



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMPUS JOINVILLE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Gabriela Buzzi

**Aplicação do método Projeto Robusto ao processo de moldagem por injeção para
reduzir a vibração causada por hélices plásticas em ventiladores**

Joinville

2022

Gabriela Buzzi

**Aplicação do método Projeto Robusto ao processo de moldagem por injeção para
reduzir a vibração causada por hélices plásticas em ventiladores**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação
em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade
Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de
mestre em engenharia e ciências mecânicas.
Orientador: Prof. Dr. Diogo Lôndero Da Silva

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra

Buzzi, Gabriela

Aplicação do método Projeto Robusto ao processo de moldagem por injeção para reduzir a vibração causada por hélices plásticas em ventiladores / Gabriela Buzzi ; orientador, Diogo Lôndero Da Silva, 2022.
96 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Projeto robusto / Método de Taguchi. . 3. Moldagem por injeção plástica. . 4. Vibração. . 5. Ruído. . I. Silva, Diogo Lôndero Da . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Gabriela Buzzi

**Aplicação do método Projeto Robusto ao processo de moldagem por injeção para
reduzir a vibração causada por hélices plásticas em ventiladores**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Adriano Fagali de Souza, Dr.Eng.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.Eng.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.Eng.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Diogo Lôndero Da Silva, Dr.Eng.
Orientador

Joinville, 2022.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais e minha irmã, ao meu namorado, e aos meus colegas de trabalho.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que permitiu que eu chegasse até aqui, sempre me concedendo força, fé e perseverança para superar as dificuldades encontradas.

Aos meus pais e minha irmã, pela motivação durante toda essa trajetória. Agradeço pela presença diária em minha rotina, pela educação, e principalmente pelo amor incondicional. A vocês minha eterna gratidão.

Agradeço aos meus professores, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Diogo Lôndero da Silva, pela confiança, dedicação e por todo o conhecimento compartilhado no decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Vocês foram instrumentos valiosos para minha construção profissional. Agradeço também à Universidade Federal de Santa Catarina, ao departamento de Engenharia e Ciências Mecânicas, à portaria 078227 da CAPES e à empresa Britânia Eletrodomésticos.

Aos amigos, colegas de trabalho, e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos vocês meu sincero agradecimento.

RESUMO

Apesar da ampla utilização de polímeros para a fabricação de peças e componentes, observa-se que as variabilidades dimensionais das peças moldadas neste tipo de material são de difícil controle, o que pode comprometer o desempenho final do produto. Por este motivo, diferentes técnicas são empregadas para minimizar os efeitos negativos destas variabilidades, dentre elas, destaca-se o Projeto Robusto, conhecido também como Método de Taguchi. Neste trabalho, o método Projeto Robusto foi utilizado para investigar as causas e reduzir a vibração de hélices plásticas utilizadas em ventiladores domésticos. Com base nos índices de rejeição de hélices no processo produtivo, observou-se que 94,0 % das causas de rejeição por vibração estavam associadas ao desbalanceamento de massa das hélices. Desta forma, o Projeto Robusto foi empregado para identificar os fatores do processo de moldagem por injeção que impactam no desbalanceamento de massa, visando reduzir o índice de rejeição, bem como, reduzir a variabilidade do processo produtivo. Foi feito um plano experimental ortogonal do tipo L12 com 6 fatores de controles e 3 fatores de ruído, variando os fatores de controle em: tempo de injeção entre 3,0 s e 7,0 s, tempo de recalque entre 2,0 s e 3,0 s, tempo de resfriamento entre 18,0 s e 21,0 s, pressão de recalque entre 93,0 bar e 97,0 bar, temperatura do canhão entre 250,0 °C e 280,0 °C, e temperatura do cilindro entre 245,0 °C e 270,0 °C. Além disso, foram considerados como fatores de ruído o turno, o operador e a máquina. As 12 combinações de fatores de controle foram testadas com as 4 diferentes combinações dos fatores de ruído, totalizando 48 tratamentos, onde o desbalanceamento de massa das hélices foi medido e expresso pelo valor médio (mg). Fazendo a análise da relação sinal/ruído do tipo menor é melhor, análise ANOVA e análise de regressão, verificou-se que a combinação de parâmetros que reduziu a média de desbalanceamento de massa e, conseqüentemente, da vibração, bem como sua variabilidade, foi tempo de injeção igual a 7,0 s, tempo de recalque de 3,0 s, tempo de resfriamento igual a 21,0 s, pressão de recalque igual a 97,0 bar, temperatura do canhão de 280,0 °C e temperatura do cilindro de 270,0 °C. Como esta condição não estava no plano experimental, ela foi testada em produção para validação das análises, confirmando a efetividade do método. Como resultados obtidos pode-se perceber uma redução de aproximadamente 55,0 % do índice de rejeição por vibração das hélices no modelo estudado.

Palavras-chave: Projeto robusto / Método de Taguchi. Ruído. Moldagem por injeção plástica. Vibração. Hélice plástica.

ABSTRACT

Despite the wide use of polymers as a raw material in manufacturing processes, it is observed that the natural dimensional variability of this type of material is difficult to control. In a large number of applications, this characteristic can compromise the final performance of the product. For this reason, different techniques are employed to minimize the negative effects of the dimensional variability, among them, the Robust Design, also known as Taguchi Method, stands out. In this work, the Robust Design method will be used to reduce the variability of an injection molding process of plastic propeller fan. Based on a preliminary investigation of the rejection rates, it was observed that 94.0% of the rejection were associated with propeller unbalance. Thus, the Robust Design method was employed to identify the factors of the injection molding process responsible for this problem and to determine their effects on the process. A L12 orthogonal array will be used with 6 control factors and 3 noise factors, varying the control factors in: injection time ranging between 3.0 s and 7.0 s, holding time ranging between 2.0 s and 3, 0 s, cooling time ranging between 18.0 s and 21.0 s, hold pressure ranging between 93.0 bar and 97.0 bar, melt temperature ranging between 250.0 °C and 280.0 °C, and cylinder temperature ranging between 245.0°C and 270.0°C. In addition, the shift, the operator and the machine were as noise factors. The 12 combinations of control factors were tested with the four different combinations of noise factors, totaling 48 treatments, where the unbalance of the propellers was measured and expressed by the mean value (mg). By analyzing the S/N ratio of the smaller is better type, ANOVA analysis and regression analysis, it was verified that the combination of parameters that reduced the average of unbalance and, consequently, of the vibration, was the injection time 7.0 s, holding time 3.0 s, cooling time 21.0 s, holding pressure 97.0 bar, melt temperature 280.0 °C and cylinder temperature 270.0°C. As this condition wasn't in the experimental plan, it was tested in production to validate the analyses, confirming the effectiveness of the method. As results obtained, it is possible to perceive a reduction of approximately 55.0% in the problem of vibration of the propellers in the studied model.

Keywords: Robust design / Taguchi method. Noise. Plastic injection molding. Vibration. Propeller fan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do número de publicação de artigos científicos relacionados com o método Projeto Robusto.	19
Figura 2 – Representação esquemática de um sistema massa-mola amortecido.....	23
Figura 3 - Máquina com desbalanceamento rotativo.....	23
Figura 4 - Diagrama P.	28
Figura 5 - Estrutura esquemática máquina injetora.	35
Figura 6 - Ciclo básico de moldagem por injeção.	37
Figura 7 - Diagrama PVT para polímero fundido.	39
Figura 8 – Principais causas de rejeição de hélices durante o ano de 2019.	46
Figura 9 – Rejeição de hélices por modelo.....	47
Figura 10 - Hélice modelo BVT/PVT400.	47
Figura 11 - Máquina injetora para injeção de hélices plásticas.	48
Figura 12 - Painel da máquina injetora.....	48
Figura 13 - Molde da hélice.....	49
Figura 14 – Ventilador com medidor de vibração.	50
Figura 15 - Equipamento para medição de desbalanceamento modelo NK720.....	51
Figura 16 - Hélice com massa para balanceamento.	52
Figura 17 - Diagrama P do processo de injeção de hélices plásticas.	54
Figura 18 – Resultados das medições de vibração das hélices rejeitadas.	59
Figura 19 - Resultados das medições de massa das hélices rejeitadas.	60
Figura 20 - Resultados das medições de desbalanceamento de massa das hélices rejeitadas. .	60
Figura 21 – Resultado das medições do diâmetro maior do eixo (mm) das hélices rejeitadas.	61
Figura 22 – Resultado das medições do diâmetro menor do eixo (mm) das hélices rejeitadas.	61
Figura 23 – Resultado das medições do batimento do cubo (mm) das hélices rejeitadas.	62
Figura 24 – Resultados das medições do diâmetro do cubo (mm) das hélices rejeitadas.	63
Figura 25 – Resultados das medições de altura total da hélice (mm) das hélices rejeitadas....	63
Figura 26 – Resultados das medições da diferença de altura entre pás (mm) das hélices rejeitadas.....	64
Figura 27 - Gráfico de vibração x desbalanceamento.	65

Figura 28 - Desvio padrão e relação S/N.....	68
Figura 29 - Relação S/N entre combinação de fatores de controle.	70
Figura 30 - Gráfico de fatores de controle x combinação de ruídos.....	71
Figura 31 - Gráfico de efeitos para a média de desbalanceamento (mg).	72
Figura 32 - Gráfico de efeitos principais para relação S/N.	73
Figura 33 - Gráfico de resíduos: tempo de injeção, temperatura do canhão e temperatura do cilindro.	76
Figura 34 - Otimização de respostas.....	77
Figura 35 - Gráfico de dispersão de fatores de controle por média de desbalanceamento (mg) incluindo resultados da validação de dados.....	79
Figura 36 - Gráfico de comparação de relação S/N.....	79
Figura 37 - Comparação do índice de rejeição por vibração nas hélices do modelo 6 PÁS BVT/PVT400, com parâmetros originais do processo e parâmetros otimizados com o método projeto robusto.....	80
Figura 38 - Pontos de desbalanceamento da hélice.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Arranjos ortogonais Método Taguchi.....	31
Tabela 2 - Matriz combinada.....	32
Tabela 3 - Matriz interna-externa.	32
Tabela 4 - Histórico de estudos e aplicações do projeto robusto ou método de Taguchi.....	44
Tabela 5 - Especificações técnicas do modelo de hélice plástica analisada.	53
Tabela 6 - Parâmetros de injeção de hélices plásticas.	55
Tabela 7 - ANOVA de um experimento fatorial com dois fatores.....	56
Tabela 8 - Plano experimental de Taguchi.	67
Tabela 9 - Relação S/N entre combinação de fatores de controle.	69
Tabela 10 - Tabela de respostas para Média.....	72
Tabela 11 - Tabela de respostas para relação S/N.	73
Tabela 12 - Análise de Variância para desbalanceamento (mg).	74
Tabela 13 - Análise de Variância para a relação S/N.	75
Tabela 14 - Análise ANOVA de parâmetros de maior importância estatística.....	76
Tabela 15 - Combinação de parâmetros de injeção que minimiza o desbalanceamento de hélices.	77
Tabela 16 - Resultados experimentos de validação.....	78
Tabela 17 - Experimento desbalanceamento intencional de hélice.....	90
Tabela 18 - Combinações de parâmetros de injeção.	91
Tabela 19 - Coleta de dados de desbalanceamento de hélices plásticas (mm).....	92
Tabela 20 - Resultados da relação S/N (dB) para as 3 combinações de parâmetros.....	92
Tabela 21 - Base de dados plano experimental de Taguchi.	94
Tabela 22 - Resultados validação.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira de Plástico
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> (Análise de Variância)
ASRHAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado)
CIEAM	Centro da Indústria do Estado do Amazonas
DOE	<i>Design Of Experiments</i> (Design de Experimentos)
ELETROS	Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletroeletrônicos
Relação S/N	Relação sinal ruído
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> (Polietileno de Alta Densidade)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
LDPE	<i>Low Density Polyethylen</i> (Polietileno de baixa densidade)
SQ	Soma dos Quadrados
GL	Graus de Liberdade
QM	Quadrado Médio

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Amplitude do deslocamento	[mm]
a_r	Aceleração relativa	[mm / s ²]
a_c	Componente vertical da aceleração	[mm / s ²]
$a_{r/c}$	Componente da aceleração direcionada para o centro de rotação	[mm / s ²]
$a_{r,x}$	Componente vertical da aceleração absoluta do centro da massa do componente rotativo	[mm / s ²]
c	Coefficiente de amortecimento	[-]
e	Excentricidade	[mm]
$F(t)$	Força	[N]
k	Constante elástica	[N/m]
m	Massa	[mg]
m_0	Massa desbalanceada	[mg]
n	Quantidade de valores	[-]
r	Razão entre frequência angular e frequência natural	[-]
s	Desvio padrão	[mg]
SN_{NEM}	Relação Sinal Ruído do tipo nominal é melhor	[dB]
SN_{MEM}	Relação Sinal Ruído do tipo menor é melhor	[dB]
SN_{MAM}	Relação Sinal Ruído do tipo maior é melhor	[dB]
t	Tempo	[s]
x	Deslocamento da massa em relação a posição de referência	[mm]
\dot{x}	Velocidade	[mm / s]
\ddot{x}	Aceleração	[mm / s ²]
X	Amplitude do movimento na equação de vibração	[mm]
$x(t)$	Deslocamento em determinado instante de tempo	[mm]
y_i	Valor individual	[mg]
\bar{y}	Média de valores	[mg]

Letras Gregas

Símbolo	Descrição	Unidade
β_0	Intersecção da linha de regressão	[-]
β_1	Inclinação da regressão	[-]
θ	Ângulo feito pelo segmento linear entre o centro de rotação e o centro da massa	[-]
θ_0	Ângulo formado entre a posição inicial do centro da massa do componente rotativo e o eixo horizontal	[-]
ϕ	Fase	[-]
ζ	Razão entre coeficientes de amortecimento	[-]
ω_n	Frequência angular natural	rad/s
ω	Frequência angular	rad/s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	VIBRAÇÃO	21
2.2	DESBALANCEAMENTO ROTATIVO UNIDIMENSIONAL	23
2.3	PROJETO ROBUSTO	25
2.3.1	Diagrama P	27
2.3.2	Relação sinal ruído	28
2.3.3	Conceitos Gerais de Planejamento de Experimentos.....	29
2.3.4	Matriz Ortogonal.....	30
2.3.5	Análise de Variância (ANOVA) e análise de resíduos	33
2.3.6	Análise de regressão	33
2.4	PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO	34
2.4.1	Fases do processo de injeção.....	34
2.4.2	Parâmetros e ciclo de injeção	36
2.4.3	Diagrama PVT e o processo de injeção	38
2.5	TRABALHOS REALIZADOS UTILIZANDO O MÉTODO PROJETO ROBUSTO NO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO PLÁSTICA.....	41
2.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.....	47
3.2	IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA DE VIBRAÇÃO.....	52
3.3	UTILIZAÇÃO DO PROJETO ROBUSTO	53

3.4	MÉTODO ANOVA E ANÁLISE DE REGRESSÃO	56
4	RESULTADOS	58
4.1	IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA DE Rejeição por Vibração	58
4.1.1	Análise preliminar de hélices	58
4.2	ANÁLISE DA ROBUSTEZ DO PROCESSO DE INJEÇÃO DAS HÉLICES	66
4.2.1	Plano Experimental de Taguchi	66
4.2.2	Análise de efeitos dos fatores de controle	71
4.2.4	Análise de Regressão	75
4.2.5	Otimização dos fatores de controle	77
4.1	VALIDAÇÃO DE RESULTADOS	78
5	CONCLUSÕES	81
6	REFERÊNCIAS	84
7	APÊNDICES	89
	APÊNDICE I – EXPERIMENTOS INICIAIS DESBALANCEAMENTO HÉLICES.....	89
	APÊNDICE II – ANÁLISE PRELIMINAR PROCESSO DE INJEÇÃO	91
	APÊNDICE III – BASE DE DADOS DO PLANO EXPERIMENTAL DE TAGUCHI.....	94
	APÊNDICE IV – RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO DE DADOS ...	96

1 INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Embora a utilização industrial do plástico seja considerada recente, é difícil imaginar o cotidiano sem a presença deste material. O plástico contribui com os avanços tecnológicos e possibilita diversas inovações, que permeiam desde a indústria de alimentos até a automotiva e a de eletrodomésticos. ZAMORA *et al.* (2020) estimam que 9,2 bilhões de toneladas de plásticos já foram produzidos desde meados do século XX, quando iniciou a fabricação de plásticos em escala industrial, e estima-se que em 2025 a fabricação atinja cerca de 600 milhões de toneladas do material por ano.

De acordo com a Associação Brasileira de Plástico - ABIPLAST (2020), a cada R\$ 1 milhão adicional de produção no setor de transformação plástica, se aumenta R\$ 1,30 milhões no PIB brasileiro, R\$ 3,35 milhões na produção total da economia e são gerados 29 novos empregos, sendo o 4º setor que mais gera empregos dentre os setores da indústria de transformação brasileira. Somente em 2020 as indústrias plásticas brasileiras consumiram aproximadamente 7,3 milhões de toneladas deste material. Entre os setores consumidores de plásticos, o setor de eletrodomésticos e eletroeletrônicos representam 1,90 %.

Na indústria plástica, uma das operações de processamento mais importantes é a moldagem por injeção. Aproximadamente 44 % de todos os plásticos são transformados através deste processo, e o surgimento deste processo de fabricação iniciou ao final do século XIX (ABIPLAST, 2020).

A moldagem por injeção é uma das tecnologias de processamento mais utilizadas para produção em massa em indústria de plásticos, devido a seu tempo de ciclo de moldagem ser relativamente curto, ao seu alto nível de automatização, a sua precisão de moldagem e a variedade de formas que podem ser produzidas. Quando comparada a outros processos produtivos, a moldagem por injeção possui maior eficiência, rendimento e precisão dimensional, além de resultar em um excelente acabamento superficial das peças injetadas.

Chen, Huang e Huang (2013) afirmam que a moldagem por injeção é uma das técnicas mais importantes para o processamento de polímeros, devido a sua alta velocidade de

moldagem e capacidade de fabricar formas geométricas complexas. Além disso, este processo é capaz de produzir em massa, por isso é amplamente utilizado em muitos produtos, especialmente em eletroportáteis, na qual destaca-se a produção de ventiladores domésticos.

Para que um ventilador atenda aos requisitos de desempenho do projeto, todos os seus componentes devem ser produzidos dentro das suas especificações técnicas. O desvio dessas especificações acarreta na redução do desempenho ou no descarte do produto durante o processo produtivo. A hélice é um dos componentes fundamentais para o funcionamento do ventilador, e o seu desbalanceamento de massa está frequentemente relacionado com o processo de fabricação.

Um ventilador com a hélice desbalanceada criará forças em seus rolamentos e mancais e, conseqüentemente, causará vibrações durante o seu funcionamento (CORY, 2005). Eisenmann (1997) mostra que o desbalanceamento é uma das fontes mais comuns de vibração em máquinas e equipamentos, e acontece devido a uma alteração no equilíbrio das forças radiais que atuam sobre o eixo da máquina.

Devido ao processo de produção de componentes plásticos ser complexo e de difícil controle, as peças plásticas acabam apresentando variabilidade em suas características dimensionais e de performance, muitas vezes, passando dos limites aceitáveis no projeto do produto. Esta variabilidade é indesejável, uma vez que quando estes limites são ultrapassados, os produtos precisam ser reprocessados ou descartados, gerando prejuízos para a empresa, e se estes produtos chegarem até os clientes pode levar a insatisfação dos mesmos. Por este motivo, diferentes técnicas são empregadas para minimizar o efeito destas variabilidades, e dentre elas, destaca-se o projeto robusto.

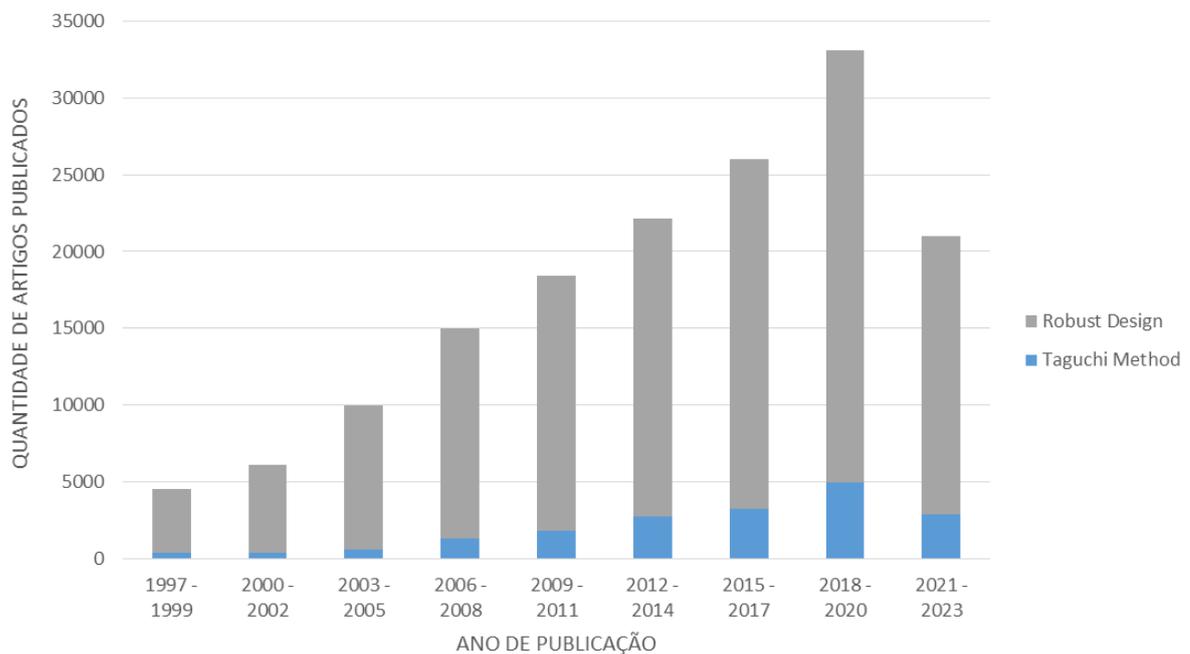
O método projeto robusto, também conhecido por método de Taguchi, é um método estruturado de engenharia que auxilia no projeto de produtos, ou na otimização de processos, para que funcionem adequadamente sob várias condições de uso, sendo capaz de manter suas características de desempenho mesmo quando submetido a diferentes fontes de variabilidade. Tais fontes de variabilidade são conhecidas como ruídos (TAGUCHI, CHOWDHURY e WU, 2005).

Existem muitos fatores que contribuem para a ocorrência de defeitos, afetando a qualidade das peças moldadas por injeção. A definição de parâmetros de processo para produtos plásticos tem uma influência notável em sua qualidade (CHEN, HUANG e HUANG, 2013). Os ruídos trazem variabilidade ao sistema, distanciando a resposta do seu valor especificado. O

objetivo do método é selecionar os níveis dos fatores de controle que otimizam a característica de qualidade definida, para que o produto ou processo sejam robustos e insensíveis à variação causada pelos parâmetros de ruído (ROBINSON, BORROR e MYERS, 2004).

Além de diversas aplicações no setor industrial, o uso crescente do método pela comunidade acadêmica pode ser comprovado pelo aumento expressivo de publicações científicas em periódicos. A Figura 1 apresenta a evolução do número de publicações de artigos científicos, de acordo com a base de dados *Scopus*, utilizando como termo de pesquisa “*Taguchi Method*” ou “*Robust Design*” no período do ano de 1997 até 2023. Observa-se que o termo “*Robust Design*”, que pode ser traduzido como “Projeto Robusto”, é o mais utilizado nas pesquisas. Além disso, observa-se também um aumento da quantidade de publicações, porém, apesar desse aumento, poucos estudos relacionados a área de ventilação que utilizam o método projeto robusto.

Figura 1 - Evolução do número de publicação de artigos científicos relacionados com o método Projeto Robusto.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

1.2 OBJETIVOS

Com base nos fatos apresentados, o objetivo geral do presente trabalho consiste na aplicação do método projeto robusto para definição dos valores dos parâmetros do processo de moldagem por injeção de hélices plásticas que reduzam o índice de rejeição por vibração em ventiladores domésticos. Para atingir este objetivo geral são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um procedimento experimental para mensurar a vibração nos ventiladores;
- Identificar as especificações técnicas da hélice que influenciam na vibração de ventiladores;
- Identificar os parâmetros do processo de injeção associados a vibração de ventiladores;
- Identificar os fatores de ruído envolvidos no processo;
- Obter uma base de dados experimental considerando diferentes níveis para os parâmetros do processo e fatores ruídos;
- Analisar os resultados e determinar os valores dos parâmetros a serem empregados para redução da variabilidade e índices de rejeição.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta uma contextualização do tema abordado, o objetivo geral e os objetivos específicos do presente trabalho. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica de vibração, desbalanceamento rotativo, processo de moldagem por injeção plástica e o método projeto robusto. No capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados, que incluem a descrição de como foram realizados os testes e o plano experimental. No capítulo 4 os resultados obtidos são apresentados, analisados e validados. Ao final, no capítulo 5 são discutidas as conclusões, bem como sugeridas propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VIBRAÇÃO

A vibração de um ventilador é a resposta estrutural às excitações causadas pelo desequilíbrio do impulsor, forças aerodinâmicas instáveis e pulsações de torque do motor. A magnitude e a extensão da estrutura resposta, ou nível de vibração, é determinada pela rigidez dos componentes do ventilador, alinhamento da unidade, propriedades do rolamento, entre outros fatores. Níveis de vibração excessivos podem levar à falha prematura do ventilador, altos níveis de ruído e transmissão de forças indesejáveis para a estrutura de suporte. Embora a vibração do ventilador não possa ser totalmente eliminada, níveis aceitáveis podem ser alcançados por meio de adequação ao projeto do produto, fabricação e aplicação (ASRHAE, 2020).

Vibração é qualquer movimento que se repete após um intervalo de tempo, e a vibração de um sistema envolve a transferência alternada e periódica de sua energia potencial para energia cinética e de energia cinética para potencial (RAO,2009). Segundo Cory (2005), a vibração pode ser definida como o movimento periódico em direções opostas alternadas em torno de uma posição de equilíbrio de referência. Inman (2014) também afirma que vibração é o estudo do movimento repetitivo de objetos em relação a um referencial estacionário ou a posição nominal. Observa-se que em equipamentos e eletrodomésticos que apresentam movimentos rotativos, a maior causa de vibração é o desequilíbrio de forças que atuam sobre o sistema girante. No ventilador, por exemplo, este desequilíbrio de forças se manifesta como uma vibração periódica caracterizada por uma onda senoidal (RAO, 2009).

De acordo com Inman (2014), a resposta de um sistema vibratório pode ser estimada a partir da solução da equação 2.1. Esta solução permite determinar a posição (x) da massa em função do tempo, devido a ação de uma força $F(t)$. Se uma força $F(t)$ agir sobre um sistema massa-mola viscosamente amortecido¹, como mostra a Figura 2, a equação diferencial de movimento pode ser obtida pela segunda lei de Newton, conforme apresentado pela equação

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.1)$$

onde m é massa, c é o coeficiente de amortecimento, k é a constante elástica e x é o deslocamento da massa em relação a sua posição de referência e t é tempo.

A equação 2.2 mostra que o caráter periódico da força $F(t)$ passa a ser observado na resposta do sistema, como indicado pela presença da função seno. E quando a força que age sobre o sistema apresenta um comportamento periódico, a solução obtida pode ser expressa como

$$x(t) = A \text{sen}(\omega_n t + \phi) \quad (2.2)$$

onde A é a amplitude² do deslocamento, ω_n é a frequência angular natural³ e ϕ é a fase.

A frequência ω_n , é determinada pelas propriedades físicas de massa e rigidez (m e k) por

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

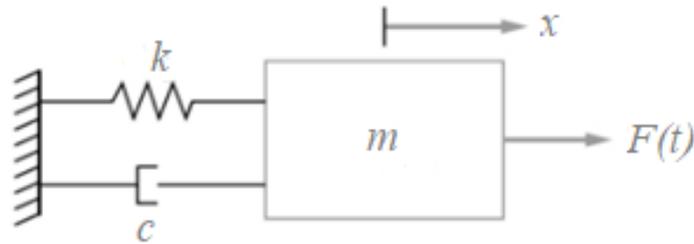
e os valores de A e ϕ são determinadas pela posição e velocidade iniciais, bem como pela frequência (GRAHAM, 2017).

¹ A força de amortecimento viscoso dissipa energia e, assim, amortece a resposta de um sistema mecânico (INMAN, 2014).

² A amplitude é o valor máximo do deslocamento (INMAN, 2014).

³ A frequência angular natural determina o intervalo de tempo durante o qual a função se repete (INMAN, 2014).

Figura 2 – Representação esquemática de um sistema massa-mola amortecido.

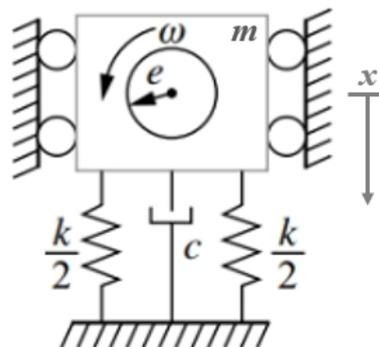


Fonte: RAO, 2009.

2.2 DESBALANCEAMENTO ROTATIVO UNIDIMENSIONAL

De acordo com Cory (2005) o balanceamento é o processo de melhorar a distribuição de massa em um impulsor para que ele possa girar sem produzir forças centrífugas desequilibradas, características de um sistema rotativo desbalanceado. Um exemplo de desbalanceamento rotativo é ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Máquina com desbalanceamento rotativo.



Fonte: GRAHAM, 2017.

De acordo com o esquema apresentado por Graham (2017), a máquina da Figura 3 possui um componente que gira a uma velocidade constante ω , e seu centro de massa está localizado a uma distância e , chamada de excentricidade, a partir do eixo de rotação. Devido aos apoios laterais, o corpo move-se apenas verticalmente. A massa desbalanceada do componente rotativo é m_0 , enquanto a massa total da máquina, que inclui a massa desbalanceada, é m . O centro de massa do componente rotativo se move em trajetória circular

em torno do centro de rotação em velocidade constante e θ é o ângulo feito pelo segmento linear entre o centro de rotação e o centro da massa em um instante arbitrário.

Sendo x o representante do movimento da máquina, a aceleração do componente rotativo é obtida usando a equação de aceleração relativa descrita por

$$a_r = a_c + a_{r/c} \quad (2.4)$$

onde $|a_c| = \ddot{x}$ é componente vertical da aceleração e $|a_{r/c}| = e\omega^2$ é a componente da aceleração direcionada para o centro de rotação. Ao solucionar a aceleração relativa em componentes horizontais e verticais, a componente vertical da aceleração absoluta do centro da massa do componente rotativo é expressa por

$$a_{r,x} = \ddot{x} + e\omega^2 \text{sen}\theta \quad (2.5)$$

Por sua vez, o balanço das forças na direção vertical resulta em

$$-kx - c\dot{x} = m\ddot{x} + m_0 e\omega^2 \text{sen}\theta \quad (2.6)$$

onde o ângulo θ_0 é formado entre a posição inicial do centro da massa do componente rotativo e o eixo horizontal, é definido por

$$\theta = \omega t + \theta_0 \quad (2.7)$$

Substituindo a equação 2.7 na equação 2.6 e rearranjando-a, obtém-se

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m_0 e\omega^2 \text{sen}(\omega t + \theta_0) \quad (2.8)$$

A solução da equação 2.8 é semelhante a equação 2.1 e mostra que uma massa desbalanceada em um sistema rotativo resulta em forças periódicas que agem sobre o sistema. Tal solução é obtida integrando a equação 2.8, que resulta em

$$x(t) = X \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (2.9)$$

onde

$$X = \frac{m_0 e}{m} \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2.10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (2.11)$$

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (2.12)$$

onde ω é a velocidade angular do sistema e ω_n é a frequência angular natural, previamente definida pela equação 2.3. Adicionalmente, ζ é a razão entre os coeficientes de amortecimento expressa por

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (2.13)$$

A equação 2.9 permite determinar a posição instantânea da massa m do sistema da Figura 3, causada pelo movimento rotativo da massa desbalanceada (m_0). Destaca-se que durante a operação de um ventilador, o eventual desbalanceamento na massa nas hélices provoca a variação da posição instantânea do sistema, que resulta na sua vibração. Adicionalmente, as equações 2.9 e 2.10 nos mostram que a variação da posição instantânea da massa do sistema (m) é diretamente proporcional ao valor da massa desbalanceada m_0 e a distância e do centro de rotação. Ou seja, quanto maior o valor da massa desbalanceada m_0 e da distância e , maior será a amplitude do movimento (X) e, conseqüentemente, a vibração observada no sistema.

2.3 PROJETO ROBUSTO

Conforme previamente apresentado, o projeto robusto, ou método de Taguchi, é um método de engenharia que auxilia no projeto de produtos e processos capazes de manter suas características de desempenho mesmo quando submetido a diferentes fontes de ruídos

(TAGUCHI, CHOWDHURY e WU, 2005). O método tornou-se cada vez mais popular, sendo muito utilizado por engenheiros para aumentar a produtividade.

De acordo com Mehat e Kamaruddin (2012), o projeto robusto é um método simples, usado especialmente no controle de qualidade para projetar produtos de qualidade e determinar a configuração ideal dos parâmetros controláveis. Ao implementar o método, a melhor combinação de variáveis para um melhor desempenho de qualidade e custo são determinadas sistematicamente, sendo possível coletar apenas os dados necessários com um mínimo de experimentos, dispensando a realização de testes com todas as combinações e reduzindo assim, tempo e recursos empregados em testes experimentais.

Quando um produto ou processo é utilizado, o seu desempenho pode sofrer variações por inúmeros motivos. Taguchi, Chowdhury e Wu (2005), afirmam que as causas dessas variabilidades podem ser chamadas de ruído. Portanto, ruídos são fatores que causam variações no produto ou processo, fazendo com que suas características funcionais se distanciem do valor esperado. Existem basicamente três tipos de ruídos:

- Ruído devido a fatores externos: Como por exemplo temperatura do ambiente, erro humano, ou qualquer carga não intencional.
- Ruído devido a fatores degenerativos: Como por exemplo acúmulo de sujeira, desgaste por atrito ou perda de carga.
- Ruído devido a fatores de unidade: Podendo ser, por exemplo, baixa qualidade de matéria prima, torque aplicado a um parafuso ou a falta de operador.

Destaca-se que diferente de outros métodos semelhantes, o projeto robusto permite a utilização intencional de fontes de ruídos durante a sua utilização, justamente para encontrar a configuração de parâmetros que resulte na menor variação dos resultados mesmo quando exposta às variações de ruídos. Entretanto, um produto ou processo é dito robusto quando ele não é sensível a fontes de variabilidade mesmo quando elas não tenham sido eliminadas.

De acordo com Taguchi, Chowdhury e Wu (2005), existem três etapas no projeto do produto ou do processo: projeto de sistema (engenharia), projeto de parâmetros (experimental) e projeto de tolerâncias (opcional). Das três etapas, o projeto dos parâmetros de Taguchi é frequentemente identificado como crucial na otimização do processo.

O projeto de parâmetro é usado para obter os níveis otimizados dos parâmetros do processo, com objetivo de se elevar as características de qualidade e determinar os valores dos parâmetros do produto baseado nos valores otimizados do processo. As variáveis do sistema

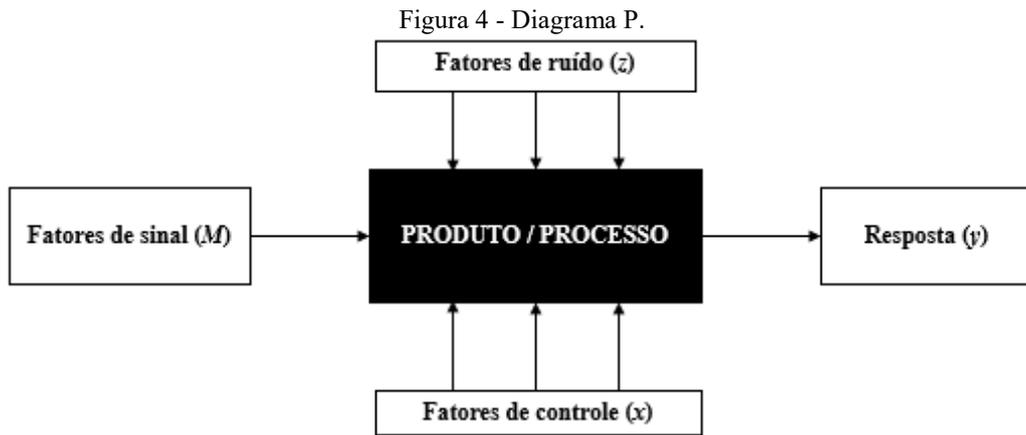
são analisadas para determinar a forma como o produto ou processo reage com os fatores de ruído, que são incontrolláveis no sistema. Portanto, o projeto de parâmetro pretende encontrar os níveis de parâmetros de processo adequados para tornar o sistema menos sensível as variações de ruído, isto é, para tornar o sistema robusto, para que assim o produto tenha um melhor desempenho.

O projeto de sistema é a concepção de um produto ou processo a ser utilizado, onde pode ser aplicada novas ideias, conceitos e conhecimentos nas áreas de ciência e tecnologia. Neste caso, podem ser utilizados pela equipe de projeto para determinar a combinação apropriada de materiais, peças, processos, e outros fatores que irão satisfazer as especificações funcionais e econômicas do produto.

A última etapa da abordagem do método é o projeto de tolerância, que é utilizado quando as tolerâncias para os produtos ou processos são estabelecidos para minimizar a soma dos custos de produção ou vida útil do produto. Essa fase é de uso facultativo e recomendada se a parte experimental na fase de projeto dos parâmetros apresentar grande variabilidade, ou seja, se os valores alvo de qualidade ainda não forem atingidos. O método Taguchi utiliza algumas ferramentas no intuito de otimizar a resposta. Algumas dessas ferramentas são o diagrama P, relação S/N, *Design of Experiments* (DOE), matriz ortogonal e Análise de Variância (ANOVA). Estas ferramentas serão discutidas nos tópicos seguintes.

2.3.1 Diagrama P

Uma ferramenta utilizada no Projeto Robusto para a visualização do funcionamento de um produto ou processo é o diagrama P, onde a letra P significa o produto ou processo em questão, conforme indicado na Figura 4. Os fatores de controle são parâmetros de projeto controláveis usados para otimizar o desempenho do sistema, idealmente produzindo a saída, ou resposta ideal desejada. Fatores de ruído são parâmetros associados a quaisquer fontes de variação que não podem ser controladas. Já o fator de sinal, é o que o cliente aplica intencionalmente a fim de alterar a resposta (ARNÉR, 2014).



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

2.3.2 Relação sinal ruído

Para analisar os resultados, o projeto robusto utiliza uma medida estatística de desempenho chamada relação sinal ruído, conhecida como relação S/N, que leva em consideração a média e a variabilidade. No projeto robusto, o termo "sinal" representa o valor desejável e "ruído" representa o valor indesejável e, portanto, a relação S/N é uma medida de desempenho para desenvolver produtos e processos insensíveis a fatores de ruído. A relação S/N indica o grau de desempenho previsível de um produto ou processo na presença de fatores de ruído, e as fórmulas para a relação S/N são projetadas para que um experimentador selecione a maior configuração de nível de fator para otimizar a característica de qualidade de um experimento. Portanto, o método de cálculo da relação S/N depende se a característica de qualidade é menor é melhor, maior é melhor, ou nominal é melhor (MEHAT e KAMARUDDIN, 2012).

A relação S/N do tipo nominal é melhor, é utilizada quando o valor esperado é um valor alvo. Sua relação S/N é definida por

$$SN_{NEM} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s} \right)^2 \quad (2.14)$$

A relação S/N do tipo menor é melhor, é utilizada quando pretende-se minimizar o valor esperado. Sua relação S/N é definida por

$$SN_{MEM} = -10 \log[s^2 + \bar{y}^2] \quad (2.15)$$

Por fim, no caso maior é melhor, o valor esperado é infinito ou o maior possível. Sua relação S/N é expressa por

$$SN_{MAM} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2.16)$$

onde s é o desvio padrão, calculado por meio da equação 2.17, e \bar{y} é a média, calculada pela equação 2.18.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2.17)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (2.18)$$

onde y_i é o valor individual e n a quantidade de valores.

2.3.3 Conceitos Gerais de Planejamento de Experimentos

De acordo com Montgomery (2001), um experimento é um teste, ou uma série de testes, em que são feitas mudanças intencionais nas variáveis de entrada de um sistema. A validação das conclusões obtidas a partir dos experimentos é bastante dependente de como os experimentos são conduzidos, e por isso, o planejamento de experimentos tem grande importância.

O uso do planejamento de experimentos em projetos de engenharia pode resultar em produtos que sejam mais fáceis de trabalhar, que tenham melhor desempenho em campo, que tenham maior confiabilidade e que sejam desenvolvidos ou produzidos em menos tempo. O objetivo do experimento é a otimização, ou seja, determinar quais são os níveis resultantes das variáveis críticas que resultam no melhor desempenho do produto ou do processo. De forma resumida, cada experimento envolve uma sequência lógica de atividades:

1. Hipótese: é o que motiva o experimento.
2. Experimento: testes feitos para investigar a hipótese.

3. Análise: análise estatística dos dados resultantes do experimento.
4. Conclusão: o que se aprendeu com relação a hipótese original do experimento.

Experimentos estatisticamente planejados permitem eficiência e economia no processo experimental, e o uso de métodos estruturados, como o método de Taguchi, resulta na objetividade científica nas análises e conclusões. A seguir, serão apresentados alguns conceitos e termos técnicos utilizados em experimentos industriais, de acordo com Montgomery (2001).

Variáveis de resposta (y): São as variáveis dependentes, ou seja, que sofrem algum efeito nos experimentos quando se altera as variáveis de controle ou de ruído. São as variáveis que são medidas, e nos experimentos podem existir uma ou mais variáveis de resposta.

Fatores de Controle (x): São os fatores alterados intencionalmente no processo, avaliando o efeito produzido nas variáveis de resposta. Como por exemplo, no processo de moldagem por injeção, os fatores de controle podem ser pressão de injeção, temperatura da máquina, entre outros.

Fatores de ruído (z): Podendo ser conhecidos ou não, são os fatores que influenciam nas variáveis de resposta e que não são controlados.

Níveis dos fatores: São as condições de operação dos fatores de controle investigados no experimento, geralmente identificadores por nível baixo (-1), sendo o menor valor, e nível alto (+1), sendo o maior valor.

Tratamentos: É a combinação dos níveis de fatores de controle e ruídos, sendo que cada uma das combinações representa um tratamento.

Matriz de experimentos: É o plano formal experimental construído para executar os experimentos. Nesta matriz são incluídos os fatores de controle e seus níveis, fatores de ruído, variáveis de resposta e os tratamentos do experimento.

2.3.4 Matriz Ortogonal

Uma técnica importante usada no planejamento de experimentos do projeto robusto é a matriz ortogonal, que é utilizada para estudar vários parâmetros por meio de uma única resposta (JEYAPPAUL, SHAHABUDEEN e KRISHNAIAH, 2004). De acordo com Mehat e Kamaruddin (2012) as matrizes ortogonais são desenhos ortogonais fracionados que podem ser usados para estimar os principais efeitos do produto ou processo usando apenas algumas execuções experimentais, podendo ser aplicados a experimentos fatoriais de dois ou mais

níveis. Assim, esse método pode reduzir os custos de pesquisa e desenvolvimento, estudando simultaneamente um grande número de parâmetros.

O DOE (*Design of Experiments*) é um desenho experimental convencional fatorial completo, utilizado quando todas as combinações dos níveis dos fatores estão presentes no experimento. As matrizes ortogonais de Taguchi são empregadas principalmente para substituir o desenho experimental convencional, a fim de executar o experimento reduzindo consideravelmente o número de experimentos. Assim, permite estudar vários parâmetros simultaneamente obtendo o máximo de informações sobre o processo com um pequeno número de experimentos (MEHAT e KAMARUDDIN, 2012).

O arranjo ortogonal adequado depende da quantidade de fatores controláveis e de seus respectivos níveis (PHADKE, 1989). Em uma matriz L9, por exemplo, são feitos 9 experimentos com no máximo 4 fatores e 3 níveis. Já na matriz L12 são feitos 12 experimentos com no máximo 11 fatores e 2 níveis. Ou seja, o arranjo ortogonal adequado depende do número de fatores controláveis e de seus respectivos níveis, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Arranjos ortogonais Método Taguchi.

Arranjo Ortogonal	Nº de Linhas	Nº máximo de fatores	Nº máximo de fatores com esses níveis			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L'36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Fonte: Adaptado de PHADKE, 1989.

Existem basicamente dois tipos de matrizes ortogonais: a matriz combinada e a matriz interna-externa (ARNÉR, 2014). Na matriz combinada todos os fatores são colocados em uma única matriz, e a análise é feita avaliando a interação entre fatores de controle e ruído, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz combinada.

Controle		Ruído	Resposta
A	B	C	y
-1	-1	-1	22.4
1	-1	-1	27.0
-1	1	-1	25.1
1	1	-1	29.7
-1	-1	1	22.3
1	-1	1	19.9
-1	1	1	25.3
1	1	1	22.0

Fonte: Adaptado de ARNÉR, 2014.

Já na matriz interna-externa, duas matrizes separadas são configuradas e combinadas entre si: a matriz interna, com os fatores de controle, e a matriz externa, com os fatores de ruído. Assim, ao invés de realizar algumas réplicas em cada tratamento, conforme o DOE clássico, é explorado o efeito dos ruídos em cada tratamento, já que os fatores de ruído na matriz externa são combinados em cada tratamento da matriz interna. Ou seja, cada combinação presente na matriz interna é testada em diferentes combinações dos fatores de ruídos presentes na matriz externa, sendo possível analisar o efeito dos fatores de controle sob diferentes combinações de ruídos, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Matriz interna-externa.

Controle				Ruído			
A	B	C	D	E = -1	E = 1	E = -1	E = 1
				F = -1	F = -1	F = 1	F = 1
-1	-1	-1	-1	y11	y12	y13	y14
1	-1	-1	1	y21	y22	y23	y24
-1	1	-1	1	y31	y32	y33	y34
1	1	-1	-1	y41	y41	y41	y41
-1	-1	1	1	y51	y51	y51	y51
1	-1	1	-1	y61	y61	y61	y61
-1	1	1	-1	y71	y71	y71	y71
1	1	1	1	y81	y81	y81	y81

Fonte: Adaptado de ARNÉR, 2014.

2.3.5 Análise de Variância (ANOVA) e análise de resíduos

A Análise de Variância, também conhecida por sua sigla ANOVA é uma ferramenta complementar utilizada no projeto robusto para analisar os resultados experimentais. A partir dessa ferramenta é possível entender a influência de cada um dos fatores escolhidos, e dessa forma visualizar se determinado fator é importante ou não para determinada variável de resposta. Além disso, é possível também entender melhor as fontes de variação, pois são identificados os níveis dos parâmetros que reduzem a variação (ARNÉR, 2014).

Após a realização do experimento, Taguchi propõe que se analise estatisticamente os resultados, em duas etapas distintas:

1. Submeter ao ANOVA os valores da relação S/N calculados a partir das variáveis de resposta, com intuito de identificar os fatores de controle ou parâmetros que possuam significativa influência.

2. Submeter as médias das respostas do experimento ao ANOVA, para identificar os fatores que apresentem uma relação linear com a resposta.

No capítulo 3 será explorado os cálculos estatísticos para fazer a análise ANOVA.

De acordo com Montgomery (2001), os resíduos em um planejamento fatorial desempenham papel importante na adequação de um modelo. A análise ANOVA considera que as observações sejam normal e independentemente distribuídas, com a mesma variância para cada um dos tratamentos ou níveis de fator. Essas suposições devem ser verificadas através da análise de resíduos, que são as diferenças entre as observações e seus valores estimados (ou ajustados) a partir do modelo estatístico utilizado. A suposição de normalidade pode ser verificada através do gráfico de probabilidade normal de resíduos, em que o gráfico plotará os resíduos contra os níveis dos fatores e comparará com a dispersão dos resíduos. A maioria dos pacotes computacionais estatísticos constrói esses gráficos.

2.3.6 Análise de regressão

A análise de regressão é uma técnica estatística para investigar e modelar a relação entre duas ou mais variáveis em um experimento. De acordo com Montgomery (2001), ela pode ser utilizada para determinar o modelo que otimiza o processo estudado, maximizando ou minimizando o valor esperado. O caso de regressão linear simples considera um único regressor

ou preditor x e uma variável de resposta Y . O valor de Y para cada valor de x pode ser expresso por

$$E(Y | x) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.19)$$

sendo β_0 a intersecção e β_1 a inclinação, que são coeficientes desconhecidos da regressão.

As estimativas de mínimos quadrados da intersecção e da inclinação no modelo de regressão linear simples são

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.20)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (2.21)$$

em que $\bar{y} = ((1/n) \sum_{i=1}^n y_i)$ e $\bar{x} = ((1/n) \sum_{i=1}^n x_i)$

A linha estimada ou ajustada de regressão, por consequência, é

$$\bar{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.22)$$

2.4 PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO

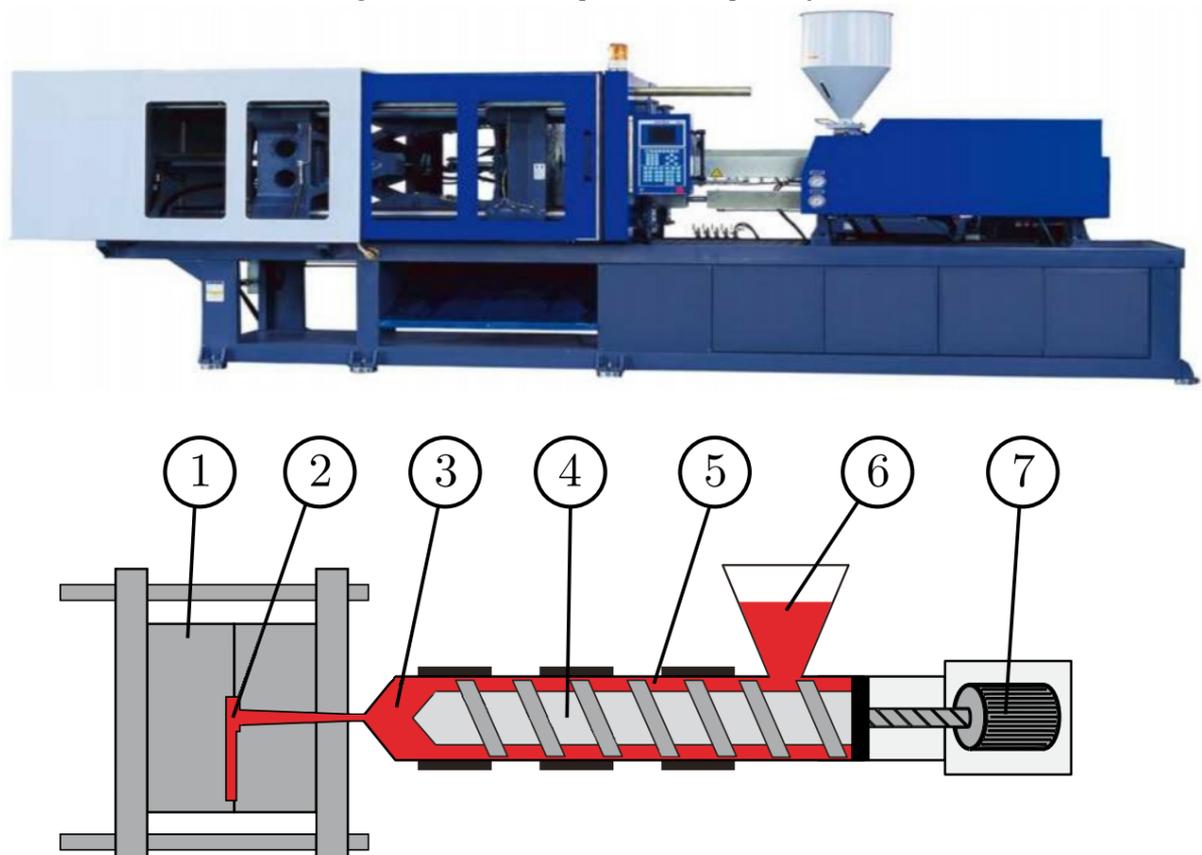
2.4.1 Fases do processo de injeção

O processo de moldagem por injeção consiste em quatro fases gerais: injeção (enchimento e compressão), recalque, refrigeração e extração. Portanto, a complexidade do processo cria um esforço intenso para manter as características da qualidade sob controle. Existem muitos fatores que contribuem para a ocorrência de defeitos que afetam a qualidade das peças moldadas por injeção, como a seleção de materiais, projetos de peças e moldes e

parâmetros de processo. Geralmente, os parâmetros de processamento envolvidos na moldagem por injeção podem ser agrupados em quatro categorias: temperatura, pressão, tempo e deslocamento (FEI, MEHAT e KAMARUDDIN, 2013).

A Figura 5 ilustra de forma esquemática as partes de uma máquina de moldagem por injeção. Segundo Manrich (2013), o molde (1) é o componente que define a geometria final da peça injetada por meio de suas cavidades (2), sendo que, os moldes convencionais mais simples, geralmente possuem duas placas: uma fixa e uma móvel. A placa fixa fica localizada ao lado do bico de injeção, enquanto a placa móvel realiza o deslocamento para a abertura e fechamento do molde. Nessas placas, além das cavidades com o formato das peças, que podem ter mais de uma cavidade de acordo com o projeto do molde, também se localizam o canal de injeção, os canais de alimentação e distribuição, os canais de resfriamento e os pinos extratores.

Figura 5 - Estrutura esquemática máquina injetora.



Fonte: Adaptado de STEMMLER *et al.*, 2020.

Conforme descrito por Stemmler *et al.* (2020), o plástico granulado é depositado no funil de alimentação (6), que o direciona para a unidade de injeção, composta pelo cilindro (5)

e pela rosca (4). No interior da unidade de injeção, o polímero é fundido e homogeneizado por meio do aquecimento do cilindro e esforços mecânicos, como atrito e cisalhamento, que são gerados pela rotação da rosca. A rosca, além de fundir o material, também é responsável por transformar o polímero para frente do cilindro (3), onde o material é acumulado até atingir uma dosagem pré-estabelecida, completando a etapa de plastificação.

Devido à pressão do material no bico da injetora (3), a rosca se desloca para trás durante a dosagem para descompressão, e, por fim, a rosca atua como um pistão empurrando o polímero pelo bico da injetora e preenchendo o molde, iniciando assim o processo de injeção, onde ocorre o preenchimento das cavidades (2) do molde (1) – etapa de conformação. Após a injeção, inicia-se a fase de recalque, onde a pressão é aumentada para compensar retrações decorrentes do início da solidificação do material, causada pelo início do resfriamento do molde. Por fim, se dá o restante do resfriamento, onde se solidifica a peça e se estabiliza a forma, acontecendo a extração da peça. Simultaneamente a etapa de resfriamento se dá início a dosagem do novo ciclo.

2.4.2 Parâmetros e ciclo de injeção

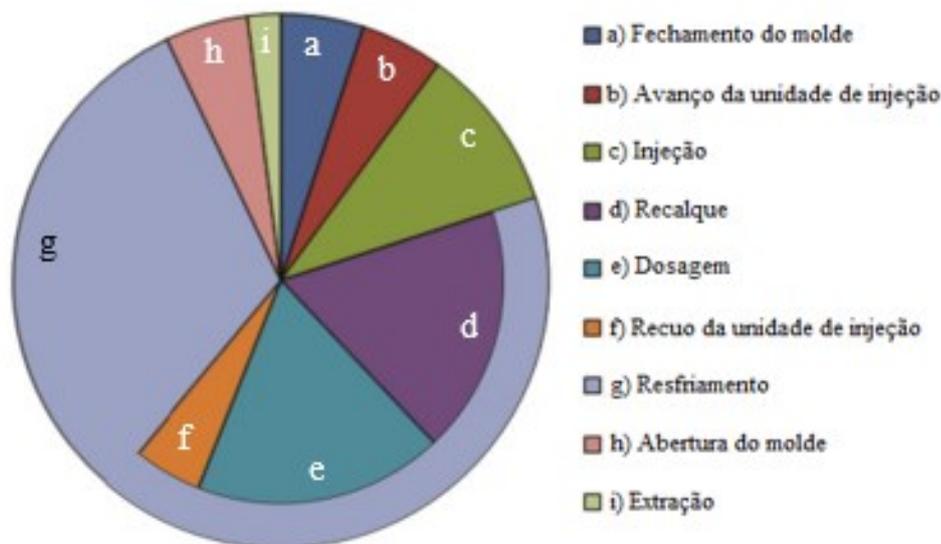
Conforme Harada e Ueki (2012), os principais fatores de controle no processo de moldagem por injeção são:

- **Tempo de ciclo:** É o tempo total do ciclo de injeção, ou seja, o tempo necessário para completar todas as etapas do ciclo de moldagem.
- **Velocidade de injeção:** É a velocidade do avanço da rosca da máquina injetora enquanto que o material é injetado.
- **Tempo de recalque:** É o tempo determinado para que o pistão continue fazendo pressão sobre o material injetado, durante a fase de recalque.
- **Tempo de injeção:** É o tempo para realizar a operação de injeção do material no molde.
- **Tempo de resfriamento:** É o tempo em que o material permanece dentro da cavidade do molde, onde a água, a uma temperatura específica, circula por dentro do molde a fim de resfriar a peça moldada.
- **Temperatura do cilindro:** Temperatura ajustada exercida sobre o cilindro da máquina injetora, que interfere diretamente no material injetado - (5) da Figura 5.

- **Temperatura do canhão (bico):** Temperatura ajustada exercida sobre o bico da injetora a fim de melhorar o fluxo do material plástico para as cavidades do molde – (3) da Figura 5.
- **Pressão de fechamento:** É a pressão utilizada para manter o molde fechado, aproximando a parte fixa da parte móvel do molde.
- **Pressão de injeção:** É a pressão na qual o material é injetado no molde.
- **Pressão de recalque:** É a pressão que atua durante o tempo de recalque, para garantir que o molde seja preenchido com material adicional para compensar os efeitos de sua contração causado pelo resfriamento durante a moldagem.
- **Dosagem:** É a quantidade de material que será injetada para dentro das cavidades do molde, que depende do tamanho e do peso da peça plástica a ser injetada.

O processo de injeção ocorre de forma cíclica, onde o tempo e as fases dependem da complexidade da máquina utilizada, bem como, do formato do produto, de modo que as 4 fases gerais podem ser subdivididas em diferentes etapas. As fases de ciclo básico de moldagem estão ilustradas na Figura 6.

Figura 6 - Ciclo básico de moldagem por injeção.



Fonte: Adaptado de HARADA e UEKI, 2012.

De acordo com Harada e Ueki (2012), o ciclo de moldagem por injeção convencional segue as seguintes etapas:

a) O ciclo inicia-se pelo fechamento do molde, que é definido pelo perfil de velocidade de injeção e pela força de fechamento.

b) Na sequência há o avanço da unidade de injeção para encostar o bico de injeção na entrada do molde.

c) É iniciada a etapa de injeção, onde material dosado é injetado dentro da cavidade do molde através da rosca que funciona como pistão. Seus principais parâmetros são a velocidade de injeção, pressão máxima de injeção e a temperatura de injeção (definida pelo perfil de temperatura na rosca e no bico).

d) Inicia-se o processo de recalque, onde ocorre o controle de pressão no material dentro do molde realizado pela rosca, e a injeção de mais material na cavidade para compensar a contração do material devido ao resfriamento do mesmo no interior da cavidade, mantendo as dimensões dentro das especificações. Nesta etapa, deve ser definido o perfil de pressão de recalque, bem como, o tempo e a pressão de recalque.

e) A dosagem para o próximo ciclo se inicia após o recalque, o material é transportado para frente da rosca na quantidade dosada para o próximo ciclo. Para isso, estipula-se o volume dosificado, a rotação da rosca e a contrapressão.

f) Para separar o material no molde do material no bico de injeção é realizado o recuo da unidade de injeção, podendo ser feito antes da etapa de dosagem.

g) A etapa de resfriamento ocorre simultaneamente à dosagem e ao recuo da unidade de injeção, na qual o polímero dentro do molde se solidifica, garantindo a estabilidade da forma. O resfriamento, se inicia desde o momento do contato do material fundido com as paredes do molde.

h) Com o fim do resfriamento o molde se abre, controlando a velocidade de deslocamento do mesmo.

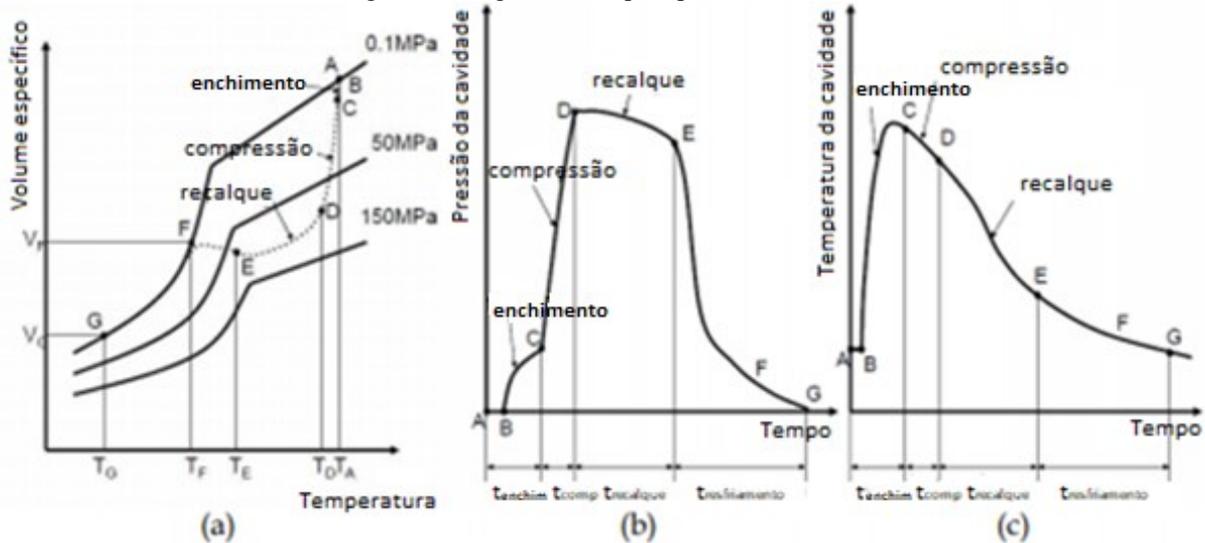
i) Para finalizar o ciclo acontece a extração da peça, sendo realizada por meio da movimentação dos pinos extratores. O deslocamento não precisa acontecer somente depois da abertura completa do molde, de forma que enquanto este recue, os pinos avancem para que a peça seja completamente extraída ao final da abertura.

2.4.3 Diagrama PVT e o processo de injeção

O diagrama PVT descreve a relação entre o volume específico, a temperatura e a pressão do polímero durante o processo de injeção, permitindo descrever os diferentes estados

termodinâmicos do polímero ao longo do processo e também visualizar as diferentes etapas envolvidas no processo, como mostra a Figura 7 (WANG, 2012).

Figura 7 - Diagrama PVT para polímero fundido.



Fonte: WANG, 2012.

Do ponto A ao ponto B inicia-se o processo de enchimento, onde a pressão da cavidade do molde está em equilíbrio com a atmosfera e o plástico derretido inicia o contato com o sensor de pressão. Na sequência, a pressão na cavidade aumenta continuamente à medida que o enchimento prossegue. Esta fase se caracteriza pela transferência de parte do material pré-dosado para dentro do molde, definindo o preenchimento volumétrico de suas cavidades. Nesta fase tem-se o controle do volume de material a ser transferido para o molde, sendo parâmetros variáveis a quantidade total de material disponível para ser transferido, a regulagem das temperaturas, e a velocidade ou o tempo de injeção.

A fase de enchimento é concluída no ponto C, onde a cavidade é preenchida pelo material, sem ser comprimida. Neste ponto, a temperatura na cavidade aumenta, pois se completa com o material fundido, a densidade e a pressão na cavidade aumentam, e o volume específico do material diminui.

Do ponto C ao D o processo de compressão se inicia e a pressão sobe rapidamente para o valor de pico no ponto D. Nesta etapa é transferida uma pequena quantidade de material polimérico que auxilia na pré-compactação do produto, tendo como função principal permitir a passagem do controle de pressão da fase de injeção para a de recalque. O início da compressão ocorre no momento em que o fluxo atinge o final da cavidade, necessitando assim maiores níveis de pressão para que o material continue sua movimentação em direção ao molde. Após

essa etapa não entra mais material na cavidade, a temperatura e volume específico reduz (densidade aumenta devido a pressão de pico).

No ponto D a pressão de injeção muda para a pressão de recalque e o plástico fundido dentro da cavidade é mantido em uma pressão atribuída durante a fase de recalque, quando o plástico derretido adicional pode ser adicionado na cavidade para compensar o encolhimento do plástico causado pelo resfriamento, de modo que o molde seja completamente preenchido. Esse processo continua até que a entrada do bico de injeção se congele, conforme marcado no ponto E. O ponto E é o ponto final da fase de recalque.

A partir do Ponto E, uma fase de volume constante é mantida, sendo decisiva para a precisão dimensional da moldagem. Neste ponto se inicia o resfriamento, que pode ser regulado através do tempo de resfriamento, onde a pressão e a temperatura reduzem e o volume específico aumenta devido ao encolhimento. Alcançar o ponto F de maneira uniforme é decisivo para a constância de peso e dimensões da moldagem. Após o Ponto F, a moldagem não pode mais ser influenciada. Ele encolhe sem ser afetado, geralmente até a temperatura ambiente.

A partir do Diagrama PVT nota-se a importância que os parâmetros de injeção têm para manter o dimensionamento correto da peça final a ser moldada. A temperatura do material injetado, definida pela temperatura do canhão e do cilindro, faz com que o material funda e consiga escoar pelo bico de injeção para dentro das cavidades do molde. É necessário que o plástico fundido esteja na temperatura ideal para preencher completamente as cavidades do molde. Nota-se que a pressão de injeção, juntamente com a pressão de recalque também são parâmetros importantes para o bom dimensionamento das peças injetadas, pois é o que auxilia na transferência do material para dentro das cavidades do molde fazendo com que seja completamente preenchida, e evitando que ocorra, por exemplo, falhas de injeção.

2.5 TRABALHOS REALIZADOS UTILIZANDO O MÉTODO PROJETO ROBUSTO NO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO PLÁSTICA

Chang e Faison (2001) utilizaram o método de Taguchi para investigar sistematicamente o efeito das condições do processo de injeção na deformação plástica, comparando três tipos de plástico diferentes: polietileno de alta densidade (HDPE), poliestireno (PS) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Utilizando o método proposto, conseguiram identificar quais parâmetros do processo possuem influência mais significativa no comportamento de retração dos materiais, bem como a melhor combinação de fatores para cada tipo de material. Os autores concluíram que a temperatura de molde, tempo de injeção e pressão de injeção são os fatores mais significativos para o comportamento de retração dos três materiais, embora sua importância seja diferente para cada tipo de plástico.

Wu e Liang (2005) estudaram os efeitos dos parâmetros do processo para reduzir as linhas de solda em amostras injetadas em plástico polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (HDPE). Utilizando o método de Taguchi, fizeram experimentos combinando quatro fatores: temperatura de fusão, temperatura do molde, velocidade de injeção e pressão de recalque. Os autores otimizaram a composição do material, projeto do molde, e condições do processo, onde este último foi dividido em experimentos de tentativa e erro e simulação numérica. Aplicando esquemas de otimização, os defeitos da linha de solda foram reduzidos utilizando uma combinação ideal de fatores, onde a temperatura de fusão foi o fator mais influente, seguido pelo tempo de recalque, velocidade de injeção e temperatura do molde.

Li, Guo e Li (2006) estudaram os parâmetros do processo que interferem na aparência de linhas de solda no processo de injeção de peças plásticas de polipropileno utilizando o método de Taguchi. Fizeram experimentos com três fatores e três níveis, onde identificaram que a temperatura de fusão, a velocidade de injeção e a pressão de injeção são os fatores que mais influenciam na visibilidade das linhas de solda. Além disso, geraram a melhor combinação de fatores para aliviar a visibilidade das linhas de solda nas peças plásticas estudadas.

Song, *et al.* (2007) utilizaram o método de Taguchi para avaliar os parâmetros do processo de injeção de plástico polipropileno de parede ultrafina, a fim de melhorar a qualidade da peça moldada. Neste estudo, os autores fizeram experimento de cinco fatores e três níveis, obtendo como resultado a espessura final da peça. Com isso, identificaram que a temperatura

de fusão e a pressão de injeção são os parâmetros que mais influenciam na espessura da peça, e além disso, definiram a melhor combinação de fatores para se obter a menor espessura da peça possível.

Kamaruddin, Khan e Foong (2010) otimizaram os parâmetros de moldagem por injeção utilizando o método de Taguchi, com o objetivo de aumentar a resistência à flexão de bandejas de plástico. Utilizaram a matriz ortogonal, ANOVA e relação S/N para determinar a condição ideal dos parâmetros do processo, bem como os fatores significativos. Os parâmetros velocidade de injeção, temperatura de fusão, pressão de injeção, pressão de recalque, tempo de recalque e tempo de resfriamento foram otimizados de forma a chegar a uma flexão de 0,8577 mm, onde a interação entre a temperatura de fusão e a pressão de injeção, bem como a pressão de recalque e tempo de recalque foram considerados os mais significativos.

Mehat e Kamaruddin (2012) otimizaram os parâmetros de injeção de plástico utilizando material reciclado, avaliando o comportamento mecânico das peças injetadas através do projeto robusto. Fizeram experimentos utilizando a matriz ortogonal L9, com quatro fatores e três níveis, buscando maximizar a resistência à flexão das peças. Por meio dos experimentos, os autores concluíram que, utilizando a combinação de parâmetros de processo recomendada e 25% de plástico reciclado na composição do material injetado, a resistência permanece praticamente a mesma.

Chen, Huang e Huang (2013) determinaram os parâmetros do processo de injeção que mais influenciam na deformação de um componente plástico de uma câmara digital. Os autores aplicaram a matriz ortogonal L27 considerando nove parâmetros de processo, sendo o tempo de injeção, pressão da injeção, tempo de recalque, pressão de recalque, tempo de resfriamento, temperatura de resfriamento, tempo de abertura do molde, temperatura de fusão e temperatura do molde. Através da análise de variância, análise de regressão múltipla e análise envoltória de dados, foram encontrados os fatores mais significativos do processo, que são o tempo de injeção, pressão de injeção, tempo de recalque e pressão de recalque.

Kiatcharoenpol e Vichiraprasert (2018) estudaram os parâmetros do processo de injeção plástica através do método de Taguchi utilizando a matriz ortogonal L16. Através dos experimentos, foi possível desenvolver uma modelagem matemática, a fim de otimizar e encontrar a condição adequada de processo para obter o deslocamento mínimo de contração possível da peça injetada. O experimento foi feito com sete fatores e dois níveis, e a significância dos fatores foi analisada através da Análise de Variância (ANOVA). Como

resultado, obtiveram como fatores estatisticamente significativos a temperatura de fusão, tempo de recalque e tempo de resfriamento.

Ginghtong, Nakpathomkun e Pechyen (2018) utilizaram o método de Taguchi para otimizar os parâmetros de processo de moldagem por injeção de plástico. Através de experimentos utilizando a matriz ortogonal L9 e análise de regressão linear, estudaram o efeito de três fatores principais na resistência à compressão de recipientes injetados em plástico polipropileno: a velocidade de injeção, pressão de injeção e temperatura de fusão. Além disso, através da análise de regressão linear os autores conseguiram identificar que a velocidade de injeção é o fator mais significativo para alcançar o resultado desejado, tendo uma contribuição de 71,07%.

Buzzi e Da Silva (2021) utilizaram o método de Taguchi para avaliar a combinação de parâmetros de injeção que reduzem a variabilidade do processo. Eles encontraram uma combinação que reduziu em 88% a variabilidade do processo de injeção de hélices, com base em resultados experimentais e a relação S/N. Tal combinação foi a que a temperatura de fusão era de 280 ° C, tempo de injeção 4 s, tempo de resfriamento 19 s e pressão de recalque 93 bar.

Sathish, *et al.* (2022) utilizaram o método de Taguchi para analisar a combinação de parâmetros que maximizam a resistência ao impacto, tração e flexão, variando-se parâmetros do processo de injeção como temperatura de fusão, pressão de injeção e tempo de injeção. Concluíram que os valores dos parâmetros de injeção ideal são temperatura de fusão de 250 °C, pressão de injeção de 1.400 bar e tempo de injeção de 1,6 s.

A Tabela 4 mostra uma relação de trabalhos científicos identificados durante a revisão bibliográfica, desenvolvidos com base no método Projeto Robusto e no método de Taguchi, dos quais são indicados o ano de publicação, país de origem e área de aplicação. Apesar da diversidade de aplicações do método, a revisão bibliográfica mostra uma carência de estudos que levam em conta os fatores de ruído nos experimentos. Adicionalmente, observa-se uma carência de estudos nos quais o método Projeto Robusto seja utilizado para investigar a vibração em ventiladores domésticos, sendo estas aplicações o foco do presente trabalho.

Tabela 4 - Histórico de estudos e aplicações do projeto robusto ou método de Taguchi.

Autores	Ano	Origem	Aplicação
Taguchi e Tsai	1995	Japão	Tecnologia de circuitos eletrônicos
Yang e Tarn	1997	China	Processo de usinagem
Reddy, Nishina e Babu	1998	Índia	Processo de galvanização
Chang e Faison	2001	Espanha	Processo de injeção plástica
Jhang e Chan	2001	China	Indústria automobilística
Jeyapaul, Shahabudeen e Krishnaiah	2004	Inglaterra	Revisão literária
Wu e Liang	2005	China	Processo de injeção plástica
Li, Guo e Li	2006	China	Processo de injeção plástica
Song <i>et al.</i>	2007	China	Processo de injeção plástica
Tang <i>et al.</i>	2007	Malásia	Processo de injeção plástica
Lo, Tsai e Hsieh	2008	Inglaterra	Processo de injeção plástica
Kamaruddin, Khan e Foong	2010	Malásia	Processo de injeção plástica
Mehat e Kamaruddin	2011	Malásia	Processo de injeção plástica
Lee <i>et al.</i>	2011	Coreia do Sul	Processo de injeção plástica
Mehat e Kamaruddin	2012	Malásia	Revisão literária
Canakci <i>et al.</i>	2013	Turquia	Processo de usinagem
Calignano <i>et al.</i>	2013	Inglaterra	Processo de usinagem
Chen, Huang e Huang	2013	Taiwan	Processo de injeção de plásticos
Fei, Mehat e Kamaruddin	2013	Malásia	Revisão literária
Zirehpour <i>et al.</i>	2014	Irã	Indústria química
Kuo e Chen	2015	Alemanha	Processo de estampagem
Ghalme, Mankar e Bhalerao	2016	Índia	Processo de usinagem de plástico
Soylak, Gökçe e Topal	2018	Turquia	Aeronáutica / Asa de aviões
Eriksen, <i>et al.</i>	2018	Dinamarca	Processo de injeção plástica
Toma	2018	Japão	Fabricação motor
Ginghtong, Nakpathomkumb e Pechyena	2018	Tailândia	Processo de injeção plástica
Raweni <i>et al.</i>	2018	Sérvia	Soldagem de alumínio
Wojciechowski <i>et al.</i>	2018	Polônia	Usinagem de aço
Hajji <i>et al.</i>	2019	Tunísia	Processo de usinagem
Canel, Zeren e Sınmazçelik	2019	Turquia	Tratamento a laser de superfície
Hoseinpour-Lonbar, Alavi e Palassi	2020	Irã	Construção civil
Wang, Wang e Wang	2020	China	Metalurgia
Suthar, Teli e Murumkar	2021	Índia	Processo de usinagem
Abdy <i>et al.</i>	2022	Reino Unido	Construção civil
Quitiaquez <i>et al.</i>	2022	Equador	Processo de usinagem
Sathish, <i>et al.</i>	2022	Índia	Processo de injeção plástica

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, abordou-se uma revisão da literatura sobre os fundamentos de vibração, desbalanceamento rotativo, método Projeto Robusto, relação S/N, planejamento e análise de experimentos e moldagem por injeção plástica.

Foi possível entender que o desbalanceamento rotativo é uma das principais causas, porém não a única, que gera vibração. Além disso, procurou-se entender os modelos matemáticos governantes de vibração, para então descobrir quais são os principais parâmetros que podem influenciar na vibração. Através das equações matemáticas governantes de vibração observou-se que um sistema com massa desbalanceada m_0 e a sua distância até o centro de rotação são diretamente proporcionais ao valor do deslocamento periódico que é a vibração.

Foram apresentadas também algumas definições e os principais conceitos relacionados ao projeto robusto, abordando também uma revisão dos principais trabalhos experimentais obtidos na literatura. Também foi realizada uma revisão dos fundamentos relacionados ao processo de moldagem por injeção plástica, procurando entender as fases do processo e quais são os principais fatores da máquina injetora que influenciam em cada etapa e que, conseqüentemente, podem influenciar no desbalanceamento.

Ao final, foram apresentados os principais estudos relacionados à aplicação do método projeto robusto em diferentes tipos de processos, incluindo a moldagem por injeção plástica. Destaca-se que não foram identificados estudos que mostram a utilização do método projeto robusto no estudo de hélices plásticas de ventiladores, o que reforça o caráter inédito do presente trabalho.

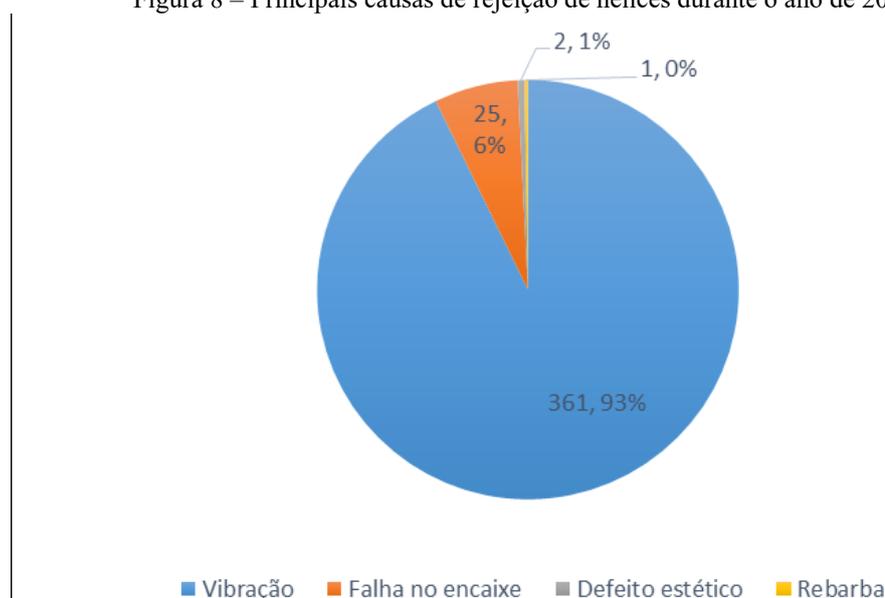
Os capítulos seguintes descrevem o plano experimental, detalhando cada etapa do experimento, bem como a análise utilizada para definir a melhor combinação de parâmetros do processo de moldagem por injeção para reduzir a variabilidade do desbalanceamento de hélices plásticas e, conseqüentemente, a vibração em ventiladores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados detalhes referentes à atividade experimental, bem como elementos do método projeto robusto que foram utilizados durante o planejamento dos experimentos e análise dos resultados. Adicionalmente, será apresentada a análise empregada para identificar se a causa da rejeição das hélices estava associada ao projeto do produto ou ao processo de fabricação.

A atividade experimental foi realizada em uma empresa de eletrodomésticos situada em Joinville/SC. Um levantamento de dados realizado no processo da empresa em questão mostrou que, durante o ano de 2019, 361 lotes de hélices foram descartados por apresentar vibração acima do limite aceitável. Tal valor representou 93 % do total de lotes de hélices rejeitadas, conforme apresentado na Figura 8. Este valor é equivalente a aproximadamente 47.000 hélices plásticas, representando aproximadamente 4,6 % da produção total de hélices. Por esse motivo, dentre as diferentes possíveis causas de descarte de hélices, a vibração foi considerada a principal variável resposta a ser investigada.

Figura 8 – Principais causas de rejeição de hélices durante o ano de 2019.

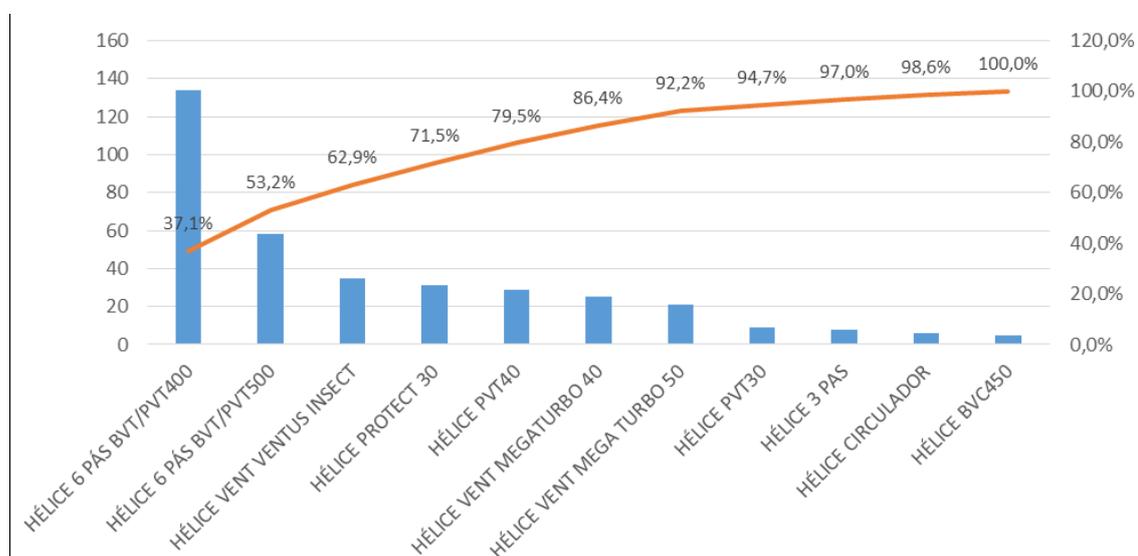


Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

O estudo foi realizado no modelo de ventilador BVT/PVT400 Turbo, pois este representa aproximadamente 40 % do índice de rejeição por vibração entre os demais modelos de ventiladores domésticos produzidos, conforme apresentado na Figura 9. Este modelo é equipado com uma hélice plástica de 400 mm de diâmetro com 6 pás, como mostra a Figura 10. O material utilizado na fabricação das hélices deste modelo é o polipropileno, com densidade de $0,9 \text{ g/cm}^3$ e temperatura de fusão de $152,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 9 – Rejeição de hélices por modelo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Figura 10 - Hélice modelo BVT/PVT400.



Fonte: BRITÂNIA, 2021.

As hélices plásticas analisadas são produzidas pelo processo de moldagem por injeção. A máquina injetora utilizada é da marca HAITIAN, modelo MA4700, conforme representado na Figura 11. Tal equipamento tem uma força de aperto de 3.200 kN, potência de 60 kW, taxa de injeção de 350 g/s e pressão de injeção de 180 MPa. Os parâmetros de injeção da máquina, como por exemplo, o tempo de ciclo (s), pressão de injeção (bar) e temperatura (°C) são ajustados manualmente pelo operador no painel da máquina, que está apresentado na Figura 12.

Figura 11 - Máquina injetora para injeção de hélices plásticas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 12 - Painel da máquina injetora.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O molde que injeta a hélice analisada possui duas cavidades, conforme apresentado na Figura 13. Porém, neste estudo não foram feitas medições separadas das diferentes cavidades do molde, pois em estudos preliminares foi verificado que não há diferença significativa entre as cavidades. O molde possui dimensões externas de 650 mm x 700 mm x 1.230 mm, considerando as partes fixa e móvel, e pesa aproximadamente 250 kg. A Figura 13 (a) apresenta a parte móvel do molde e a Figura 13 (b) mostra a parte fixa.

Figura 13 - Molde da hélice.



(a)

(b)

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Para medir a vibração do ventilador, foi utilizado o medidor de vibração modelo MVA-400 da marca Minipa. O equipamento traz como resultado a vibração medida na superfície de contato entre a ponteira do medidor e o ventilador. Tal equipamento permite realizar a medição da vibração na forma de deslocamento (mm), velocidade (mm/s) ou aceleração (mm/s²). No presente estudo optou-se por medir a vibração por meio do deslocamento (mm), por ser este o padrão adotado pelo setor de qualidade da empresa na qual o estudo foi realizado. O equipamento empregado apresenta uma incerteza máxima de medição de $\pm 5,0\%$ em relação ao valor de fundo de escala (maior valor que o instrumento de medição pode medir).

O processo de medição da vibração das amostras é realizado empregando-se um ventilador padrão, no qual substitui-se apenas a hélice plástica no momento da medição. Após fixada a hélice plástica no ventilador padrão, o mesmo é ligado na velocidade máxima e, após 5 segundos, o medidor de vibração é posicionado no local indicado, conforme apresentado na Figura 14. Destaca-se que sem a instalação da hélice plástica, o ventilador padrão apresenta vibração de 0,002 mm (deslocamento).

Figura 14 – Ventilador com medidor de vibração.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Além da vibração, foram realizadas medições de desbalanceamento. Para medir o desbalanceamento das hélices plásticas foi utilizado um sistema de medição fabricado pela empresa Teknikao, modelo NK720, conforme ilustrado na Figura 15. O equipamento possui uma incerteza máxima de medição informada pelo fornecedor de $\pm 5,0\%$ em relação ao valor de fundo de escala. Tanto no equipamento para medição de desbalanceamento quanto no medidor de vibração, são realizadas calibrações periódicas a cada ano pela empresa.

Para realizar a medição do desbalanceamento, deve-se inicialmente encaixar a amostra da hélice no eixo do motor acoplado no equipamento, conforme indicado pela seta na Figura 15. O resultado da medição do desbalanceamento é expresso em miligramas (mg),

representando a massa que falta em uma das pás da hélice para ela se tornar balanceada e, consequentemente, não gerar vibração.

Figura 15 - Equipamento para medição de desbalanceamento modelo NK720.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Após realizada a medição do desbalanceamento, é feita a verificação do resultado obtido acrescentando manualmente na pá desbalanceada a quantidade de massa (mg) indicada pelo equipamento. Esta etapa do processo é ilustrada na Figura 16. Depois de acrescentada a massa é feita uma nova medição, para confirmar que a massa adicionada atinge o critério mínimo de balanceamento.

Figura 16 - Hélice com massa para balanceamento.



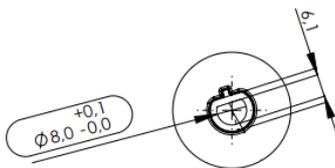
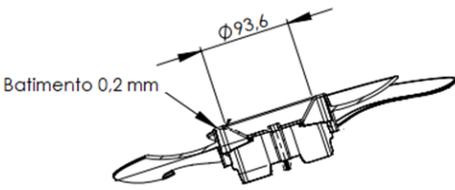
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA DE VIBRAÇÃO

Para entender se o descarte das hélices por vibração excessiva está relacionado com o projeto do produto ou com o processo de fabricação, inicialmente foi realizada uma investigação das características gerais das hélices que apresentavam vibração acima do valor permitido. Destas hélices foram realizadas medições das cotas especificadas no projeto que podem influenciar na vibração de ventiladores. Foi realizada uma coleta de dados de 30 hélices vibração acima da tolerância permitida, que é de 0,300 mm de deslocamento.

Após separar as hélices com vibração, foram realizadas medições das cotas especificadas pela engenharia em cada amostra. As cotas medidas foram o peso (g), o desbalanceamento de massa (mg), o diâmetro maior do eixo (mm), o diâmetro menor do eixo (mm), o batimento do cubo (mm), o diâmetro do cubo (mm), a altura total da hélice (mm) e diferença de altura entre pás (mm). Em cada cota de cada amostra, foi obtido o valor médio de 4 medições. O valor nominal das cotas especificadas pela engenharia, bem como as tolerâncias aceitáveis estão descritas com detalhes na Tabela 5. Estes valores foram utilizados como referência para avaliar os itens analisados no trabalho.

Tabela 5 - Especificações técnicas do modelo de hélice plástica analisada.

Descrição técnica	Representação	Especificações de engenharia	
		Mínimo	Máximo
Vibração	Não se aplica	0,00 mm	0,30 mm
Peso	Não se aplica	252,00 g	256,00 g
Desbalanceamento de massa	Não se aplica	0,00 mg	120,00 mg
Diâmetro maior do eixo		8,00 mm	8,10 mm
Diâmetro menor do eixo		6,10 mm	6,20 mm
Batimento cubo		0,00 mm	0,20 mm
Diâmetro cubo		93,50 mm	93,70 mm
Altura total hélice		64,70 mm	64,90 mm
Diferença de altura entre pás		0,00 mm	2,00 mm

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Além da comparação com os valores de referência sumarizados na Tabela 5, foram realizados experimentos preliminares descritos nos Apêndices I e II. O Apêndice I apresenta o experimento de desbalanceamento intencional de hélices, que teve como objetivo analisar o efeito que o desbalanceamento de hélices tem sob a vibração do ventilador. Por sua vez, o Apêndice II apresenta o experimento e análise preliminar do processo de injeção das hélices plásticas, mostrando que diferentes combinações do processo de injeção podem gerar diferentes valores de desbalanceamento.

3.3 UTILIZAÇÃO DO PROJETO ROBUSTO

O método projeto robusto foi utilizado para elaborar o plano experimental, bem como realizar a análise dos resultados. Para ajudar a entender as principais variáveis de entrada e de resposta envolvidas no processo de produção de hélices plásticas, foi utilizado o diagrama P

apresentado na Figura 17. Como pode ser observado, tal diagrama mostra os principais fatores de controle (x) e de ruído (z) no processo de moldagem por injeção plástica das hélices, bem como as principais variáveis de resposta (y). Destaca-se que as informações apresentadas na Figura 17 foram obtidas seguindo a metodologia do projeto robusto e com ajuda da equipe técnica especialista em injeção plástica da empresa em que se realizou o estudo.

Figura 17 - Diagrama P do processo de injeção de hélices plásticas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Após a análise detalhada do diagrama P (Figura 17), foram selecionados os fatores de controle tempo de injeção (s), tempo de recalque (s), tempo de resfriamento (s), pressão de recalque (bar), temperatura do canhão (°C) e temperatura do cilindro (°C) para realizar o plano experimental. Já com relação aos fatores de ruído, foram considerados a máquina injetora, turno e operador, sendo que turno e operador foram utilizados de forma combinada. A seleção dos

fatores bem como de seus respectivos níveis, foi feita junto com a equipe técnica especialista em injeção plástica da empresa em que se realizou o estudo. Os níveis de cada parâmetro escolhido, bem como a resolução de medição da máquina, que é a menor diferença entre as indicações mostradas, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de injeção de hélices plásticas.

Variável	Fator	Nível -	Nível +	Resolução
de controle (x)	Tempo de injeção (s)	3,0	7,0	± 0,1
	Tempo de recalque (s)	2,0	3,0	± 0,1
	Tempo de resfriamento (s)	18,0	21,0	± 0,1
	Pressão de recalque (bar)	93,0	97,0	± 0,1
	Temperatura do canhão (bico) (°C)	250,0	280,0	± 0,1
	Temperatura do cilindro (°C)	245,0	270,0	± 0,1
de ruído (z)	Injetora	1	2	-
	Turno	A	B	-
	Operador	A	B	-

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Após a definição dos níveis dos fatores de controle e de ruído, o planejamento experimental foi elaborado utilizando uma matriz ortogonal L12 com 6 fatores de controles e 3 fatores de ruído, sendo dois deles combinados, e todos eles com 2 níveis cada. A matriz L12 foi escolhida de forma a manter um balanço entre o custo experimental e a quantidade de informação gerada nas diferentes condições operacionais investigadas. Dessa forma, foram geradas 12 combinações de fatores de controle pelo plano experimental de Taguchi, sendo realizada com cada uma das combinações de fatores de ruído. O *software* utilizado para gerar as combinações foi o *Minitab 17*.

Durante os experimentos, a variável resposta balanceamento (mg) foi obtida em cada condição experimental considerando a medição de 20 amostras de hélices plásticas. Desta medição foi calculada a média e o desvio padrão. Também se utilizou a medida de desempenho relação S/N considerando o caso menor é melhor, representada pela equação 2.15, uma vez que um dos objetivos é minimizar a média e a variância da massa desbalanceada da hélice simultaneamente.

3.4 MÉTODO ANOVA E ANÁLISE DE REGRESSÃO

Para determinar quais parâmetros possuem efeito significativo sobre a resposta, foi empregado o método análise de variância (ANOVA). O método ANOVA foi utilizado para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses investigadas com os experimentos industriais. O objetivo da técnica é analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que possuem efeito estatisticamente significativo para a resposta do sistema (MONTGOMERY, 2001).

Os resultados obtidos com o método ANOVA serão apresentados em forma de tabela, conforme mostra a Tabela 7 para uma situação simplificada com apenas dois fatores em dois níveis. As colunas da tabela mostram para cada uma das fontes de variação - A, B, AB e erro - as respectivas somas dos quadrados (SQ), os graus de liberdade (gl), os quadrados médios (QM) e a estatística do teste F - razão f (MONTGOMERY, 2001).

Na Tabela 7, a é o efeito do fator A, b é o efeito do fator B, ab é o efeito dos fatores A e B em seus níveis máximos, e -1 é o efeito dos fatores A e B em seus níveis mínimos, n é o número de observações tomadas em cada tratamento, e N é a quantidade total de observações.

Ao final, compara-se a razão f com a estatística f_0 para identificar quais são as fontes de variação que apresentam efeito significativo sobre a variável resposta.

Tabela 7 - ANOVA de um experimento fatorial com dois fatores.

Fonte de variação	SQ	gl	QM	Razão f
A	$SQ_A = \frac{1}{4n} [+a + ab - b - (1)]^2$	$a - 1$	$QM_A = \frac{SQ_A}{gl_A}$	$f = \frac{QM_A}{QM_{ERRO}}$
B	$SQ_B = \frac{1}{4n} [+b + ab - (1) - a]^2$	$b - 1$	$QM_B = \frac{SQ_B}{gl_B}$	$f = \frac{QM_B}{QM_{ERRO}}$
AB	$SQ_{AB} = \frac{1}{4n} [+b + ab - (1) - a]^2$	$(a - 1)(b - 1)$	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{gl_{AB}}$	$f = \frac{QM_{AB}}{QM_{ERRO}}$
Erro	$SQ_{erro} = SQ_{total} - SQ_A - SQ_B - SQ_{AB}$	$ab(n - 1)$	$QM_{erro} = \frac{SQ_{erro}}{gl_{erro}}$	
Total	$\sum y_{ij}^2 - \frac{y_{.k}^2}{2^k \cdot n}$	$N - 1$		

Fonte: Montgomery, 2001.

A análise de regressão é usada para investigar o relacionamento entre uma variável de resposta e um ou mais fatores de controle. Uma grandeza largamente utilizada para julgar a adequação de um modelo de regressão é a razão da soma dos quadrados, que é expressa por

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (3.1)$$

sendo SQ_E a soma dos quadrados de erro e SQ_T a soma dos quadrados total.

A razão R^2 é frequentemente utilizada como a quantidade de variabilidade nos dados, onde $0 \leq R^2 \leq 1$, e quanto mais próximo de 1 for o resultado, maior será a representatividade dos dados experimentais pelo modelo obtido pela análise de regressão dos dados.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no trabalho, que estão organizados em três partes. Na primeira delas são apresentadas as análises de um conjunto de hélices rejeitadas no processo de fabricação por apresentarem vibração acima do limite aceitável. O resultado destas análises permitiu identificar que a causa do alto índice de rejeição por vibração era o processo de fabricação e não o projeto das hélices. Na segunda parte do capítulo, são apresentados os resultados do plano experimental e as análises utilizadas para identificar os parâmetros do processo de injeção que possam aumentar a robustez do processo de fabricação e reduzir os índices de rejeição. Na terceira e última parte do capítulo os parâmetros do processo de injeção identificados são validados no próprio processo produtivo das hélices.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DA CAUSA DE REJEIÇÃO POR VIBRAÇÃO

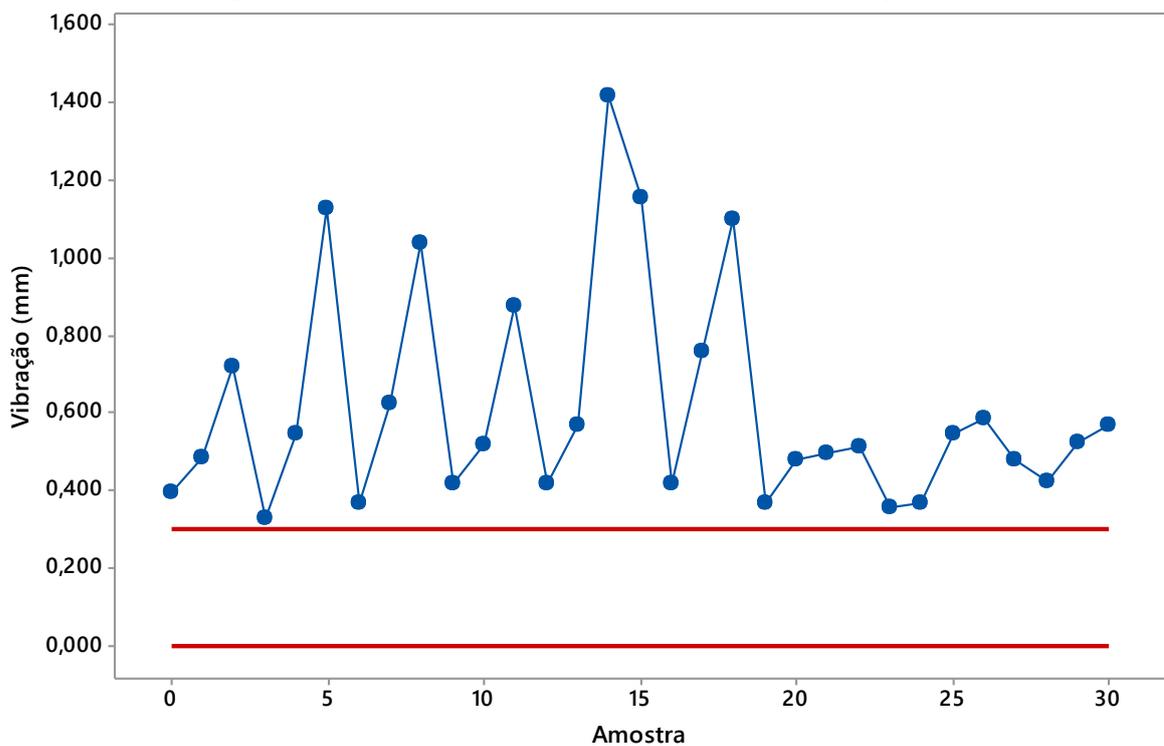
4.1.1 Análise preliminar de hélices

Buscando investigar se há alguma característica ou especificação técnica fora das tolerâncias permitidas no modelo de hélice em questão, foi realizada uma análise comparativa empregando 30 hélices rejeitadas por apresentarem vibração acima do limite de 0,300 mm. As especificações técnicas dos limites máximos e mínimos estão resumidas na Tabela 5 do capítulo 3. A Figura 18 mostra os resultados das medições de vibração (mm) das 30 hélices rejeitadas, onde o eixo x do gráfico representa cada amostra coletada, e o eixo y representa o valor referente à vibração. Observa-se que as medições de vibração das hélices variaram entre 0,326 mm até 1,415 mm de deslocamento. Sabendo que o limite máximo aceitável é de 0,300 mm confirmou-se que todas as hélices coletadas para esta análise apresentavam valores de vibração acima da tolerância máxima permitida.

Na sequência, os próximos gráficos apresentados demonstram os resultados das medições das especificações técnicas realizadas nas amostras que apresentaram vibração,

conforme especificações técnicas apresentadas pela Tabela 5. As linhas horizontais de cor vermelha em cada gráfico representam os limites mínimos e máximos de cada especificação técnica medida, de acordo com a Tabela 5, e a linha na cor azul representa os valores resultantes das medições.

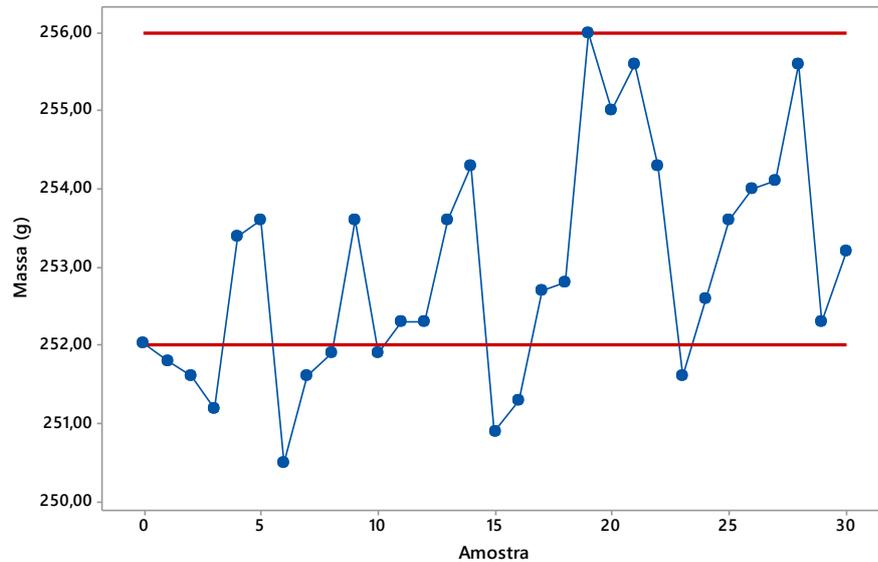
Figura 18 – Resultados das medições de vibração das hélices rejeitadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 19 mostra os resultados das medições da massa (g) nas amostras de hélices que apresentaram vibração acima do limite. Considerando o limite mínimo de 252,00 g e máximo de 256,00 g, verifica-se que 10 amostras de hélices apresentaram medições de massa abaixo do limite mínimo, representando aproximadamente 34 % do total, sendo que a medição mais baixa realizada foi de 250,50 g.

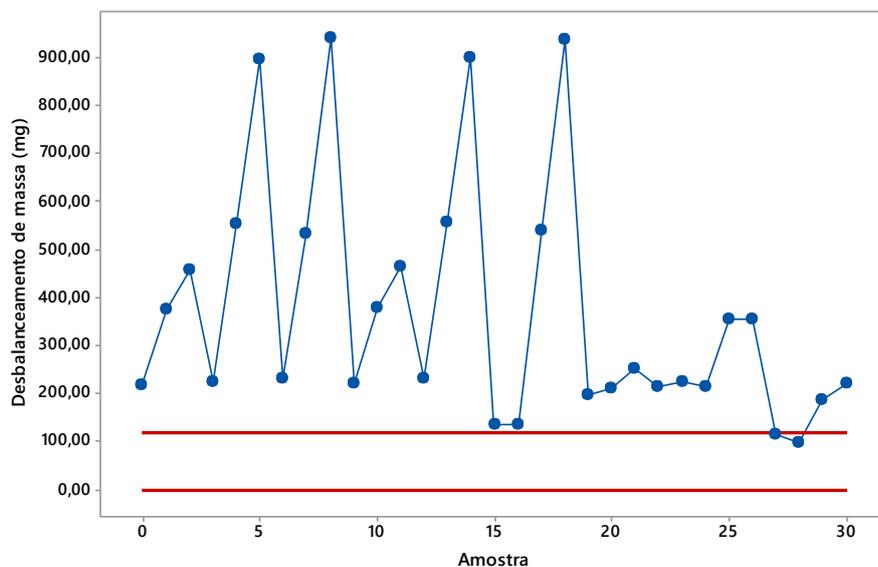
Figura 19 - Resultados das medições de massa das hélices rejeitadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 20 mostra os resultados das medições de desbalanceamento de massa (mg) nas amostras de hélices que apresentaram vibração acima do limite. Considerando os limites entre 0,00 mg e 120,00 mg, verifica-se que aproximadamente 94 % das hélices apresentaram seus valores acima da especificação máxima, sendo que o maior valor de desbalanceamento das amostras coletadas foi de 940,00 mg, e o menor foi de 98,00 mg. Apenas 2 amostras apresentaram seus valores dentro da especificação, porém próximo do máximo aceitável, sendo estes equivalentes a 98,00 mg e 114,00 mg.

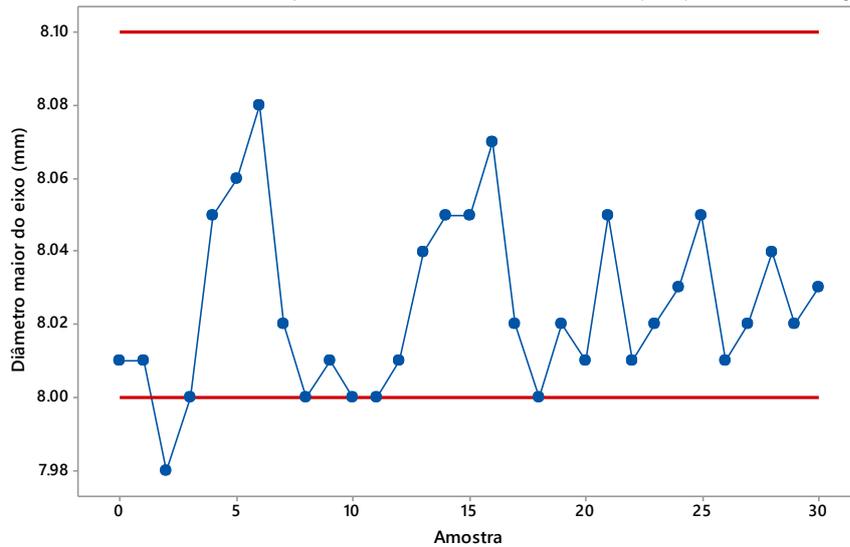
Figura 20 - Resultados das medições de desbalanceamento de massa das hélices rejeitadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 21 mostra os resultados das medições do diâmetro maior do eixo (mm) nas amostras de hélices que apresentaram vibração. Considerando os limites entre 8,00 mm e 8,10 mm, verifica-se que 96,7 % das hélices estão com as especificações dentro do limite aceitável, sendo que somente uma amostra obteve seu valor abaixo da tolerância mínima, medindo 7,98 mm, e outras cinco amostras que obtiveram seu valor no limite mínimo aceitável.

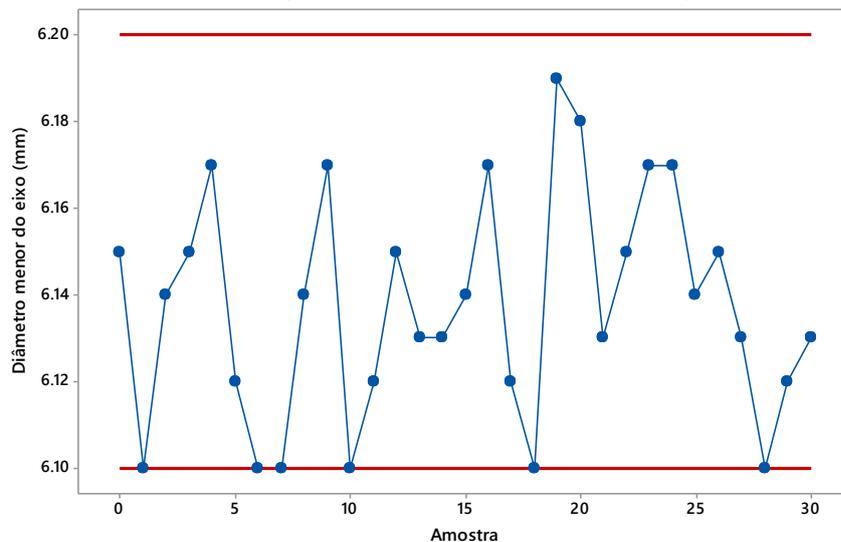
Figura 21 – Resultado das medições do diâmetro maior do eixo (mm) das hélices rejeitadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 22 mostra os resultados das medições do diâmetro menor do eixo (mm) nas amostras de hélices que apresentaram vibração. Com os limites que vão de 6,10 mm a 6,20 mm, todas as hélices coletadas apresentaram seus valores dentro das especificações, sendo que 6 amostras (20%) apresentaram seu valor no limite mínimo aceitável.

Figura 22 – Resultado das medições do diâmetro menor do eixo (mm) das hélices rejeitadas.

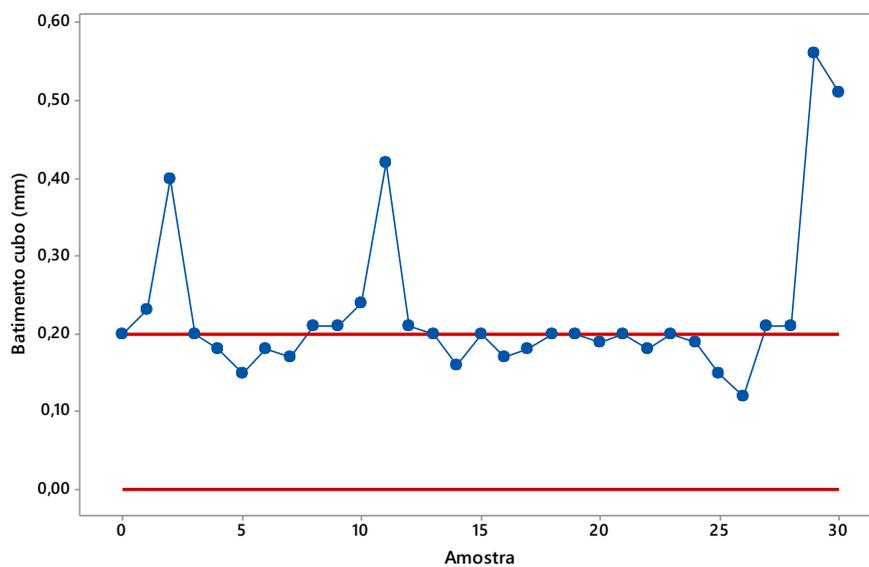


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 23 mostra os resultados das medições do batimento do cubo (mm) das amostras de hélices que apresentaram vibração. Com os limites que vão de 0,00 mm a 0,20 mm, verifica-se que 11 amostras apresentaram seu valor acima da tolerância máxima aceitável, representando aproximadamente 37 % do total das amostras.

O maior valor de batimento do cubo foi de 0,56 mm, e observa-se que, mesmo as amostras cujo resultados ficaram dentro das especificações, seus valores ficaram próximos do máximo aceitável.

Figura 23 – Resultado das medições do batimento do cubo (mm) das hélices rejeitadas.

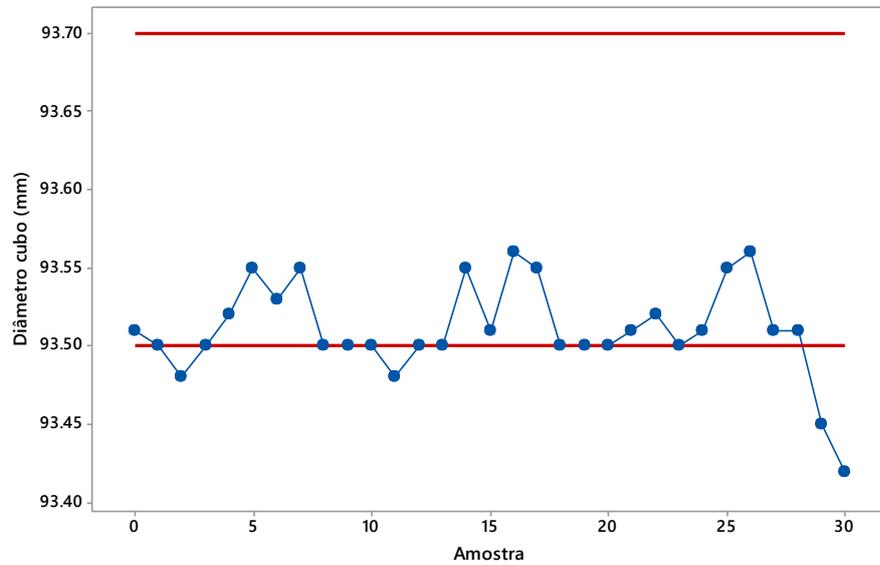


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 24 mostra os resultados das medições do diâmetro do cubo (mm) das amostras de hélices que apresentaram vibração. Com os limites que vão de 93,50 mm a 93,70 mm, verifica-se que 4 amostras apresentaram seu valor abaixo da tolerância mínima aceitável, representando aproximadamente 14 % do total das amostras.

O menor valor do diâmetro do cubo coletado foi de 93,42 mm. Além disso, verifica-se que 11 amostras obtiveram seus valores no limite mínimo aceitável.

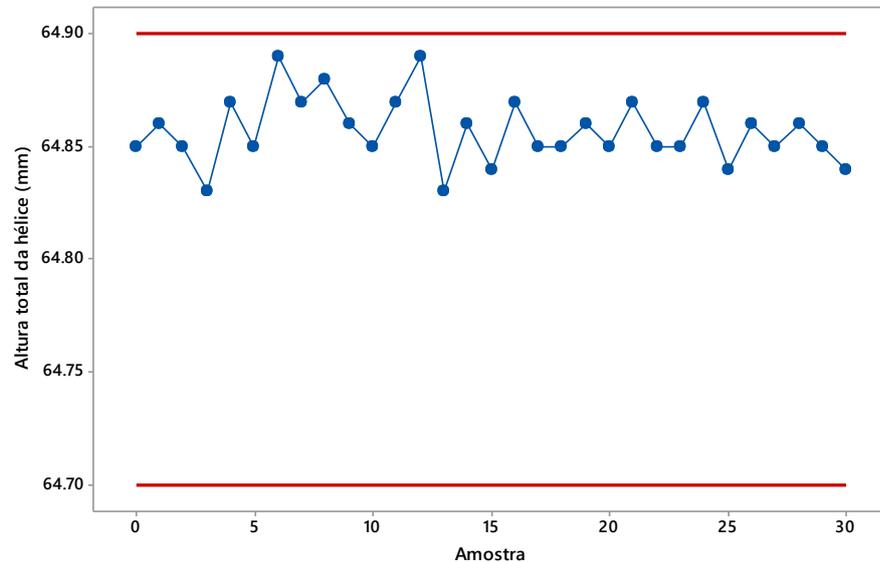
Figura 24 – Resultados das medições do diâmetro do cubo (mm) das hélices rejeitadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 25 mostra os resultados das medições da altura total da hélice (mm) das amostras de hélices que apresentaram vibração. Com os limites que vão de 64,70 mm a 64,90 mm, verifica-se que todas as amostras apresentaram seu valor dentro das especificações, mesmo que mais próximas do limite máximo aceitável.

Figura 25 – Resultados das medições de altura total da hélice (mm) das hélices rejeitadas.

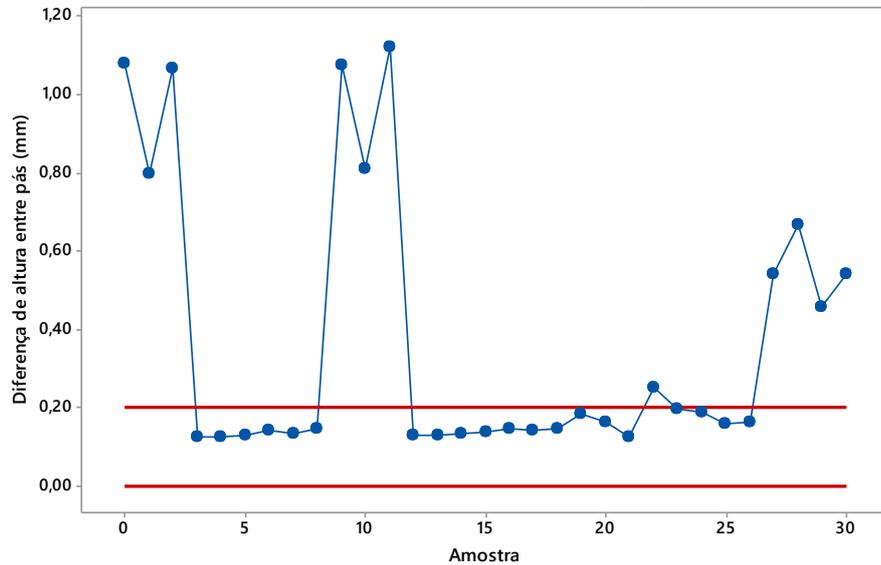


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 26 mostra os resultados das medições da diferença de altura entre pás (mm) das amostras de hélices que apresentaram vibração. Com os limites que vão de 0,00 mm a 2,00 mm, verifica-se que 11 amostras apresentaram seu valor acima do limite máximo aceitável,

representando aproximadamente 37 % do total das amostras. O maior valor de diferença de altura entre pás foi de 11,20 mm, e observa-se que, mesmo as amostras cujo os resultados ficaram dentro das especificações, seus valores ficaram próximos do máximo aceitável.

Figura 26 – Resultados das medições da diferença de altura entre pás (mm) das hélices rejeitadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

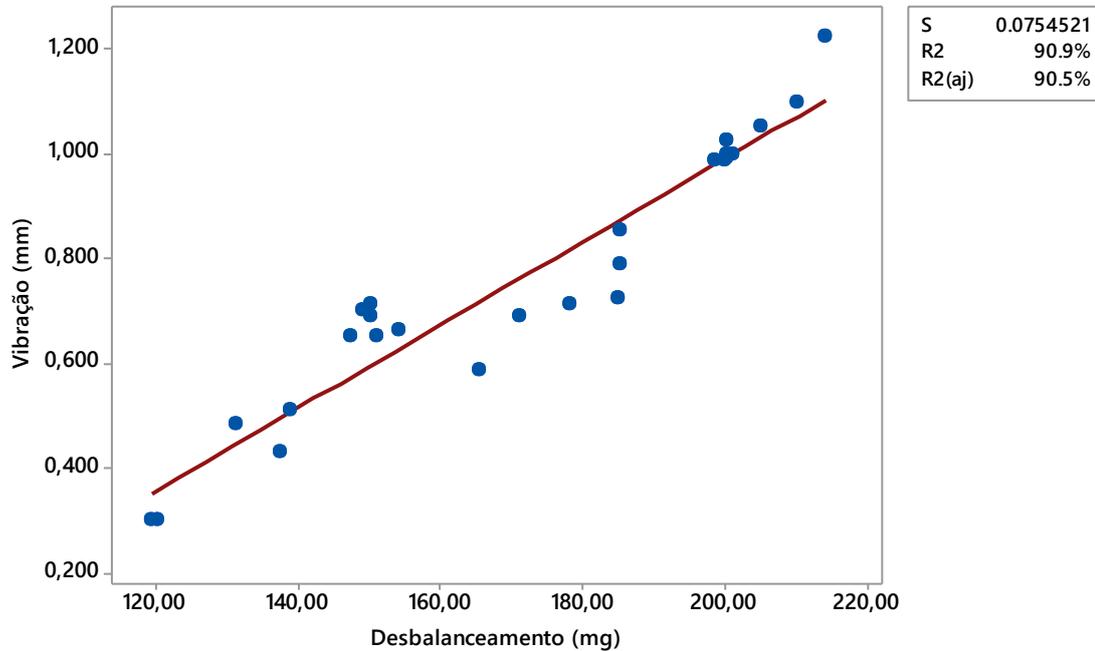
De modo geral, os resultados obtidos mostram que as variáveis diâmetro menor do eixo (Figura 22) e altura total da hélice (Figura 25) apresentaram todas as medições dentro dos limites de especificação, mesmo tendo sido rejeitadas por motivo de vibração. Já as variáveis massa (Figura 19), desbalanceamento de massa (Figura 20), batimento do cubo (Figura 23), diâmetro do cubo (Figura 24) e diferença de altura entre pás (Figura 26), apresentaram algumas amostras fora dos limites de especificação, o que inclui estas variáveis no grupo das que podem estar ocasionando a vibração inaceitável.

Adicionalmente, verifica-se que 94% das hélices estavam com a massa desbalanceada. Também se observa que 37 % das hélices apresentaram batimento do cubo fora das especificações, 37 % estavam com diferença de altura entre as pás, 34 % com a massa fora das especificações e, por último, 14% com diâmetro de cubo fora das especificações.

Para confirmar esta observação, a Figura 27 mostra a relação entre vibração (mm) e desbalanceamento (mg) referente às amostras analisadas. Ajustando uma reta aos valores medidos, obtém-se o valor de R^2 de 90,9 %, evidenciando a correlação entre as variáveis. A Figura 27 também mostra que quanto maior o desbalanceamento medido, maior é a vibração. Tal observação experimental está coerente com a fundamentação teórica apresentada no

capítulo 2 e representada matematicamente pelas equações 2.8 e 2.9, que mostram que a vibração (x) tem uma relação proporcional com a massa desbalanceada m_0 do sistema rotativo.

Figura 27 - Gráfico de vibração x desbalanceamento.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Também é compreensivo existirem pontos que se afastem da linha de regressão ajustada na Figura 27, uma vez que, além das incertezas experimentais, as Figuras 19 a 26 mostram que existem outras variáveis, além do desbalanceamento, que estavam fora dos limites de especificação. Dentre estas variáveis, destacam-se o batimento do cubo (Figura 23) e a diferença de altura entre pás (Figura 26). Adicionalmente, a equação 2.8 mostra que o deslocamento (x), associado à vibração do sistema, também depende da distância (e) entre a massa desbalanceada m_0 e centro de massa ao eixo de rotação. Como a distância e não é a mesma nas amostras analisadas, conclui-se que a variável e também pode causar o afastamento dos pontos em relação a linha de regressão apresentados na Figura 27.

Esta análise mostrou que 94% das amostras rejeitadas por vibração apresentaram massa desbalanceada acima do limite especificado de 120,00 mg. Simultaneamente, observou-se que a grande parte destas hélices rejeitadas atendiam os demais critérios especificados no projeto. Portanto, conclui-se que o projeto das hélices não era a causa geradora de vibração, mas que o processo de moldagem por injeção poderia ser aprimorado para que a massa desbalanceada fosse ajustada para dentro dos limites aceitáveis, reduzindo a vibração.

Após esta etapa, empregou-se o método projeto robusto ao processo produtivo das hélices para identificar os parâmetros do processo de injeção capazes de reduzir os índices de rejeição por vibração.

4.2 ANÁLISE DA ROBUSTEZ DO PROCESSO DE INJEÇÃO DAS HÉLICES

Nesta seção do trabalho serão apresentadas as análises do processo de injeção das hélices. No subcapítulo 4.2.1 serão apresentados os resultados do plano experimental de Taguchi bem como as análises gerais dos resultados. No subcapítulo 4.2.2 serão apresentadas as análises dos efeitos dos fatores de controle, no 4.2.3 a análise ANOVA e, por último, no subcapítulo 4.2.4 a análise de regressão.

4.2.1 Plano Experimental de Taguchi

Conforme apresentado na seção 3.3, um plano experimental ortogonal do tipo L12 com 6 fatores de controles e 3 fatores de ruído foi utilizado neste trabalho. A Tabela 8 mostra o plano experimental no qual cada uma das 12 combinações de fatores de controle foi testada com as 4 diferentes combinações dos fatores de ruído, totalizando 48 tratamentos. Tal estratégia é empregada para avaliar a robustez dos parâmetros de máquina em relação aos ruídos presentes no processo.

Todas as combinações de fatores de controle e ruído apresentadas na Tabela 8 foram testadas na injetora utilizada para a produção do modelo de hélice analisado. Em cada um dos 48 tratamentos investigados foram coletadas 20 amostras de hélices, das quais o desbalanceamento de cada amostra foi medido e expresso pelo valor médio. Nas combinações em que as primeiras amostras produzidas já apresentavam desbalanceamento e vibração fora das especificações, coletavam-se apenas 10 amostras para não impactar no índice de refugo da empresa.

A base de dados com os resultados obtidos a partir do plano experimental está apresentada no Apêndice III, bem como o valor médio entre as medições de desbalanceamento, o desvio padrão (s) e a relação S/N do tipo Menor é Melhor. O cálculo do desvio padrão foi feito com base na equação 2.17 e da relação S/N foi feito com base na equação 2.15.

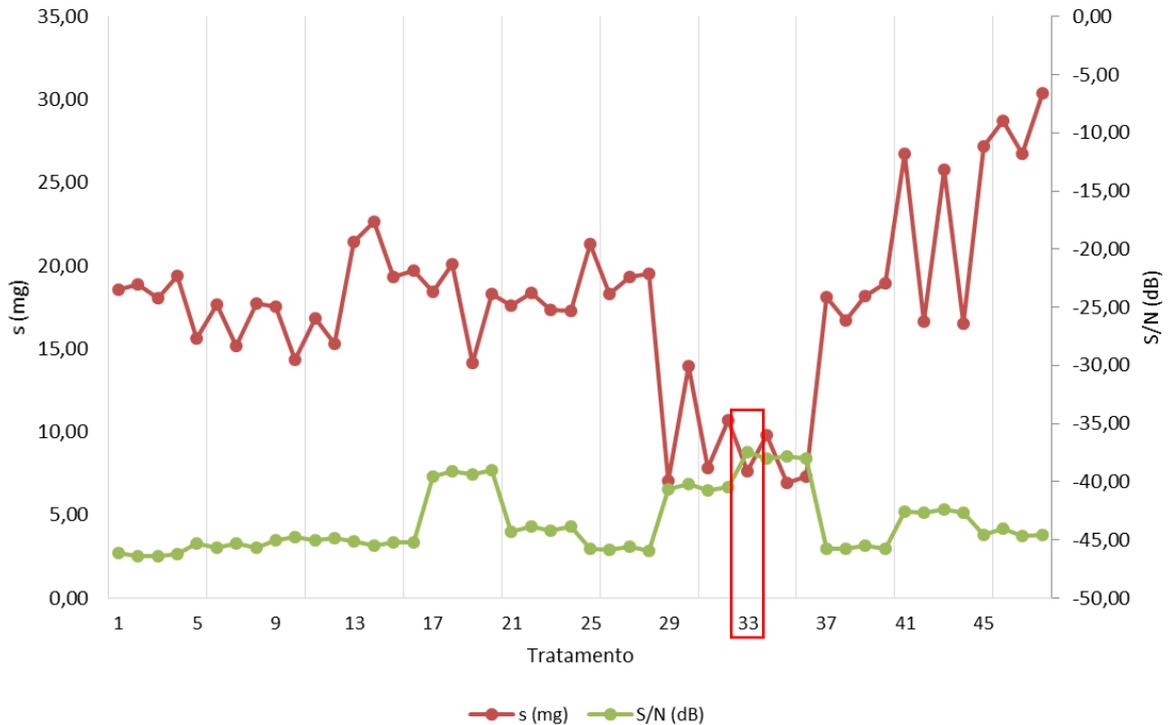
Tabela 8 - Plano experimental de Taguchi.

Run	Fatores de controle						Fatores de ruído		
	Tempo injeção [s]	Tempo de recalque [s]	Tempo resfriamento	Pressão recalque [bar]	Temperatura canhão [°C]	Temperatura cilindro [°C]	Turno	Operador	Máquina
1	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	A	A	1
2	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	A	A	2
3	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	B	B	1
4	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	B	B	2
5	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	A	A	1
6	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	A	A	2
7	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	B	B	1
8	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	B	B	2
9	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	A	A	1
10	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	A	A	2
11	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	B	B	1
12	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	B	B	2
13	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	A	A	1
14	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	A	A	2
15	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	B	B	1
16	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	B	B	2
17	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	1
18	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	2
19	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	1
20	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	2
21	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	A	A	1
22	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	A	A	2
23	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	B	B	1
24	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	B	B	2
25	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	A	A	1
26	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	A	A	2
27	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	B	B	1
28	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	B	B	2
29	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	1
30	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	2
31	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	1
32	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	2
33	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	A	A	1
34	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	A	A	2
35	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	B	B	1
36	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	B	B	2
37	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	A	A	1
38	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	A	A	2
39	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	B	B	1
40	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	B	B	2
41	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	A	A	1
42	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	A	A	2
43	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	B	B	1
44	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	B	B	2
45	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	A	A	1
46	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	A	A	2
47	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	B	B	1
48	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	B	B	2

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 28 mostra os resultados da relação S/N e do desvio padrão (s) de cada ensaio, na qual que o eixo y do gráfico apresenta os valores da relação S/N e do desvio padrão, sendo a linha verde representando a relação S/N e a linha vermelha representando o desvio padrão (s) conforme legenda, e o eixo x representa cada um dos 48 tratamentos.

Figura 28 - Desvio padrão e relação S/N.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Verifica-se, pela Figura 28, que para valores mais altos da relação S/N, os valores de desvio padrão são mais baixos. O que faz sentido, pois quanto maior for a relação S/N, mais robusto estará o processo e, conseqüentemente, menor será a sua variabilidade.

Com base nos resultados do Apêndice III, representados graficamente na Figura 28, observa-se também que a combinação com maior valor da relação S/N corresponde ao tratamento 33, onde o valor da relação S/N resultou em -37,49 dB, a média de desbalanceamento resultou em 74,55 mg e o desvio padrão em 7,61 mg, sendo aparentemente a mais robusta entre as demais.

Para quantificar a robustez de cada uma das 12 combinações de fatores de controle investigadas, avaliou-se a influência das diferentes combinações de fatores de ruídos empregadas (AA1: operador e turno A e máquina 1, AA2: operador e turno A e máquina 2, BB1: operador e turno B e máquina 1 e BB2: operador e turno B e máquina 2). Desta forma, obteve-se a Tabela 9 que mostra nas últimas 3 colunas o resultado médio dos valores de desbalanceamento, o desvio padrão e a relação S/N, entre as diferentes combinações de fatores de ruído.

Por exemplo, a média do desbalanceamento equivalente a 205,56 mg apresentada na linha 1 da Tabela 9 foi obtida calculando-se o valor médio das 4 medições de desbalanceamento referentes às 4 diferentes combinações de ruído equivalentes a 201,95, 208,22, 207,34 e 204,72. Desta forma, os resultados apresentados na Tabela 9 facilitam a identificação da combinação de fatores de controle que, mesmo sobre a ação dos ruídos, é capaz de aumentar a robustez das hélices produzidas.

Tabela 9 - Relação S/N entre combinação de fatores de controle.

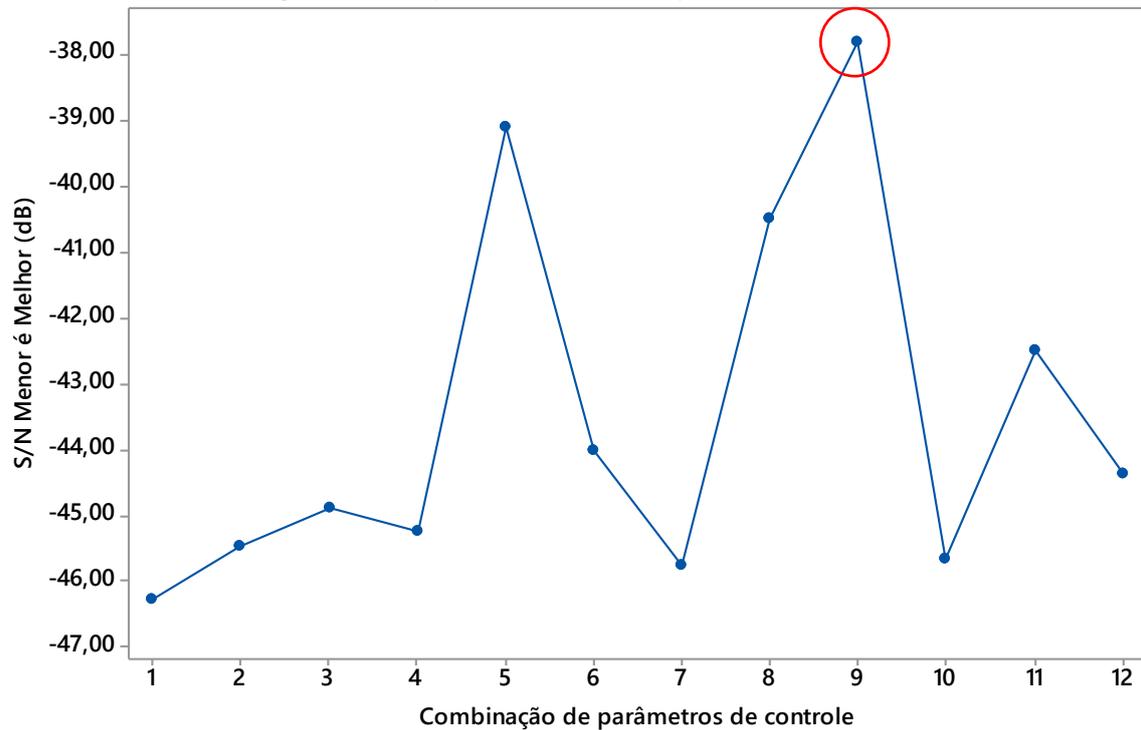
Run	Fatores de controle						Desbalanceamento (mg)				Média do desbalanceamento (mg)	s (mg)	S/N MEM (dB)
	Tempo injeção [s]	Tempo recalque [s]	Tempo resfriamento [s]	Pressão recalque [bar]	Temp. canhão [°C]	Temp. cilindro [°C]	AA1	AA2	BB1	BB2			
1	3,0	2,0	18,0	93,0	250,0	245,0	201,95	208,22	207,34	204,72	205,56	2,83	-46,26
2	3,0	2,0	18,0	93,0	250,0	270,0	182,93	191,20	183,36	191,56	187,26	4,76	-45,45
3	3,0	2,0	21,0	97,0	280,0	245,0	177,80	171,95	178,04	173,61	175,35	3,05	-44,88
4	3,0	3,0	18,0	97,0	280,0	245,0	179,70	186,13	181,54	182,00	182,34	2,71	-45,22
5	3,0	3,0	21,0	93,0	280,0	270,0	92,86	88,23	92,22	87,50	90,20	2,73	-39,11
6	3,0	3,0	21,0	97,0	250,0	270,0	163,35	155,36	161,02	154,63	158,59	4,27	-44,01
7	7,0	2,0	21,0	97,0	250,0	245,0	193,00	195,40	188,49	198,15	193,76	4,09	-45,75
8	7,0	2,0	21,0	93,0	280,0	270,0	107,50	101,81	108,57	105,51	105,85	2,97	-40,50
9	7,0	2,0	18,0	97,0	280,0	270,0	74,55	78,91	77,87	78,88	77,55	2,06	-37,80
10	7,0	3,0	21,0	93,0	250,0	245,0	193,67	192,69	187,25	193,48	191,77	3,04	-45,66
11	7,0	3,0	18,0	97,0	250,0	270,0	131,48	135,46	129,48	135,34	132,94	2,96	-42,48
12	7,0	3,0	18,0	93,0	280,0	245,0	166,87	157,14	169,59	167,52	165,28	5,55	-44,37

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A Figura 29 apresenta os resultados da relação S/N para cada uma das 12 combinações, sendo que o eixo y representa os valores da relação S/N e o eixo x representa cada uma das 12 combinações de fatores de controle. Verifica-se que a combinação que obteve maior valor da relação S/N foi a combinação 9, resultando em -37,80 dB. Esta combinação utiliza o tempo de injeção de 7,0 s, tempo de recalque de 2,0 s, tempo de resfriamento de 18,0 s, pressão de recalque de 97,0 bar, temperatura do canhão de 280,0 °C e temperatura do cilindro de 270,0 °C.

Destaca-se que esta combinação de fatores de controle é a mesma que apresentou a maior robustez na análise da Tabela 9, indicando o seu bom desempenho mesmo quando submetida às diferentes formas de ruído investigadas.

Figura 29 - Relação S/N entre combinação de fatores de controle.

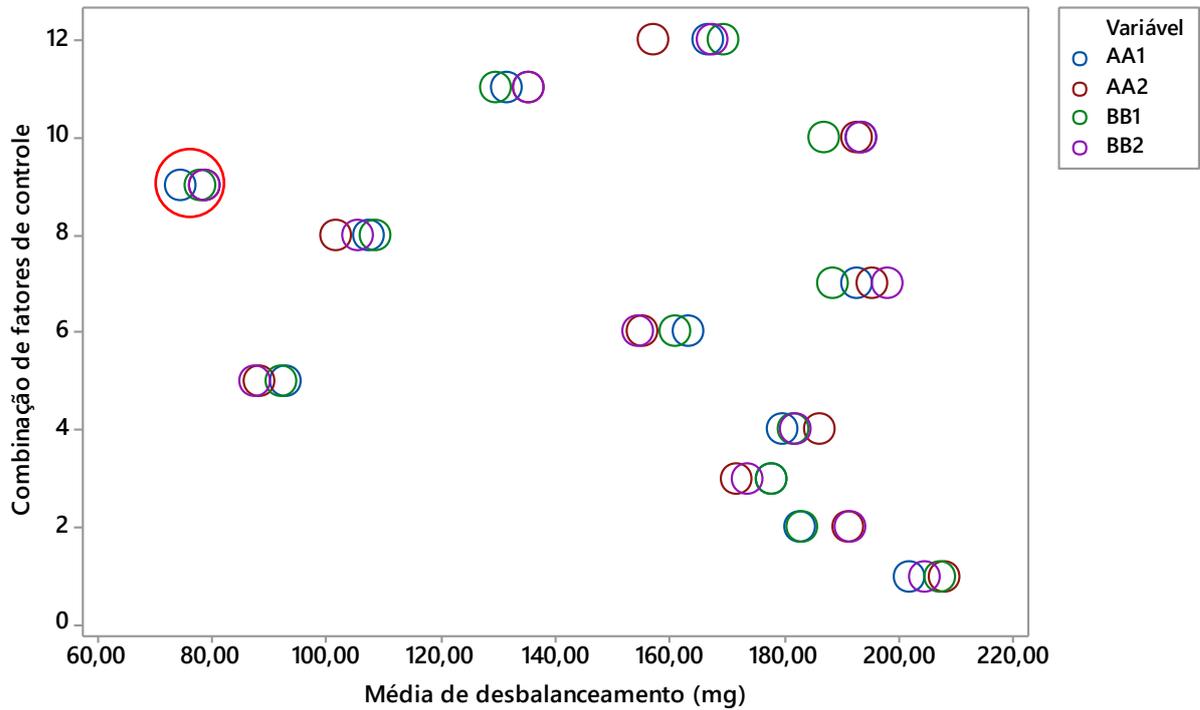


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O resultado do valor médio do desbalanceamento para cada combinação de fatores de controle e cada combinação de fatores de ruído está representado graficamente na Figura 30. O eixo y do gráfico representa cada uma das combinações de fatores geradas pela matriz experimental L12, apresentadas na Tabela 9, e o eixo x representa o resultado médio do desbalanceamento para cada combinação. Para cada combinação de fatores há 4 representações gráficas indicadas por círculos, que representam as 4 combinações de fatores de ruídos empregadas durante os experimentos, sendo AA1: operador e turno A e máquina 1, AA2: operador e turno A e máquina 2, BB1: operador e turno B e máquina 1 e BB2: operador e turno B e máquina 2.

A Figura 30 permite identificar não apenas as condições do plano experimental que resultam na redução do desbalanceamento médio, mas também evidencia as combinações em que ocorre a menor variação da resposta devido ao efeito dos fatores de ruído, que corresponde a maior robustez. Com base nos resultados da Figura 30, verifica-se que a combinação com menores valores de média de desbalanceamento e menor variação entre os fatores de ruído é a combinação 9, cujo valor de desbalanceamento médio resultou em 77,55 mg e a relação S/N foi de -37,80 dB. Em contraste, observa-se que elevados desbalanceamentos médios e variabilidade foram obtidos com as combinações 1 e 7.

Figura 30 - Gráfico de fatores de controle x combinação de ruídos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

4.2.2 Análise de efeitos dos fatores de controle

A Tabela 10 apresenta os valores médios de resposta de desbalanceamento por nível de cada parâmetro. A linha Delta da Tabela 10 mostra a diferença entre os resultados do nível 1 e 2 para cada variável de controle. A comparação dos valores do delta estabelece o posto de cada variável, que permite classificá-las em função da sua influência sobre o desbalanceamento. Com base nos resultados obtidos para o posto, observa-se que a ordem de influência dos fatores de controle sobre o desbalanceamento foi o seguinte: temperatura cilindro, temperatura canhão, tempo de injeção, tempo de resfriamento, pressão de recalque e tempo de recalque, correspondente aos postos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

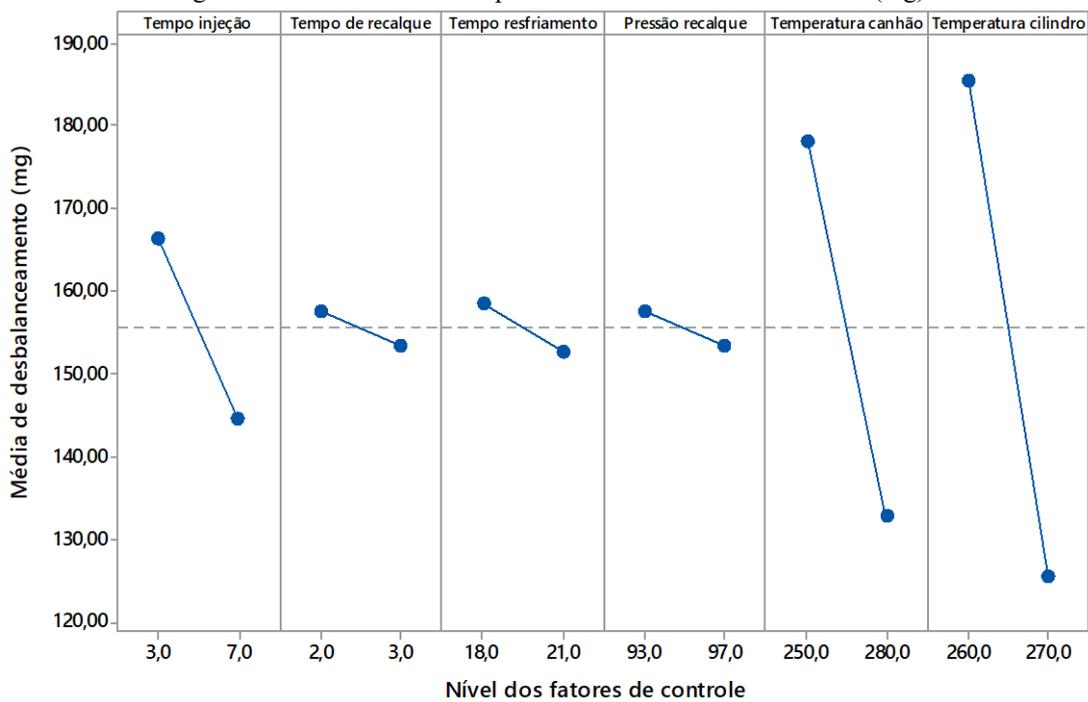
Tabela 10 - Tabela de respostas para Média.

Nível	Tempo de injeção	Tempo de recalque	Tempo de resfriamento	Pressão de recalque	Temperatura canhão	Temperatura cilindro
1	166,6 mg	157,6 mg	158,5 mg	157,7 mg	178,3 mg	185,7 mg
2	144,5 mg	153,5 mg	152,6 mg	153,4 mg	132,8 mg	125,4 mg
Delta	22,0	4,0	5,9	4,2	45,6	60,3
Posto	3	6	4	5	2	1

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Os dados da Tabela 10 estão representados graficamente na Figura 31, indicando o efeito do nível de cada condição sobre o desbalanceamento, onde eixo x representa os níveis para cada parâmetro de controle, e o eixo y representa os valores médios de desbalanceamento (mg) para cada nível. A análise da Figura 31 mostra que a combinação de fatores que minimiza os valores de desbalanceamento são tempo de injeção igual a 7,0 s, tempo de recalque de 3,0 s, tempo de resfriamento igual a 21,0 s, pressão de recalque igual a 97,0 bar, temperatura do canhão de 280,0 °C e temperatura do cilindro de 270,0 °C.

Figura 31 - Gráfico de efeitos para a média de desbalanceamento (mg).



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

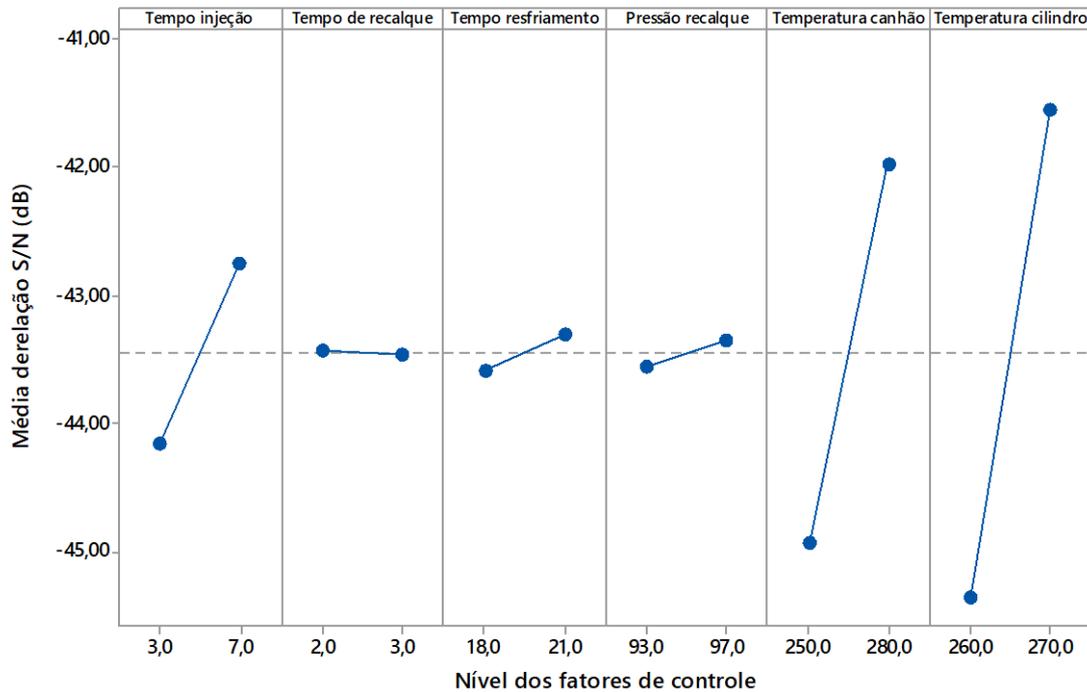
De maneira semelhante, a Tabela 11 e Figura 32 mostram os efeitos dos parâmetros de controle sobre a média das relações S/N, que representa a robustez de cada condição. A Figura 32 mostra que a combinação que maximiza a relação S/N é obtida empregando o tempo de injeção de 7,0 s, tempo de recalque de 3,0 s, tempo de resfriamento de 21,0 s, pressão de recalque de 97,0 bar, temperatura do canhão de 280,0 °C e temperatura do cilindro de 270,0 °C. Com base nos dados da Tabela 11 observa-se que a ordem decrescente de influência dos fatores de controle sobre o desbalanceamento foi temperatura cilindro, temperatura canhão, tempo de injeção, tempo de resfriamento, pressão de recalque e tempo de recalque.

Tabela 11 - Tabela de respostas para relação S/N.

Nível	Tempo de injeção	Tempo de recalque	Tempo de resfriamento	Pressão de recalque	Temperatura canhão	Temperatura cilindro
1	-44,1 dB	-43,4 dB	-43,6 dB	-43,5 dB	-44,9 dB	-45,3 dB
2	-42,7 dB	-43,4 dB	-43,3 dB	-43,5 dB	-41,9 dB	-41,5 dB
Delta	1,4	0,0	0,3	0,2	2,9	3,8
Posto	3	6	4	5	2	1

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 32 - Gráfico de efeitos principais para relação S/N.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.2.3 Análise de Variância (ANOVA)

O método ANOVA foi empregado para identificar quais fatores de controle apresentaram efeitos com significância estatística sobre a massa desbalanceada e a relação S/N das amostras. A Tabela 12 mostra o resultado da análise de variância considerando um nível de confiança de 95 %, onde o cálculo da contribuição é feito conforme (OKASHA *et al.*, 2012):

$$\text{Contribuição \%} = \frac{\text{soma dos desvios quadrados}}{\text{soma total dos desvios quadrados}} \quad (4.1)$$

Tabela 12 - Análise de Variância para desbalanceamento (mg).

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Tempo injeção (s)	1	5.821,8	5.821,8	27,70	0,000	7,0%
Tempo recalque (s)	1	195,3	195,3	0,93	0,341	0,2%
Tempo resfriamento (s)	1	418,0	418,0	1,99	0,166	0,5%
Pressão recalque (bar)	1	214,8	214,8	1,02	0,318	0,3%
Temperatura canhão (°C)	1	24.899,5	24.899,5	118,49	0,000	29,7%
Temperatura cilindro (°C)	1	43.600,6	43.600,6	207,49	0,000	52,1%
Erro	41	8.615,6	210,1			
Falta de ajuste	5	8.161,0	1.632,2	129,23	0,000	
Erro puro	36	454,7	12,6			
Total	47	83.765,6				

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se que a mais expressiva contribuição foi a da temperatura do cilindro, seguida da temperatura do canhão, com 52,1 % e 29,7 %, respectivamente. Na sequência, o tempo de injeção com 7,0 %, tempo de resfriamento com 0,5 %, pressão de recalque com 0,3 % e tempo de recalque com 0,2 %. Destaca-se que estes valores estabelecem a mesma ordem de influência resultante da análise do método de Taguchi, conforme os postos obtidos na Tabela 10 e Tabela 11.

Ainda sobre os resultados apresentados na Tabela 12, verifica-se que o tempo de injeção, temperatura do canhão e temperatura do cilindro são os fatores de controle que apresentam contribuição estatisticamente significativa para o desbalanceamento. Isto porque foram os únicos fatores que apresentaram valor-P menor que 0,05, sendo o valor-P do tempo de injeção, da temperatura do canhão e da temperatura do cilindro de 0,000.

Também foi feita a análise de variância com um nível de confiança de 95 % utilizando como resposta a relação S/N, e seus resultados encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise de Variância para a relação S/N.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Tempo injeção (s)	1	23,310	5.821,8	18,02	0,000	6,6%
Tempo recalque (s)	1	0,092	0,092	0,07	0,791	0,0%
Tempo resfriamento (s)	1	0,970	0,970	0,75	0,392	0,3%
Pressão recalque (bar)	1	0,563	0,563	0,44	0,513	0,2%
Temperatura canhão (°C)	1	103,152	103,152	79,73	0,000	29,3%
Temperatura cilindro (°C)	1	171,496	171,496	132,56	0,000	48,6%
Erro	41	53,042	1,294			
Falta de ajuste	5	51,643	10,329	265,69	0,000	
Erro puro	36	1,399	0,039			
Total	47	352,624				

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Observa-se que a maior e mais expressiva contribuição continuou sendo a temperatura do cilindro, seguida da temperatura do canhão, com 48,6 % e 29,3 %, respectivamente. Na sequência, o tempo de injeção com 6,6 %, tempo de resfriamento com 0,3 %, pressão de recalque com 0,2 % e tempo de recalque com 0,0 %. Além disso, os únicos fatores que apresentaram valor-P menor que 0,05, foram o tempo de injeção, a temperatura do canhão e a temperatura do cilindro. Este resultado ficou semelhante ao resultado da análise de variância da Tabela 12, trazendo uma confirmação nos resultados alcançados.

4.2.4 Análise de Regressão

Os resultados experimentais também foram empregados para a realização de uma análise de regressão. Nesta etapa, as variáveis de controle que não apresentaram significância estatística foram desconsideradas resultando na equação

$$\text{Desbalanceamento (mg)} = 155.54 + 8.11 A_{3.0} - 8.11 A_{7.0} + 22.78 B_{250.0} - 22.78 B_{280.0} + 31.83 C_{245.0} - 31.83 C_{270.0} \quad (4.2)$$

onde A é o tempo de injeção (s), B é a temperatura do canhão (°C) e C é a temperatura do cilindro (°C).

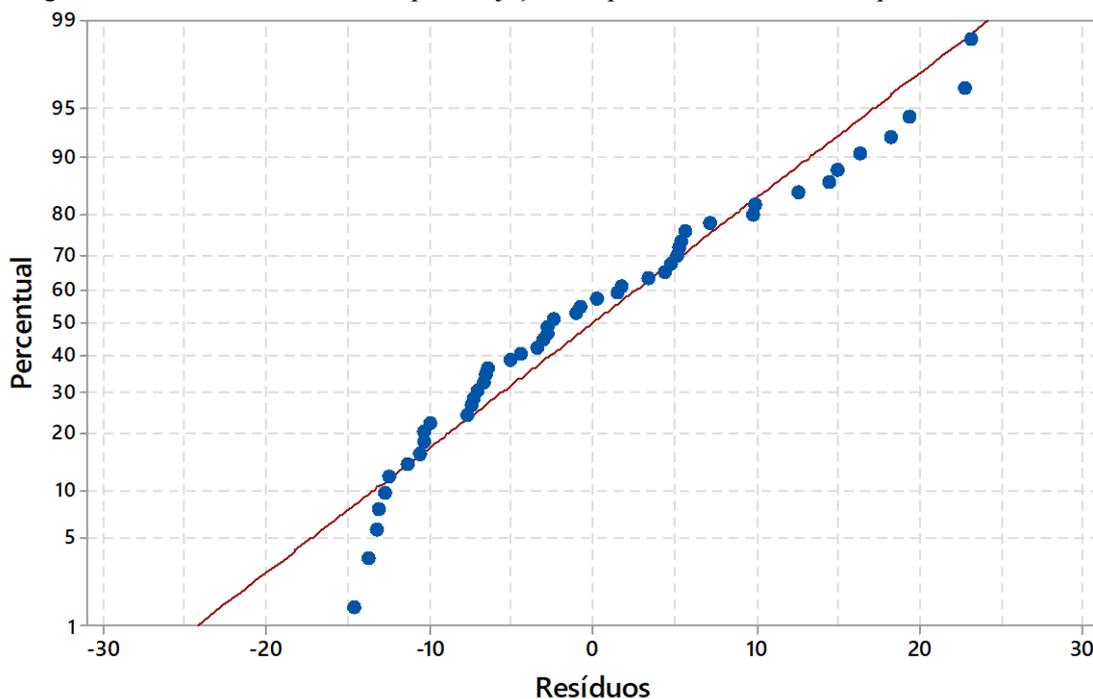
A equação 4.2 apresentou um valor $R^2 = 93,9\%$, mostrando que o modelo obtido se ajusta bem aos dados experimentais, e comprovando que os fatores considerados têm forte influência sobre a massa desbalanceada das hélices. Estas conclusões são confirmadas pelos resultados apresentados na Tabela 14, que mostram que os parâmetros tempo de injeção, temperatura do canhão e temperatura do cilindro possuem significância estatística (valor-P < 0,05). Adicionalmente, a Figura 33 mostra que os resíduos associados à equação 4.2 seguem uma distribuição normal por estarem próximos da linha reta diagonal, o que viabiliza a utilização e do método ANOVA.

Tabela 14 - Análise ANOVA de parâmetros de maior importância estatística.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados (Aj.)	Quadrado Médio (Aj.)	Valor-F	Valor-P	Contribuição
Tempo injeção (s)	1	2.803,7	2.803,7	23,11	0,000	3,3%
Temperatura canhão (°C)	1	24.899,5	24.899,5	205,27	0,000	29,7%
Temperatura cilindro (°C)	1	43.240,2	43.240,2	356,47	0,000	51,6%
Erro	42	5.094,7	121,3			
Falta de ajuste	6	4.640,0	773,3	61,23	0,000	
Erro puro	36	454,7	12,6			
Total	47	83.765,6				

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 33 - Gráfico de resíduos: tempo de injeção, temperatura do canhão e temperatura do cilindro.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.2.5 Otimização dos fatores de controle

Após realizada a análise de regressão, o modelo matemático representado na equação 4.2 foi empregado para encontrar a combinação de fatores que minimizam a massa desbalanceada das hélices. Nesta etapa, mesmo que os parâmetros tempo de recalque, tempo de resfriamento e pressão de recalque não tiveram significância estatística para o desbalanceamento, de acordo com a análise ANOVA vista no subcapítulo 4.2.2, elas ainda assim foram consideradas em seu nível máximo. Isso porque elas apresentam efeito para outras características da hélice, como dimensões e alguns aspectos estéticos, por exemplo.

A Tabela 15 mostra o resultado da minimização da massa desbalanceada das hélices realizada com a equação 4.2 no *software Minitab 17*, que resultou em um valor de 84,53 mg. Os valores obtidos para cada uma das variáveis por meio desta análise estão sumarizados na Figura 34. Destaca-se que esta combinação de fatores não faz parte das condições experimentais do plano experimental descrito na Tabela 8.

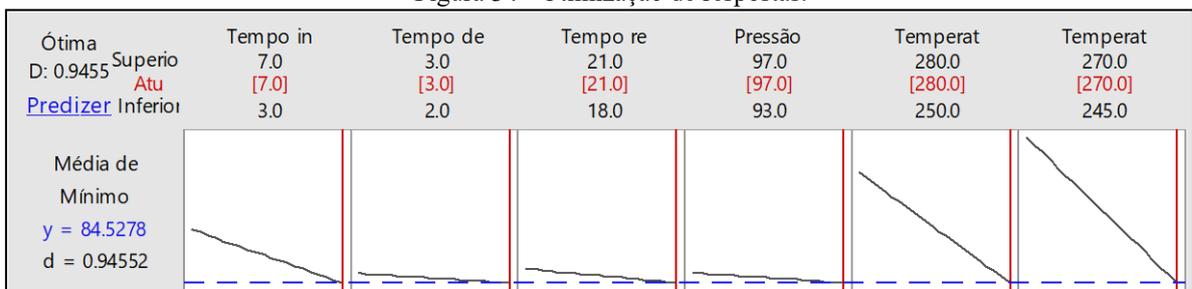
Tabela 15 - Combinação de parâmetros de injeção que minimiza o desbalanceamento de hélices.

Parâmetro	Valor
Tempo de injeção (s)	7,0
*Tempo de recalque (s)	3,0
*Tempo de resfriamento (s)	21,0
*Pressão de recalque (bar)	97,0
Temperatura do canhão (°C)	280,0
Temperatura do cilindro (°C)	270,0

Observação: Parâmetros com * apresentam valor-p > 0,05.

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Figura 34 - Otimização de respostas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

4.1 VALIDAÇÃO DE RESULTADOS

Para confirmar o resultado obtido na análise de otimização dos fatores de controle, optou-se por fazer a validação experimental dos resultados por meio de um lote piloto de hélices. Dessa forma, foram coletadas 20 amostras de hélices utilizando os parâmetros de injeção da Tabela 15 nas 4 diferentes combinações de fatores de ruídos, totalizando 80 amostras de validação. As 4 diferentes combinações de fatores de ruídos são:

- AA1: Operador A, turno A e máquina 1;
- AA2: Operador A, turno A e máquina 2;
- BB1: Operador B, turno B e máquina 1;
- BB2: Operador B, turno B e máquina 2.

Os valores completos dos resultados da validação de dados estão apresentados no Apêndice IV. A Tabela 16 apresenta a média dos valores de desbalanceamento das amostras coletadas, bem como o desvio padrão e o valor da relação S/N do tipo Menor é Melhor.

Tabela 16 - Resultados experimentos de validação.

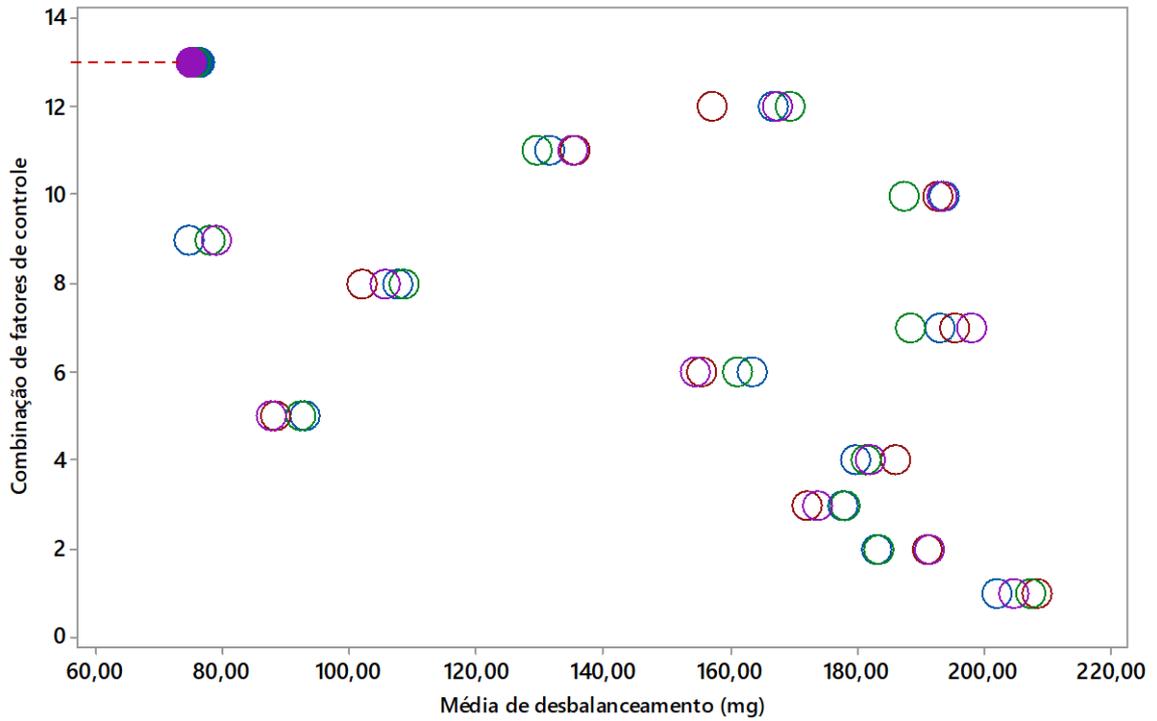
Média desbalanceamento (mg)	s (mg)	S/N MEM (dB)
75,67	4,80	-37,60

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

A Figura 35 apresenta a comparação dos resultados de desbalanceamento previamente discutidos na Figura 30 com os resultados do lote piloto obtidos com a combinação dos fatores de controle da Tabela 15. A nova combinação dos fatores de controle é representada pela combinação 13 que está destacada com o símbolo preenchido. Verifica-se graficamente que tal combinação resultou na menor média de desbalanceamento (mg) e também na menor variação, sendo estas equivalentes a 75,67 mg e 4,80 mg, respectivamente.

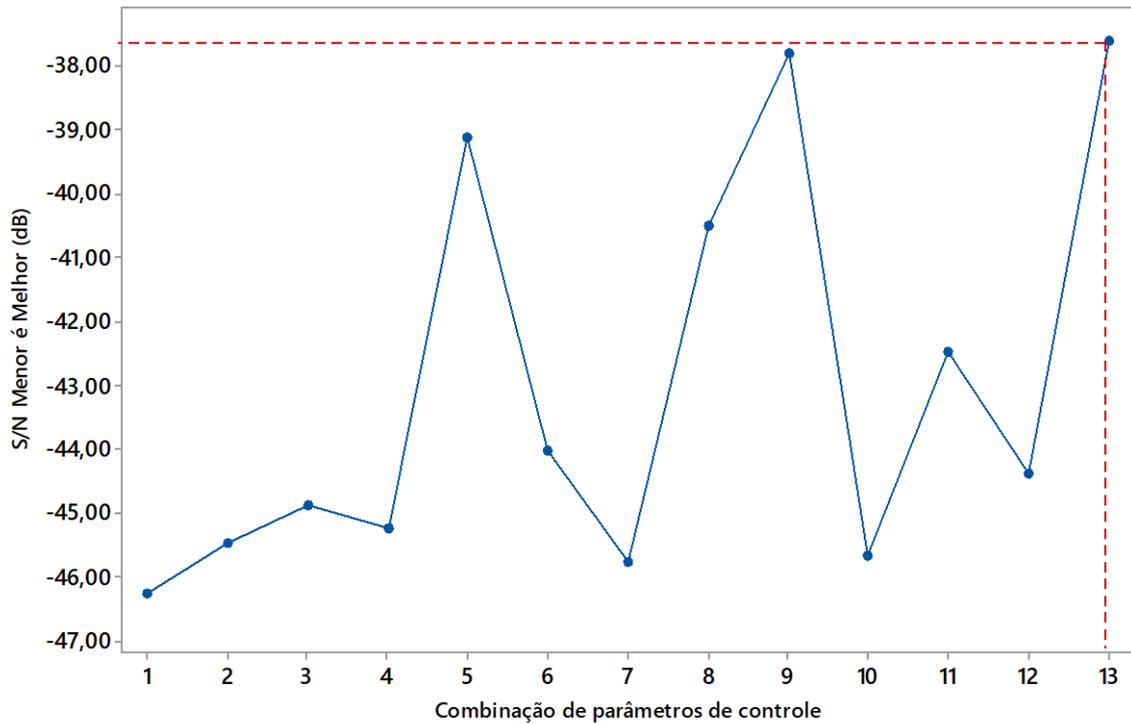
De maneira semelhante, a Figura 36 representa a comparação dos valores da relação S/N da nova combinação validada com as demais do plano experimental inicial de Taguchi. Novamente, verifica-se que a combinação 13 é a que possui o maior valor de relação S/N, equivalente a -37,60 dB, comprovando que ela é a mais robusta em relação às demais condições investigadas.

Figura 35 - Gráfico de dispersão de fatores de controle por média de desbalanceamento (mg) incluindo resultados da validação de dados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

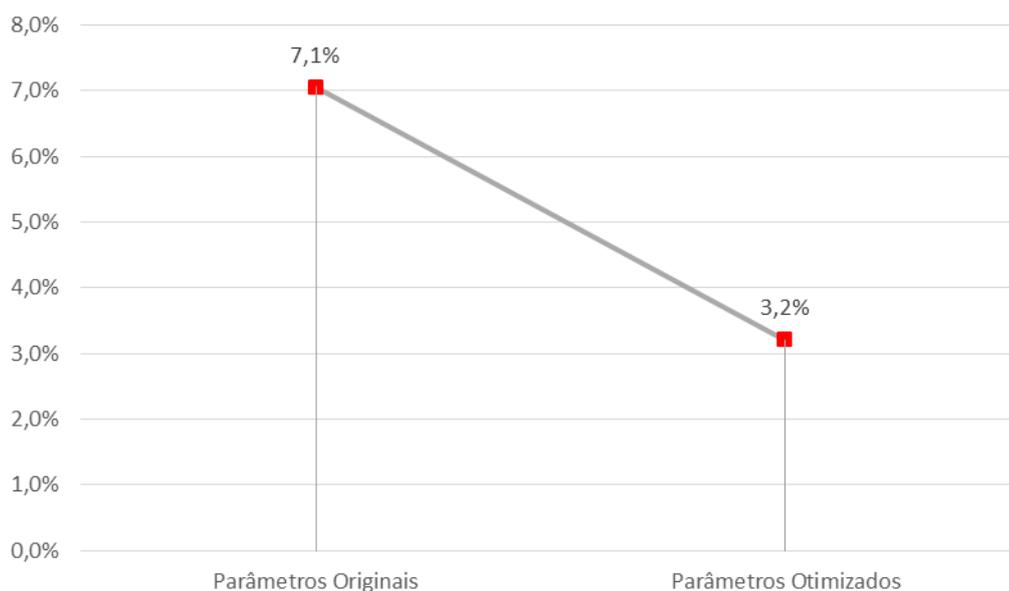
Figura 36 - Gráfico de comparação de relação S/N.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Adotando a nova configuração de parâmetros no processo de injeção para a produção de hélices plásticas, conforme Tabela 16, pode-se notar uma melhora no índice de rejeição de vibração no modelo de hélice escolhido, conforme mostra a Figura 37. O gráfico apresenta uma comparação de uma coleta de dados realizada em novembro de 2020, utilizando os parâmetros originais do processo (identificada no eixo y como Parâmetros Originais), e uma coleta de dados realizada com os parâmetros otimizados utilizando o método projeto robusto (identificada no eixo y como Parâmetros Otimizados). Verifica-se uma redução no índice de rejeição de hélices por vibração e, portanto, uma melhoria na estabilidade do processo, mostrando uma redução de aproximadamente 55,0 % do índice rejeição.

Figura 37 - Comparação do índice de rejeição por vibração nas hélices do modelo 6 PÁS BVT/PVT400, com parâmetros originais do processo e parâmetros otimizados com o método projeto robusto.



Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Portanto, a partir do experimento feito com a combinação sugerida na Tabela 16, e a partir das análises gráficas apresentadas neste capítulo, foi possível concluir que esta foi a combinação de fatores de controle que resultou nos menores valores de desbalanceamento e variação. Logo, o método Projeto Robusto mostrou-se eficiente para identificar os níveis dos fatores de controle que minimizam o valor médio e a variabilidade do desbalanceamento das hélices. Nota-se que, além do benefício financeiro para a empresa devido à redução no índice de rejeição das hélices plásticas, há também um benefício ambiental pela diminuição de descarte de material plástico, bem como, de reprocessamento de materiais.

5 CONCLUSÕES

Apesar da diversidade de aplicações do método projeto robusto, observou-se uma carência de estudos que levam em conta os fatores de ruído nos experimentos, além de não se ter encontrado estudos nos quais o método projeto robusto seja utilizado para investigar a vibração em ventiladores domésticos. E essa foi a principal motivação do presente trabalho, que se propôs a utilizar o método projeto robusto para investigar as rejeições de hélices plásticas que apresentavam vibração acima dos limites aceitáveis em ventiladores domésticos, investigando os fatores de controle e de ruído do processo produtivo. As conclusões obtidas neste trabalho são detalhadas a seguir.

Na etapa de análise preliminar das hélices, verificou-se que 94% das hélices com vibração acima dos limites aceitáveis estavam com a massa desbalanceada, 37 % de hélices apresentaram batimento do cubo fora das especificações, 37 % estavam com diferença de altura entre as pás, 34 % com a massa fora das especificações e, por último, 14% com diâmetro de cubo fora das especificações. Com isso, concluiu-se que a maior parte dos casos de vibração de ventiladores são ocasionados por hélices com massa desbalanceada, confirmando a teoria apresentada na revisão bibliográfica. Além disso, pode-se concluir através desse levantamento de dados que a causa da vibração estava relacionada com processo de fabricação das hélices e não com o projeto das mesmas.

Foram considerados os seguintes fatores de ruídos para avaliar a robustez do processo: a máquina injetora, o turno e o operador, sendo que turno e operador foram utilizados de forma combinada. Os fatores de controle envolvidos no processo de produção das hélices foram identificados utilizando o diagrama P, onde foram selecionados os parâmetros tempo de injeção (s), tempo de recalque (s), tempo de resfriamento (s), pressão de recalque (bar), temperatura do canhão (°C) e temperatura do cilindro (°C).

Utilizando um plano experimental ortogonal do tipo L12 com 6 fatores de controles e 3 fatores de ruído, foram executados 48 tratamentos obtendo como resposta o desbalanceamento (mg) de hélices onde, no total, foram analisadas 624 amostras de hélices. Foi utilizado então o método ANOVA para confirmar a significância estatística dos fatores de controle do processo, onde verificou-se que os únicos fatores que possuem significância

estatística para o desbalanceamento são o tempo de injeção, a temperatura do canhão e a temperatura do cilindro, pois foram os parâmetros cujo valor-P ficaram abaixo de 0,05. A temperatura é o fator mais influente nos resultados de desbalanceamento (mg).

Através da análise de regressão obteve-se um modelo matemático cujo valor de R^2 resultou em 93,92%. As análises dos resultados experimentais mostraram que a combinação de fatores que minimiza os valores de desbalanceamento e maximiza a relação S/N, tornando o processo mais robusto, é a de tempo de injeção igual a 7,0 s, tempo de recalque de 3,0 s, tempo de resfriamento igual a 21,0 s, pressão de recalque igual a 97,0 bar, temperatura do canhão de 280,0 °C e temperatura do cilindro de 270,0 °C.

A combinação de fatores de controle identificada pelo processo de otimização foi então testada em um lote piloto de hélices, resultando no menor valor médio de desbalanceamento, e também menor variação, sendo respectivamente, 75,67 mg e 4,80 mg, quando comparado com a base de dados. Esta combinação de fatores de controle, também resultou no maior valor de relação S/N, sendo de -37,60 dB, mostrando a maior robustez dentre as demais combinações.

Utilizando esta nova configuração de parâmetros no processo de injeção, observou-se uma redução de aproximadamente 55,0 % do índice de rejeição de hélices. Esse resultado trouxe uma economia estimada anual, considerando apenas o custo da matéria prima, de aproximadamente R\$ 50.000,00. Além da economia financeira, este resultado traz também um benefício ambiental, devido à redução na geração de resíduos plásticos e retrabalhos operacionais.

Logo, o método projeto robusto mostrou-se eficiente para identificar os níveis dos fatores de controle que minimizam o valor médio e a variabilidade do desbalanceamento das hélices e, por sua vez, vibração em ventiladores domésticos. Portanto, por meio da utilização deste método, conseguiu-se atingir o objetivo geral deste trabalho que é a definição dos parâmetros do processo de moldagem por injeção de hélices plásticas que reduzam o índice de rejeição por vibração.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização desta pesquisa, foram identificados alguns tópicos que permitem dar continuidade aos estudos referentes ao desempenho mecânico de hélices plásticas:

- Investigação das demais especificações técnicas da hélice que possuem influência na vibração, analisando a influência dos parâmetros do processo de injeção sobre elas. Como por exemplo, o batimento do cubo e o batimento da ponta da pá da hélice, onde 37,0 % das hélices com vibração estavam com essas especificações fora de suas tolerâncias;
- Investigação de outros parâmetros do processo de injeção, como por exemplo a dosagem (mg) ou a pressão de compressão (bar).
- Investigação das propriedades mecânicas do polímero utilizado para injetar as hélices e sua influência na vibração.
- Aplicar o método nos demais modelos de hélices plásticas produzidas.

6 REFERÊNCIAS

- ABDY, Charlotte *et al.* Pyrolysis of polyolefin plastic waste and potential applications in asphalt road construction: A technical review. **Resources, Conservation & Recycling**, 2022.
- ARNÉR, Magnus. **Statistical robust design: An Industrial Perspective**. Primeira edição. Wiley, 2014.
- ASRHAE. **Handbook – HVAC Systems and Equipment (SI)**. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). **Indústria brasileira de transformação e reciclagem de material plástico**. 2020. 47 p. Disponível em <<http://www.abiplast.org.br/boletins-economicos/>>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2022.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE PRODUTOS ELETROELETRÔNICOS (ELETROS). **Indústria de eletroeletrônicos prevê fechar 2019 com avanço de 9% a 10%**. 2019. Disponível em <<https://eletros.org.br/industria-de-eletroeletronicos-preve-fechar-2019-com-avanco-de-9-a-10/>>. Acesso em: 18 de julho de 2020.
- BRITÂNIA. 2021. Disponível em <<https://britannia.com.br/>>. Acesso em 15/08/2021.
- BUZZI, G., SILVA, L. D.. Analysis of injection molding process of plastic propeller fan based on the Taguchi Method. **26º International Congress of Mechanical Engineering**, 2021.
- CALIGNANO, F. *et al.* Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, n. 9, p. 2743-2751, ago. 2013.
- CANAKCI, Aykut *et al.* Determining the effect of process parameters on particle size in mechanical milling using the Taguchi method: Measurement and analysis. **Journal Of The International Measurement Confederation**, Trabzon, v. 46, n. 9, p. 3532-3540, nov. 2013.
- CANEL, T.; ZEREN, M.; SINMAZÇELIK, T.. Laser parameters optimization of surface treating of Al 6082-T6 with Taguchi method. **Optics and Laser Technology**. 2019.
- CENTRO DA INDÚSTRIA DO ESTADO DO AMAZONAS (CIEAM). **Eletros projeta crescimento na produção de eletroeletrônicos**. 2020. Disponível em <<https://cieam.com.br/eletros-projeta-crescimento-na-producao-de-eletroeletronicos/>>. Acesso em: 18 de julho de 2020.

CHANG, Tao C.; FAISON, Ernest. Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the taguchi method. **Polymer Engineering & Science**, Arnes, v. 41, n. 5, p. 703-710, maio 2001.

CHEN, Wu-lin; HUANG, Chin-yin; HUANG, Ching-ya. Finding efficient frontier of process parameters for plastic injection molding. **Journal Of Industrial Engineering International**, Taichung, v. 9, n. 1, p. 1-11, set. 2013.

CORY, W. **Fans & Ventilation: A Practical Guide**, Primeira edição. Inglaterra: Elsevier, 2005.

EISENMANN, Robert C. Sr. And Eisenmann, Robert C. Jr., **Machinery Malfunction Diagnosis and Correction: vibration analysis and troubleshooting for the process industries**, New Jersey, Prentice-Hall, Inc, 1997.

ERIKSEN, M.K. *et al.* Contamination in plastic recycling: influence of metals on the quality of reprocessed plastic. **Waste Management**, Dinamarca, 2018.

FEI, Ng Chin; MEHAT, Nik Mizamzul; KAMARUDDIN, Shahrul. Practical Applications of Taguchi Method for Optimization of Processing Parameters for Plastic Injection Moulding: a retrospective review. **Isrn Industrial Engineering**, Malásia, v. 2013, p. 1-11, 2013.

GRAHAM, K. **Vibrações Mecânicas: teorias e aplicações**, Primeira edição. Cengage, 2017.

GHALME, Sachin; MANKAR, Ankush; BHALERAO, Y. J.. Parameter optimization in milling of glass fiber reinforced plastic (GFRP) using DOE-Taguchi method. **Springerplus**, Ahmednagar, v. 5, n. 1, p. 1-9, 22 ago. 2016.

GINGHTONG, Thatchanok; NAKPATHOMKUN, Natthapon; PECHYEN, Chiravoot. Effect of injection parameters on mechanical and physical properties of super ultra-thin wall propylene packaging by Taguchi method. **Results In Physics**, Pathumthani, v. 9, p. 987-995, jun. 2018.

HAJJI, Hanen *et al.* Study of the effect of milling parameters on mechanosynthesis of hydroxyfluorapatite using the Taguchi method. **Powder Technology**. 2019.

HARADA, Júlio; UEKI, Marcelo Massayoshi. **Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade**. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

HOSEINPOUR-LONBAR, M.; ALAVI, Z., M.; PALASSI, M.. Selection of asphalt mix with optimal fracture properties at intermediate temperature using Taguchi method for design of experimente. **Construction and Building Materials**. 2020.

INMAN, D. **Engineering Vibrations**, Quarta edição. Pearson, 2014.

JEYAPPAUL, R.; SHAHABUDEEN, P.; KRISHNAIAH, K.. Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method – a review. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 26, n. 11-12, p. 1331-1337, 7 abr. 2004.

JHANG, Jhy-ping; CHAN, Hsiao-ling. Application of the Taguchi method to improve the process yield rate for air cleaners in Toyota Corona vehicles. **International Journal Of Reliability, Quality And Safety Engineering**, Taiwan, v. 8, n. 3, p. 219-231, mai. 2001.

KAMARUDDIN, Shahrul; KHAN, Zahid Akhtar; FOONG, S. H.. Quality characteristic improvement of an injection moulding product made from blends plastic by optimizing the injection moulding parameters using Taguchi method. **International Journal Of Plastics Technology**, Penang, v. 14, n. 2, p. 152-166, dez. 2010.

KIATCHAROENPOL, T; VICHIRAPRASERT, T. Optimizing and Modeling for Plastic Injection Molding Process using Taguchi Method. **Journal Of Physics: Conference Series**, Bangkok, v. 1026, p. 12018-12024, mai. 2018.

KUO, C.-c.; CHEN, B.-c.. Optimization of hot embossing molding process parameters of Fresnel lens using Taguchi method. **Materials Science & Engineering Technology**. p. 942-948, set. 2015.

LEE, Shi W. *et al.* Effects of process parameters in plastic, metal, and ceramic injection molding processes. **Korea-australia Rheology Journal**, Busan, v. 23, n. 3, p. 127-138, set. 2011.

LI, Hongsheng; GUO, Zhiying; LI, Dequn. Reducing the effects of weldlines on appearance of plastic products by Taguchi experimental method. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, Shanghai, v. 32, n. 9-10, p. 927-931, 4 abr. 2006.

LO, W. C.; TSAI, K. M.; HSIEH, C. Y.. Six Sigma approach to improve surface precision of optical lenses in the injection-molding process. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, London, v. 41, n. 9-10, p. 885-896, 29 maio 2008.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. 2ª. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

MEHAT, Nik Mizamzul; KAMARUDDIN, Shahrul. Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method. **Journal Of Materials Processing Technology**, Penang, v. 211, n. 12, p. 1989-1994, dez. 2011.

MEHAT, Nik Mizamzul; KAMARUDDIN, Shahrul. Quality control and design optimisation of plastic product using Taguchi method: a comprehensive review. **International Journal Of Plastics Technology**, Penang, v. 16, n. 2, p. 194-209, 6 nov. 2012.

MINIPA. 2021. Disponível em <https://www.minipa.com.br/catalogo-minipa_>. Acesso em 26/05/2021.

MONTGOMERY, D. C.. **Design and Analysis of Experiments**, Quinta edição. 2001.

OKASHA, M. *et al.* Mechanical microdrilling of negative-tapered laser-predrilled holes: a new approach for burr minimization. **Int J Adv Manuf Technol**, 2012.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. USA: Prentice-Hall, 1989.

QUITIAQUEZ, P. *et al.* Investigation of geometric parameters with HSS tools in machining polyamide 6 using Taguchi method. **Materials Today: Proceedings**, 2022.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**, Quarta edição. Pearson, 2009.

RAWENI, Abuajila *et al.* Optimization of AA5083 Friction Stir Welding Parameters Using Taguchi Method. **Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette**, v. 25, n. 3, p. 861-867, jun. 2018.

REDDY, P. B. S.; NISHINA, K.; BABU, A. S.. Performance Improvement of a Zinc Plating Process Using Taguchi's Methodology: A Case Study, **Metal Finishing**, 1998.

ROBINSON, T. J., BORROR, C., M., MYERS, R., H.. Robust Parameter Design: A Review. **Quality And Reliability Engineering International**, 2004.

SATHISH, T. *et al.* Novel study on improvement of plastics properties by blending of waste micro plastics into ABS plastics. *Chemosphere*, Índia, 2022.

SONG, M.C. *et al.* Research on effects of injection process parameters on the molding process for ultra-thin wall plastic parts. **Journal Of Materials Processing Technology**, Dalian, v. 187, p. 668-671, jun. 2007.

SOYLAK, Mustafa; GÖKÇE, Nurseda Karagöz; TOPAL, Eyüp Sabri. Aircraft wing design at low speeds using Taguchi method. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v.90, n. 9, p. 51-55. 2018.

STEMMLER, S. *et al.* Quality control in injection molding based on norm-optimal iterative learning cavity pressure control. **Ifac-Papers online**, 2020.

SUTHAR, J.; TELI, S.N.; MURUMKAR, A.. Drilling process improvement by Taguchi method. **Materials Today: Proceedings**. 2021.

TANG, S.H. *et al.* The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage. **Journal Of Materials Processing Technology**, Malásia, v. 182, n. 1-3, p. 418-426, fev. 2007.

TAGUCHI, G., CHOWDHURY, S., WU, Y.. **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. 2005.

TAGUCHI, G.; TSAI, S.. Quality engineering (Taguchi methods) for the development of electronic circuit technology. **IEEE transactions on reliability**. 1995.

TOMA, Eiji. Optimization of rotor shaft shrink fit method for motor using "Robust design". **Journal Of Industrial Engineering International**, p. 705-718, jan. 2018.

WANG, Jian. **Some Critical Issues for Injection Molding**, Primeira edição. Intech, 2012.

WANG, Hung-Kai; WANG, Zih-Huei; WANG, Ming-Chi. Using the Taguchi method for optimization of the powder metallurgy forming process for Industry 3.5. **Computers & Industrial Engineering**. 2020.

WOJCIECHOWSKI, Szymon *et al.* Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibrations during precise ball end milling. **Journal Of Precision Engineering**, v. 51, p. 582-596, jan. 2018.

WU, Cheng-hsien; LIANG, Wan-jung. Effects of geometry and injection-molding parameters on weld-line strength. **Polymer Engineering & Science**, Taiwan, v. 45, n. 7, p. 1021-1030, 2005.

YANG, W. H.; TARNG, Y. S.. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. **Journal Of Materials Processing Technology**, 1997.

ZAMORA, Andrea Maltchik *et al.* **Atlas do plástico: fontes e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. 2020.

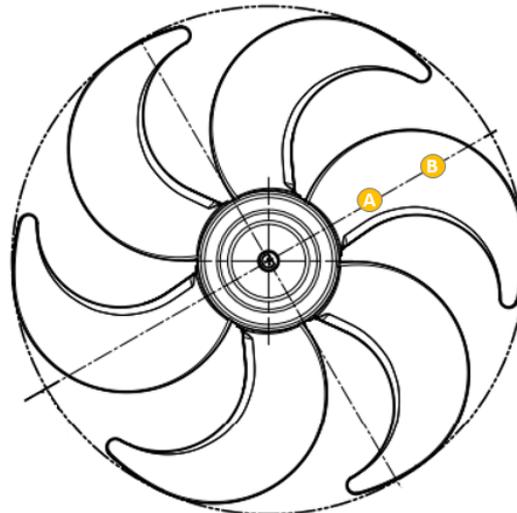
ZIREHPOUR, Alireza *et al.* Mixed matrix membrane application for olive oil wastewater treatment: Process optimization based on Taguchi design method. **Journal Of Environmental Management**, v. 132, p. 113-120, jan. 2014.

7 APÊNDICES

APÊNDICE I – EXPERIMENTOS INICIAIS DESBALANCEAMENTO HÉLICES

Inicialmente foi feito um experimento desbalanceando intencionalmente uma hélice. Para isso, foram utilizadas duas massas, $m_1 = 50,00$ mg e $m_2 = 2000,00$ mg, e foram utilizados dois pontos para inserir as massas e desbalancear a hélice. O ponto A, situado a aproximadamente 20,00 mm do eixo da hélice, e o ponto B, situado a aproximadamente 70,00 mm do eixo da hélice, conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Pontos de desbalanceamento da hélice.



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A hélice original apresentava desbalanceamento de 10,53 mg e vibração de 0,025 mm. Foram feitos quatro experimentos diferentes, e repetidos duas vezes, sendo que para cada experimento foram coletadas quatro medições de vibração gerando uma média entre elas. No primeiro experimento, colocou-se a massa m_1 sob o ponto A da hélice, no segundo experimento colocou-se a massa m_1 no ponto B da hélice, no terceiro experimento colocou-se a massa m_2 no ponto A da hélice e no quarto experimento, por sua vez, colocou-se a massa m_2 no ponto B da hélice. Para cada experimento coletou-se dados de desbalanceamento e vibração. Os resultados do experimento estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Experimento desbalanceamento intencional de hélice.

VARIÁVEIS DE CONTROLE (X)			RESPOSTA (Y)					
Run	massa (mg)	distância do eixo (mm)	desbalanceamento (mg)	vibração (mm)				
				1	2	3	4	média
1	50,00	20,00	122,00	0,187	0,196	0,180	0,190	0,188
2	50,00	70,00	229,00	0,315	0,320	0,300	0,297	0,308
3	2000,00	20,00	551,00	0,522	0,534	0,515	0,520	0,523
4	2000,00	70,00	936,00	1,142	1,098	1,002	1,120	1,091
5	50,00	20,00	124,00	0,201	0,210	0,195	0,205	0,203
6	50,00	70,00	232,00	0,365	0,358	0,363	0,370	0,364
7	2000,00	20,00	533,00	0,537	0,542	0,532	0,520	0,533
8	2000,00	70,00	939,00	0,980	1,028	1,101	1,035	1,036

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Através deste experimento inicial verifica-se que, quanto maior o valor da massa (mg) inserida na hélice, maiores foram os resultados de vibração (mm). Além disso, quanto maior for a distância do eixo (mm) da hélice a ser inserida a massa, também maiores resultados de vibração.

APÊNDICE II – ANÁLISE PRELIMINAR PROCESSO DE INJEÇÃO

Diferentes combinações do processo de injeção foram analisadas antes de gerar o plano experimental no processo de injeção, para avaliar o efeito do processo de injeção sobre o desbalanceamento. Foram comparadas três diferentes combinações de parâmetros do processo de injeção, onde para cada uma das combinações foram coletadas 30 amostras. As diferentes combinações de parâmetros estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Combinações de parâmetros de injeção.

PARÂMETROS	COMBINAÇÕES		
	A	B	C
Tempo de injeção (s)	4,0	3,0	3,5
Tempo de resfriamento (s)	19,0	17,0	17,0
Pressão de recalque (bar)	93,0	91,0	91,0
Temperatura do canhão (°C)	280,0	275,0	250,0

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Os valores médios das medições do desbalanceamento das hélices correspondentes a cada uma combinação de parâmetros são apresentados na Tabela 19. Com os dados da Tabela 19, pode-se calcular a vibração média (\bar{y}) e o desvio padrão (s) para cada combinação de parâmetros e também a relação S/N. Os resultados encontram-se na Tabela 20.

Tabela 19 - Coleta de dados de desbalanceamento de hélices plásticas (mm).

Combinação A		Combinação B		Combinação C	
Amostra	média (mg)	Amostra	média (mg)	Amostra	média (mg)
1	98.25	1	85.34	1	100.34
2	100.34	2	105.34	2	121.34
3	105.24	3	119.64	3	119.64
4	85.34	4	121.31	4	95.34
5	89.31	5	115.34	5	125.34
6	93.64	6	100.34	6	114.34
7	103.46	7	98.34	7	110.34
8	90.46	8	105.34	8	105.64
9	91.64	9	114.34	9	125.64
10	95.64	10	89.64	10	89.64
11	89.46	11	92.34	11	94.34
12	107.35	12	97.85	12	100.34
13	100.34	13	100.34	13	117.64
14	102.34	14	105.34	14	121.31
15	98.34	15	110.34	15	119.64
16	92.34	16	115.34	16	129.34
17	88.45	17	113.64	17	122.24
18	91.46	18	120.34	18	117.24
19	99.74	19	116.97	19	110.34
20	86.24	20	118.64	20	99.34
21	92.34	21	106.45	21	105.24
22	95.64	22	95.64	22	100.34
23	87.34	23	93.46	23	116.34
24	90.34	24	89.74	24	120.34
25	100.34	25	103.64	25	99.34
26	108.31	26	100.74	26	89.34
27	89.34	27	116.45	27	125.24
28	97.34	28	99.64	28	118.34
29	91.24	29	100.31	29	120.34
30	90.31	30	115.34	30	116.34

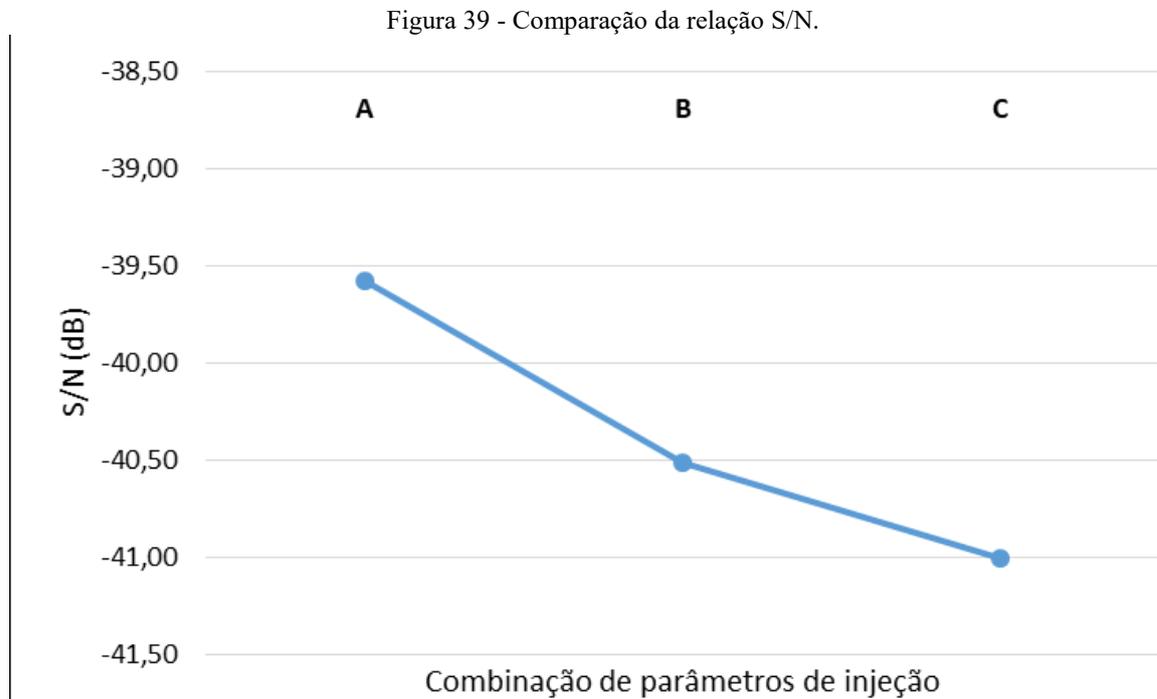
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 20 - Resultados da relação S/N (dB) para as 3 combinações de parâmetros.

Combinação	Média (mm)	s (mm)	s ² (mm ²)	COV (-)	S/N (dB)
A	95.06	6.38	40.72	6.71%	-39.580
B	105.58	10.38	107.77	9.83%	-40.514
C	111.69	11.65	135.76	10.43%	-41.007

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O gráfico apresentado na Figura 39 mostra a comparação entre os resultados da relação S/N. Verifica-se, a partir dos resultados, que o conjunto de parâmetros A apresentou maior valor na relação S/N, indicando que esta é a combinação de parâmetros mais robusta entre as três.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Por meio dos resultados preliminares apresentados, é possível concluir que os parâmetros do processo de injeção de hélices plásticas podem ser empregados para reduzir a variabilidade de desbalanceamento de hélices plásticas, e consequentemente a vibração causada em ventiladores, e assim aumentar a robustez do produto.

APÊNDICE III – BASE DE DADOS DO PLANO EXPERIMENTAL DE TAGUCHI

Tabela 21 - Base de dados plano experimental de Taguchi.

Run	Fatores de controle						Fatores de ruído			Média desbalanceamento (mg)	s (mg)	S/N MEM (dB)
	Tempo injeção [s]	Tempo de recalque [s]	Tempo resfriamento [s]	Pressão recalque [bar]	Temperatura canhão [°C]	Temperatura cilindro [°C]	Turno	Operador	Máquina			
1	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	A	A	1	201.95	18.53	-46.14
2	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	A	A	2	208.22	18.86	-46.41
3	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	B	B	1	207.34	18.05	-46.37
4	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	245.0	B	B	2	204.72	19.40	-46.26
5	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	A	A	1	182.93	15.63	-45.28
6	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	A	A	2	191.20	17.64	-45.67
7	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	B	B	1	183.36	15.18	-45.30
8	3.0	2.0	18.0	93.0	250.0	270.0	B	B	2	191.56	17.71	-45.68
9	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	A	A	1	177.80	17.55	-45.04
10	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	A	A	2	171.95	14.34	-44.74
11	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	B	B	1	178.04	16.83	-45.05
12	3.0	2.0	21.0	97.0	280.0	245.0	B	B	2	173.61	15.29	-44.83
13	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	A	A	1	179.70	21.45	-45.15
14	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	A	A	2	186.13	22.62	-45.46
15	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	B	B	1	181.54	19.35	-45.23
16	3.0	3.0	18.0	97.0	280.0	245.0	B	B	2	182.00	19.70	-45.25
17	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	1	92.86	18.45	-39.53
18	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	2	88.23	20.10	-39.13
19	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	1	92.22	14.17	-39.40
20	3.0	3.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	2	87.50	18.31	-39.03
21	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	A	A	1	163.35	17.58	-44.31
22	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	A	A	2	155.36	18.39	-43.89
23	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	B	B	1	161.02	17.33	-44.19
24	3.0	3.0	21.0	97.0	250.0	270.0	B	B	2	154.63	17.30	-43.84
25	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	A	A	1	193.00	21.28	-45.76
26	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	A	A	2	195.40	18.32	-45.86
27	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	B	B	1	188.49	19.33	-45.55
28	7.0	2.0	21.0	97.0	250.0	245.0	B	B	2	198.15	19.53	-45.98
29	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	1	107.50	7.03	-40.65
30	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	A	A	2	101.81	13.97	-40.24
31	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	1	108.57	7.85	-40.74
32	7.0	2.0	21.0	93.0	280.0	270.0	B	B	2	105.51	10.72	-40.51

33	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	A	A	1	74.55	7.61	-37.49
34	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	A	A	2	78.91	9.81	-38.01
35	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	B	B	1	77.87	6.93	-37.86
36	7.0	2.0	18.0	97.0	280.0	270.0	B	B	2	78.88	7.32	-37.98
37	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	A	A	1	193.67	18.09	-45.78
38	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	A	A	2	192.69	16.69	-45.73
39	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	B	B	1	187.25	18.18	-45.49
40	7.0	3.0	21.0	93.0	250.0	245.0	B	B	2	193.48	18.97	-45.77
41	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	A	A	1	131.48	26.75	-42.6
42	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	A	A	2	135.46	16.65	-42.7
43	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	B	B	1	129.48	25.75	-42.4
44	7.0	3.0	18.0	97.0	250.0	270.0	B	B	2	135.34	16.50	-42.7
45	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	A	A	1	166.87	27.21	-44.56
46	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	A	A	2	157.14	28.71	-44.07
47	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	B	B	1	169.59	26.73	-44.69
48	7.0	3.0	18.0	93.0	280.0	245.0	B	B	2	167.52	30.36	-44.62

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

APÊNDICE IV – RESULTADOS DO EXPERIMENTO DE VALIDAÇÃO DE DADOS

Abaixo segue resultados dos experimentos de validação de dados, onde utilizou-se a seguinte configuração de parâmetros de controle da injeção: tempo de injeção de 7,0 s, tempo de recalque de 3,0 s, tempo de resfriamento de 21,0 s, pressão de recalque de 97,0 bar, temperatura do canhão de 280,0 °C e temperatura do cilindro de 270,0 °C.

Tabela 22 - Resultados validação.

Run	Fatores de ruído	Resposta: Desbalanceamento (mg)																				Média (mg)	s (mg)	S/N MEM (dB)
1	AA1	75,56	76,53	85,64	78,35	73,54	75,24	74,97	77,57	78,64	76,34	74,34	75,14	68,24	71,64	76,34	78,31	79,14	75,34	85,34	70,34	76,33	4,18	-37,67
2	AA2	78,36	75,34	81,34	73,14	76,84	78,34	77,34	68,34	70,24	86,34	81,24	78,14	76,36	72,45	68,95	71,54	72,68	86,24	71,24	70,34	75,74	5,30	-37,61
3	BB1	81,24	78,34	68,46	75,14	71,24	76,68	84,52	70,35	71,64	77,89	86,34	69,14	72,13	69,24	76,54	81,24	82,34	71,24	73,44	75,34	75,62	5,38	-37,60
4	BB2	73,24	81,24	68,34	72,14	75,64	76,67	80,24	69,34	74,34	76,28	79,31	71,24	69,99	73,54	75,14	77,71	85,14	79,14	71,24	70,14	75,00	4,50	-37,52

Fonte: Elaborado pela autora, 2022.

Sendo 4 combinações possíveis dos fatores de ruídos:

- AA1: Operador A, turno A e máquina 1;
- AA2: Operador A, turno A e máquina 2;
- BB1: Operador B, turno B e máquina 1;
- BB2: Operador B, turno B e máquina 2.