

UTILIZAÇÃO DO *DESIGN OF EXPERIMENT*: ESTUDO DIDÁTICO

Francisco Tiago Araújo Barbosa (UFPB) francisco.tiago2@academico.ufpb.br

Rogério Santana Peruchi (UFPB) rsp@academico.ufpb.br

Marcos do Santos (UFF) marcosdossantos_doutorado_uff@yahoo.com.br

Resumo

O trabalho apresenta uma pesquisa didática da aplicação da análise de experimentos, com a utilização do método DOE, *design of experiment*, buscando de forma didática apresentar o passo-a-passo dessa poderosa ferramenta. A pesquisa foi dividida em dois estágios: o primário foi de caráter exploratório, identificando na literatura disponível os fatores críticos e a aplicação no método *design of experiment* de forma estruturada na resolução de problemas didático; o secundário foi de caráter qualitativo e quantitativo descritivo. Objetivo de analisar o melhor modelo de otimização para assar os pães de queijos comprados congelados com a utilização de um experimento fatorial completo com três fatores, dois níveis e três *centers points*. No experimento foram analisadas duas variáveis de saída a média da área do pão de queijo e o desvio padrão, sendo a equação para o desvio padrão não sendo representativa e a da média sendo significativa e estando dentro dos testes aplicados, a melhor solução pães assados a uma temperatura de 200°C, tempo de forno de 35 minutos e sem papel alumínio.

Palavras-Chaves: DOE, Experimento; Fatorial completo, Otimização.

1. Introdução

O *design of experiment* é uma ferramenta estatística utilizada em conduções de experimentos, na análise e interpretação dos dados, sendo uma ferramenta extremamente útil para processos de planejamento, identificação, condução e validação de experimentos (DURAKOVIC, 2017).

Para que um experimento seja bem realizado é importante seguir um roteiro e que todas as combinações dos experimentos sejam realizadas (VERA CANDIOTI et al., 2014). Não utilizando dados suspeitos, mas garantindo a qualidade do sistema de medição (SOARES et al., 2022).

Com o intuito de avaliar um experimento didático, um estudo de área de pão de queijo foi realizado para avaliar todas as possíveis combinações e interações entre os fatores, tempo, temperatura e com ou sem papel alumínio sobre as variáveis respostas (Y1) média da área, (Y2) desvio padrão da área (CHERRAFI et al., 2016).

Objetivo de analisar o melhor modelo de otimização para assar os pães de queijos comprados congelados com a utilização de um experimento fatorial completo com três fatores, dois níveis e três *centers points*.

O trabalho está dividido em introdução, referencial teórico, metodologia, definição do problema, seleção das variáveis, fatores e níveis, calibração do sistema de medição, escolher o arranjo experimental, resultados e conclusão.

2. Referencial teórico.

Telford (2007) desenvolveu uma ordem histórica cronológica do *design of experiment*, inventada por Ronald A. Fisher nas décadas de 1920 e 1930 em uma estação de pesquisa agrícola, localizada a 40 quilômetros ao norte de Londres, embora o método tenha sido proposto em âmbito agrícola tem sido aplicado em diversos segmentos.

Utilização de experimentos para triagem e desenvolvimento de indicadores de instabilidade para cromatografia (MANDPE; PARATE; NAIK, 2022), o *design of experiment*, é amplamente difundido nas análises de otimização, desenvolvimento e validação de medicamentos, como o recente efavirenz medicamento antiviral aplicado a tratamentos de infecções por HIV (SAHA; PANDEY, 2022).

A utilização do *design of experiment*, em projetos de melhoria continua garante a validação das variáveis e as melhores oportunidades de atuação, em projeto de melhoria com a aplicação do *lean six sigma* e seu framework DMAIC em uma indústria foi possível alcançar um modelo com precisão de 99,3%, para melhorar os desperdícios causados por bolhas que não são visíveis a olhos humanos, nas camadas ocultas do processo de fabricação (ABED et al., 2020).

Para aplicação do *design of experiment* pesquisadores dão roteiros para sua execução, nesse caso didático foi utilizado o roteiro proposto por Coleman e Montgomery (2012) com sete passos: Definir problema, selecionar as variáveis, fatores e seus níveis, escolher o arranjo, executar o experimento e analisar os dados e por último as conclusões e recomendações, este

mesmo roteiro também é utilizado pelos autores (KENDALL et al., 2016; VERA CANDIOTI et al., 2014).

3. Metodologia

A pesquisa foi dividida em dois estágios: o primário foi de caráter exploratório, identificando na literatura disponível os fatores críticos e a aplicação no método *design of experiment* de forma estruturada na resolução de problemas didático; o secundário foi de caráter qualitativo e quantitativo descritivo.

Os experimentos foram realizados utilizando o *design of experiments*, com a utilização de um forno elétrico Britânia 10L BFE10V, com duas resistências, superior e inferior, que distribuem melhor o calor, controle de temperatura, que varia entre 90°C e 230°C, função timer de 60 minutos, para a execução dos experimentos.

O DOE, *design of experiments*, foi fatorial completo, conceitualmente 2^k , onde, k representa o número de fatores e dois o número de níveis, sendo baixo (-1) e alto (+1), assim para o experimento didático $k = 3$, 2^3 , temperatura, tempo e papel alumínio, enquanto o número 2 representa de níveis, para temperatura [180°C; 200°C], tempo [20 min; 35 min], com ou sem papel alumínio, e seguiu um cronograma de execução identificado na literatura.

A representação de gráfica de um fatorial completo no cubo abaixo onde (-1) representa o nível baixo e (+1) representa do nível alto. Na figura 1 a representação do experimento fatorial completo.

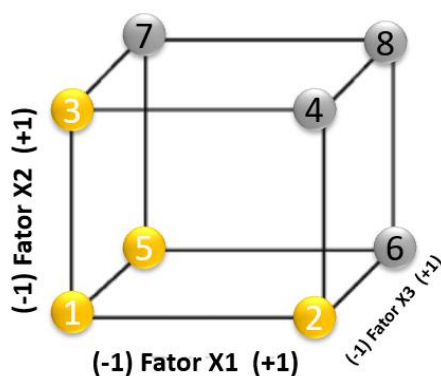


Figura 1: Cubo que representa o experimento fatorial completo.

Fonte: Adaptado de Telford (2007)

Para abordagem fatorial completa com a adição de pontos centrais, se obteve uma equação que representa a interação entre fatores, sendo $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$ como o experimento fatorial e a equação $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$ a interação tempo com papel alumínio.

A interação ocorre quando o efeito na resposta de uma mudança no nível de um fator depende do nível de outro fator ($b_{12}x_1x_2$), assim, quando uma interação está presente entre dois fatores, o efeito combinado desses dois fatores na resposta variável não pode ser previsto a partir dos efeitos separados.

3.1. Procedimentos didático para a execução de um estudo experimental

Coleman e Montgomery (2012) definem as etapas para o desenvolvimento de um planejamento de experimentos, são:

- Definir o problema.
- Selecionar variáveis resposta.
- Escolher fatores e seus níveis.
- Escolher o arranjo experimental.
- Executar o experimento.
- Análise estatística dos dados.
- Conclusões e recomendações.

Para a realização dos experimentos outros autores consideram as fases acima como sendo o ponto inicial (VERA CANDIOTI et al., 2014). Dessa forma o trabalho segue os passos mencionados, atendendo um roteiro lógico para a aplicação do caso didático.

4. Definir o problema

O trabalho apresenta um estudo didático da aplicação do DOE, *design of experiments*, onde se busca o ponto ótimo para a otimização do pão de queijo quando o pão de queijo será assado. A menor área aceitável para o cliente (VOC) é de 15 centímetros (FOUND; HARRISON, 2012). Para iniciar foi desenvolvido passo a passo da aplicação do método. A figura 2 mostra o procedimento operacional para o experimento.

Figura 2: Procedimento operacional para o experimento.

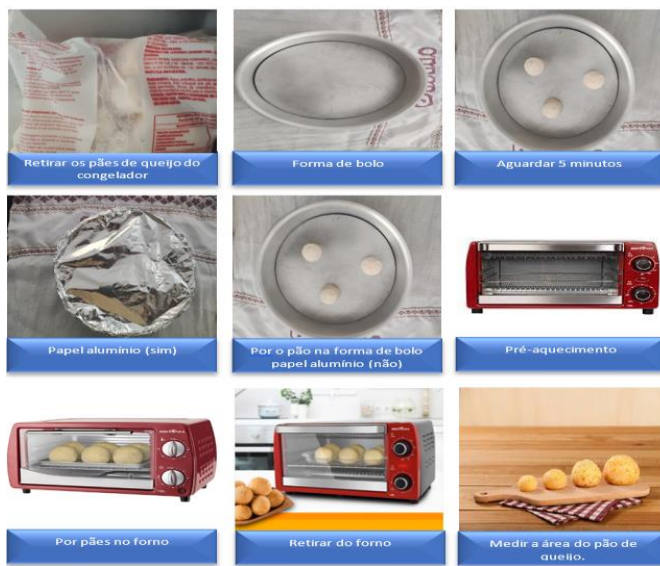
Experimentos Pão de queijo
Ingredientes Pão de queijo
Materiais necessários 01 - Forninho 01 - Forma de bolo 01 - Régua 01 - Toalha 01 - Papel alumínio 01 - Computador 01 - Software, (ImageJ). 01 - Celular
Experimento 01 - Retirar os pães de queijo do congelador 02- Por o pão na forma de bolo 03- Se o experimento for com papel alumínio, a forma deve ser coberta com o papel alumínio, 04- Aguardar por cinco minutos a temperatura ambiente 05- Pré aquecer o Forno 18°C 06- Colocar boleira no Forno. 07 - Aguardar o pão assar segundo as especificações 08 - Retirar os pães de queijo do forno 09 - Registrar (fotos).

Fonte: Autores (2022)

No formulário são descritos os itens ou materiais necessários para a aplicação do experimento, e como o experimento será executado nas suas diversas fases, é comum na literatura encontrarmos modelos de requisitos para os projetos de experimentos, como descrição as vantagens dos modelos multivariáveis (LEARDI, 2009).

Na figura 2, são dispostas imagens detalhadas da prática do procedimento operacional, com mais detalhamento operacional para guiar os operadores a realizarem suas tarefas com o mínimo de variação possível, na figura 3 o procedimento passo a passo.

Figura 3: Procedimento padrão ilustrado.

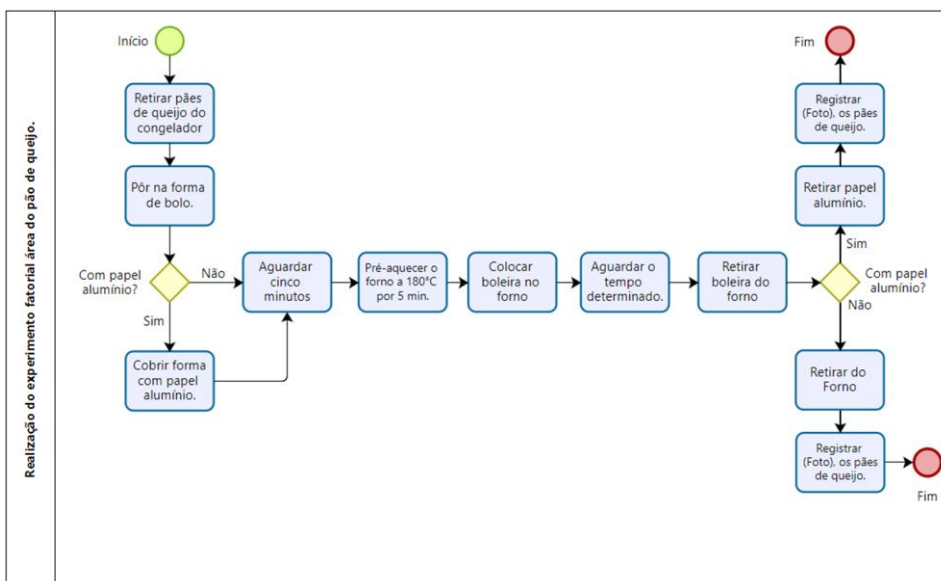


Fonte: Autores (2022).

Os processos descritos na figura 3 demonstram o sequenciamento detalhado da atividade. O mapeamento de fluxo de processos é uma ferramenta utilizada nos mais diversos segmentos para trazer de forma interativa os processos a serem seguidos (ZHU; JOHNSON; SARKIS, 2018).

Os fluxos do processo devem ser documentados e expostos para que operador recorra em caso de dúvidas. O fluxograma é uma ferramenta visual, com representação dos processos através das atividades em ordem de execução, que possibilitam uma visão clara e viabilizam a compreensão e implementação, com foco na melhoria contínua dos processos (YADRIFIL; SEPTYANTI; RUS, 2020).

Figura 4: Fluxo de processos do experimento.



Fonte: Autores (2022)

Estando os dados do fluxograma demonstrando a realidade do processo, exposto em lugar acessível, possibilita consultas e orienta, evitando análises equivocadas por parte dos colaboradores que executam o processo, análises equivocadas não trazem os resultados esperados, assim, a ferramenta deve ser utilizada de forma a apoiar a tomada de decisão coerente, eficiente e eficaz para que se obtenha o resultado buscado (CHIKUMBIRIKE et al., 2021).

4.1 Selecionar as variáveis e seus fatores e níveis

Para a realização do experimento os fatores devem ser selecionados e definidos os seus níveis, assim os fatores selecionados para o experimento foram 3 e 2 níveis, esses fatores são variáveis do processo que influenciam a área do pão de queijo (SAJJAD et al., 2021). No quadro 1, as variáveis do experimento.

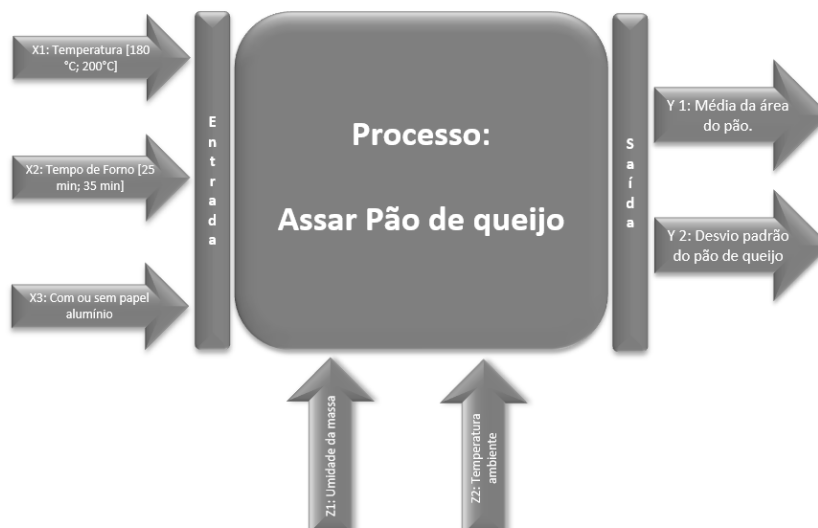
Quadro1: Variáveis do experimento.

Variáveis independentes	CTQ (Y) – Característica da qualidade
X1 - Temperatura [180°C; 200°C]	Y1 - Média da altura
X2 - Tempo de Forno [25 min; 35 min]	Y2 - Desvio padrão da altura
X3 - Papel alumínio [com ou sem papel alumínio].	

Fonte: Autores (2022).

Para a seleção das variáveis algumas observações são importantes, objetivo do experimento, variáveis, tempo, custo dos experimentos, se os experimentos são de fácil execução, de fácil compreensão e buscar estudos com o mesmo proposito na literatura.

Figura 5: Processo experimental do pão de queijo, entrada, saída e fatores de ruído.



Fonte: Autores (2022).

A figura 5, demonstra as variáveis controláveis, temperatura, tempo de forno e com ou sem papel alumínio, as variáveis constantes que não serão abordadas na pesquisa, local de fabricação, tempo de descanso da massa fora do forno de 5 minutos, variáveis de ruído (Z), serão Z1 umidade da massa, Z2 temperatura ambiente.

5. Escolher arranjo experimental

O *design of experiments* é utilizado para gerar os experimentos, os experimentos são gerados utilizando o software MINITAB, no intuito de coletar as informações necessárias para as análises dos experimentos.

Tabela 1: Experimento fatorial completo com três fatores, uma réplica e três *centers points*.

OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	Tempo	Temperatura	Com papel alumínio
1	1	1	1	20	180	Sim
2	2	1	1	35	180	Sim
3	3	1	1	20	200	Sim
4	4	1	1	35	200	Sim
5	5	1	1	20	180	Não
6	6	1	1	35	180	Não
7	7	1	1	20	200	Não
8	8	1	1	35	200	Não
9	9	0	1	27,5	190	Sim
10	10	0	1	27,5	190	Não
11	11	0	1	27,5	190	Sim
12	12	0	1	27,5	190	Não
13	13	0	1	27,5	190	Sim
14	14	0	1	27,5	190	Não

Fonte: Autores (2022).

Após a definição das variáveis, da construção dos procedimentos que serão adotados para a execução dos experimentos, procedimentos operacionais padrões, é gerado o experimento fatorial e se inicia a coleta dos dados.

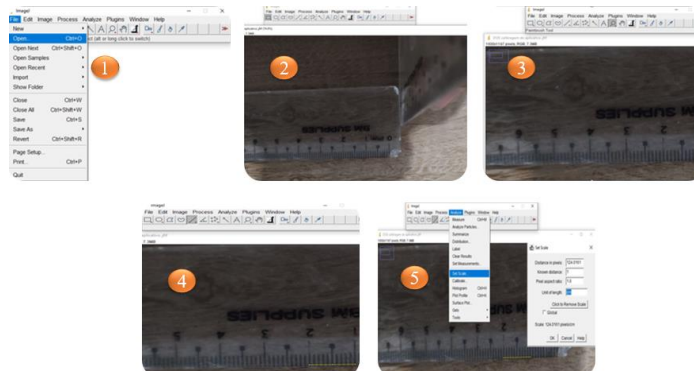
5.1 Medição

Para a medição dos pães de queijo foi utilizado o aplicativo *ImageJ*, seguindo um roteiro de calibragem do aplicativo antes do início das medições, um sistema de medição permite avaliar as variações e erros de medição, sendo utilizados em diversos tipos de manufaturas (PERUCHI et al., 2014).

Primeira etapa: Calibrar o aplicativo. A figura de fluxo do processo demonstra passo a passo de como calibrar o aplicativo. Para a calibragem foi tirado uma foto de uma régua contendo milímetros e centímetros, para o *case* foi selecionado centímetro. A foto foi tirada a uma distância de 10cm da régua, seguindo esse para reduzir a variação no processo de medição

(YEH; SUN, 2013). A Figura 7 mostra o passo a passo da primeira etapa para calibragem do sistema de medição.

Figura 7: Demonstração da realização da calibragem do *ImageJ*.



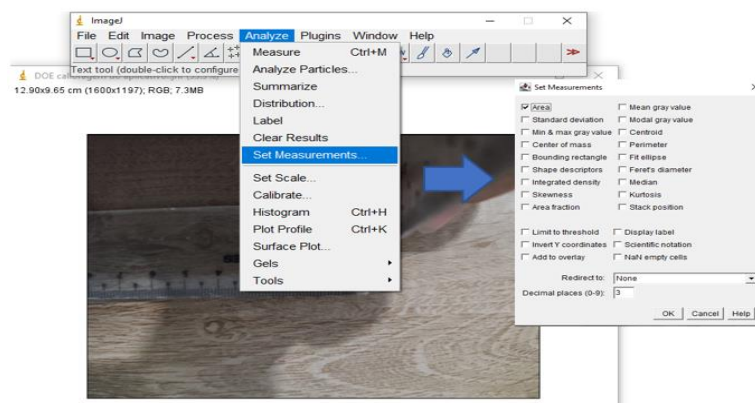
Fonte: Autores (2022).

No processo de calibragem foram realizadas as 5 atividades descritas na figura 7, abrindo o Aplicativo *ImageJ* (SCHROEDER et al., 2021), o aplicativo tem sido usado em diversos trabalhos, como utilização em microscopia (VAN DE LINDE, 2019). , o usuário realiza a primeira atividade no botão *file, open*, seleciona a foto para a calibragem; atividade 2, inserir a foto; na atividade 3 o usuário usa o botão lupa para dar zoom na imagem aproximando a foto; atividade 4 clica no botão linha e insere a linha na unidade de medição desejada, no caso centímetro; atividade 5 é utilizado o botão *analyse, set scale*, o aplicativo irá dar o número de pixels na linha colocada, em *known distance* insere 1 e por último em *unit or length* a unidade de medida, centímetro. O primeiro passo para a calibragem está completo.

As fotos foram tiradas individualmente, sendo assados em cada experimento três pães de queijo, e medidos em base individual, cada foto que for aberta o usuário deverá colocar a medida que foi determinada na calibragem, para o experimento foram os seguintes parâmetros: Botão *Analyse, set scale, distance in pixes* 124.6952, *know distance* 1, *pixel distance* 1.0, *unit of length* centímetro, esses passos com esse mesmo padrão deve ser colocado em todas as fotos que serão medidas individualmente.

Segunda etapa: Configurar a medida desejada. Para essa etapa é utilizado os botões *Analyse, set measurements* e selecionado a opção área. Na figura 8.

Figura 8: Seguindo passo da calibragem do sistema de medição.



Fonte: Autores (2022).

A partir desse passo o aplicativo estará calibrado com a unidade de medida desejada pelo usuário. Para capturar as medidas é utilizado o botão *Analyze >> Measure*, nesse momento será realizada a captura da área do pão de queijo.

6. Resultados

6.1 Executar o experimento

O estudo de simulação é realizado para se obter a melhor solução de otimização para a área de pães de queijos, as variáveis independentes são X1, temperatura (180°C; 200°C), X2, tempo de forno (25 min; 35 min) e X3 com ou sem papel alumínio, são utilizadas três amostras de pão de queijo por experimento, coletadas as áreas de cada pão em base individual e posteriormente calculado a média (Y1) e o desvio padrão (Y2).

Os limites do projeto são fixados, sendo atribuído como limite inferior de especificação a média de 15 centímetros, nesse caso os experimentos devem sempre maximizar o processo. Tabela 2 após aplicação do experimento.

Tabela 2: Tabela do experimento fatorial completo, com as coletas dos dados, média e variância.

O.Pad.	O.Ens.	PtCent.	Blocos	Tempo	Temperatura	Com papel alumínio	Med 1	Med 2	Med 3	Média	S
1	1	1	1	20	180	Sim	5,819	8,245	8,506	7,523	1,464
2	2	1	1	35	180	Sim	12,58	12,562	17,445	14,196	5,279
3	3	1	1	20	200	Sim	12,234	13,061	14,391	13,229	0,789
4	4	1	1	35	200	Sim	21,73	18,294	20,978	20,334	2,175
5	5	1	1	20	180	Não	10,641	14,244	13,214	12,7	2,296
6	6	1	1	35	180	Não	14,583	15,737	15,87	15,397	0,334
7	7	1	1	20	200	Não	17,584	18,388	15,327	17,1	1,679
8	8	1	1	35	200	Não	13,745	12,751	17,993	14,83	5,168
9	9	0	1	27,5	190	Sim	16,389	13,8	14,25	14,813	1,276
10	10	0	1	27,5	190	Não	14,58	14,096	13,681	14,119	0,135
11	11	0	1	27,5	190	Sim	16,817	14,469	13,174	14,82	2,274
12	12	0	1	27,5	190	Não	14,893	16,023	17,957	16,291	1,601
13	13	0	1	27,5	190	Sim	10,33	17,747	15,612	14,563	9,719
14	14	0	1	27,5	190	Não	14,664	21,324	18,156	18,048	7,398

Fonte: Experimentos realizados com medições de área de pão de queijo (2022).

Algumas observações devem ser feitas, como a diferença entre os experimentos mesmo o ensaio sendo igual, o que ocasiona um alto desvio padrão e limita as análises posteriores para a variável (Y2), em relação à média não se tem divergências tão acentuadas.

6.2 Resultados fatorial para média

Análises fatoriais do experimento para a variável média das áreas do pão de queijo, o modelo é linear apresentando curvatura de 3,63 e p-value < 0,05, com 0,008, tendo como variáveis não representativas para tempo; utilização de papel alumínio quando variável independente com o p-value > 0,113, a variável tempo e com papel alumínio quando deve ser levada em consideração assumindo um p-value < que 0,05 de 0,013. Análise de variância é apresentada na tabela 3.

Tabela 3: Análises de variância para a média dos experimentos.

Análise de Variância regressão fatorial média x tempo; temperatura; com papel alumínio; ponto central					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	101,880	12,735	8,120	0,017
Linear	3	61,735	20,578	13,130	0,008
Tempo	1	25,222	25,222	16,090	0,010
Temperatura	1	30,720	30,720	19,600	0,007
Com papel alumínio	1	5,793	5,793	3,700	0,113
Interações de 2 fatores	3	32,871	10,957	6,990	0,031
Tempo*Temperatura	1	2,570	2,570	1,640	0,257
Tempo*Com papel alumínio	1	22,280	22,280	14,210	0,013
Temperatura*Com papel alumínio	1	8,021	8,021	5,120	0,073
Interações de 3 fatores	1	3,645	3,645	2,330	0,188
Tempo*Temperatura*Com papel alumínio	1	3,645	3,645	2,330	0,188
Curvatura	1	3,630	3,630	2,320	0,189
Erro	5	7,837	1,568		
Falta de ajuste	1	0,047	0,047	0,020	0,884
Erro Puro	4	7,790	1,948		
Total	13	109,718			

Fonte: Autores (2022)

As variáveis que assumem maior grau de significância são as variáveis temperatura com $p\text{-value} < 0,05$ de 0,007, tempo com 0,01 e conforme mencionado no paragrafo anterior a interação de tempo com papel alumínio com 0,013. Na tabela 4 é observado ao VIF, fatores de inflação da variância, que determina o grau de multicolinearidade.

Tabela 4: Para média

Termo	Coeficientes Codificados				
	Efeito	Coef	EP de coef	Valor-T	Valor-F
Constante		14,413	0,443	32,560	0,000
Tempo	3,551	1,776	0,443	4,010	0,010
Temperatura	3,919	1,96	0,443	4,430	0,007
Com papel alumínio	1,287	0,643	0,335	1,920	0,113
Tempo*Temperatura	-1,134	-0,567	0,443	-1,280	0,257
Tempo*Com papel alumínio	-3,338	-1,669	0,443	-3,770	0,013
Temperatura*Com papel alumínio	-2,003	-1,001	0,443	-2,260	0,073
Tempo*Temperatura*Com papel alumínio	-1,35	-0,675	0,443	-1,520	0,188
Pt Ct		1,029	0,676	1,520	0,189

Fonte: Autor (2022)

Para o fator de inflação da variância recomenda-se que seja inferior a 10, na tabela 4 na coluna sete o VIF, das variáveis é um (1,00) em todas as linhas, ou seja, inferior a dez, os principais testes para a validação dos dados é o valor p e o teste de normalidades dos resíduos, VIF e o R² (aj) como desejáveis. Na tabela 5, outro teste de validação R²(aj).

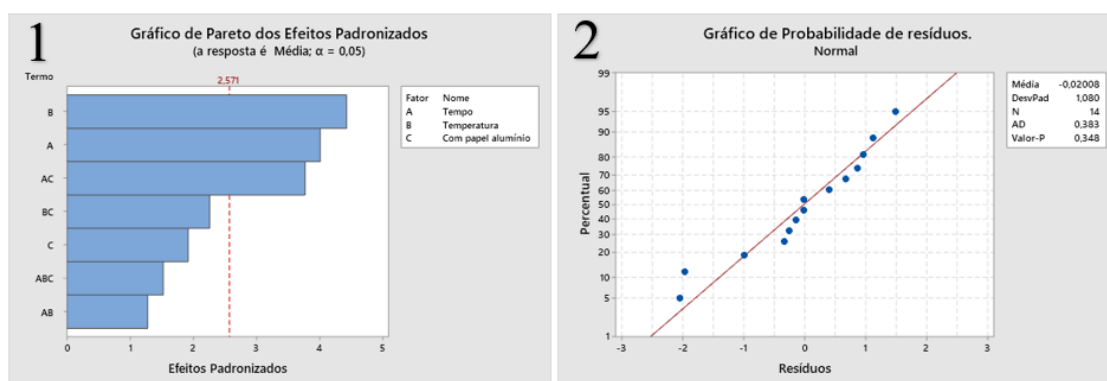
Tabela 5: Sumário teste de validação do R² (aj).

Sumário do Modelo			
S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,25198	92,86%	81,43%	81,30%

Fonte: Autores (2022).

Na tabela 5 apresenta o R2 (aj), que para o experimento deve ser acima de 70%, por último o teste de normalidade para os resíduos deve ser maior que p-value > 0,05. Figura 89 Pareto e teste de normalidade.

Figura 9: Pareto e teste de normalidade para os resíduos, média.



Fonte: Autores (2022).

No gráfico de Pareto se observa os efeitos e interações das variáveis independentes, x1, x2, x3, sendo o fator temperatura (B) o mais significativo, o fator tempo (A) e o fator (AC), tempo e com papel alumínio fatores que apresentam interações entre eles.

O gráfico 2 apresenta o teste de normalidade dos resíduos do experimento, como critério obrigatório para o experimento o p-value deve ser maior que 0,05, conforme gráfico os resíduos apresentam uma distribuição normal com p-value de 0,348, ao se observar o gráfico os pontos azuis estão claramente próximos a reta em vermelho, demonstrando visualmente a normalidade dos dados. Na figura 9 a equação e regressão.

Figura 10: Equação de regressão que melhor representa o modelo de otimização para a média (não codificada).

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Média} = & -68,8 + 1,67 \text{ Tempo} + 0,404 \text{ Temperatura} - 21,2 \text{ Com papel alumínio} \\ & - 0,00756 \text{ Tempo*Temperatura} + 1,49 \text{ Tempo*Com papel alumínio} \\ & + 0,147 \text{ Temperatura*Com papel alumínio} - 0,00900 \text{ Tempo*Temperatura*Com papel alumínio} \\ & + 1,029 \text{ Pt Ct} \end{aligned}$$

Fonte: Autores (2022).

De acordo com os testes aplicados a equação apresentada é válida, apresentando interações importantes, variáveis com p-value < 0,05, VIF abaixo de 10, R2 (aj) de 81,43%, dispondo de um modelo que pode ser aplicado.

6.3 Resultados fatorial para o desvio padrão

Para análise de segunda variável dependente (Y2), o desvio padrão dos experimentos realizados, foi calculado o desvio padrão das medidas 1, 2, 3 de todos os experimentos e realizada a regressão, nenhuma das variáveis obtiveram p-value < 0,05, conforme tabela 6.

Tabela 6: Análises de variância para o desvio padrão da amostra.

Análise de variância, desvio padrão x tempo; temperatura; com papel alumínio; ponto central					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	31,742	3,968	0,270	0,951
Linear	3	7,043	2,348	0,160	0,919
Tempo	1	5,659	5,659	0,380	0,562
Temperatura	1	0,024	0,024	0,000	0,969
Com papel alumínio	1	1,361	1,361	0,090	0,773
Interações de 2 fatores	3	10,819	3,606	0,250	0,862
Tempo*Temperatura	1	1,141	1,141	0,080	0,792
Tempo*Com papel alumínio	1	1,687	1,687	0,110	0,749
Temperatura*Com papel alumínio	1	7,991	7,991	0,540	0,494
Interações de 3 fatores	1	7,763	7,764	0,530	0,500
Tempo*Temperatura*Com papel alumínio	1	7,763	7,764	0,530	0,500
Curvatura	1	6,116	6,116	0,420	0,548
Erro	5	73,573	14,715		
Falta de ajuste	1	1,494	1,494	0,080	0,788
Erro Puro	4	72,079	18,020		
Total	13	105,315			

Fonte: Autores (2022)

Não teve fatores interagindo para a análise de desvio padrão, variável dependente (Y2), não foi levado em consideração o gráfico de Pareto para análises, já que nenhuma das variáveis foram significantes para o desvio padrão. Na tabela 7 é verificado o VIF, fatores de inflação da variância.

Tabela 7: Para desvio padrão

Coeficientes Codificados desvio padrão.					
Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P
Constante		2,400	1,360	1,770	0,137
Tempo	1,680	0,840	1,360	0,620	0,562
Temperatura	0,110	0,050	1,360	0,040	0,969
Com papel alumínio	-0,620	-0,310	1,030	-0,300	0,773
Tempo*Temperatura	0,760	0,380	1,360	0,280	0,792
Tempo*Com papel alumínio	-0,920	-0,460	1,360	-0,340	0,749
Temperatura*Com papel alumínio	2,000	1,000	1,360	0,740	0,494
Tempo*Temperatura*Com papel alumínio	1,970	0,990	1,360	0,730	0,500
Pt Ct		1,340	2,070	0,640	0,548

Fonte: Autores

Na tabela 7 na coluna sete os fatores de inflação da variância são de 1,00 estando dentro do recomendado, não existindo multicolinearidade entre as variáveis do experimento. Na tabela 8, outro teste de validação $R^2(aj)$ é apresentado como critério desejável.

Tabela 8: Sumário teste de validação do $R^2(aj)$.

Sumário do Modelo			
S	R ²	R ² (aj)	R ² (pred)
3,83597	30,14%	0,00%	0,00%

Fonte: Autores (2022).

Para o critério de $R^2(aj) >$ que 70% como critério desejável a análise do desvio padrão da área do pão de queijo não tem um bom modelo de regressão, nesse sentido o mesmo está com 0,00%. Não foram gerados resíduos para a segunda variável dependente (Y2) não sendo possível realizar o teste de normalidade dos resíduos apresentados. Por fim, para o desvio padrão da área do pão de queijo é apresentado a equação de regressão na figura 10.

Figura 11: Equação de regressão que melhor representa o modelo de otimização para a desvio padrão (não codificada).

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

$$\begin{aligned} \text{Mediana} = & 24,6 - 0,84 \text{ Tempo} - 0,133 \text{ Temperatura} + 51,0 \text{ Com papel alumínio} \\ & + 0,0050 \text{ Tempo*Temperatura} - 2,56 \text{ Tempo*Com papel alumínio} \\ & - 0,261 \text{ Temperatura*Com papel alumínio} \\ & + 0,0131 \text{ Tempo*Temperatura*Com papel alumínio} + 1,34 \text{ Pt Ct} \end{aligned}$$

Fonte: Autores (2022).

O modelo de regressão para a variável desvio padrão (Y2), não representa bem a melhor otimização, não tento variáveis com p-value < 0,05, os resíduos não sendo avaliados como dados normais, $R^2(aj)$ de 0,00%.

7.1 Considerações Finais

O estudo aplicou a metodologia de planejamento de experimentos com o objetivo de fornecer um modelo didático para a aplicação e análise dos experimentos, com o intuito de analisar a melhor condição para assar pães de queijo, foram analisados itens como o grau de significância das variáveis e suas interações (obrigatório), o VIF, a normalidade dos resíduos (obrigatório) e o $R^2(aj)$ para validar os modelos propostos. Com resultados para a média (Y1) e para o desvio padrão (Y2).

O estudo teve limitações ao serem aplicados os experimentos, como após as análises ser identificado que os pães de queijo já vinham com falta de padrão de fábrica, o que interferiu diretamente nas análises para o desvio padrão.

Para média: De acordo com os testes aplicados a equação apresentada é válida, apresentando interações importantes, variáveis com $p\text{-value} < 0,05$, VIF abaixo de 10, R^2 (aj) de 81,43%, dispondo de um modelo que pode ser aplicado. O modelo de regressão para a variável desvio padrão (Y_2), não representa bem a melhor otimização, não tendo variáveis com $p\text{-value} < 0,05$, os resíduos não sendo avaliados como dados normais, R^2 (aj) de 0,00%.

Pelas análises propostas foi verificado que a melhor condição para os pães de queijo serem assados é a uma temperatura de 200°C, tempo de forno de 35 minutos e sem papel alumínio.

REFERÊNCIAS

ABED, Ahmed M.; ELATTAR, Samia; GAAFAR, Tamer S.; ALROWAIS, Fadwa Moh. The neural network revamping the process's reliability in deep lean via internet of things. **Processes**, [S. l.], v. 8, n. 6, 2020. DOI: 10.3390/PR8060729.

CHERRAFI, A. et al. The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: A literature review and future research directions for developing a specific model. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, Cadi Ayyad Univ, Av Abdelkrim Khattabi, BP 511, Marrakech 40000, Morocco, v. 139, p. 828–846, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.08.101 WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI).

CHIKUMBIRIKE, M. O.; KANYEMBA, G.; CHIRINDA, G. P.; MATOPE, S. Design of an automated monitoring and control system for the soft drink capping machine and process mixer. **South African Journal of Industrial Engineering**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 225–237, 2021. DOI: 10.7166/32-3-2637.

COLEMAN, D. E.; MONTEGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. **Technometrics**, 1999. v.35, n.1. Recuperado em mar. 2012 em <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1993.10484984>.

DURAKOVIC, Benjamin. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 421–439, 2017. DOI: 10.21533/pen.v5i3.145.

FOUND, Pauline; HARRISON, Richard. Understanding the lean voice of the customer. **International Journal of Lean Six Sigma**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 251–267, 2012. DOI: 10.1108/20401461211282736.

KENDALL, Graham et al. Good Laboratory Practice for optimization research. **Journal of the Operational Research Society**, [S. l.], v. 67, n. 4, p. 676–689, 2016. DOI: 10.1057/jors.2015.77.

LEARDI, Riccardo. Experimental design in chemistry: A tutorial. **Analytica Chimica Acta**, [S. l.], v. 652, n. 1–2, p. 161–172, 2009. DOI: 10.1016/j.aca.2009.06.015.

MANDPE, Shilpa R.; PARATE, Vishal R.; NAIK, Jitendra B. Experimental design approach, screening and optimization of system variables, analytical method development of flurbiprofen in nanoparticles and stability-indicating methods for high-pressure liquid chromatography. **Future Journal of Pharmaceutical Sciences**, [S. l.], v. 8, n. 1, 2022. DOI: 10.1186/s43094-022-00426-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43094-022-00426-4>.

00426-4.

PERUCHI, R. S.; PAIVA, A. P.; BALESTRASSI, P. P.; FERREIRA, J. R.; SAWHNEY, R. Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis. **Precision Engineering**, [S. l.], v. 38, n. 3, p. 651–658, 2014. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2014.03.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2014.03.001>.

SAHA, Paramita; PANDEY, Murali Monohar. Design of Experiment (DoE)-Approach Based RP-HPLC Analytical Method Development and Validation for Estimation of Efavirenz in Bulk and Formulations. **Journal of chromatographic science**, [S. l.], v. 60, n. 1, p. 35–44, 2022. DOI: 10.1093/chromsci/bmab029.

SAJJAD, Muhammad Hamad; NAEEM, Khawar; ZUBAIR, Muhammad; USMAN JAN, Qazi Muhammad; KHATTAK, Sikandar Bilal; OMAIR, Muhammad; NAWAZ, Rashid. Waste reduction of polypropylene bag manufacturing process using Six Sigma DMAIC approach: A case study. **Cogent Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 1, 2021. DOI: 10.1080/23311916.2021.1896419. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1896419>.

SCHROEDER, Alexandra B.; DOBSON, Ellen T. A.; RUEDEN, Curtis T.; TOMANCAK, Pavel; JUG, Florian; ELICEIRI, Kevin W. The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis. **Protein Science**, [S. l.], v. 30, n. 1, p. 234–249, 2021. DOI: 10.1002/pro.3993.

SOARES, Williane de Oliveira Silva; PERUCHI, Rogério Santana; SILVA, Rômulo Augusto Ventura; ROTELLA JUNIOR, Paulo. Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review. **Quality Engineering**, [S. l.], v. 34, n. 3, p. 382–403, 2022. DOI: 10.1080/08982112.2022.2069505. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08982112.2022.2069505>.

TELFORD, JACQUELINE, K. A Brief Introduction to Design of Experiments. **Johns Hopkins APL Technical Digest**, Volume 27, Number 3. 2007. Disponível em: [https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V27-N03/27-03-Telford](https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V27-N03/27-03-Telford.pdf).pdf. Acesso em: 18 dez. 2021.

VAN DE LINDE, Sebastian. Single-molecule localization microscopy analysis with ImageJ. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S. l.], v. 51, n. 20, 2019. DOI: 10.1088/1361-6463/ab092f.

VERA CANDIOTI, Luciana; DE ZAN, María M.; CÁMARA, María S.; GOICOECHEA, Héctor C. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta**, [S. l.], v. 124, p. 123–138, 2014. DOI: 10.1016/j.talanta.2014.01.034. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>.

YADRIFIL; SEPTYANTI, Anindya Alfi; RUS, Annisa Marlin Masbar. Implementation of lean-DMAIC method for reducing packing defect in a flour company. **AIP Conference Proceedings**, [S. l.], v. 2227, n. May, 2020. DOI: 10.1063/5.0004212.

YEH, Tsu Ming; SUN, Jia Jeng. Using the Monte Carlo simulation methods in gauge repeatability and reproducibility of measurement system analysis. **Journal of Applied Research and Technology**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 780–796, 2013. DOI: 10.1016/S1665-6423(13)71585-2. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S1665-6423\(13\)71585-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1665-6423(13)71585-2).

ZHU, Qingyun; JOHNSON, Sharon; SARKIS, Joseph. Lean six sigma and environmental sustainability: A hospital perspective. **Supply Chain Forum**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 25–41, 2018. DOI: 10.1080/16258312.2018.1426339. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/16258312.2018.1426339>.