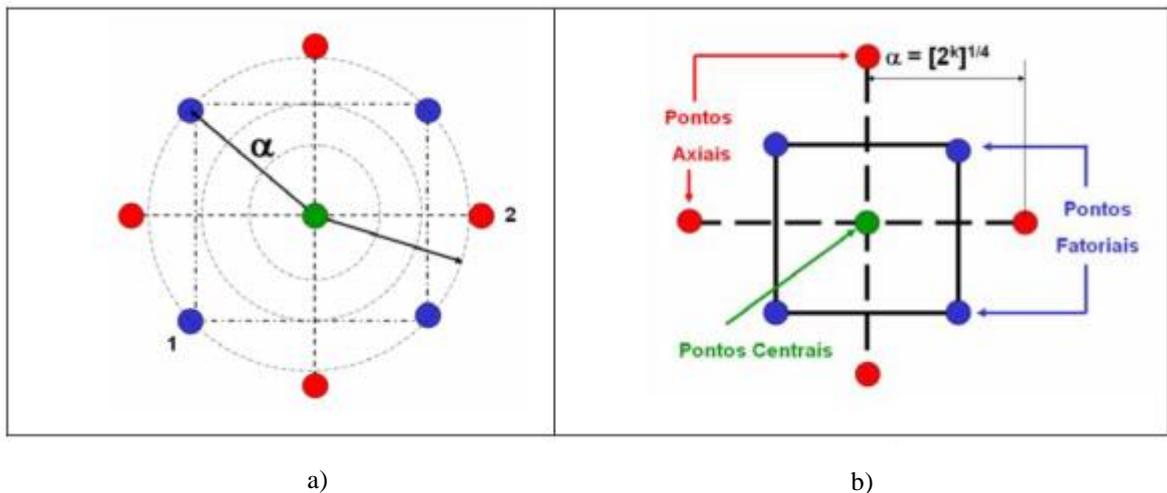


Figura 2.7. Ilustração de um arranjo composto central a) Rotacionalidade; b) Arranjo Composto Central para 2 fatores (PAIVA, 2006).

2.4.1 Método para estimação dos coeficientes do modelo de regressão

De acordo com Newbold (1995), quando os resíduos (e_i) dos valores ajustados (\hat{y}_i) de um modelo de regressão não possuem variância constante, eles apresentam comportamento heteroscedástico. Nestes casos, o método do OLS não é o mais eficiente na estimação dos coeficientes de regressão do modelo, como dito anteriormente, o WLS se adequa melhor. Portanto, faz-se necessário estabelecer técnicas capazes de identificar a presença de heteroscedasticidade, para então escolher o melhor método para o ajuste dos modelos (NEWBOLD, 1995).

Assumindo-se que os resíduos representam o termo de erro entre a diferença dos valores reais (y_i) e os valores ajustados (\hat{y}_i), eles podem ser obtidos por meio da Equação (3.2).

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3.2)$$

Sendo assim, estabelece-se o teste de hipótese a seguir:

H_0 : Os resíduos são homoscedásticos (variância dos resíduos é constante)

H_a : Os resíduos são heteroscedásticos (variância dos resíduos não é constante)

Para testar a hipótese nula de que a variância é constante nos resíduos contra a hipótese alternativa de que a variância dos resíduos não é constante, isto é, ela é dependente dos valores esperados, Newbold (1995) sugere um procedimento baseado na estimação de uma regressão

linear simples, em que a variável dependente é o quadrado do resíduo (e_i^2) e a variável independente é o valor previsto (\hat{y}_i), conforme descrito na Equação (3.3)

$$e_i^2 = a_0 + a_1 \hat{y}_i \quad (3.3)$$

Assim, o teste de hipótese pode ser reescrito conforme Equação (3.4):

$$\begin{aligned} H_0: nR^2 &\leq \chi_{1,\alpha}^2 \\ H_a: nR^2 &> \chi_{1,\alpha}^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Onde: n : Número de observações realizadas

R^2 : Coeficiente de determinação do modelo de regressão simples sugerido

$\chi_{1,\alpha}^2$: Valor crítico de uma distribuição Qui-quadrado com 1 grau de liberdade e nível de significância α .

Sendo assim, quando o produto do número de observações realizadas e o coeficiente de determinação do modelo de regressão simples for maior que o valor crítico de distribuição Qui-quadrado, pode-se assumir que os resíduos do modelo de regressão ajustado apresentarão comportamento heteroscedástico, caso contrário, serão homocedásticos.

2.5 Otimização de processos com múltiplas respostas

Geralmente, os processos de manufatura e, mais especificamente, os de produção de alimentos, possuem diversas propriedades desejáveis de se alcançar simultaneamente, as quais podem estar relacionadas tanto à qualidade do produto e suas propriedades funcionais quanto ao rendimento e produtividade do processo produtivo (MYERS *et al.*, 2009). Em outras palavras, os processos são multivariados, uma vez que estabelecem relações funcionais para múltiplas respostas, isto é, as variáveis de saída, a partir de um mesmo grupo de variáveis de entrada (parâmetros de processo).

Desta forma, em processos que possuem diversas variáveis de saída dificilmente se obtém um conjunto de fatores ótimos de entrada por meio da otimização individual de cada modelo estabelecido. Portanto, nestes casos, faz-se necessário estabelecer, primeiramente, o modelo de superfície de resposta para cada resposta separadamente, para num segundo

momento, encontrar um conjunto de condições operacionais capazes de otimizar todas as respostas ou pelo menos atingir níveis desejáveis (MYERS *et al.*, 2009).

Um modo relativamente simples e direto de avaliar as condições ótimas para obter a otimização de diversas respostas simultaneamente é pela sobreposição das superfícies obtidas para cada resposta separadamente, de maneira que seja possível avaliar as fronteiras de ótimo entre as respostas, bem como a região que otimiza ou melhora todas elas ao mesmo tempo, conforme apresentado na Figura 2.8. Desta forma, o pesquisador é capaz de avaliar de forma mais visual quais são as condições de operação ideais para atingir os resultados (saídas) que ele deseja.

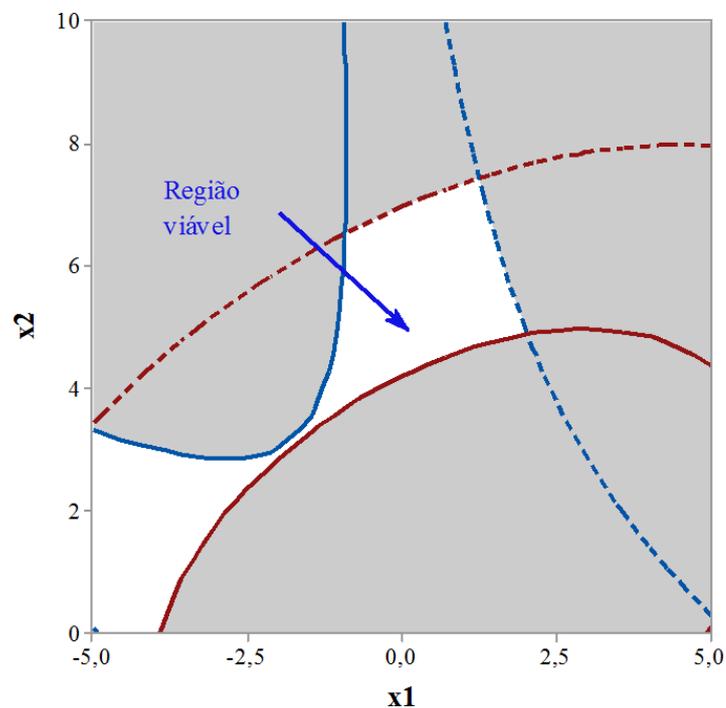


Figura 2.8. Exemplo de sobreposição de gráficos de contorno.

Embora a sobreposição dos gráficos de contorno contribua para a identificação visual da região de ótimo, ela não é capaz de indicar o valor específico de cada parâmetro do processo para atingir as respostas desejadas, portanto, ela acaba requerendo muitos experimentos de tentativa e erro para encontrar os níveis dessas variáveis (MYERS *et al.*, 2009). Desta forma, faz-se necessário o emprego de métodos de otimização mais formais e precisos para a obtenção de resultados mais adequados.

2.5.1 Método *Desirability*

Um dos primeiros algoritmos propostos para a otimização de múltiplas respostas foi desenvolvido inicialmente por Harrington (1965) e, posteriormente, aprimorado e disseminado por Derringer e Suich (1980) com o nome de *Desirability*. De acordo com Van Gysegem *et al.* (2004), este é um método multicritério, capaz de avaliar diversas respostas simultaneamente e, conseqüentemente, de determinar as condições ideais de operação que resultam na combinação mais desejável das variáveis de interesse.

Uma das vantagens deste método é que as funções objetivo são balanceadas de acordo com sua importância no processo ou produto final, dentro de uma mesma escala (entre 0 e 1), permitindo que elas sejam ponderadas simultaneamente de modo adimensional (DERRINGER, 1994). Sua desvantagem, no entanto, é que este método desconsidera a existência de variância-covariância entre as respostas, o que pode acabar favorecendo a obtenção de soluções inadequadas (WU 2005; KO *et al.*, 2005).

Nos últimos anos tem sido publicados diversos trabalhos que utilizam técnicas de Metodologia de Superfície de Resposta conjugada com o algoritmo do *Desirability*, para a otimização multi-objetivo de processos de produção na área alimentícia, os quais abrangem desde a melhoria e desenvolvimento de novos produtos e ingredientes até a extração de compostos alimentícios e melhoria de processos (KIM *et al.*, 2013; BALLUS *et al.*, 2014; ATALAR E DERVISOGLU, 2015; DE OLIVEIRA *et al.*, 2015; CHEN E MARTYNENKO, 2016 KARNOPP *et al.*, 2017).

Segundo Paiva (2006), esse método reduz um problema multivariado em univariado por meio de um princípio que consiste, basicamente, no estabelecimento de uma relação entre as respostas e as variáveis independentes, o qual pode ser feito através da aplicação da Metodologia de Superfície de Resposta e OLS ou WLS, por exemplo. Em seguida, é feita a aplicação do algoritmo proposto por Harrington (1965) para a transformação de cada uma das respostas em uma função única d_i pertencente ao intervalo 0 e 1, isto é $0 \leq d_i \leq 1$, sendo que $d_i = 0$ representa uma resposta fora da região aceitável, enquanto $d_i = 1$ é o objetivo (*target*), que se deseja atingir para a resposta (MYERS *et al.*, 2009).

Desta forma, as variáveis ótimas são escolhidas com o intuito de maximizar o *Desirability* Global (D), o qual é representado pela média geométrica de cada uma das funções individuais (d) das respostas que se deseja otimizar, podendo ser descrito conforme a Equação (2.8), em que m representa o número de respostas.

$$D = (d_1(Y_1)d_2(Y_2) \dots d_m(Y_m))^{1/m} \quad (2.8)$$

De acordo com Paiva (2006), nos casos em que cada uma das respostas apresenta importâncias diferentes, ao invés de se utilizar a Equação (2.8), deve-se aplicar a Equação (2.9), em que g_i representa o grau de importância individual de cada função e G a soma deles.

$$D = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{g_i}(\widehat{Y}_i) \right]^{\frac{1}{G}} \quad (2.9)$$

A vantagem de se utilizar a média geométrica é que a solução global é alcançada de modo balanceado, o que permite que as variáveis de interesse (saída) alcancem os valores desejados dentro das especificações impostas no algoritmo. Ainda de acordo com o mesmo autor, o algoritmo do *Desirability* vai variar conforme o tipo de otimização que se deseja realizar em cada resposta, isto é, minimização, normalização ou maximização (PAIVA, 2006).

Segundo Myers *et al.* (2009) e Montgomery (2013), quando se deseja maximizar uma função deve-se aplicar a Equação (2.10), em que T e L são o valor máximo e mínimo da resposta, respectivamente e r representa a ponderação das funções.

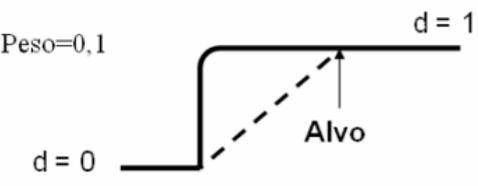
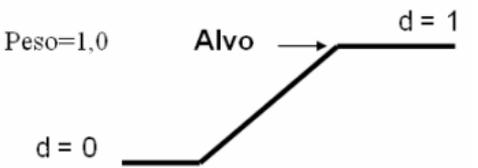
$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (2.10)$$

Quando $r = 1$, a função é linear, escolhendo $r > 1$, os valores se de d_i se aproximarão de T e, ao se optar por $r < 1$ a função d_i terá menor importância, portanto, esta escolha é aconselhável quando não houver problema em se encontrar valores da resposta inferiores ao dos limites pré-estabelecidos, conforme detalhado no Quadro 2.1 (PAIVA, 2006; MYERS *et al.*, 2009; MONTGOMERY, 2013).

Quando se deseja minimizar uma resposta, deve-se aplicar a Equação (2.11).

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{H-y}{H-T}\right)^r & T \leq y \leq H \\ 0 & y > H \end{cases} \quad (2.11)$$

Quadro 2.1. Detalhamento da relação de importância entre o alvo (*target*) e os limites no método *Desirability* (PAIVA, 2006).

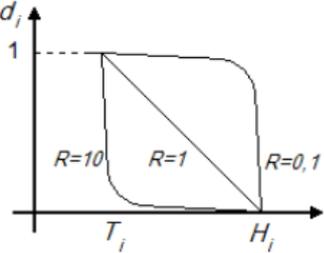
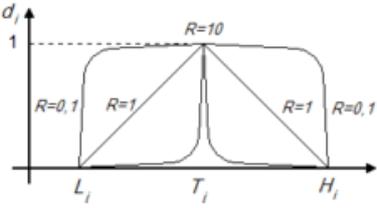
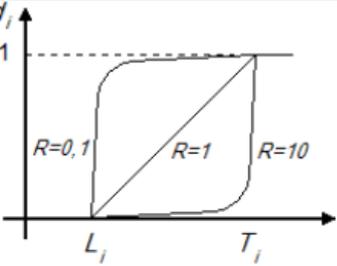
<p>Peso=0,1</p> 	<p>Se peso < 1 (valor mínimo = 0,1)</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>Menor ênfase no alvo</p>
<p>Peso=1,0</p> 	<p>Se peso = 1</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>Importancia dada ao alvo = Importância dada aos limites</p>
<p>Peso=10,0</p> 	<p>Se peso > 1</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>Maior ênfase no alvo</p>

Já nos casos em que se deseja atingir um objetivo específico, isto é, o foco não é nem maximizar nem minimizar, mas sim atingir um determinado valor alvo entre o mínimo e máximo, utiliza-se a Equação (2.12).

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{H-y}{H-T}\right)^r & T \leq y \leq H \\ 0 & y > H \end{cases} \quad (2.12)$$

No Quadro 2.2, é apresentado, de modo simplificado, o método *Desirability* para todas as funções (minimização, normalização e maximização).

Quadro 2.2. Objetivos de otimização do método *Desirability*. Adaptado de Salgado Júnior (2010).

Objetivo	Características	Representação
Minimização	Acima de H $\rightarrow d = 0$ Abaixo de T $\rightarrow d = 1$	
Normalização	Acima de H ou abaixo de L $\rightarrow d = 0$ Igual à T $\rightarrow d = 1$	
Maximização	Abaixo de L $\rightarrow d = 0$ Acima de T $\rightarrow d = 1$	

2.5.2 Método de Interseção Normal à Fronteira

Em otimizações multiobjetivo deseja-se otimizar duas ou mais variáveis que, muitas vezes, apresentam interesses divergentes. Em geral, quando não se tem nenhuma informação de preferência em relação a essas variáveis, ao invés de uma única solução otimizada, obtém-se um conjunto de pontos ótimos, os quais são denominados de soluções ótimas de Pareto (VAHIDINASAB E JADID, 2010). De acordo com Vahidinasab e Jadid (2010), um método eficaz para identificação dos pontos uniformemente distribuídos na fronteira de Pareto para problemas de otimização multiobjetivo é a Interseção Normal à Fronteira (do inglês, *Normal Boundary Intersection* – NBI).

O NBI, desenvolvido por Das e Dennis (1998) com o objetivo de resolver problemas de otimização multiobjetivo não lineares, é um método que permite a construção de fronteiras de Pareto contínuas e equispaçadas, independentemente da distribuição dos pesos entre cada uma das funções objetivo. Tal característica faz com que este método seja mais eficiente em

otimizações multiobjetivo do que outros métodos de aglutinação, como por exemplo, o *Desirability* e método de Somas Ponderadas (BRITO *et al.*, 2014).

A primeira etapa da aplicação do método NBI consiste no estabelecimento da matriz *Payoff* Φ , a qual é formada pelos conjuntos de ótimos obtidos na minimização individual de cada função objetivo. Neste sentido, x_i^* representa o vetor de solução que minimiza individualmente a i -ésima função objetivo $f_i(x)$, sendo que o valor mínimo desta função neste ponto, é representado por $f_i^*(x_i^*)$. Ao se substituir os pontos de ótimo individuais, x_i^* , oriundos das otimizações individuais das demais funções objetivo, obtém-se $f_i(x_i^*)$, o qual representa o valor não-ótimo desta função. Desta forma, replicando-se este algoritmo para todas as funções objetivo, é possível obter a matriz *Payoff*, conforme Equação (2.13).

$$\Phi = \begin{bmatrix} f_1^*(x_1^*) & \dots & f_1(x_1^*) & \dots & f_1(x_m^*) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_i(x_1^*) & \dots & f_i^*(x_i^*) & \dots & f_i^*(x_m^*) \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_m(x_1^*) & \dots & f_m(x_i^*) & \dots & f_m^*(x_m^*) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Cada linha da matriz *Payoff* representa os valores de máximo e mínimo das funções objetivo $f_i(x)$, através dos quais se obtém os limites inferior e superior da função objetivo global. Estes limites são conhecidos como os pontos de ancoragem: Utopia e Nadir. O primeiro deles, representado pela Equação (2.14), corresponde aos melhores valores de todas funções objetivo otimizadas individualmente (VAHIDINASAB E JADID, 2010).

$$f^U = [f_1^*(x_1^*), \dots, f_i^*(x_i^*), \dots, f_m^*(x_m^*)]^T \quad (2.14)$$

Já o ponto de Nadir representa o oposto, ou seja, o conjunto de pontos não-ótimos individuais das funções objetivo, conforme descrito na Equação (2.15).

$$f^N = [f_1^N, \dots, f_i^N, \dots, f_m^N]^T \quad (2.15)$$

A partir destes dois conjuntos de pontos opostos, é possível estabelecer a normalização das funções objetivo, tornando-as adimensionais, conforme apresentado na Equação (2.16), o que

conduz na obtenção da matriz *Payoff* normalizada ou escalonada (VAHIDINASAB E JADID, 2010).

$$\bar{f}_i(\mathbf{x}) = \left[\frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^U}{f_i^N - f_i^U} \right], i = 1, 2, \dots, m \quad (2.16)$$

Segundo Jia e Ierapetritou (2007), o conjunto de combinações convexas de cada linha da matriz *Payoff* corresponde à “Envoltória Convexa de Mínimos Individuais” (do inglês, *Convex Hull of Individual Minima* - CHIM). Considerando uma ponderação convexa w , Φw representará um ponto qualquer na CHIM e assumindo-se que \hat{n} corresponde ao vetor normal à CHIM em direção à origem, então tem-se que $\Phi w + D\hat{n}$, com $D \in R$, é a função \bar{F} que representa o conjunto de pontos nesta normal.

Desta forma, Das e Dennis (1998) definiram que o ponto de interseção da normal com a fronteira $\partial\bar{F}$ mais próximo da origem corresponde à maximização da distância entre a CHIM e a fronteira de Pareto, podendo ser descrito como um problema de programação não-linear, conforme Equação (2.17).

$$\begin{aligned} & \underset{(x,t)}{\text{Max}} D \\ \text{Sujeito a: } & \bar{\Phi}w + D\hat{n} = \bar{F}(x) \\ & x \in \Omega \end{aligned} \quad (2.17)$$

Onde $\Omega = \{x \in R^m \mid h(x) = 0, g(x) \leq 0\}$

Em que, $h(x) = 0$: Restrição de igualdade

$g(x) \leq 0$: Restrição de desigualdade

R^m : Espaço objetivo

Ω : Espaço amostral da variável de decisão

Neste sentido, a principal ideia da abordagem do método NBI é de que a interseção do ponto entre a fronteira $\partial\bar{F}$ e qualquer vetor normal à CHIM corresponderá a um ponto numa porção de $\partial\bar{F}$, que contém os pontos ótimos, compondo a fronteira de Pareto, conforme representado pela Figura 2.9 (DAS E DENNIS, 1998).

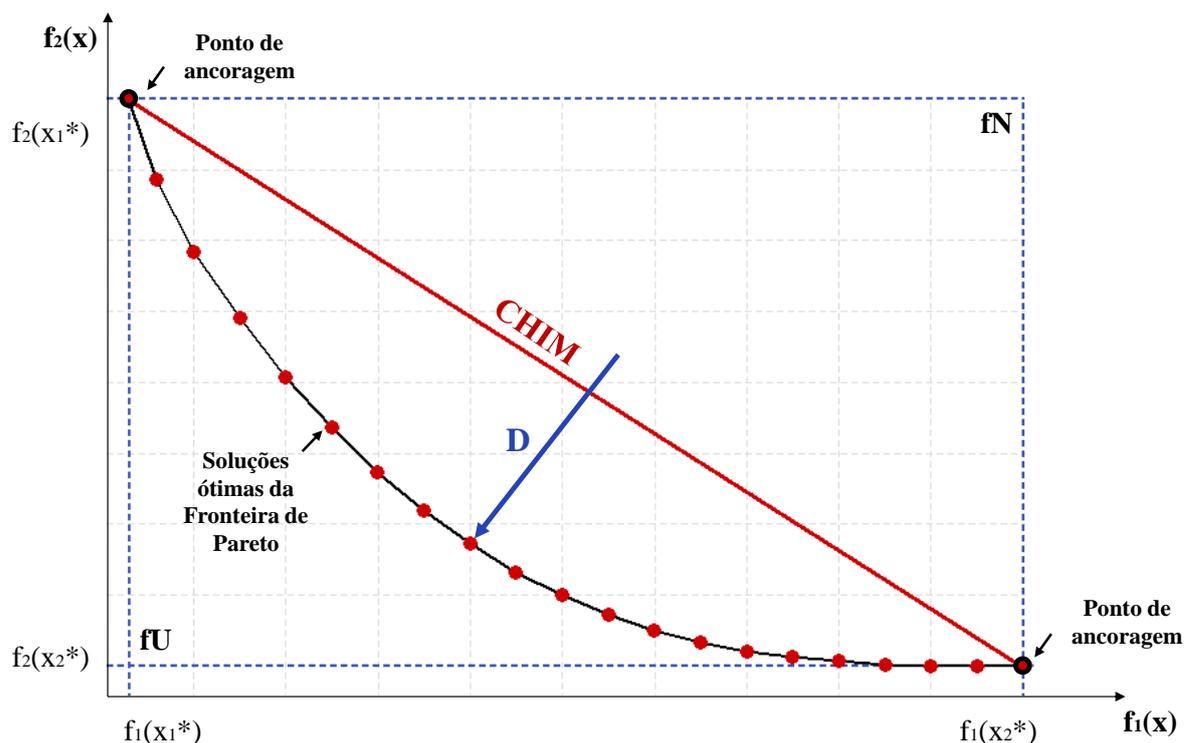


Figura 2.9. Representação gráfica do Método de Interseção Normal à Fronteira (NBI).

Ao se resolver este problema de otimização não linear, repetidas vezes, para cada um dos pesos, será possível obter uma Fronteira de Pareto equispaçada. Para a definição destes pesos, Jia e Ierapetritou (2007) propõem que $w_j = 1 - \sum_{i=1}^n w_i$.

Brito (2015) demonstra que, para casos de otimização biobjetivo, o parâmetro D pode ser algebricamente removido, uma vez que ele já se encontra na função objetivo e nas restrições de igualdade. Neste sentido, quando houver apenas duas funções objetivo, a Equação (2.17) pode ser escrita de forma simplificada conforme Equação (2.18).

$$\begin{aligned}
 & \underset{(x,t)}{\text{Min}} \bar{f}_1(x) \\
 \text{Sujeito a: } & \bar{f}_1(x) - \bar{f}_2(x) + 2w - 1 = 0 \\
 & g_j(x) \geq 0 \\
 & h_j(x) = 0 \\
 & 0 \leq w \leq 1
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Em que $\bar{f}_1(x)$ e $\bar{f}_2(x)$ correspondem a duas funções objetivo normalizadas.

O NBI tem sido cada vez mais utilizado, o que pode ser evidenciado pelo gráfico da Figura 2.10. Artigos publicados na base *Web of Science* que aplicam o método NBI. Figura 2.10, o qual mostra um crescente aumento no número de publicações que empregaram este método nas mais diversas áreas de engenharia e ciência, totalizando em 93 artigos nos últimos oito anos, sendo 2 deles publicados já em 2018.

Embora seja crescente o número de trabalhos que utilizam o método NBI, por meio de um levantamento na base *Web of Science*, foi possível constatar que ainda existem poucos trabalhos que aplicam o NBI na área alimentícia, uma vez que apenas 2 artigos foram encontrados nos últimos 20 anos. Neste sentido, levando-se em consideração que os processos de produção de alimentos envolvem diversas operações complexas e inúmeras variáveis, a aplicação do NBI na otimização de diferentes tipos de processos alimentícios é totalmente apropriada.

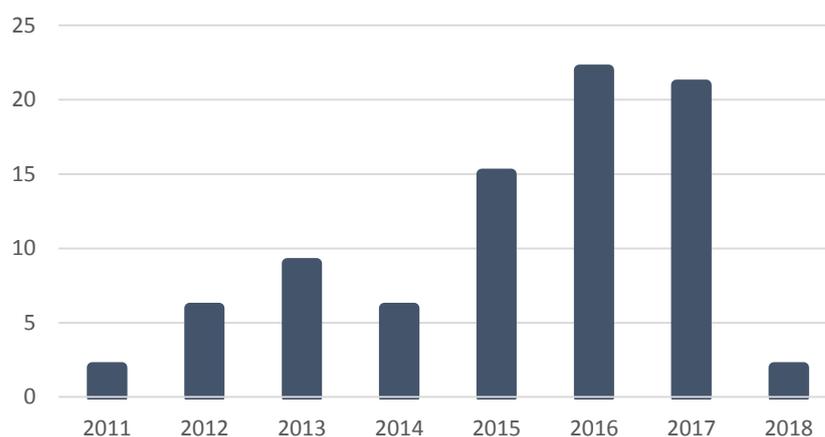


Figura 2.10. Artigos publicados na base *Web of Science* que aplicam o método NBI.

3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Tendo em vista que no Capítulo 2 foram descritos todos os fundamentos teóricos e conceitos necessários para a condução deste trabalho, o Capítulo 3 tem como objetivo detalhar a estratégia utilizada na aplicação prática dos conceitos abordados anteriormente. Desta forma, o capítulo se resume à classificação da pesquisa científica, à apresentação do objeto de estudo considerado e ao detalhamento do método experimental.

3.1 Classificação da pesquisa científica

A pesquisa científica pode ser classificada quanto à natureza, aos objetivos, à abordagem e ao método. No que tange à natureza, o presente trabalho se classifica como aplicado, uma vez que ele foi mais orientado para as necessidades do mercado, do que para a ampliação do conhecimento científico.

Já com relação aos objetivos, esta pesquisa se classifica como explicativa, já que ela se preocupou em identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos de um dado processo, visando explicar o porquê das coisas em função dos dados obtidos. A abordagem desta pesquisa se classifica como quantitativa, tendo em vista que os dados foram coletados de modo estruturado, controlado e objetivo e, posteriormente, analisados por procedimentos estatísticos.

Por fim, o método desta pesquisa é experimental, uma vez que ela seguiu um planejamento rigoroso, iniciando-se pela formulação exata do problema, das hipóteses e da definição do objeto de estudo. Em seguida, as variáveis capazes de influenciar o objeto de estudo foram selecionadas, estabelecendo-se formas de controle e observação do impacto delas nas variáveis de resposta estudadas.

3.2 Problema de pesquisa

3.2.1 Seleção da empresa estudada

Em geral, nas empresas de pequeno porte os processos são menos controlados do que nas de grande porte. Isto se deve ao fato de que, geralmente, eles são manuais ou semi-automatizados, o que, de uma forma geral, os tornam muito mais dependentes da habilidade e do conhecimento de processo por parte do operador, do que dos equipamentos. Somado a isso, tem-se o elevado custo em manter funcionários especialistas que se dediquem somente ao

controle e melhoria de processos, obrigando as pequenas empresas a utilizarem apenas ferramentas estatísticas mais básicas (CAGNAZZO E TATICCHI, 2010).

Trazendo este contexto de pequenas empresas para o setor alimentício, o cuidado com os processos se torna ainda mais peculiar, uma vez que as indústrias de alimentos possuem características únicas, tais como o curto prazo de validade dos produtos e matérias-primas, variabilidade na composição físico-química das matérias-primas, sazonalidade, variação de condições climáticas, bem como uma complexa cadeia de suprimentos (DORA E GELLYNCK, 2015). No contexto de indústrias alimentícias, uma que merece destaque são os laticínios, uma vez que, em termos de faturamento, eles se enquadram como o 3º maior setor da indústria de alimentos do Brasil (ABIA, 2017).

A grande maioria das indústrias de laticínios se concentra nas regiões Sul e Sudeste do país, as quais processam mais de 75% do leite nacionalmente produzido. Dentre os estados, Minas Gerais se destaca, sendo responsável por mais de 24% do leite processado no Brasil (IBGE, 2017). No que tange ao porte das empresas destes setor, uma pesquisa realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com quase 2 mil laticínios do país, identificou-se que uma grande parcela deles (86,46%) possui pequeno ou médio porte (IBGE, 2017b).

Diante da grande complexidade envolvida na cadeia de produção de alimentos e, mais especificamente, na produção de produtos lácteos, bem como ao elevado número de laticínios de pequeno e médio porte no Brasil e, principalmente, no estado de Minas Gerais, o presente trabalho selecionou uma indústria de laticínios de pequeno porte (SEBRAE, 2014), que conta com um total de 24 funcionários e está localizada no estado de Minas Gerais, para desenvolver os experimentos e alcançar os objetivos de pesquisa propostos.

O laticínio, onde os experimentos foram conduzidos, possui Selo de Inspeção Federal (SIF), o que caracteriza seus produtos com um nível de qualidade aceitável para a comercialização em todo o país. Sua gama de produtos é composta por leite pasteurizado, queijo Minas Frescal, queijo Minas Padrão, queijo Mussarela, requeijão, manteiga e bebida láctea. Mensalmente, a indústria processa por volta de 454 mil litros de leite, deste total, uma média de 40% é utilizada para a fabricação do queijo tipo mussarela, podendo variar conforme a sazonalidade.

A empresa processa o queijo mussarela em diferentes formatos e tamanhos: “nozinho”, “palito”, peças de 1 quilograma ou ainda em peças grandes de 3 kg. A maior parte do queijo mussarela é processado em peças grandes, as quais geralmente são vendidas para supermercados para serem fatiadas ou raladas e revendidas *in natura* aos clientes, ou ainda para

indústrias de alimentos e restaurantes, os quais utilizam a mussarela como um ingrediente de seus produtos.

Levando em consideração o grande volume de queijo mussarela processado anualmente por este laticínio bem como a complexidade envolvida na fabricação deste produto, o presente trabalho optou por avaliar o processo de produção do queijo mussarela, em peças de 3 quilogramas, com o objetivo de identificar oportunidades de melhoria e de redução de perdas.

3.2.2 Método experimental

Conforme detalhado no item 3.1, o presente trabalho adotou o método experimental. Neste sentido, a estratégia para o desenvolvimento da pesquisa, foi desenvolvida em três etapas, por meio de um método experimental que combinou a Metodologia de Superfície de Resposta com os métodos de otimização *Desirability* e Interseção Normal à Fronteira (NBI). Tal procedimento foi necessário para a modelagem das funções objetivo das respostas de interesse para que, posteriormente, as mesmas pudessem ser otimizadas.

Neste sentido, o método experimental foi estruturado como descrito a seguir:

- **1ª Etapa: análise do estado atual** – Etapa em que foi feita a coleta de dados históricos da produção da fábrica, para identificação da estabilidade do processo, bem como da sua capacidade em atender aos requisitos da legislação brasileira de identidade e qualidade de queijo mussarela.
- **2ª Etapa: experimental** – Etapa em que foi feito o planejamento dos experimentos, definido o procedimento experimental e feita a coleta dos dados, com base na Metodologia de Superfície de Resposta.
- **3ª Etapa: análise dos dados** – Etapa em que foi feita a modelagem matemática das funções objetivo, bem como as análises dos efeitos principais e interações das variáveis de controle nas respostas.
- **4ª Etapa: otimização das respostas** – Etapa em que foi feita a otimização das respostas pelos métodos *Desirability* e de Interseção Normal à Fronteira (NBI) e a comparação dos resultados obtidos por ambos.

Na Figura 3.1 está ilustrado o fluxograma contendo todas as etapas do método experimental.

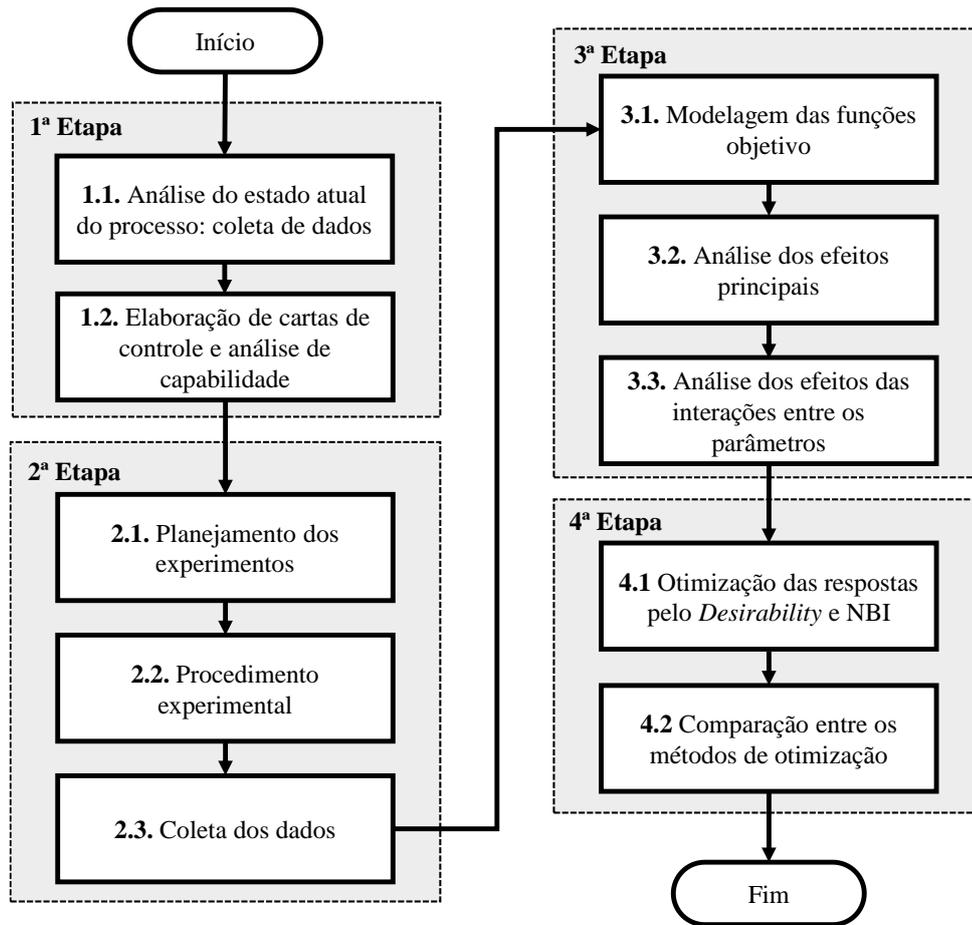


Figura 3.1. Fluxograma do método experimental.

3.2.3 Definição do problema de pesquisa

Conforme detalhado no item 1.3, o objetivo do presente trabalho é otimizar um processo industrial de fabricação de mussarela, com foco na redução de perdas e melhoria da qualidade do produto. Antes de buscar pela melhoria de um processo, é necessário compreender o seu estado atual, isto é, se ele está sob controle ou não e se atende às especificações da legislação ou até mesmo aquelas estabelecidas pelos clientes. Esta observação prévia, torna viável a análise das possíveis causas de variação do processo e como elas podem ser eliminadas ou terem seus efeitos reduzidos.

Seguindo esta lógica, no presente trabalho, antes da realização dos experimentos, buscou-se avaliar as condições atuais do processo, por meio da coleta de dados fornecidos pela equipe do controle de qualidade da fábrica, durante 2 meses. As informações coletadas, tanto para o leite quanto para o queijo mussarela de 3 quilogramas, foram utilizadas para análise do estado atual do processo, conforme disposto no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Relação dos dados coletados pelo controle de qualidade da fábrica.

Leite	Queijo Mussarela
Volume (L)	Massa total (kg)
Densidade (g/L)	Umidade (%)
Matéria Gorda (%)	Matéria gorda (%)
	Matéria Gorda em Extrato Seco - GES (%)

O volume de leite e a sua densidade foram usados para a obtenção da massa total de leite empregada na fabricação do queijo, a qual foi posteriormente utilizada, junto à massa total da mussarela e teor de matéria gorda do leite e do queijo, para calcular a porcentagem de recuperação de gordura, conforme Equação (2.3). Os dados coletados pelo controle de qualidade da fábrica estão dispostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Dados históricos de dois meses fornecidos pelo controle de qualidade do laticínio estudado.

GES (g/100g)		Umidade (%)		% R_{MG}	
33,83	40,12	42,36	48,90	66,87	74,41
33,83	39,35	42,36	47,90	66,21	70,91
38,34	39,47	47,83	48,06	70,31	69,57
37,27	39,27	47,68	48,43	65,80	66,84
38,21	39,11	47,66	48,86	69,63	65,20
38,21	39,14	47,66	47,63	65,66	69,91
38,34	39,14	47,83	47,63	69,63	78,80
38,34	32,96	47,83	48,43	68,83	57,73
34,48	36,07	47,80	50,10	59,11	56,04
34,50	36,14	47,82	50,20	56,82	60,29
37,26	36,14	47,67	50,20	67,68	61,01
36,89	38,67	48,50	45,70	65,37	59,45
38,86	37,30	48,53	49,06	66,27	64,56
37,15	35,16	47,51	45,96	61,92	68,97
37,62	37,99	46,83	47,35	69,70	60,89
37,74	37,95	47,00	47,30	67,74	66,13
37,22	34,72	47,61	48,16	62,20	61,45
40,67	35,31	48,36	43,36	63,20	58,88
40,67	34,66	48,36	48,06	65,60	64,86
37,33	40,64	46,43	48,33	61,68	58,44
39,16	35,57	45,10	49,39	68,75	69,52
36,90	35,57	45,80	49,39	59,94	47,73
35,65	38,01	48,10	46,06	64,62	59,13
37,23	36,45	48,97	45,13	65,73	66,65
38,73	36,90	48,36	45,80	71,00	67,23
37,83	37,27	51,10	45,00	63,22	66,70
36,89	36,36	47,14	45,00	65,75	71,04
36,60	36,36	45,36	45,00	68,70	67,53
38,07	37,64	47,46	46,87	71,48	64,67
39,47	35,51	48,06	46,50	65,20	64,14
39,47	36,10	48,06	47,37	64,02	63,62

Conforme abordado no Capítulo 2, no Brasil a mussarela deve atender a dois requisitos físico-químicos: teor de umidade máximo de 60% e porcentagem de matéria gorda em extrato seco (GES) mínima de 35%. Embora a umidade máxima permitida legalmente seja de 60%, a grande maioria dos queijos mussarela fabricados nacionalmente possui teores de água que variam dentro da faixa de 45 e 52% (PIZAIA *et al.*, 2003; SILVA, 2005; ANDREATTA *et al.*, 2009; CHIESA *et al.*, 2011), caracterizando-os como de baixa umidade, de acordo com a classificação da USDA (Tabela 2.2), a qual é comumente adotada pelos trabalhos científicos internacionais.

Desta forma, com o intuito de analisar a capacidade do processo atual em atender às especificações, foram realizadas análises da capacidade do processo levando-se em consideração os limites de concentração de água para queijos mussarela de baixa umidade (45 a 52%) propostos pela USDA, uma vez que a especificação brasileira apresenta somente limite superior, o qual é muito elevado em relação ao teor médio de umidade dos queijos fabricados nacionalmente, o que poderia decorrer na superestimação da análise da capacidade do processo. Já para o requisito relacionado ao teor de gordura em extrato seco, adotou-se o valor estabelecido pelo Padrão de Identidade e Qualidade para queijo mussarela no Brasil ($\geq 35\%$).

Antes do estudo de capacidade do processo, foi feita a verificação do comportamento dos dados. O gráfico da Figura 3.2. Gráfico do teste de normalidade para a distribuição dos dados históricos de gordura em extrato seco (GES). Figura 3.2 evidencia que a gordura em extrato seco (GES) apresentou comportamento normal, uma vez que para o teste de normalidade p-valor $> 0,05$; portanto para tal foi utilizada a análise de capacidade para distribuição normal.

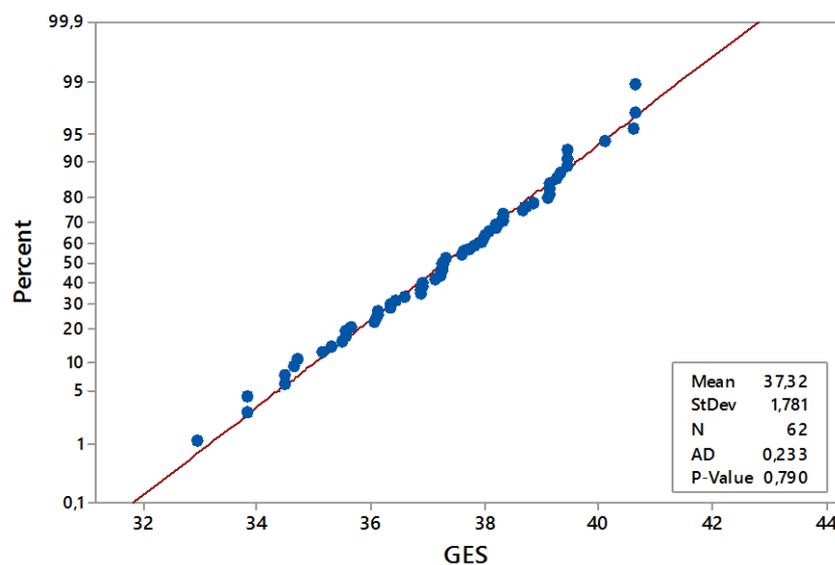


Figura 3.2. Gráfico do teste de normalidade para a distribuição dos dados históricos de gordura em extrato seco (GES).

A umidade (U), por sua vez, apresentou um comportamento não normal (p-valor <0,05), conforme representado no gráfico da Figura 3.3, devido a isto foi utilizada a transformação de Johnson (IC=95,0%) na análise destes dados.

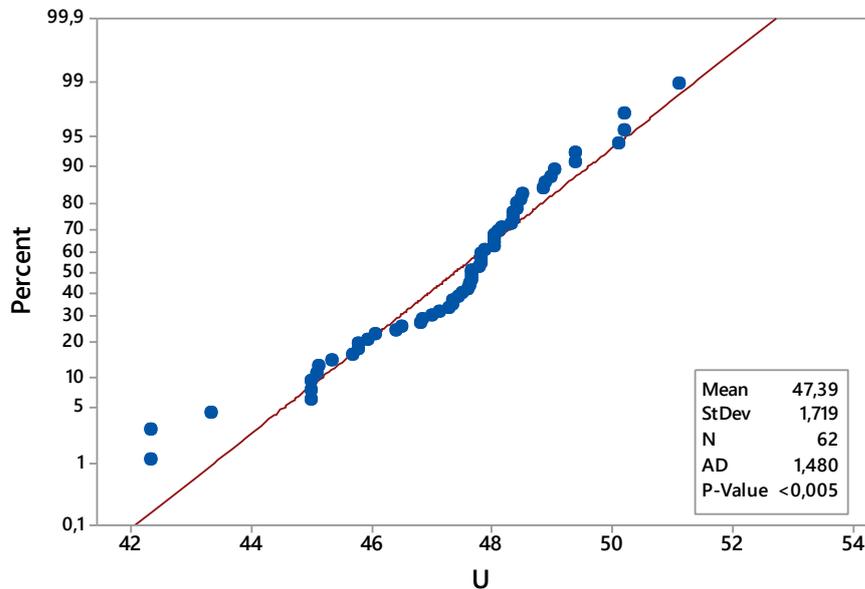


Figura 3.3. Gráfico do teste de normalidade para a distribuição dos dados históricos de umidade (U).

O gráfico da capacidade do processo, em termos de teor de gordura em extrato seco total, está plotado na Figura 3.4, onde é possível notar que $Ppk = PPL$ e $Cpk = CPL$, uma vez que se considerou apenas o limite inferior de especificação (LIE).

O $Cpk = 0,63$ indica que, operando nas condições atuais, o processo apresenta baixo desempenho, visto que para processos com especificações unilaterais, espera-se que o Cpk seja pelo menos igual a 1,25 (MONTGOMERY, 2001). Da mesma forma, o índice de capacidade global do processo apresentou um valor muito baixo ($Ppk = 0,43$), refletindo num total esperado de 9,63% fora das especificações. Além disso, foi observado que 11,29% das amostras não atingiram o mínimo de 35% de gordura em extrato seco total.

O baixo desempenho do processo, em termos de concentração de gordura em extrato seco, pode ser explicado pela porcentagem de gordura do leite recuperada no queijo, já que as perdas deste nutriente ao longo do processo, decorrerão numa menor concentração dele no produto final. Neste sentido, uma alternativa para a medição do desempenho do processo é avaliá-lo em termos de porcentagem de gordura recuperada.

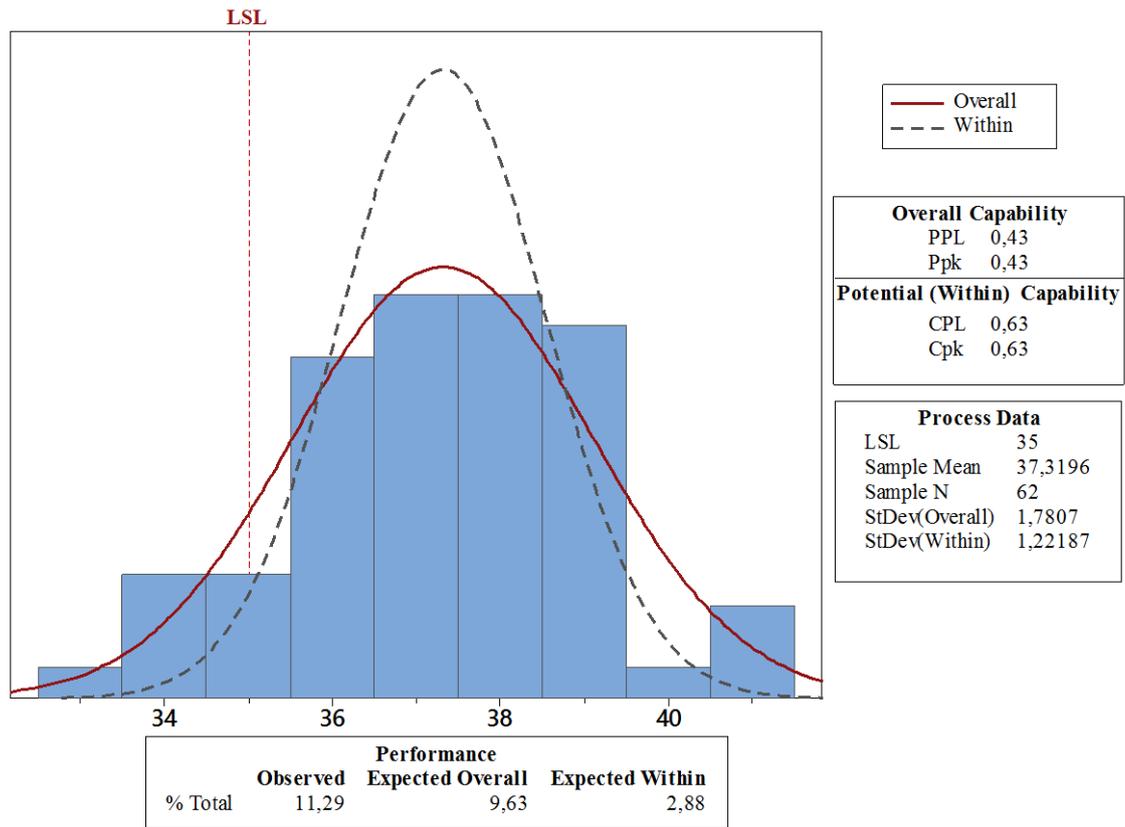


Figura 3.4. Gráfico de capacidade do processo em termos de teor de gordura em extrato seco total.

O gráfico da capacidade do processo em termos de teor de umidade do queijo mussarela pode ser observado na Figura 3.5. A elevada variação dos dados em relação ao valor alvo (47,0) é evidenciada pelo baixo Cpm (0,25), o qual se apresenta bem abaixo do valor indicado para processos com especificação bilateral que, segundo Montgomery (2001), é 1,33. A variação expressiva entre os dados também pode ser observada no gráfico *Boxplot* da Figura 3.6, a qual mostra a presença de *outliers* na faixa de 42-43,5% de umidade.

Embora nenhum dos dados tenha ultrapassado o limite superior de especificação, foi observado um total de 4,84% com porcentagem de umidade abaixo do LIE. Além disso, com o valor de $Ppk = 0,46$ estima-se que 9,07% dos dados irão exceder os limites de especificação para teor de umidade do queijo mussarela no processo em questão.

Conforme explicitado na Equação (2.1), o teor de gordura em extrato seco (GES) depende da concentração de água (umidade) e de gordura no produto. Do mesmo modo que queijos com teores de umidade abaixo do ideal tendem a apresentar uma menor porcentagem de GES, quanto menor a retenção de gordura do leite no produto final, menor a concentração de matéria gorda no queijo e, conseqüentemente, espera-se que o GES também seja reduzido.

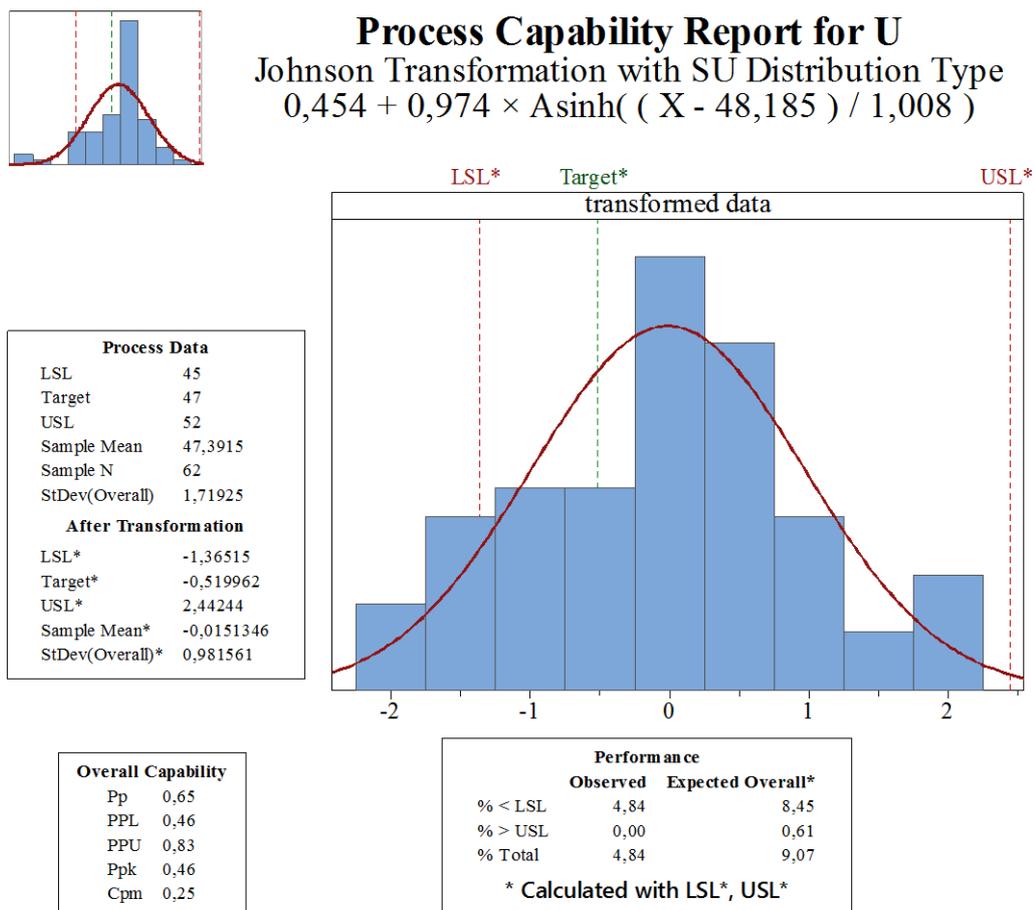


Figura 3.5. Gráfico de capacidade do processo em termos de teor de umidade.

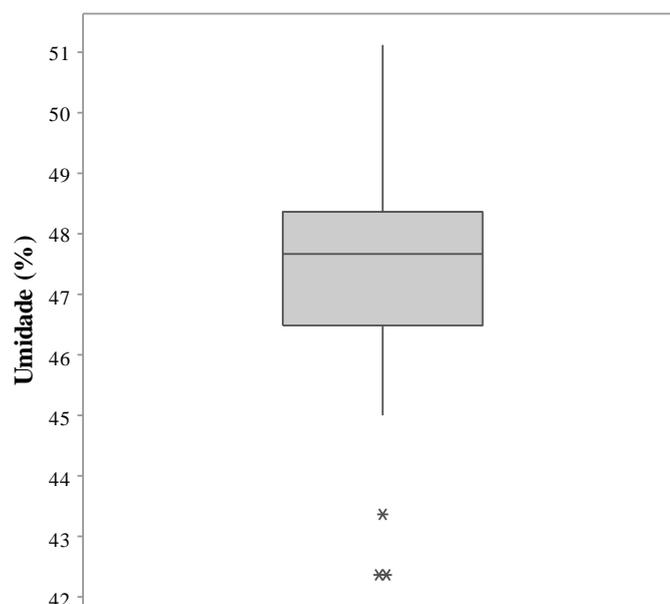


Figura 3.6. Gráfico boxplot dos dados da porcentagem do teor de umidade.

Neste sentido, visando complementar as análises de capacidade de processo, foram utilizadas cartas de controle. Segundo Montgomery e Runger (2011), esta é uma ferramenta que fornece informações importantes para a melhoria de processos, uma vez que ela contribui para detectar rapidamente a ocorrência de causas especiais, possibilitando a investigação do processo e a implementação de ações corretivas, para a redução ou eliminação da variabilidade.

De acordo com Montgomery (2001) e Montgomery e Runger (2011), existem dois tipos de variabilidade no processo: a de causas naturais (aleatórias) e a de causas especiais (atribuíveis). A primeira delas se refere às fontes de variação inerentes ao processo, indicando que o mesmo opera sob suas condições normais; já a segunda, trata das variações causadas devido a anormalidades no processo, advertindo que o mesmo está operando fora de controle.

Desta forma, com o objetivo de avaliar as condições de operação do processo e, sabendo-se que o mesmo opera em batelada, foram geradas cartas de controle individuais e de média móvel, para análise de média e variância dos dados históricos, com o auxílio do *software Minitab17*®. Tendo em vista que a variação do teor de gordura em extrato seco pode ser um indício tanto da variabilidade no rendimento em termos de recuperação de gordura do leite no queijo, quanto da concentração de água no produto, foram plotadas cartas de controle com os dados do teor de umidade e da porcentagem de recuperação de gordura.

A Figura 3.7 apresenta as cartas de controle dos valores individuais e da média móvel (do inglês, *moving range*) da porcentagem de gordura do leite recuperada no queijo, as quais indicam que, em média, somente 65,18% deste nutriente é recuperado no processo. Os pontos vermelhos, superiores aos limites de controle, evidenciam que existem causas especiais atuando sobre o processo, contribuindo para a sua instabilidade.

O gráfico de média móvel reforça o que a carta de controle individual já havia indicado, isto é, o processo possui uma elevada variabilidade, o que implica numa variação expressiva de rendimento (52,4 a 77,95%), impactando diretamente na composição do produto fabricado e na eficiência do processo.

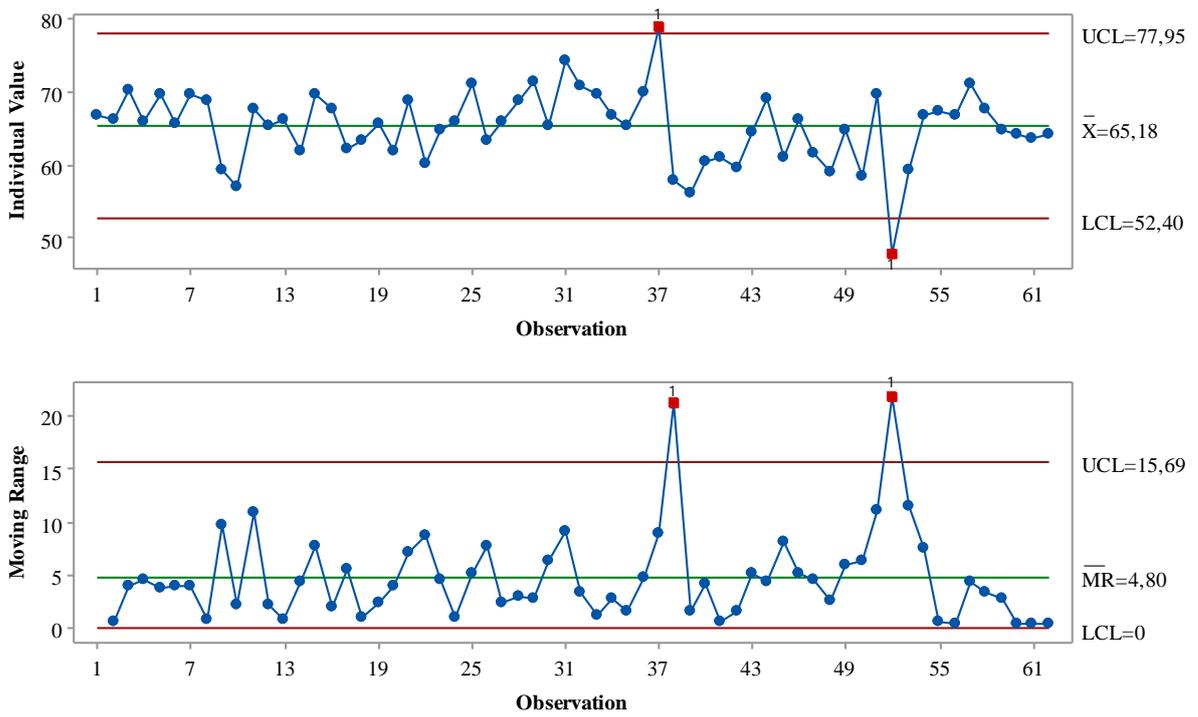


Figura 3.7. Cartas de controle dos valores individuais e de média móvel do rendimento, em termos de recuperação de gordura, obtidos ao longo de dois meses de produção.

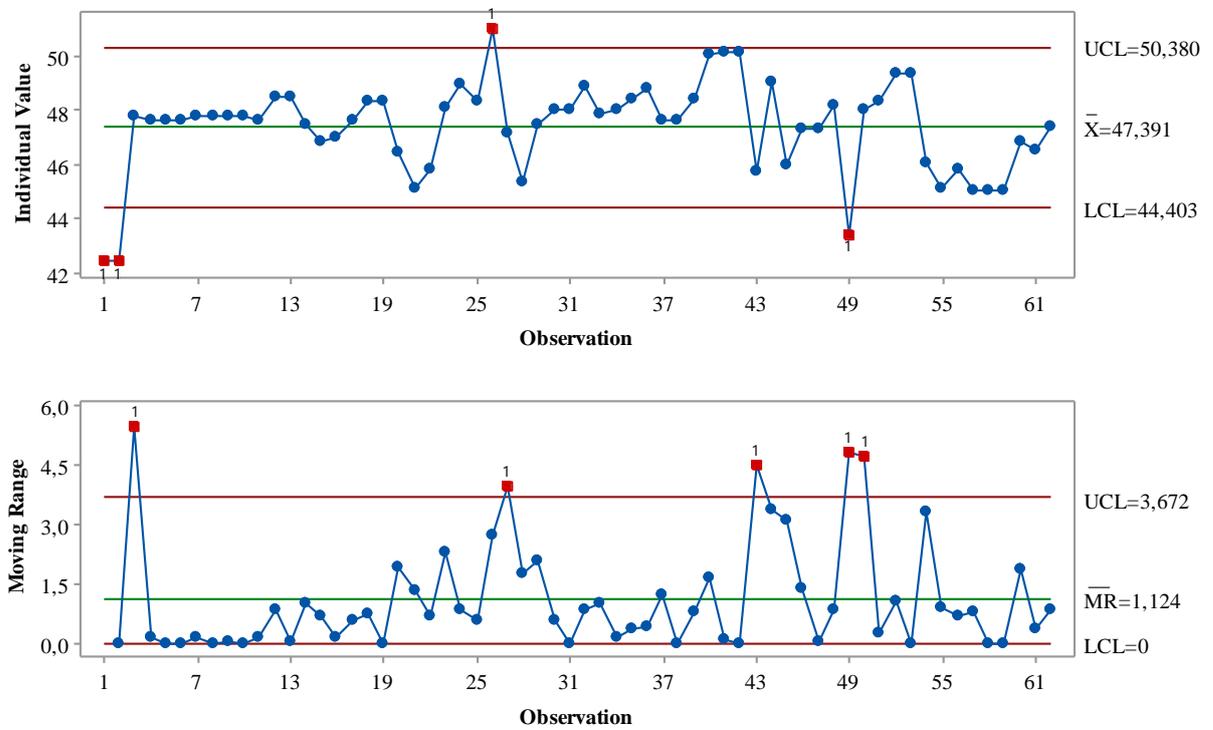


Figura 3.8. Cartas de controle dos valores individuais e de média móvel da porcentagem de umidade obtidos ao longo de dois meses de produção.

A carta de controle individual da Figura 3.8 reafirma o que havia sido observado na análise de capacidade do processo, isto é, o teor médio e umidade dos queijos observados é de 47,39%. Embora este valor seja próximo do alvo, a elevada variabilidade do processo, evidenciada pela carta de média móvel, implica numa faixa de variação expressiva (44,4 a 50,38%), em termos de composição do produto. Além disso, semelhante às cartas anteriores, estas apresentaram pontos vermelhos excedendo os limites de controle, indício de que causas especiais podem estar atuando no processo, promovendo a sua desestabilização.

3.2.4 Mapeamento do processo

Diante da instabilidade do processo, foi feito um mapeamento para uma melhor identificação das etapas que contribuíssem de forma mais significativa para a variabilidade, conforme apresentado na Figura 3.9. O esquema visual do processo de fabricação de queijo mussarela da fábrica estudada está disposto na Figura 3.10.

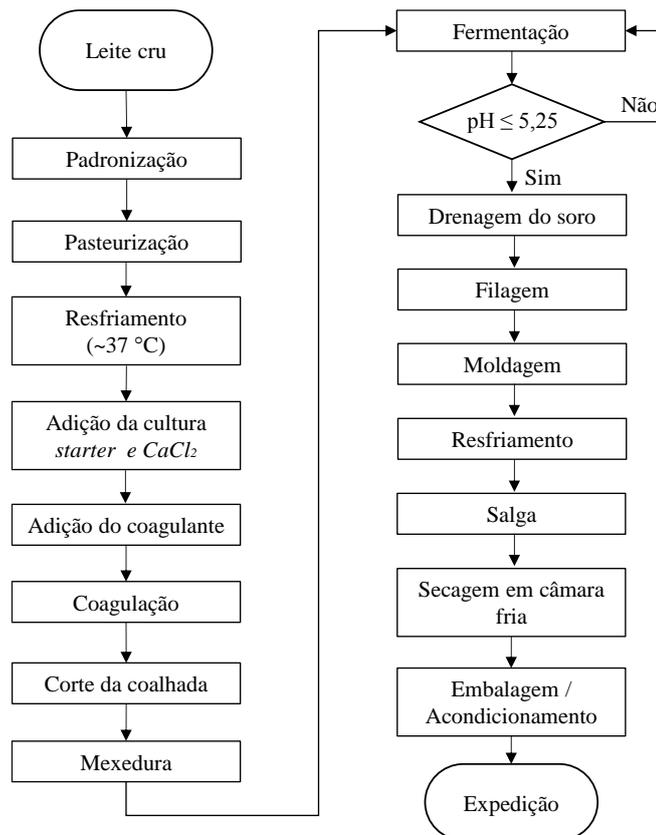


Figura 3.9. Fluxograma do processo de fabricação de mussarela da fábrica estudada.

Para a tomada de decisão durante a seleção do objeto de estudo, foi levado em consideração tanto as informações disponíveis na literatura, quanto as limitações do processo

investigado. Neste sentido, um *benchmarking* foi realizado junto à equipe do controle de qualidade da fábrica, onde o processo de filagem ficou definido como o objeto de estudo do presente trabalho.

Esta decisão foi tomada, uma vez que o processo de filagem representa uma etapa crítica do processamento de queijos do tipo *pasta-filata*, se constituindo de uma fase complexa que envolve diversas variáveis, as quais podem apresentar interações. Todavia, a quantidade de trabalhos na literatura que abordam a complexidade deste processo ainda é muito limitada. Somado a isso, levou-se em consideração o fato de que os parâmetros do processo de filagem não eram padronizados na empresa estudada, até então, indicando que ele apresentava um potencial de contribuição na instabilidade do processo global de fabricação do queijo mussarela.

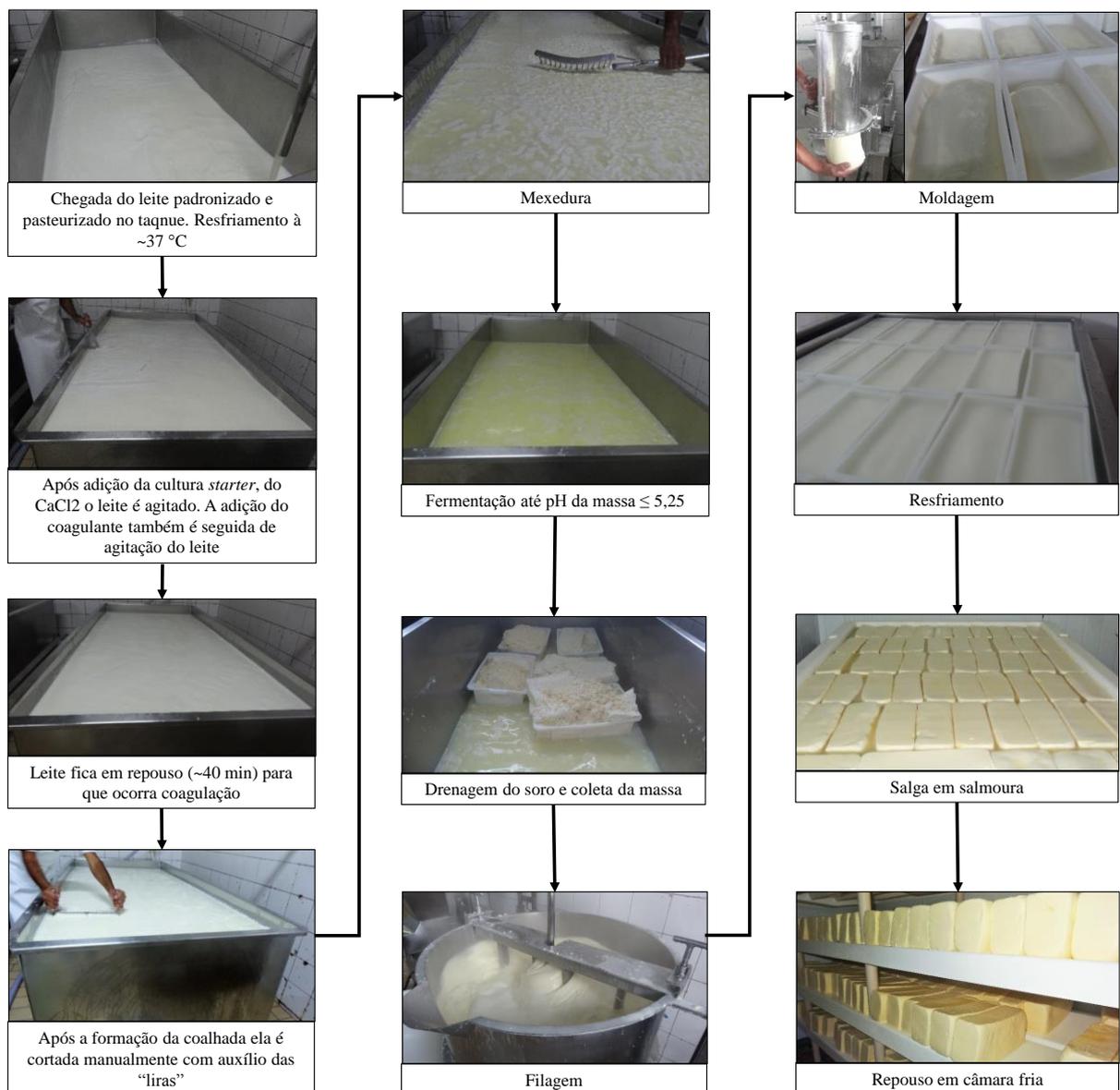


Figura 3.10. Esquema visual do processo de fabricação de queijo mussarela na fábrica estudada.

3.2.5 Detalhamento do objeto de estudo

O objeto de estudo do presente trabalho foi definido com base nas informações disponíveis na literatura e nas limitações do processo investigado. Desta forma, o mesmo consistiu na otimização da etapa de filagem do processo de fabricação industrial do queijo mussarela, com o objetivo de aumentar o rendimento, em termos de recuperação de gordura do leite no queijo, e de padronizar o teor de umidade dos produtos.

O processo foi configurado com duas variáveis de entrada controláveis e duas respostas foram analisadas, o que definiu o problema como bi-objetivo, conforme detalhado na Figura 3.11.

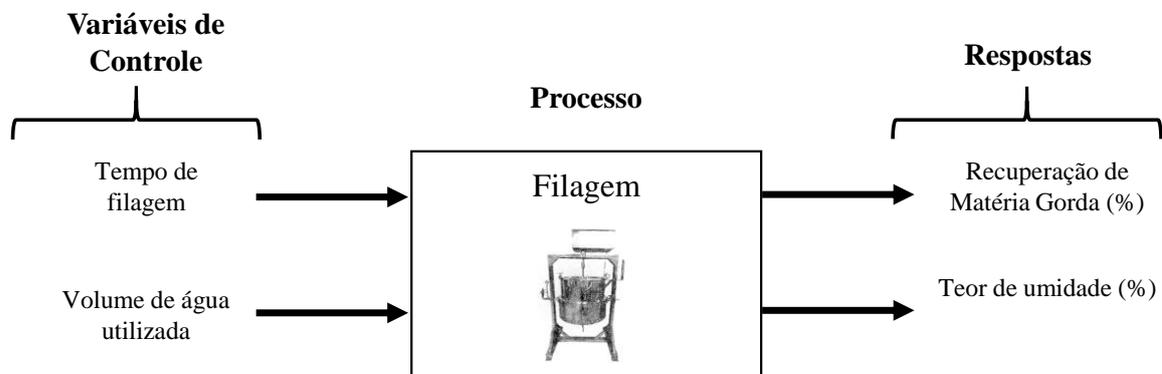


Figura 3.11. Esquematização do objeto de estudo.

O laticínio, onde os experimentos foram conduzidos, apresenta um processo de fabricação de mussarela do tipo batelada, sendo que a etapa de filagem é realizada em um tacho encamisado aberto, de aço inox, constituído de um garfo fixo e outro giratório com reversão, acionado por motor, com capacidade de 200 kg de massa por batelada (Figura 3.12).



Figura 3.12. Tacho de filagem de mussarela da fábrica estudada.

O aquecimento é feito por meio da inserção de vapor na camisa, através do acionamento de válvula, manualmente. Tanto a água quanto a massa fermentada do queijo são colocados no tacho pelos operadores da fábrica, de forma manual.

3.2.6 Procedimento experimental

Conforme detalhado na Figura 3.11, os parâmetros de processo definidos como variáveis de entrada controláveis, foram o tempo de filagem e o volume de água utilizado. Os experimentos foram planejados de acordo com o arranjo composto central circunscrito, criado para dois parâmetros em dois níveis e executados em duplicata, o que totalizou em oito pontos fatoriais ($2 \cdot 2^k = 2 \cdot 2^2 = 8$), oito pontos axiais ($2(2k) = 2(2 \cdot 2) = 8$) e dez pontos centrais ($cp = 2 \cdot 5 = 10$), resultando em 26 experimentos, com $\alpha = 1,414$.

Para a definição dos níveis dos parâmetros e o monitoramento do processo, levou-se em conta as considerações e análises feitas por trabalhos anteriores relacionados à produção de mussarela, conforme detalhado no Capítulo 2, bem como as conclusões obtidas em testes preliminares, os níveis já adotados pela fábrica e as limitações de processo, como por exemplo, a capacidade do tacho de filagem.

Baseando-se na literatura e nos valores adotados pela fábrica, foram estabelecidos os limites para os testes preliminares, ao final deles, foram fixados os níveis das variáveis de entrada, conforme descrito na Tabela 3.2. As respostas analisadas foram a porcentagem de recuperação de gordura do leite no queijo (R_{MG}) e teor de umidade do queijo mussarela (U).

Tabela 3.2. Parâmetros utilizados no processo de filagem e níveis de trabalho.

Parâmetros	Unidade	Notação	Níveis de trabalho				
			-2	-1	0	1	2
Volume de água	Litros	V	39,9	42,0	47,0	52,0	54,1
Tempo de filagem	Segundos	t	332,1	348,0	386,5	425,0	440,9

O pH da coalhada ácida e a temperatura, tanto da água quanto da massa ao final da filagem, representam as variáveis que não eram passíveis de ser controladas no processo estudado, devido às limitações do mesmo. Desta forma, elas foram monitoradas para que variassem dentro de um intervalo aceitável, de acordo com o que é proposto na literatura, conforme disposto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Intervalo de variação das variáveis não controláveis do processo.

Variável	Mínimo	Máximo
Temperatura da massa (°C)	54,0	63,7
Temperatura da água (°C)	80,1	85,0
pH	5,13	5,25

Para o monitoramento da temperatura da massa e da água durante o processo de filagem foi utilizado termômetro infravermelho, modelo 59 MAX da marca Fluke, com emissividade 0,93, valor indicado para aferição de temperatura de alimentos quentes. O pH da massa foi aferido de modo direto em pHmetro da marca CapLab, modelo PG 1800.

3.2.7 Coleta de dados

A coleta das respostas foi conduzida em duas etapas, na primeira delas, foram conduzidas as análises físico-químicas do queijo mussarela, já na segunda, foram feitos os cálculos das respostas relacionadas ao rendimento técnico do processo.

3.2.7.1 Análise físicas e químicas

Uma vez que a segunda etapa da coleta dos dados consistiu em cálculos de rendimento, além de coletar informações quanto às variáveis de saída do processo, isto é, o teor de nutrientes e umidade do queijo mussarela fabricado, também foi necessário obter informações referentes à composição do leite utilizado na fabricação destes produtos.

Para a determinação do teor de proteína e gordura do leite utilizado na fabricação do queijo mussarela foi empregado um equipamento analisador de leite, modelo Ekomilk M, da marca Cap-Lab, disponível no laticínio onde foram conduzidos os experimentos. O leite analisado e utilizado no processamento do queijo era, previamente, pasteurizado e padronizado, em termos de teor de gordura, em 3,0%.

As análises físico-químicas do queijo mussarela foram conduzidas no Laboratório de Análises de Alimentos, do Departamento de Tecnologia de Alimentos, da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Para cada um dos experimentos, foi coletada uma amostra de queijo mussarela e todas as análises físico-químicas foram realizadas em duplicata, sendo o valor final correspondente à média entre as duas replicatas.

I) Gordura

O teor de gordura das amostras de queijo mussarela foi determinado pelo método de Gerber, que é o mais utilizado para determinação de gordura em produtos derivados de leite (IAL, 2008).

II) Umidade

O teor de umidade foi determinado por meio de secagem de amostra em estufa a 105 °C até peso constante da amostra, conforme método descrito no Instituto Adolfo Lutz (2008).

3.2.7.2 Cálculos do rendimento

Conforme discutido no Capítulo 2, existem diferentes abordagens para o cálculo do rendimento no processo de fabricação de queijos. No presente trabalho, o enfoque foi dado no rendimento técnico, ou seja, aquele que avalia a capacidade do processo em recuperar os nutrientes presentes no leite, tais como gordura e proteína.

Levando em consideração que, proporcionalmente, a concentração da cultura *starter* no leite foi muito pequena (~0,00033) no presente trabalho, para fins de cálculo foi feita uma adaptação da Equação (2.3), em que se desconsiderou a concentração de gordura na cultura *starter*, obtendo-se a Equação (3.1).

$$\%R_{MG} = 100 \times \left[\frac{(M_Q) \times (C_{MGQ})}{(M_L) \times (C_{MGL})} \right] \quad (3.1)$$

Após a medição de todas as respostas, as mesmas foram organizadas para compor a matriz experimental (Tabela 3.4), a qual foi utilizada como fonte de dados para a modelagem das equações e otimização da etapa de filagem, do processo de fabricação de queijo mussarela. A variável V representa o volume de água utilizado, t o tempo de filagem, R_{MG} a porcentagem de gordura do leite recuperada no queijo e U o teor de umidade do queijo.

Tabela 3.4. Matriz experimental.

Teste	Parâmetros codificados		Parâmetros decodificados		Respostas	
	<i>V</i>	<i>t</i>	<i>V</i>	<i>t</i>	<i>R_{MG}</i> (%)	<i>U</i> (%)
1	-1,000	-1,000	42,0	348,0	70,81	46,21
2	1,000	-1,000	52,0	348,0	72,73	46,30
3	-1,000	1,000	42,0	425,0	71,46	48,22
4	1,000	1,000	52,0	425,0	74,34	43,88
5	-1,414	0,000	39,9	386,5	74,31	46,01
6	1,414	0,000	54,1	386,5	69,07	45,02
7	0,000	-1,414	47,0	332,1	75,05	45,60
8	0,000	1,414	47,0	440,9	75,25	45,53
9	0,000	0,000	47,0	386,5	68,94	44,37
10	0,000	0,000	47,0	386,5	65,88	44,96
11	0,000	0,000	47,0	386,5	67,83	46,01
12	0,000	0,000	47,0	386,5	65,54	44,90
13	0,000	0,000	47,0	386,5	70,96	44,57
14	-1,000	-1,000	42,0	348,0	70,01	47,12
15	1,000	-1,000	52,0	348,0	74,32	45,72
16	-1,000	1,000	42,0	425,0	72,27	47,61
17	1,000	1,000	52,0	425,0	75,15	44,17
18	-1,414	0,000	39,9	386,5	74,31	46,07
19	1,414	0,000	54,1	386,5	69,07	45,10
20	0,000	-1,414	47,0	332,1	71,06	45,06
21	0,000	1,414	47,0	440,9	72,08	47,07
22	0,000	0,000	47,0	386,5	66,96	44,29
23	0,000	0,000	47,0	386,5	65,88	45,28
24	0,000	0,000	47,0	386,5	66,41	46,43
25	0,000	0,000	47,0	386,5	65,54	45,31
26	0,000	0,000	47,0	386,5	67,26	45,11

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a finalização dos experimentos descritos no Capítulo 3, obtenção dos dados e organização da matriz (Tabela 3.4), o presente capítulo tem como objetivo dar sequência às etapas 2 e 3 do método experimental, afim de verificar a influência das variáveis de processo sobre o rendimento do produto final, levando em consideração a recuperação de nutrientes e a concentração de umidade da mussarela fabricada, bem como definir os parâmetros ótimos do processo.

Diante disto, dando continuidade ao método experimental, na 2ª Etapa será conduzida a modelagem das funções objetivo para cada uma das três respostas, seguida da análise dos efeitos principais e das interações entre os parâmetros nas respostas. Por fim, na 3ª Etapa será feita uma otimização simultânea das duas respostas, por meio do emprego dos métodos *Desirability* e Interseção Normal à Fronteira (NBI).

4.1 Modelagem das funções objetivo

Por meio do planejamento experimental e dos resultados obtidos na matriz para as respostas R_{MG} e U , conforme apresentado na Tabela 3.4, é possível obter o modelo de superfície de resposta de segunda ordem, o qual representa a relação matemática aproximada destas duas respostas, em função de duas variáveis de entrada controláveis do processo.

A Equação (4.1) apresenta o modelo de superfície de resposta utilizado como base para a modelagem das funções objetivo para cada uma das respostas de interesse.

$$y = \beta_0 + \beta_1 V + \beta_2 t + \beta_{11} V^2 + \beta_{22} t^2 + \beta_{12} V \cdot t \quad (4.1)$$

A estimação dos coeficientes β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} para cada uma das respostas, considerando as variáveis de entrada V e t codificadas, foi obtida por meio de análise estatística, baseada no Método dos Mínimos Quadrados (OLS), realizada no software *Minitab*® (versão 17). A Tabela 4.1 apresenta os valores dos coeficientes obtidos para os modelos quadráticos das respostas.

Tabela 4.1. Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos de cada resposta de interesse.

<i>R_{MG}</i>					<i>U</i>				
Termo	Coef	SE Coef	T	P	Termo	Coef	SE Coef	T	P
Cte	66,751	0,600	111,190	0,000	Cte	45,124	0,233	194,01	0,000
V	-0,176	0,475	-0,370	0,714	V	-0,742	0,184	-4,03	0,001
<i>t</i>	0,442	0,475	0,930	0,363	<i>t</i>	0,080	0,184	0,44	0,667
V*V	2,498	0,509	4,910	0,000	<i>V*V</i>	0,332	0,197	1,68	0,108
t*t	3,332	0,509	6,550	0,000	t*t	0,463	0,197	2,35	0,029
<i>V*t</i>	-0,059	0,671	-0,090	0,930	V*t	-0,810	0,260	-3,12	0,005
R²		75,18%			R²		62,70%		
R²(adj)		68,98%			R²(adj)		53,37%		
R²(prev)		50,86%			R²(prev)		33,79%		
S		1,8984			S		0,7355		

Valores em negrito representam os termos significativos (P-valor <0,05).

Nota-se que, para resposta *U*, apenas um dos termos lineares, um dos quadráticos e a interação foram significativos, decorrendo em um ajuste baixo, correspondente à $R^2_{adj}=53,37\%$. Já para a resposta *R_{MG}*, ambos os termos quadráticos foram significativos, denotando um ajuste um pouco melhor, porém ainda não muito bom ($R^2_{adj} = 68,98\%$).

4.2 Adequação e ajuste dos modelos

4.2.1 Análise de variância (ANOVA)

Como apresentado na Tabela 4.1, os valores de R^2 dos modelos não foram muito elevados, indicando que os mesmos têm baixa a moderada capacidade de explicação dos dados observados. Entretanto, visando complementar esta análise, a adequação dos modelos também foi verificada através da Análise de Variância (ANOVA), por meio do *software* estatístico *Minitab*®. Os resultados para *R_{MG}* e *U* estão expressos nas Tabelas 4.2 e 4.3, respectivamente.

Pela Tabela 4.2 observa-se que apenas o modelo quadrático foi significativo para a modelagem da equação da resposta *R_{MG}*, o que é coerente com os resultados da Tabela 4.1, a qual mostra que somente os termos quadráticos foram significativos para essa resposta. Além disso, também nota-se a falta de ajuste do modelo, uma vez que o p-valor para a análise de falta

de ajuste (do inglês, *Lack of Fit* – LOF) foi inferior à 0,05. Levando em consideração que existem termos não significativos e que o modelo apresentou falta de ajuste, uma alternativa para melhorá-lo é fazer a sua redução.

Tabela 4.2. Análise de Variância para Recuperação de gordura (R_{MG}).

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Modelo	5	218,36	43,672	12,12	0,000
Linear	2	3,622	1,811	0,50	0,612
Quadrático	2	214,71	107,354	29,79	0,000
Interação	1	0,028	0,028	0,01	0,930
Erro Residual	20	72,074	3,604		
<i>Lack-of-fit</i>	3	45,745	15,248	9,85	0,001
Erro puro	17	26,329	1,549		
Total	25	290,43			

Os resultados da Análise de Variância para a resposta U , apresentados na Tabela 4.3, evidenciam que todos os modelos, isto é, linear, quadrático e de interação, foram significativos (P -valor $< 0,05$), corroborando os dados da Tabela 4.1. Com relação à análise do erro residual do ajuste do modelo, percebe-se que ele não apresenta boa adequação, uma vez que $P_{LOF} < 0,05$. A pouca adequação do modelo somada ao seu baixo ajuste ($R^2_{adj} = 53,37\%$) indicam a necessidade de melhorar a modelagem desta função, o que pode ser feito por meio da remoção de termos não significativos.

Tabela 4.3. Análise de Variância para porcentagem de umidade dos queijos (U).

<i>Fonte</i>	<i>DF</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Modelo	5	18,1825	3,6365	6,72	0,001
Linear	2	8,9066	4,4533	8,23	0,002
Quadrático	2	4,0255	2,0127	3,72	0,042
Interação	1	5,2504	5,2504	9,71	0,005
Erro Residual	20	10,8186	0,5409		
<i>Lack-of-fit</i>	3	4,4939	1,498	4,03	0,025
Erro puro	17	6,3247	0,372		
Total	25	29,0011			

Diante do exposto acima, o passo seguinte na análise dos dados foi a remoção dos termos não significativos, que decorreu na obtenção de novos modelos. Como evidenciado pela análise de variância da resposta R_{MG} , os termos de interação entre as duas variáveis de entrada não

foram significativos, desta forma, a interação foi removida. Em relação à resposta U , optou-se por remover o termo quadrático do coeficiente β_{11} , uma vez que ele é o único termo não significativo que poderia ser removido.

Conforme exposto na Tabela 4.4, a redução do modelo para a resposta R_{MG} contribuiu para uma melhora no ajuste, uma vez que R^2_{adj} aumentou para 70,45%, embora o teste de *Lack-of-Fit* denote que ainda assim este modelo não apresenta uma boa adequação ($P_{LOF} < 0,05$). Já para a resposta U , a remoção do termo não significativo reduziu o ajuste do modelo ($R^2_{adj} = 49,29\%$) e piorou sua adequação ($P_{LOF} = 0,017$). Desta forma, optou-se por considerar o modelo reduzido para a resposta R_{MG} e completo para U , conforme as Equações (4.2) e (4.3), respectivamente.

$$R_{MG} = 66,751 - 0,176 V + 0,442 t + 2,498 V^2 + 3,332 t^2 \quad (4.2)$$

$$U = 45,124 - 0,742 V + 0,080 t + 0,332 V^2 + 0,463 t^2 - 0,810 V \cdot t \quad (4.3)$$

Tabela 4.4. Novos valores de R^2 obtidos após a redução dos modelos de regressão das respostas R_{MG} e U .

	R_{MG}		U		
	<i>Completo</i>	<i>Reduzido</i>	<i>Completo</i>	<i>Reduzido</i>	
R^2	75,18%	75,17%	R^2	62,70%	57,40%
$R^2(\text{adj})$	68,98%	70,45%	$R^2(\text{adj})$	53,37%	49,29%
$R^2(\text{prev})$	50,86%	56,04%	$R^2(\text{prev})$	33,79%	30,30%
S	1,8984	1,8530	S	0,7355	0,7670
P_{LOF}	0,001	0,001	P_{LOF}	0,025	0,017

P_{LOF} : P-valor do teste de *Lack-of-Fit*.

Reitera-se que a resposta U apresentou um ajuste muito baixo, portanto, antes de utilizar este modelo para a otimização do processo, faz-se necessário buscar outra alternativa para melhorá-lo, de modo que ele seja capaz de explicar melhor os dados. Já a resposta R_{MG} apresentou um ajuste razoável, porém é mais interessante que ele apresente um ajuste superior, em vista de que a otimização seja feita de forma mais eficaz. Neste sentido, uma alternativa encontrada no presente trabalho para melhorar a modelagem das respostas, foi utilizando-se da abordagem do método dos mínimos quadrados ponderados (*Weighted Least Squares – WLS*).

4.2.2 Análise de heteroscedasticidade dos resíduos

Conforme abordado no Capítulo 2, para modelos de regressão heteroscedásticos o método WLS é mais adequado na estimação dos coeficientes que o OLS. Levando em consideração que os modelos de regressão do presente trabalho não apresentaram bons ajustes pelo método OLS, optou-se por avaliar a heteroscedasticidade dos mesmos, a fim de verificar a possibilidade da aplicação do método WLS.

Levando em consideração que para a verificação da homocedasticidade ou não de uma distribuição, é necessário conduzir um teste de hipótese Qui-quadrado, conforme expresso na Equação (3.4), este foi o primeiro passo executado para a condução do teste de heteroscedasticidade dos modelos.

Para o teste do Qui-quadrado assumiu-se $n = 26$; $\alpha = 0,1$ e 1 grau de liberdade, obtendo-se $\chi^2_{1;0,1} = 2,71$. Em seguida, foram estabelecidos os modelos de regressão simples para cada uma das respostas, com base na Equação (3.3).

I) Análise de heteroscedasticidade para R_{MG}

Antes da condução dos testes de heteroscedasticidade, o comportamento da variância dos resíduos foi avaliado graficamente (Figura 4.1). Pela análise gráfica dos resíduos padronizados em relação aos valores ajustados do modelo, nota-se que há uma tendência no comportamento dos mesmos, indicando que eles são heteroscedásticos, ou seja, a variância dos resíduos não é constante em relação ao valor ajustado.

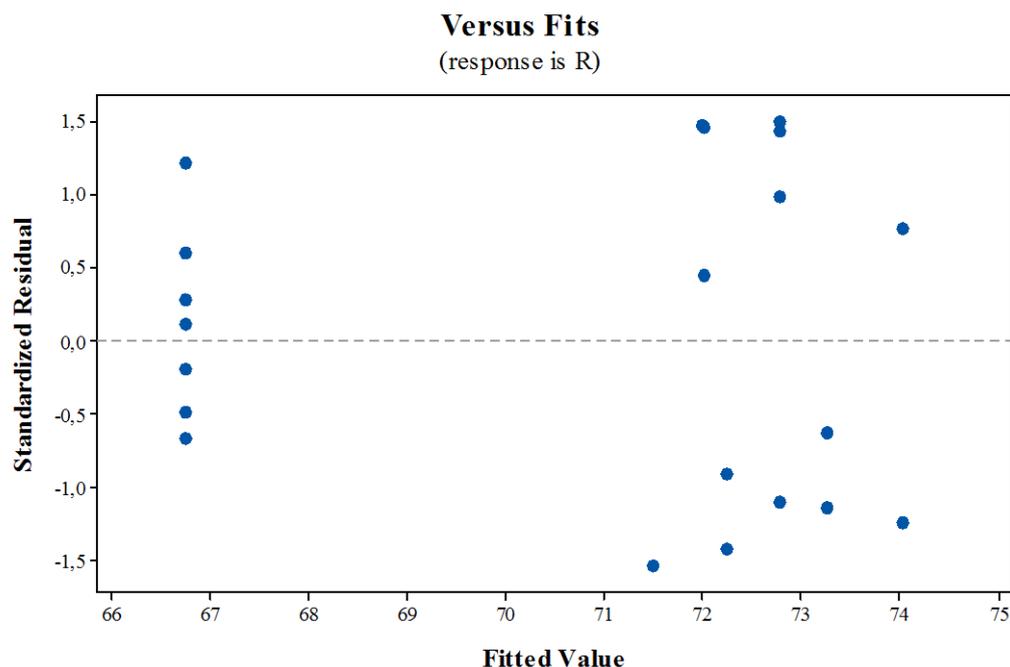


Figura 4.1. Gráfico dos resíduos padronizados *versus* o valor ajustado para a resposta R_{MG} .

Para confirmar esta hipótese, conduziu-se então o teste de heteroscedasticidade, obtendo-se a regressão linear simples, conforme Equação (4.4).

$$e^2 = -20,84 + 0,3356 R_{MG} \quad R^2 = 28,2\% = 0,282 \quad (4.4)$$

Multiplicando o valor de R^2 pelo número de experimentos, que no presente estudo foi equivalente à 26, tem-se:

$$nR^2 = 26 * 0,282 = 7,332 > \chi_{1;0,1}^2$$

Desta forma, conclui-se que os resíduos para a variável R_{MG} apresentam comportamento heteroscedástico.

II) Análise de heteroscedasticidade para U

A análise gráfica dos resíduos versus o modelo ajustado para a resposta U também indica que eles apresentam um comportamento heteroscedástico, tendo em vista que a medida que se varia o valor ajustado, a variância dos resíduos também varia, conforme expresso na Figura 4.2.

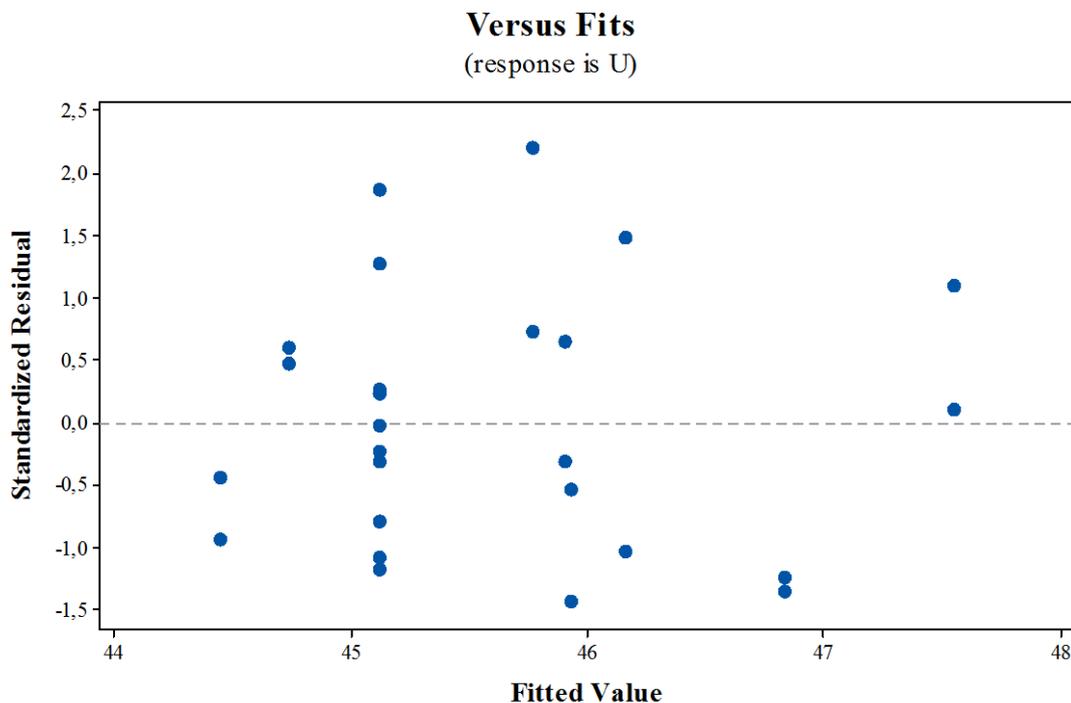


Figura 4.2. Gráfico dos resíduos padronizados versus o valor ajustado para a resposta U .

Desta forma, para confirmar esta hipótese, executou-se o mesmo procedimento de análise de heteroscedasticidade da resposta R_{MG} para a resposta U , obtendo-se a regressão linear simples descrita na Equação (4.5).

$$e^2 = -6,344 + 0,1482U \quad R^2 = 10,9\% = 0,109 \quad (4.5)$$

Sendo assim, tem-se que:

$$nR^2 = 26 * 0,109 = 2,834 > \chi_{1;0,1}^2$$

Diante deste resultado para o teste qui-quadrado, pode-se concluir que os resíduos do modelo da resposta U também apresentam comportamento heteroscedástico.

Neste sentido, o presente trabalho optou por aplicar o método WLS para os modelos das respostas U e R_{MG} com o objetivo de avaliar se esta ponderação seria capaz de reduzir a influência da variabilidade dos dados a ponto de melhorar o ajuste das distribuições.

4.2.3 Aplicação do método WLS

O primeiro passo para a aplicação do método WLS é a obtenção do modelo matemático que melhor represente a variável de resposta, por meio da aplicação do método OLS. Desta forma, como demonstrado anteriormente, após a utilização do OLS, o modelo mais adequado para a resposta R_{MG} foi o quadrático reduzido e para U o modelo completo. Após a obtenção dos melhores modelos, a próxima etapa consiste no cálculo do peso relacionado à cada resultado experimental, o qual é baseado no resíduo gerado pelo melhor modelo matemático obtido pelo OLS para cada condição experimental, por meio da relação descrita na Equação (4.6).

$$Peso(\hat{y}_{ij}) = \frac{1}{e_{ij}^2} \quad (4.6)$$

Em que, \hat{y}_{ij} : Melhor modelo ajustado obtido pelo método OLS
 e_{ij}^2 : Quadrado do resíduo do melhor modelo obtido pelo OLS

A Tabela 4.5 apresenta o cálculo do peso de acordo com o modelo ajustado pelo método OLS.

Tabela 4.5. Cálculo do peso para as variáveis de resposta U e R_{MG} de acordo com o modelo ajustado pelo OLS.

i	V	t	y_U	y_{RMG}	\hat{y}_U	\hat{y}_{RMG}	e_U	e_{RMG}	Peso (\hat{y}_U)	Peso (\hat{y}_{RMG})
1	-1,000	-1,000	46,21	70,81	45,77	72,31	0,44	-1,50	5,11	0,44
2	1,000	-1,000	46,30	72,73	45,91	71,96	0,39	0,76	6,42	1,71
3	-1,000	1,000	48,22	71,46	47,55	73,20	0,67	-1,74	2,21	0,33
4	1,000	1,000	43,88	74,34	44,45	72,85	-0,57	1,49	3,06	0,45
5	-1,414	0,000	46,01	74,31	46,84	72,00	-0,82	2,31	1,47	0,19
6	1,414	0,000	45,02	69,07	44,74	71,50	0,28	-2,42	12,33	0,17
7	0,000	-1,414	45,60	75,05	45,94	72,79	-0,33	2,26	8,98	0,20
8	0,000	1,414	45,53	75,25	46,16	74,04	-0,63	1,21	2,52	0,68
9	0,000	0,000	44,37	68,94	45,12	66,75	-0,75	2,19	1,76	0,21
10	0,000	0,000	44,96	65,88	45,12	66,75	-0,16	-0,87	38,42	1,31
11	0,000	0,000	46,01	67,83	45,12	66,75	0,89	1,08	1,27	0,86
12	0,000	0,000	44,90	65,54	45,12	66,75	-0,22	-1,21	19,91	0,68
13	0,000	0,000	44,57	67,26	45,12	66,75	-0,55	0,51	3,26	3,79
14	-1,000	-1,000	47,12	70,01	45,77	72,31	1,35	-2,31	0,55	0,19
15	1,000	-1,000	45,72	74,32	45,91	71,96	-0,19	2,36	27,97	0,18
16	-1,000	1,000	47,61	72,27	47,55	73,20	0,06	-0,93	255,06	1,15
17	1,000	1,000	44,17	75,15	44,45	72,85	-0,28	2,30	13,19	0,19
18	-1,414	0,000	46,07	74,31	46,84	72,00	-0,76	2,31	1,71	0,19
19	1,414	0,000	45,10	69,07	44,74	71,50	0,36	-2,42	7,57	0,17
20	0,000	-1,414	45,06	71,06	45,94	72,79	-0,88	-1,73	1,29	0,33
21	0,000	1,414	47,07	72,08	46,16	74,04	0,90	-1,96	1,22	0,26
22	0,000	0,000	44,29	66,96	45,12	66,75	-0,83	0,21	1,45	23,00
23	0,000	0,000	45,28	65,88	45,12	66,75	0,16	-0,87	38,42	1,31
24	0,000	0,000	46,43	66,41	45,12	66,75	1,30	-0,34	0,59	8,65
25	0,000	0,000	45,31	65,54	45,12	66,75	0,18	-1,21	29,49	0,68
26	0,000	0,000	45,11	67,26	45,12	66,75	-0,01	0,51	5617,24	3,79

Após a determinação do valor dos pesos para cada modelo ajustado, excuta-se a regressão com ponderação, considerando os mesmos termos adotados para o modelo ajustado (completo ou reduzido). A Tabela 4.6 apresenta a comparação com relação aos coeficientes, ajustes e adequação dos modelos obtidos por OLS e WLS para ambas as respostas avaliadas. Nota-se que, embora os modelos obtidos pelos dois métodos sejam semelhantes, uma vez que, de uma maneira geral os coeficientes de ambos são bem próximos, os índices em relação à adequação e ajuste dos modelos se diferem muito.

Para a resposta U , observa-se que os ajustes são largamente maiores pelo método WLS, atingindo quase 100% e que o modelo é adequado, visto que $P_{LOF} = 0,076$. Na resposta R_{MG} , ainda que a diferença entre os ajustes de ambos os métodos seja menor, quando comparada à resposta U , nota-se que há uma melhora considerável, uma vez que os valores de R^2 se

aproximaram de 90%. Além disso, o modelo também apresentou melhor adequação com $P_{LOF} > 0,05$.

Tabela 4.6. Comparação entre modelos obtidos pelos métodos OLS e WLS para as respostas R_{MG} e U .

Coeficiente	R_{MG}		U	
	OLS	WLS	OLS	WLS
β_0	66,751	66,823	45,124	45,1103
β_1	-0,176	0,370	-0,742	-0,798
β_2	0,442	0,522	0,08	0,072
β_{11}	2,948	2,453	0,332	0,455
β_{22}	3,332	3,315	0,463	0,313
β_{12}			-0,81	-0,863
R^2	75,17%	89,73%	62,70%	98,66%
R^2_{adj}	70,45%	87,77%	53,37%	98,33%
R^2_{prev}	56,04%	83,91%	33,79%	97,58%
P_{LOF}	0,001	5,60%	0,025	7,60%

P_{LOF} : P-valor de *Lack-of-fit*.

Levando em consideração a qualidade dos ajustes obtidos pelo método WLS para ambas as respostas avaliadas, no presente trabalho optou-se por adotar as regressões obtidas por este método. Os modelos das respostas R_{MG} e U estão descritos nas Equações (4.7) e (4.8), respectivamente.

$$R_{MG} = 66,823 + 0,377 V + 0,522 t + 2,453 V^2 + 3,315 t^2 \quad (4.7)$$

$$U = 45,110 - 0,798 V + 0,072 t + 0,455 V^2 + 0,313 t^2 - 0,863 V \cdot t \quad (4.8)$$

4.3 Análise dos efeitos dos parâmetros

Após a obtenção dos modelos de regressão para as respostas de interesse, é possível avaliar o modo como estas variáveis de saída se comportam em função das modificações feitas nas variáveis de entrada. Esta avaliação pode ser feita por meio da alteração do parâmetro que se deseja avaliar mantendo o outro constante, de modo que seus efeitos sobre as respostas de interesse possam ser identificados. Desta forma, os tópicos a seguir abordarão como os parâmetros estudados, isto é, volume de água e tempo gasto na etapa de filagem, influenciam as variáveis de resposta: teor de umidade do queijo (U) e porcentagem de recuperação de gordura (R_{MG}).

4.3.1 Análise dos efeitos principais sobre R_{MG} e U

O modo como os efeitos principais atuam sobre a porcentagem de recuperação de gordura (R_{MG}) do leite no queijo mussarela está representado na Figura 4.3, em que é possível observar que a Figura 4.3. Efeitos principais sobre a porcentagem de recuperação de gordura do leite para o queijo (R_{MG}). ambos os parâmetros avaliados apresentaram pontos de curvatura para a resposta R_{MG} , sendo que valores mínimos de recuperação foram encontrados com volume aproximado de 46,5 litros e tempo de 385 segundos. Valores mais elevados de recuperação de gordura foram observados próximos aos níveis extremos de tempo e volume de água, sendo que em ambos os parâmetros, aproximando-se dos seus valores mínimos e máximos a tendência é que haja um aumento considerável na porcentagem de recuperação de gordura.

Os efeitos principais sobre a resposta U podem ser observados na Figura 4.4, onde também se notam pontos de curvatura para ambos os parâmetros, sendo que valores mínimos de umidade são identificados para V próximo a 52 litros e valor de t de aproximadamente 385 segundos. Nota-se ainda, que ao se reduzir o parâmetro V a aproximadamente 40 litros, o teor de umidade se eleva de forma considerável, o parâmetro t por sua vez, não apresenta influência tão significativa na resposta U .

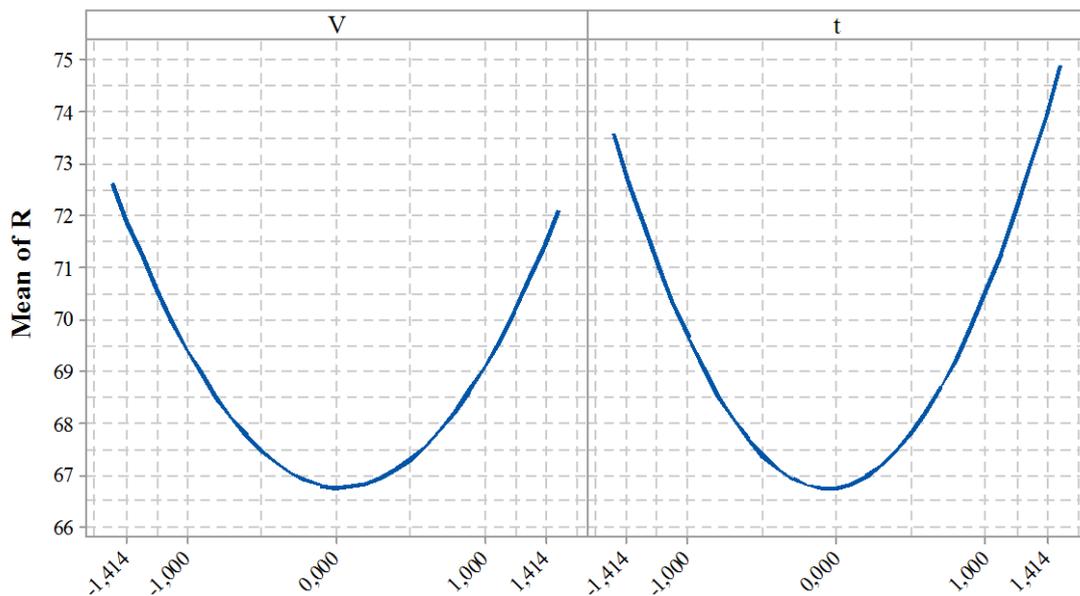


Figura 4.3. Efeitos principais sobre a porcentagem de recuperação de gordura do leite para o queijo (R_{MG}).

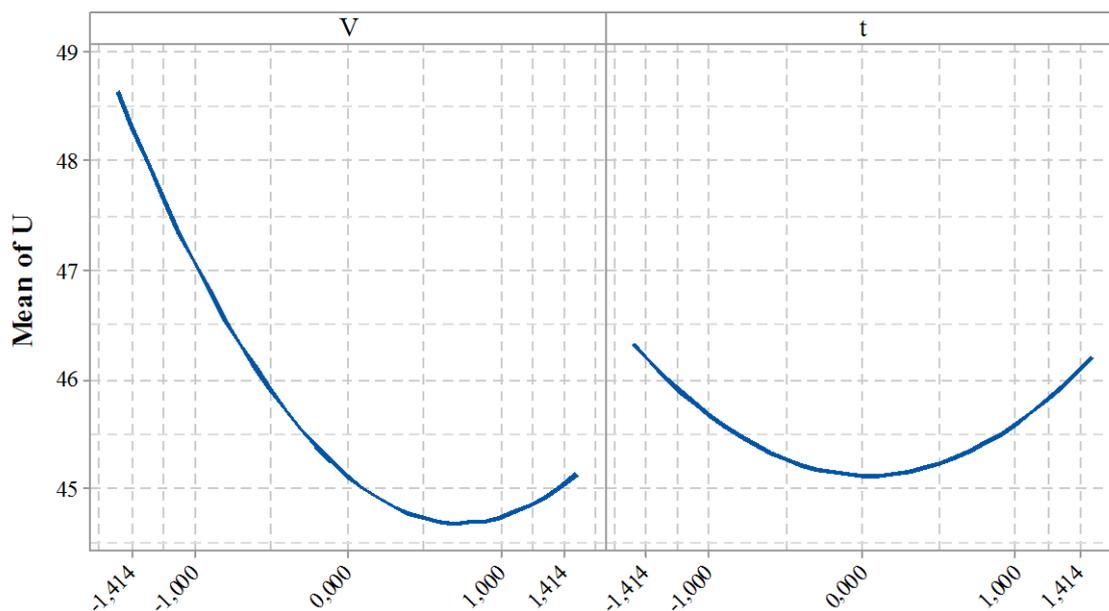


Figura 4.4. Efeitos principais sobre o teor de umidade do queijo mussarela (U).

4.3.2 Análise dos efeitos da interação sobre R_{MG} e U

O gráfico da Figura 4.5 evidencia a conclusão que já foi obtida anteriormente por meio de análises estatísticas, de que a interação entre os parâmetros V e t não é significativa sobre a resposta R_{MG} , uma vez que as linhas do gráfico não se interceptam.

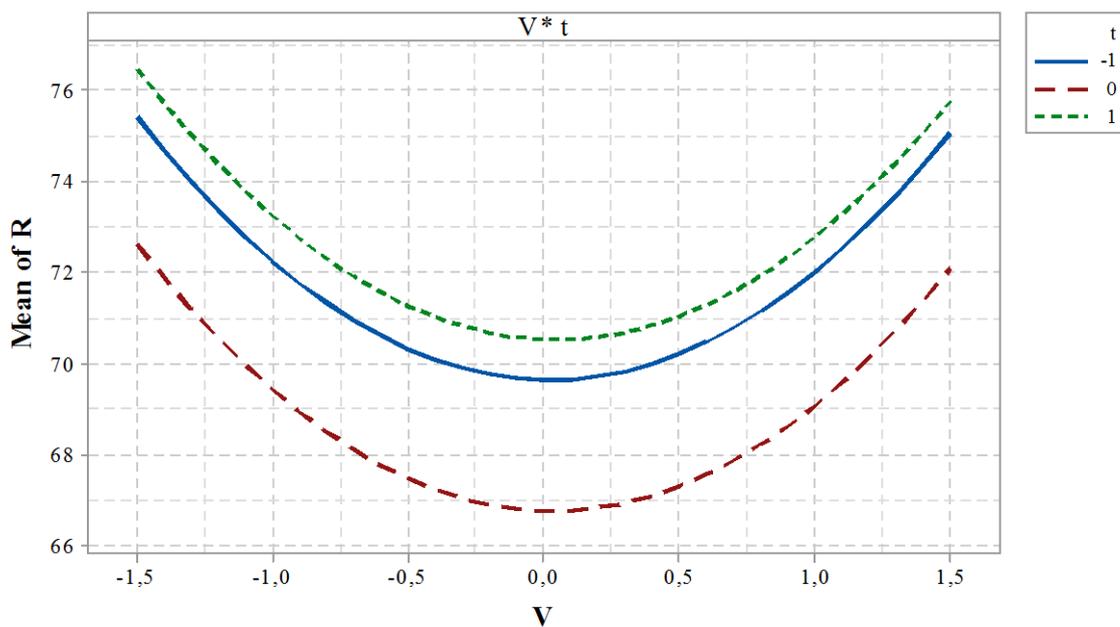


Figura 4.5. Efeitos da interação sobre a porcentagem de recuperação de gordura do leite para o queijo (R_{MG}).

O comportamento do gráfico da resposta U (Figura 4.6) é bem diferente daquele apresentado pela resposta R_{MG} , uma vez que neste caso há interseção entre as linhas, indicando que os efeitos da interação são significativos sobre a resposta U . Aqui é interessante notar que, embora o parâmetro t não seja significativo para U , quando ele interage com V ele passa a influenciar significativamente esta resposta de interesse, ressaltando a importância de se avaliar como a interação entre variáveis de entrada impactam os *outputs* de um processo. Vale ressaltar, que estes gráficos evidenciam as conclusões que já haviam sido obtidas pela análise de variância (ANOVA) dos dados das funções objetivo, uma vez que ela indicou que a interação era significativa para o teor de umidade (U) e não significativa para porcentagem de recuperação de gordura (R_{MG}).

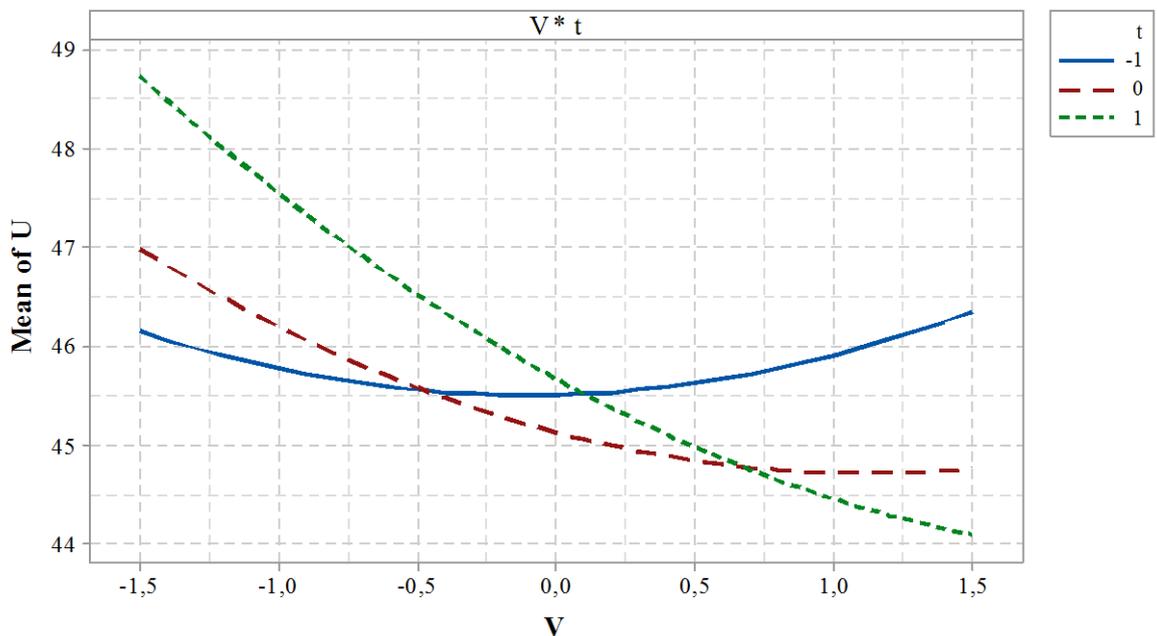


Figura 4.6. Efeitos da interação sobre o teor de umidade do queijo mussarela (U).

4.4 Identificação da convexidade das funções de R_{MG} e U

Com o objetivo de compreender melhor como os parâmetros avaliados influenciam cada uma das respostas de interesse, bem como de identificar a convexidade das funções, foi feita uma análise canônica para identificação do sinal dos autovalores de cada uma das funções objetivo, conforme apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7. Autovalores e convexidade das funções objetivo.

Função	U	R_{MG}
Autovalores da matriz hessiana	0,82157	2,46312
	-0,0528	0,52266
Convexidade	Sela	Convexa

Pelos autovalores da matriz hessiana é possível concluir que a função da resposta U não apresenta nem ponto de mínimo nem de máximo, uma vez que ambos possuem sinais contrários, indicando que sua superfície se comporta como sela, conforme evidenciado pelo gráfico da Figura 4.7a. Os autovalores da função R_{MG} , por sua vez, apresentaram sinal positivo, sugerindo que a superfície desta resposta apresenta comportamento convexo e, portanto, ponto de mínimo, como apresentado no gráfico da Figura 4.7b.

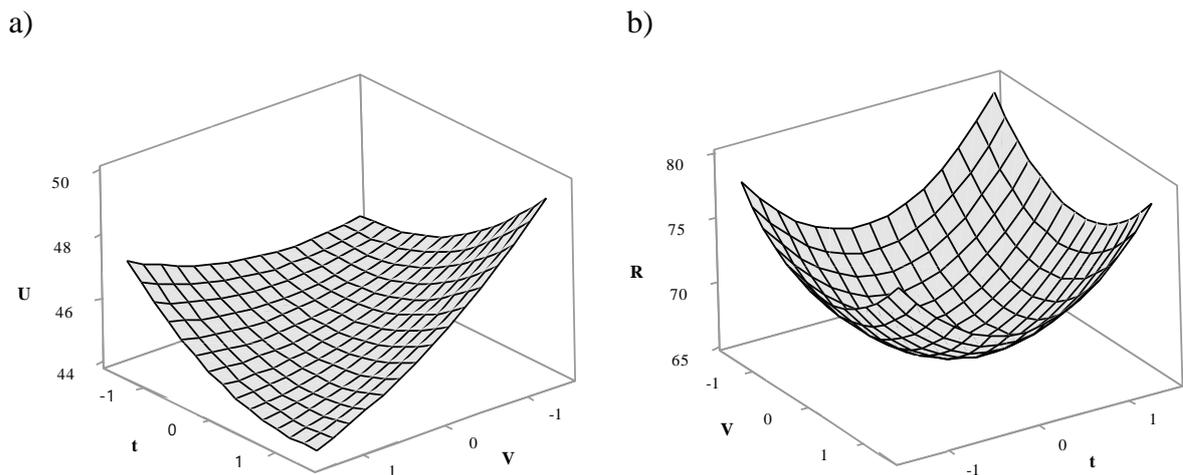


Figura 4.7. Superfícies de resposta em função dos parâmetros V e t para (a) Resposta U . (b) Resposta R_{MG} .

Levando em consideração que o objetivo do presente trabalho é maximizar a função de R_{MG} e atingir um alvo para a função de U , espera-se que na otimização destas funções a restrição do espaço experimental fique ativa, uma vez que se deseja maximizar uma função que apresenta ponto de mínimo e atingir um alvo específico para uma função que possui ponto de sela.

4.5 Otimização das respostas

Com o intuito de otimizar simultaneamente as funções objetivo de modo eficaz, o presente trabalho se utilizou de dois métodos de otimização multiobjetivo e, posteriormente, comparou os resultados obtidos por ambos. O primeiro deles foi o *Desirability*, um dos métodos de

otimização mais antigos e populares, sendo amplamente aplicado tanto na área acadêmica, quanto industrial. Embora seja um dos métodos mais utilizados na resolução de problemas com múltiplas respostas ele não leva em consideração a variância nem a correlação entre elas, o que pode acabar decorrendo em soluções irrealis ou incoerentes (WU 2005; KO *et al.*, 2005).

Além disso, apesar de este método permitir que as respostas de interesse recebam ponderações diferentes, conforme sua importância ou prioridade no processo/produto final, dentro de uma escala adimensional que varia entre 0 e 1 (DERRINGER, 1994); esta ponderação não possui um critério de escolha, ou seja, é dependente do tomador de decisão, o que pode, muitas vezes, acarretar em uma escolha que não conduz à solução ótima.

Diante disto, optou-se por otimizar as funções objetivo pelo método de Interseção Normal à Fronteira (NBI), com a finalidade de alcançar a melhor configuração de parâmetros para o processo de fabricação estudado, uma vez que este método permite a construção de fronteiras de Pareto contínuas e igualmente espaçadas, com 21 soluções ótimas e viáveis, independentemente da distribuição de pesos entre as funções objetivo.

Quando se trata de processos em que múltiplas respostas são avaliadas, um fenômeno comum é a dependência entre elas, ou seja, a presença de correlação. De acordo com Box *et al.* (1973), este fenômeno pode influenciar na otimização das respostas de interesse e desestabilizar os modelos matemáticos. Neste sentido, antes da otimização pelos métodos *Desirability* e NBI, foi feita a análise de correlação pelo método de Pearson, com auxílio do software Minitab®.

Pela Tabela 4.8 verifica-se que U e R_{MG} não apresentam correlação (P -valor $> 0,05$), desta forma, torna-se viável a aplicação direta dos métodos de otimização *Desirability* e NBI, conforme será detalhado nos itens a seguir.

Tabela 4.8. Resultado da análise de correlação entre as respostas U e R_{MG} .

Correlação	0,335
P-value	0,094

4.5.1 Método *Desirability*

A otimização pelo método *Desirability* foi feita com auxílio do *software* estatístico Minitab®. Primeiramente, realizou-se a otimização individual de cada uma das funções para avaliar como elas se comportavam, os resultados estão expressos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Resultados da otimização individual das funções objetivo pelo método *Desirability*.

Variável Resposta	d	Y	Otimização individual				Objetivo
			Parâmetros codificados		Parâmetros decodificados		
			V	t	V	t	
R_{MG}	1,0000	79,6300	1,4142	1,4142	54,0710	440,9467	Maximização
U	1,0000	47,0000	-0,5156	1,4142	44,4220	440,9467	Alvo

Percebe-se que tanto R_{MG} quanto U apresentaram um bom desempenho na otimização pelo método *Desirability*, já que ambas as respostas conseguiram se aproximar de seus objetivos, com $d = 1,0$. Para a resposta U , o alvo era de 47%, o qual é atingido quando os parâmetros (decodificados) são aproximadamente 44,4 litros e 441 segundos para V e t , respectivamente. Já para a resposta R_{MG} , a qual se desejava maximizar, o maior valor possível de recuperação de gordura, no processo avaliado, é por volta de 79,63%, quando o volume (V) de água corresponde à aproximadamente 54 litros e o tempo (t) à 441 segundos.

Estes resultados indicam que os parâmetros ótimos selecionados pelo *Desirability* para as otimizações individuais, com exceção de V para a resposta U , correspondem aos pontos axiais do arranjo CCD. Este resultado é coerente com a superfície da resposta R_{MG} , pois, uma vez que ela é convexa e se deseja maximizá-la, espera-se que seus pontos de ótimo sejam próximos aos pontos axiais.

Como o objetivo é padronizar o teor de umidade do queijo mussarela e, concomitantemente, aumentar a recuperação de gordura do leite no queijo, conduziu-se a otimização simultânea das respostas, assumindo-se o mesmo peso e importância para ambas. Os resultados estão expressos nos gráficos da Figura 4.8, onde é possível notar que os parâmetros ótimos para a otimização simultânea das respostas são: tempo igual à 440,95 segundos e volume de 44,42 litros (relação massa de coalhada e água correspondente à 4,5).

Pelos gráficos, nota-se que mesmo que a otimização seja feita simultaneamente, ambas as funções se aproximam de seus objetivos com $d = 1$, decorrendo em um D ótimo global correspondente a 1. Entretanto, embora U permaneça atingindo seu objetivo de 47,0%, a otimização de ambas as respostas implicou na redução do valor ótimo de R_{MG} para 74,65%. Todavia esta porcentagem de recuperação de gordura ainda é elevada quando comparada à média do processo estudado nas suas condições atuais (65,0%), o qual apresenta uma média de recuperação de aproximadamente 65,18%.

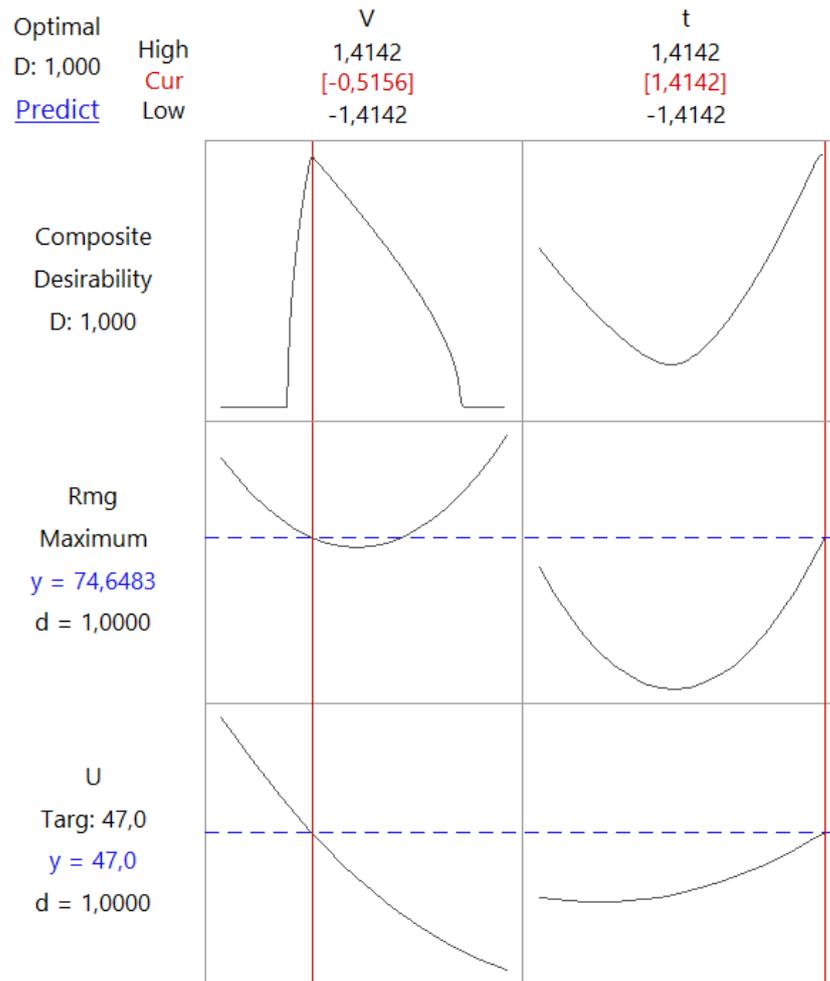


Figura 4.8. Gráfico de otimização simultânea das respostas R_{MG} e U pelo método *Desirability*.

4.5.2 Método de Interseção Normal à Fronteira (NBI)

O primeiro passo para a condução do método NBI, foi o cálculo da matriz *Payoff*, conforme Equação (2.16). Esta matriz foi obtida através da otimização individual de cada função objetivo pelo algoritmo Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), disponível no Solver do *software* Microsoft Excel®, obtendo-se os valores de utopia para a resposta $U = 47,726$ e $R_{MG} = 74,222$, como exposto na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Matriz *Payoff* das respostas de interesse.

U	47,726	45,482
R_{MG}	72,146	74,222

Tendo em vista que se trata de um problema bi-objetivo, após a obtenção da matriz *Payoff*, foi realizada a otimização pelo NBI com base na Equação (2.18), com pesos variando entre 0 e 1, de 5 em 5%, conforme disposto na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Resultado da otimização das respostas U e R_{MG} pelo método NBI.

Pesos		Parâmetros Codificados		Parâmetros Decodificados		Funções objetivo	
w_1	w_2	V	t	$V(L)$	$t(s)$	U	R_{MG}
0,00	1,00	0,179	1,403	47,90	440,50	45,4823	74,2223
0,05	0,95	0,072	1,412	47,36	440,87	45,6935	74,2101
0,10	0,90	-0,023	1,414	46,89	440,93	45,8846	74,1792
0,15	0,85	-0,110	1,410	46,45	440,78	46,0606	74,1344
0,20	0,80	-0,190	1,401	46,05	440,44	46,2247	74,0786
0,25	0,75	-0,267	1,389	45,67	439,96	46,3786	74,0134
0,30	0,70	-0,339	1,373	45,30	439,35	46,5237	73,9399
0,35	0,65	-0,409	1,354	44,96	438,62	46,6607	73,8591
0,40	0,60	-0,476	1,332	44,62	437,77	46,7902	73,7712
0,45	0,55	-0,541	1,307	44,30	436,80	46,9125	73,6768
0,50	0,50	-0,604	1,279	43,98	435,73	47,0280	73,5760
0,55	0,45	-0,666	1,248	43,67	434,53	47,1366	73,4688
0,60	0,40	-0,726	1,213	43,37	433,21	47,2383	73,3553
0,65	0,35	-0,786	1,175	43,07	431,75	47,3329	73,2352
0,70	0,30	-0,845	1,134	42,77	430,15	47,4201	73,1083
0,75	0,25	-0,904	1,088	42,48	428,37	47,4994	72,9740
0,80	0,20	-0,962	1,036	42,19	426,40	47,5698	72,8316
0,85	0,15	-1,020	0,979	41,90	424,19	47,6304	72,6799
0,90	0,10	-1,079	0,914	41,60	421,68	47,6791	72,5174
0,95	0,05	-1,139	0,838	41,31	418,77	47,7129	72,3411
1,00	0,00	-1,201	0,747	41,00	415,26	47,7264	72,1460

Os 21 pontos ótimos foram plotados graficamente, com o auxílio do *software* Minitab®, obtendo-se a fronteira de Pareto equispçada, conforme exposto na Figura 4.9.

Os resultados evidenciam a boa performance do método de otimização NBI para a localização dos parâmetros ótimos do processo de filagem estudado, uma vez que, de um modo geral, a porcentagem de umidade dos produtos é mais próxima do objetivo e a porcentagem de recuperação de gordura mais elevada do que aquelas obtidas experimentalmente.

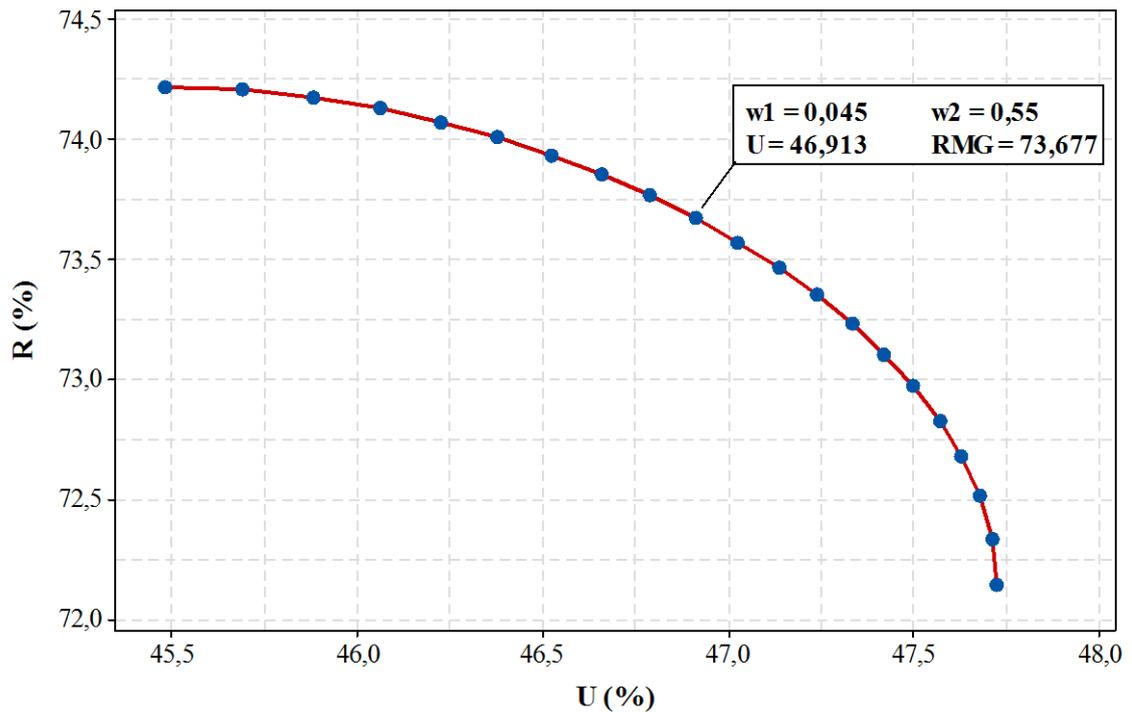


Figura 4.9. Fronteira de Pareto obtida pela otimização biobjetivo de U e RMG .

O conjunto de parâmetros otimizados permite que o processo seja configurado de modo a se obter os melhores resultados para as respostas de interesse, dentro das condições de operação do processo estudado. Neste sentido, espera-se que a recuperação de gordura do leite no queijo e o teor de umidade variem numa faixa de 72,11% até 74,22% e 45,48% a 47,73%, respectivamente, quando o equipamento operar em condições ótimas, ou seja, num intervalo de tempo de 397 a 440,5 segundos, com volume de água variando entre 40,06 e 47,90 litros, o que corresponde à, aproximadamente uma proporção de 4,18 à 4,99 de massa de coalhada para água.

Embora os 21 pontos plotados na fronteira de Pareto sejam ótimos e viáveis, optou-se por selecionar o melhor dentre eles, por meio do cálculo do erro percentual global (EPG) das respostas, baseado na Equação (4.9). O ponto escolhido como o melhor foi aquele que apresentou o menor EPG.

$$EPG_T = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^*}{T_i} - 1 \right| \quad (4.9)$$

Em que, EPG_T : Erro Percentual Global das respostas Pareto-ótimas em relação aos alvos;

- y_i^* : Valores ótimos para cada resposta de interesse;
 T_i : Alvos definidos (valores de utopia da matriz *Payoff*);
 n : Número de respostas de interesse.

Para a resposta U , o alvo selecionado foi 47%, uma vez que se objetiva atingir este teor de umidade para o produto final; já para R_{MG} considerou-se o valor de utopia da matriz *Payoff* como o alvo, visto que quanto maior a recuperação de gordura do leite para o queijo, melhor.

A Tabela 4.12 mostra que a resposta Pareto-ótima que apresenta o menor erro percentual global é o ponto em que $w_1 = 0,45$ e $w_2 = 0,55$, conforme destacado no gráfico da Figura 4.9. Este ponto ótimo compreende um teor de umidade (U) para a mussarela de 46,91% e uma porcentagem de recuperação de gordura (R_{MG}) do leite no queijo correspondente à 73,67%.

Tabela 4.12. Cálculo do Erro Percentual Global (EPG) para as soluções Pareto-ótimas.

Pesos		EPG (U)	EPG (R_{MG})	EPG _T
w_1	w_2			
0,00	1,00	0,0323	0,0000	0,0323
0,05	0,95	0,0278	0,0002	0,0280
0,10	0,90	0,0237	0,0006	0,0243
0,15	0,85	0,0200	0,0012	0,0212
0,20	0,80	0,0165	0,0019	0,0184
0,25	0,75	0,0132	0,0028	0,0160
0,30	0,70	0,0101	0,0038	0,0139
0,35	0,65	0,0072	0,0049	0,0121
0,40	0,60	0,0045	0,0061	0,0105
0,45	0,55	0,0019	0,0073	0,0092
0,50	0,50	0,0006	0,0087	0,0093
0,55	0,45	0,0029	0,0101	0,0131
0,60	0,40	0,0051	0,0117	0,0167
0,65	0,35	0,0071	0,0133	0,0204
0,70	0,30	0,0089	0,0150	0,0239
0,75	0,25	0,0106	0,0168	0,0274
0,80	0,20	0,0121	0,0187	0,0309
0,85	0,15	0,0134	0,0208	0,0342
0,90	0,10	0,0144	0,0230	0,0374
0,95	0,05	0,0152	0,0253	0,0405
1,00	0,00	0,0155	0,0280	0,0434

4.5.3 Comparação entre os métodos de otimização

A Tabela 4.13 apresenta a comparação dos resultados otimizados obtidos pelos dois métodos de otimização aplicados no presente trabalho. Nota-se que não houve uma diferença expressiva entre o *Desirability* e NBI no que tange aos parâmetros otimizados, uma vez que a diferença de volume (V) foi de apenas mililitros (~ 220 mL), e de tempo (t) de aproximadamente 4 segundos entre os dois métodos.

Com relação às respostas de interesse, observa-se que o *Desirability* conseguiu atingir exatamente o alvo para a resposta U , enquanto que, se considerado o ponto ótimo da fronteira de Pareto, o NBI atingiu 46,94% de teor de umidade, valor igualmente próximo ao objetivo. Com relação à recuperação de gordura do leite no queijo (R_{MG}), foi possível observar que o *Desirability* apresenta valores mais elevados (74,65%) em comparação ao ponto ótimo da fronteira de Pareto do NBI (73,66%), entretanto este método mostra que é possível atingir uma recuperação de até 74,22%, desde que se considere uma ponderação maior para a resposta R_{MG} .

Tabela 4.13. Comparação dos resultados otimizados obtidos pelos métodos *Desirability* e NBI.

	Parâmetros codificados		Parâmetros decodificados		Valores otimizados	
	V	t	V (L)	t (s)	U (%)	R_{MG} (%)
<i>Desirability</i>	-0,5156	1,414	44,42	440,95	47,00	74,65
NBI	-0,555	1,301	44,30	436,80	46,94	73,66

No presente estudo, o NBI foi empregado na otimização das funções objetivo com o intuito de verificar as respostas otimizadas pelo *Desirability*. Os resultados do NBI comprovam o que havia sido obtido pelo outro método de otimização, uma vez que ele reafirmou que as condições ótimas de operação para o processo investigado no presente trabalho se encontram próximas à 44 litros de água e à, aproximadamente, 440 segundos de filagem. Sabendo-se que o *Desirability* desconsidera a existência de variância-covariância entre as funções objetivo, uma possível explicação para o bom desempenho deste método no presente estudo é o fato de não haver correlação entre as duas respostas analisadas.

Com o objetivo de avaliar graficamente as regiões em que os parâmetros operam em condições ótimas, foi realizada a sobreposição dos gráficos de contorno das superfícies, conforme gráfico da Figura 4.10, sendo que para os valores de mínimo e máximo de cada resposta foram considerados os pontos de nadir e utopia da matriz *Payoff*.

Pela análise do gráfico nota-se que, embora o ponto de ótimo obtido pelo método *Desirability* esteja dentro da região experimental, ele se encontra fora da região viável gerada pelo método NBI. Todavia, a diferença dos parâmetros ótimos obtidos pelos dois métodos é tão pequena que, em termos práticos de operação de processo, tanto os pontos ótimos obtidos pelo *Desirability* quanto pelo NBI poderiam ser implementados, obtendo-se respostas otimizadas com valores bem semelhantes.

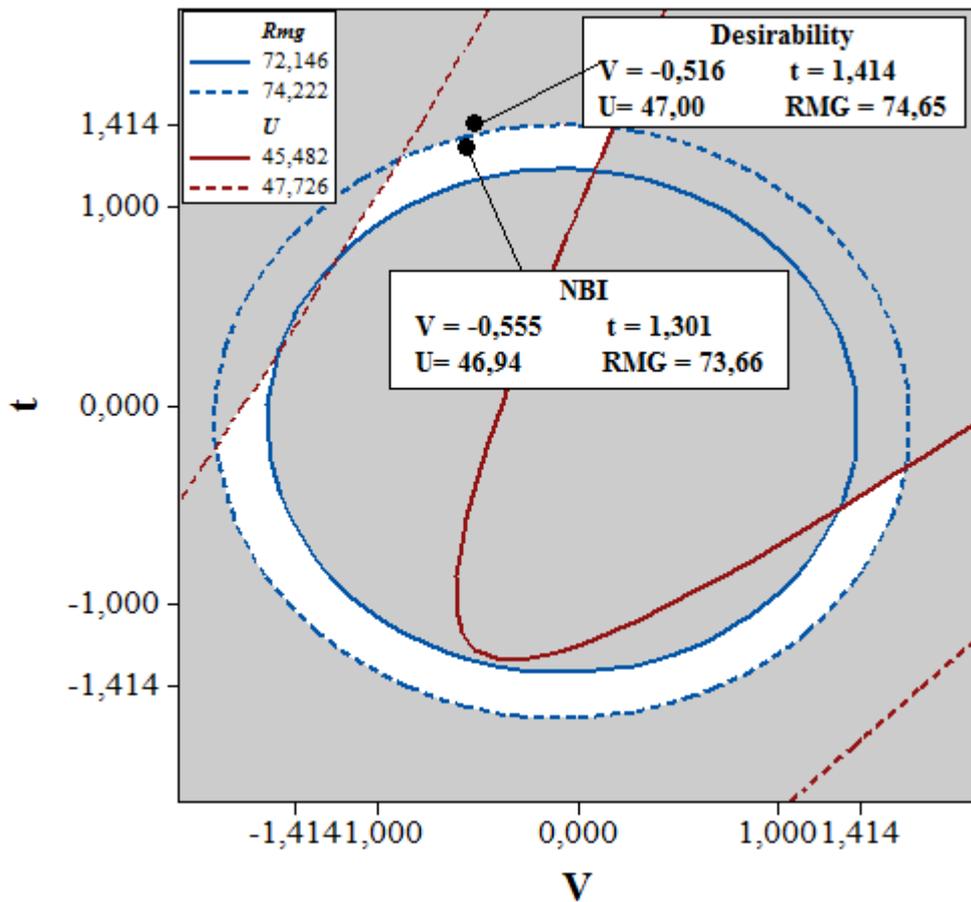


Figura 4.10. Representação gráfica da sobreposição dos gráficos de contorno das respostas R_{MG} e U .

5. CONCLUSÃO

5.1 Contribuições do trabalho

A principal contribuição do presente trabalho consistiu na otimização de um processo industrial de fabricação de queijo mussarela em batelada, implicando na padronização do teor de água dos produtos fabricados e no aumento do rendimento do processo, em termos de recuperação de gordura.

Concomitantemente, a revisão de literatura realizada na presente pesquisa constatou que ainda não existem trabalhos na literatura que abordam a otimização do processo de filagem na fabricação de queijos do tipo *pasta-filata*, por meio do uso da Metodologia de Superfície de Resposta conjugada com os métodos de otimização multiobjetivo, da maneira como foi desenvolvida nesta pesquisa, evidenciando o potencial de contribuição deste trabalho.

É interessante ainda ressaltar que os objetivos inicialmente propostos no presente trabalho foram cumpridos, a saber:

- Embora a qualidade do leite seja um fator determinante no rendimento do processo e na composição do queijo mussarela, foi constatado que os parâmetros de processo também impactam diretamente nestas respostas, uma vez que, no presente estudo, as variáveis tempo e volume de água influenciaram tanto o teor de umidade dos produtos, quanto o rendimento do processo, em termos de recuperação de gordura do leite no queijo:
 - Se os parâmetros ótimos forem aplicados no processo de filagem da fábrica, o rendimento, em termos de recuperação de gordura, poderá aumentar em quase 10,0%, em comparação à média de recuperação de gordura atual e, simultaneamente, permitirá a padronização do teor de umidade dos produtos no valor de 47,0%;
 - O aumento da recuperação do teor de gordura irá implicar num menor impacto ambiental, já que a quantidade de gordura perdida no processo será reduzida e, conseqüentemente, um menor volume de efluente será gerado. Concomitantemente, o ganho econômico do laticínio poderá ser mais elevado, já que, além de aumentar o rendimento do processo, espera-se que ele também gastará menos recursos com tratamento de efluentes, uma vez que o volume deste será reduzido.

- O *Desirability* e o NBI apresentaram desempenhos semelhantes na otimização das funções objetivo e, em termos operacionais de processo, os parâmetros otimizados obtidos por cada método não se diferem;
- Ainda que os processos de pequenas empresas sejam menos automatizados e mais instáveis aos fatores incontroláveis, o presente trabalho constatou que é possível estudar e propor melhorias para estes processos produtivos, por meio da aplicação de técnicas estatísticas mais robustas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O presente trabalho focou no entendimento e estudo da melhoria da etapa de um processo alimentício industrial particular: filagem da massa de queijo mussarela em batelada, utilizando filadeira do tipo tacho aberto, constituída de dois garfos (um fixo e outro de reversão), por meio da aplicação de técnica de planejamento de experimento, métodos e algoritmos de otimização específicos. Entretanto, em vista de complementar os resultados obtidos nesta pesquisa, outros aspectos podem ser abordados em trabalhos futuros, tais como:

- Avaliação do impacto da otimização dos parâmetros de processo na qualidade do produto no que tange aos aspectos sensoriais (textura, aroma, sabor e aparência) e propriedades funcionais (elasticidade, capacidade de derretimento, etc.);
- Avaliação do efeito que os parâmetros de processo causam na transição de cálcio coloidal para cálcio solúvel, durante a filagem, bem como na quantidade de proteína presente na massa ao final do processo;
- Avaliação do impacto dos parâmetros do processo de filagem na qualidade e rendimento de outros queijos da variedade *pasta-filata*;
- Condução de experimentos em escala laboratorial e/ou industrial de processos contínuos de fabricação de queijo do tipo *pasta-filata*, os quais possuem parâmetros passíveis de controle diferentes dos abordados no presente estudo, tais como vazão da massa e temperatura da água de circulação.

Vale ressaltar que estes trabalhos posteriores podem ser conduzidos com a mesma abordagem utilizada no presente estudo, ou seja, aplicando a Metodologia de Superfície de Resposta em conjunto com métodos de otimização multiobjetivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD EL-GAWAD, M. A. M.; AHMED, N. S. Cheese yield as affected by some parameters review. **Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria**, v. 10, n. 2, p. 131–153, 2011.

ABDUL, S.; LIM, H.; ANTONY, J. Statistical process control readiness in the food industry: Development of a self-assessment tool. **Trends in Food Science & Technology**, v. 58, p. 133–139, 2016.

ABIA (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA ALIMENTAÇÃO). Faturamento do Setor Alimentício. Disponível em: <<http://www.abia.org.br/vsn/anexos/faturamento2016.pdf>>. .

ANDREATTA, E.; FERNANDES, A. M.; SANTOS, M. V.; et al. Composition, functional properties and sensory characteristics of Mozzarella cheese manufactured from different somatic cell counts in milk. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, n. 5, p. 1235–1242, 2009.

ANGELIS, M. DE; GOBBETTI, M. **Pasta-Filata Cheeses: Traditional Pasta-Filata Cheese**. 2º ed. Elsevier Ltd., 2016.

ATALAR, I.; DERVISOGLU, M. Optimization of spray drying process parameters for kefir powder using response surface methodology. **LWT - Food Science and Technology**, v. 60, n. 2, p. 751–757, 2015.

BÄHLER, B.; RUF, T.; SAMUDRALA, R.; SCHENKEL, P.; HINRICHS, J. Systematic approach to study temperature and time effects on yield of pasta filata cheese. **International Journal of Dairy Technology**, v. 69, n. 2, p. 184–190, 2016.

BALLUS, C. A.; MEINHART, A. D.; DE SOUZA CAMPOS, F. A.; BRUNS, R. E.; GODOY, H. T. Doehlert design-desirability function multi-criteria optimal separation of 17 phenolic compounds from extra-virgin olive oil by capillary zone electrophoresis. **Food Chemistry**, v. 146, p. 558–568, 2014.

BANKS, J. M. Cheese Yield. In: Woodhead Publishing Limited (Org.); **Cheese Problems Solved**. p.100–114, 2007.

BANKS, J. M.; BANKS, W.; MUIR, D. D.; WILSON, A. G. Cheese yield: composition does matter. **Dairy Industries International**, v. 46, n. 5, p. 15–22, 1981.

BANVILLE, V.; MORIN, P.; POULIOT, Y.; BRITTEN, M. Physical properties of pizza Mozzarella cheese manufactured under different cheese-making conditions. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 8, p. 4804–4815, 2013.

BARBANO, D. M. Impact of Seasonal Variation in Milk Composition on Cheese Yields and Composition. **Dairy Field**, p. 46–50, 1987.

BARBANO, D. M.; YUN, J. J.; KINDSTEDT, P. S. Mozzarella Cheese Making by a Stirred Curd, No Brine Procedure. **Journal of Dairy Science**, v. 77, p. 2687–2694, 1994.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S. Multifactor Experimental Designs for Exploring Response Surfaces. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 28, p. 195–242, 1957.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; MACGREGOR, J. F.; ERJAVEC, J. Some problems associated with the analysis of multiresponse models. **Technometrics**, v. 15, n. 1, p. 33–51, 1973.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. PORTARIA Nº 146 DE 7 DE MARÇO DE 1996. **Aprova o regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade de queijo Mozzarella (Muzzarella ou Mussarela)**. BRASIL: Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1996.

BRITO, T. G. **Método da interseção normal à fronteira para otimização bi-objetivo do fresamento de topo do aço ABNT 1045**, 2015. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2015.

BRITO, T. G.; PAIVA, A. P.; FERREIRA, J. R.; GOMES, J. H. F.; BALESTRASSI, P. P. A normal boundary intersection approach to multiresponse robust optimization of the surface roughness in end milling process with combined arrays. **Precision Engineering**, v. 38, n. 3, p. 628–638, 2014.

CAGNAZZO, L.; TATICCHI, P. Six sigma for big companies and SMEs: Evidences from literature. **WSEAS Transactions on Business and Economics**, v. 7, n. 4, p. 295–310, 2010.

CECCHINATO, A.; MARCHI, M. DE; BITTANTE, G. Factors affecting variation of different measures of cheese yield and milk nutrient recovery from an individual model cheese-manufacturing process. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 12, p. 7952–7965, 2013.

CHAVHAN, G. B.; KANAWJIA, S. K.; KHETRA, Y.; PURI, R. Effect of potassium-based emulsifying salts on sensory, textural, and functional attributes of low-sodium processed Mozzarella cheese. **Dairy Science and Technology**, v. 95, n. 3, p. 265–278, 2015.

CHEN, Y.; MARTYNENKO, A. Effect of hydrothermodynamic (HTD) processing on physical and chemical qualities of American cranberry puree using response surface methodology (RSM). **LWT - Food Science and Technology**, v. 70, p. 322–332, 2016.

CHIESA, O.; CAMISA, J.; TAYLA, A.; et al. Avaliação da composição química, proteólise e propriedades funcionais do queijo mussarela comercial com teor reduzido de gordura. , v. 66, p. 28–33, 2011.

CHO, B. R.; PARK, C. Robust design modeling and optimization with unbalanced data. , v. 48, p. 173–180, 2005.

CITRO, D. A. Classificazione dei formaggi a pasta filata e tecnologia di produzione. **AIVEMP Newsletter**, p. 8–12, 2010.

CITRO, V. Atypical local product obtained from buffalo milk. **Scienza-e-Tecnica-Lattiero-Casearia**, v. 32, p. 263–273, 1981.

CLARK, S.; COSTELLO, M.; DRAKE, M.; BODYFELT, F. **The Sensory Evaluation of Dairy Products**. 2^o ed. New York: Springer, 2009.

DAS, I.; DENNIS, J. E. Normal-Boundary Intersection: a new method for generating the pareto surface in nonlinear multicriteria optimization problems. **SIAM Journal on Optimization**, v. 8, n. 3, p. 631–657, 1998.

DERRINGER, G. C. A Balancing Act: Optimizing a Product's Properties. **Quality Progress**, v. 27, n. 6, p. 51–58, 1994.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

DORA, M.; GELLYNCK, X. House of lean for food processing SMEs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 44, n. 2, p. 272–281, 2015a.

DORA, M.; GELLYNCK, X. Lean Six Sigma Implementation in a Food Processing SME: A Case Study. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 31, n. 7, p. 1151–1159, 2015b.

EMMONS, D. B. AND MODLER, H. W. Invited review : a commentary on predictive cheese yield formulas. **Journal of Dairy Science**, v. 93, n. 12, p. 5517–5537, 2010.

EMMONS, D. B.; ERNSTROM, C. A.; LACROIX, C.; VERRET, P. Predictive Formulas for Yield of Cheese from Composition of Milk : A Review 1. **Journal of Dairy Science**, v. 73, n. 6, p. 1365–1394, 1990. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(90\)78803-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(90)78803-0)>. .

FAGAN, C. C.; CASTILLO, M.; PAYNE, F. A.; DONNELL, C. P. O.; CALLAGHAN, D. J. O. Effect of Cutting Time, Temperature, and Calcium on Curd Moisture, Whey Fat Losses, and Curd Yield by Response Surface Methodology. **Journal of Dairy Science**, v. 90, n. 10, p. 4499–4512, 2007.

FARBOD, F.; KALBASI, A.; MOINI, S.; et al. Optimization of operational parameters to fortify iranian UF-feta cheese with fish oil using response surface methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 38, n. 4, p. 1898–1910, 2014.

FOX, P.F.; GUINEE, T.P., COGAN, T.M., MCSWEENEY, P. L. H. **Fundamentals of Cheese Science**. 1º ed. New York: Springer US, 2000.

FRANCOLINO, S.; LOCCI, F.; GHIGLIETTI, R.; IEZZI, R.; MUCCHETTI, G. Use of milk protein concentrate to standardize milk composition in Italian citric Mozzarella cheese making. **LWT - Food Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 310–314, 2010.

FURTADO, M. M. **Principais problemas em queijos: causas e prevenções**. São Paulo: Fonte Comunicação e Editora, 2005.

GHOSH, B. C.; SINGH, S.; KANAWJIA, S. K. Rheological properties of Mozzarella cheese: A review. **Indian Journal of Dairy Science**, v. 43, n. 1, p. 70–79, 1990.

GOMES, A. M.; MALCATA, F. X. Development of probiotic cheese manufactured from goat milk: response surface analysis via technological manipulation. **Journal of Dairy Science**, v. 81, n. 6, p. 1492–1507, 1998.

GOMES, J. H. F. **Método dos polinômios canônicos de misturas para otimização multi-objetivo**, 2013. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2013.

GOVINDASAMY-LUCEY, S.; JAEGGI, J. J.; JOHNSON, M. E.; WANG, T.; LUCEY, J. A. Use of cold microfiltration retentates produced with polymeric membranes for standardization of milks for manufacture of pizza cheese. **Journal of Dairy Science**, v. 90, n. 10, p. 4552–68, 2007.

GUIAMA, V. D.; BEKA, R. G.; NGAH, E.; et al. Milk-coagulating extract produced from *solanum aethiopicum* shum fruits: Multivariate techniques of preparation, thermal stability and effect on milk solids recovery in curd. **International Journal of Food Engineering**, v. 10, n. 2, p. 211–222, 2014.

GUINEE, T. P.; FEENEY, E. P.; AUTY, M. A. E.; FOX, P. F. Effect of pH and Calcium Concentration on Some Textural and Functional Properties of Mozzarella Cheese. **Journal of Dairy Science**, v. 85, n. 7, p. 1655–1669, 2002. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74238-0](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74238-0)>. .

GUNASEKARAN, S.; AK, M. M. **Cheese rheology and texture**. Washington, D.C.: CRC Press, 2003.

VAN GYSEGHEM, E.; JIMIDAR, M.; SNEYERS, R.; et al. Selection of reversed-phase liquid chromatographic columns with diverse selectivity towards the potential separation of impurities in drugs. **Journal of Chromatography A**, v. 1042, n. 1–2, p. 69–80, 2004.

HARRINGTON, E. C. The Desirability Function. **Industrial Quality Control**, , n. 2, p. 494–498, 1965.

HUBBARD, M. R. **Statistical Quality Control for the Food Industry**. 3^o ed. New York:

Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

HUNG, H. C.; SUNG, M. H. Applying six sigma to manufacturing processes in the food industry to reduce quality cost. **Scientific Research and Essays**, v. 6, n. 3, p. 580–591, 2011.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Estatística da Produção Pecuária**. 2017a.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Pesquisa Trimestral do Leite. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/leite/brasil>>. .

INTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4^o ed. São Paulo, 2008.

JANA, A.H.; MANDAL, P. K. Manufacturing and Quality of Mozzarella Cheese: A Review. **International Journal of Dairy Science**, v. 6, n. 4, p. 199–226, 2011. Academic Journals Inc.

JIA, Z.; IERAPETRITOU, M. G. Generate Pareto optimal solutions of scheduling problems using normal boundary intersection technique. **Computers and Chemical Engineering**, v. 31, p. 268–280, 2007.

JOSHI, N. S.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; DAVE, R. I. Understanding the Role of Calcium in Functionality of Part Skim Mozzarella Cheese. **Journal of Dairy Science**, v. 86, n. 6, p. 1918–1926, 2003.

KARNOPP, A. R.; OLIVEIRA, K. G.; DE ANDRADE, E. F.; POSTINGHER, B. M.; GRANATO, D. Optimization of an organic yogurt based on sensorial, nutritional, and functional perspectives. **Food Chemistry**, v. 233, p. 401–411, 2017.

KHETRA, Y.; KANAWJIA, S. K.; PURI, R. Selection and optimization of salt replacer, flavour enhancer and bitter blocker for manufacturing low sodium Cheddar cheese using response surface methodology. **LWT - Food Science and Technology**, v. 72, p. 99–106, 2016.

KIM, G. D.; JUNG, T. C.; JUNG, E. Y.; et al. Optimization of processing conditions for meat paper from beef semimembranosus muscle using response surface methodology. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 326–330, 2013.

KO, Y.; KIM, K.; JUN, C. A New Loss Function-Based Method for Multiresponse Optimization. **Journal of Quality Technology**, v. 37, n. 1, p. 50–59, 2005.

KOSIKOWSKI, F. V. Our industry today. **Journal of dairy science**, v. 62, n. 7, p. 1149–1160, 1979.

KOSIKOWSKI, F. V. **Cheese and fermented milk foods**. 2^o ed. Ann Arbor: Edwards Brothers Inc, 1982.

LIMA, L. P. **Tamanho de empresa e eficiência de indústria de laticínios no Brasil**, 2015. Universidade Federal de Viçosa.

MA, X.; JAMES, B.; ZHANG, L.; EMANUELSSON-PATTERSON, E. A. C. Correlating mozzarella cheese properties to its production processes and microstructure quantification. **Journal of Food Engineering**, v. 115, n. 2, p. 154–163, 2013.

MARGOLIES, B.; ADAMS, M. C.; PRANATA, J.; GONDOUTOMO, K.; BARBANO, D. M. Effect of uncertainty in composition and weight measures in control of cheese yield and fat loss in large cheese factories. **Journal of Dairy Science**, p. 1–31, 2017.

MCMAHON, D. J.; FIFE, R. L.; OBERG, C. J. Water Partitioning in Mozzarella Cheese and Its Relationship to Cheese Meltability. **Journal of Dairy Science**, v. 82, n. 7, p. 1361–1369, 1999.

MELILLI, C.; LYNCH, J. M.; CARPINO, S.; et al. An Empirical Method for Prediction of Cheese Yield 1. **J. Dairy Sci.**, v. 85, p. 2699–2704, 2002.

MONTEIRO, A. A.; PIRES, A. C. S.; ARAÚJO, E. A. **Tecnologia de produção de derivados de leite (Cadernos Didáticos)**. Viçosa: Editora UFV, 2007.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 6^o ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8^o ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**.

5^o ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.

MOYNIHAN, A. C.; MOLITOR, M.; JAEGGI, J. J.; JOHNSON, M. E.; MCSWEENEY, P. L. H. Effect of standardizing the lactose content of cheesemilk on the properties of low-moisture, part-skim Mozzarella cheese. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 10, p. 7791–7802, 2016.

MURPHY, S. C.; MARTIN, N. H.; BARBANO, D. M.; WIEDMANN, M. Influence of raw milk quality on processed dairy products : How do raw milk quality test results relate to product quality and yield ? **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 12, p. 10128–10149, 2016.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology**. 3^o ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009.

NEWBOLD, P. **Statistics for Business & Economics**. 4th ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1995.

OLIVEIRA, F. C.; COIMBRA, J. S. R.; OLIVEIRA, E. B.; et al. Acacia gum as modifier of thermal stability, solubility and emulsifying properties of α -lactalbumin. **Carbohydrate Polymers**, v. 119, p. 210–218, 2015.

PAIVA, A. P. DE. **Metodologia de Superfície de Resposta e Análise de Componentes Principais em Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Correlacionadas**, 2006. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2006.

PAIVA, C. L. Quality Management: Important Aspects for the Food Industry. **Food Industry**. p.191–218, 2013.

PERRONE, Í. T.; PEREIRA, J. P. F.; MAGALHÃES, F. A. R.; et al. Determinação da composição e do rendimento de queijo prato obtido a partir de leite concentrado por evaporação a vácuo. **Revista do Instituto de Laticínios “Cândido Tostes”**, v. 376, n. 65, p. 35–41, 2010.

PIZAIA, P. D.; SPADOTI, L. M.; NARIMATSU, A.; DORNELLAS, R. F.; ROIG, S. M. Composição, proteólise, capacidade de derretimento e formação de “blisters” do queijo mussarela obtido pelos métodos tradicional e de ultrafiltração. , v. 23, n. 3, p. 485–491, 2003.

RASHID, A. A.; HUMA, N.; ZAHOOR, T.; ASGHER, M. Optimization of pH, temperature

and CaCl₂ concentrations for Ricotta cheese production from Buffalo cheese whey using Response Surface Methodology. **Journal of Dairy Research**, v. 84, n. 1, p. 109–116, 2017.

RENDA, A.; BARBANO, D. M.; YUN, J. J.; KINDSTEDT, P. S.; MULVANEY, S. J. Influence of Screw Speeds of the Mixer at Low Temperature on Characteristics of Mozzarella Cheese 1. **Journal of Dairy Science**, v. 80, n. 9, p. 1901–1907, 1997.

SALES, D. C.; HENRIQUE, A.; URBANO, S. A.; et al. Cheese yield in Brazil : state of the art. **Food Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 563–569, 2016.

SALES, D. C.; RANGEL, A. H. N.; URBANO, S. A.; et al. Relationship between mozzarella yield and milk composition, processing factors, and recovery of whey constituents. **Journal of Dairy Science**, p. 1–14, 2017.

SALGADO JÚNIOR, A. R. **Otimização de múltiplos duais correlacionados no processo de torneamento do aço de corte fácil ABNT 12L14**, 2010. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2010.

SEBRAE (SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS). **Participação das Micro e Pequenas Empresas na Economia Brasileira**. 2014.

SHAKEEL-UR-REHMAN; FARKYE, N. Y.; YIM, B. Use of dry milk protein concentrate in pizza cheese manufactured by culture or direct acidification. **Journal of dairy science**, v. 86, n. 12, p. 3841–3848, 2003.

SHAKERIAN, M.; KIANI, H.; EHSANI, M. Food Bioscience Effect of buffalo milk on the yield and composition of buffalo feta cheese at various processing parameters. **Food Bioscience**, v. 15, p. 110–117, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2016.06.002>>. .

SILVA, F. T. **Queijo Mussarela**. 1º ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

SKEIE, S. **Milk quality requirements for cheesemaking**. Woodhead Publishing Limited, 2010.

VAHIDINASAB, V.; JADID, S. Normal boundary intersection method for suppliers ' strategic

bidding in electricity markets : An environmental / economic approach. **Energy Conversion and Management**, v. 51, p. 1111–1119, 2010.

VERDIER-METZ, I.; COULON, J.-B.; PRADEL, P. Relationship between milk fat and protein contents and cheese yield. **Animal Research**, v. 50, n. 5, p. 365–371, 2001.

WU, F. C. Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function. **Quality Engineering**, v. 17, n. 1, p. 119–126, 2005.

YU, C.; GUNASEKARAN, S. A systems analysis of pasta filata process during Mozzarella cheese making. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 4, p. 399–408, 2005.

YUN, J. J.; KIELY, L. J.; BARBANO, D. M. .; KINDSTEDTZ, P. S. Mozzarella Cheese: Impact of Cooking Temperature on Chemical Composition, Proteolysis, and Functional Properties. **Journal of Dairy Science**, v. 76, n. 12, p. 3664–3673, 1993.

ZENG, S. S.; SORYAL, K.; FEKADU, B.; BAH, B.; POPHAM, T. Predictive formulae for goat cheese yield based on milk composition. **Small Ruminant Research**, v. 69, p. 180–186, 2007.

ZISU, B.; SHAH, N. P. Ñ. Texture characteristics and pizza bake properties of low-fat Mozzarella cheese as influenced by pre-acidification with citric acid and use of encapsulated and ropy exopolysaccharide producing cultures. **International Dairy Journal**, v. 17, p. 985–997, 2007.