

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE) - HELICÓPTERO DE PAPEL (TIMON-HM)

Laboratório de Robótica e Sistemas Autônomos - RoSA

Autores:

Jéssica Lima Motta

Leonardo Mendes de Souza Lima

Miguel Felipe Nery Vieira

Vinícius José Gomes de Araujo Felismino

**Salvador
Bahia, Brasil**

Setembro de 2020

RESUMO

O presente documento tem como objetivo aplicar os conceitos de Planejamento de Experimento, do inglês [Design of Experiments \(DOE\)](#), a um modelo de helicóptero de papel. O propósito principal foi identificar quais são os fatores que mais influenciam seu tempo de voo e como estas variáveis podem melhorar o seu desempenho. Durante o processo, foi medido o seu tempo de voo em duas alturas diferentes, além disto, foram adicionados adesivos e um clipe em sua estrutura a fim de verificar a influência da variação destes parâmetros no resultado final. Para realizar o estudo estatístico dos dados obtidos durante os testes, foi utilizada a ferramenta R, uma linguagem de programação voltada à manipulação, análise e visualização de dados.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

DOE Design of Experiments

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO COM VÁRIOS FATORES	7
2.1	Caracterização do problema	7
2.2	Escolha dos fatores de influência e níveis, e listar restrições . .	7
2.3	Seleção das variáveis de resposta	8
2.4	Determinação de um modelo de planejamento de experimento	8
2.5	Condução do experimento	8
2.6	Análise dos dados	8
2.7	Conclusões e recomendações	8
3	EXPERIMENTO	11
4	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	15
5	CONCLUSÃO	21
	REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

Diferentes métodos constituem a prática da melhoria contínua. É de suma importância que os administradores conheçam estas ferramentas para que haja sempre redução de desperdícios, aumento da eficiência e controle dos processos (NORTEGUBISIAN, 2020).

Planejamento de Experimentos (DOE) é uma das técnicas utilizadas para estudar um produto ou processo, e assim, identificar os fatores que mais influenciam seu comportamento. Através deste método deve-se obter a mais otimizada configuração para a construção da peça ou elaboração do procedimento (PETENATE, 2020).

O desenvolvimento de um experimento bem executado deve explicitar os fatores-chave do processo, assim como a combinação dos fatores que fazem o processo funcionar de maneira aceitável. A variabilidade do processo, ou seja, a diferença entre o que esperamos de algo e o que realmente acontece também é um ponto a ser observado pelo executor do DOE.

O resultado que determina uma característica ou elemento do experimento é chamado de **variável de resposta**. Por ser um método de abordagem repetitiva, é necessário realizar ciclos de testes para alcançar um bom resultado. Estes ciclos devem possuir três etapas: **Rastreamento** - fase de delimitação de variáveis e do campo de atuação; **Projeto fatorial completo** - fase de combinação de fatores e níveis de fatores e **Projeto de superfície** - Modelagem dos resultados obtidos.

O DOE pode ser aplicado em duas situações: planejamento de experimentos e correção de processos defeituosos. Um processo desenvolvido desde o início com esta aplicação garante que sua produção e gestão sejam sempre melhoradas e tenham custos e tempo reduzidos. É uma ferramenta de melhoria contínua bastante eficaz, desde que se tome os devidos cuidados com as etapas do experimento (PETENATE, 2020).

2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO COM VÁRIOS FATORES

Antes de realizar o experimento foi necessário um estudo prévio sobre o [DOE](#). Neste planejamento determina-se quais as configurações são eficientes para determinado processo. Segundo ([COLEMAN; MONTGOMERY, 1993](#)) as etapas para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimento na Indústria devem ser as seguintes:

- Caracterização do problema;
- Escolha dos fatores de influência e níveis, e listar restrições;
- Seleção das variáveis de resposta;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento;
- Condução do experimento;
- Análise dos dados;
- Conclusões e recomendações.

Nesta seção será avaliado cada item mencionado.

2.1 Caracterização do problema

Nesta etapa é necessário desenvolver as ideias acerca do problema e sobre os objetivos específicos do experimento. É fundamental a participação de toda a equipe de qualidade, engenharia, clientes e operadores, para fazer um relato preciso sobre o problema. Dessa forma será possível uma melhor compreensão do processo e a busca por uma provável uma solução para o problema.

2.2 Escolha dos fatores de influência e níveis, e listar restrições

Os fatores de influência e os níveis são escolhidos após se obter uma boa definição do problema e a elaboração do objetivo do experimento. O responsável pelo experimento deverá determinar quais fatores devem variar, os intervalos nos quais esses fatores variarão e os níveis em que cada rodada será realizada. Quando se tem por objetivo fazer uma varredura dos fatores ou caracterização do processo, e este ainda não está amadurecido, melhor manter baixo o número de níveis, geralmente dois ([ROZENFELD, 2014](#)). É fundamental a investigação de todos os fatores que possam ser importantes.

É necessário listar e rotular as interações conhecidas e supostas, e as restrições no experimento, como métodos de aquisição de dados, duração, materiais, facilidade de alterar a variável de controle, tipo de experimento, etc.

2.3 Seleção das variáveis de resposta

Nesta etapa o responsável pelo experimento irá escolher a(s) variável/variáveis que fornece informação útil sobre o processo. Geralmente, tem-se como variável de resposta a média ou o desvio padrão, ou ambos, da característica medida. A capacidade do medidor também interferirá nessa etapa pois, caso seja baixa, apenas efeitos grandes serão detectados, ou será necessária replicação do experimento. O embasamento para selecionar a variável resposta pode vir da teoria, de especialistas ou da experiência.

2.4 Determinação de um modelo de planejamento de experimento

A escolha do planejamento leva em consideração o tamanho da amostra, seleção de uma ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais, e se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas (DÁVILA, 2018). Podem-se citar dentre os métodos de planejamento: Fatorial, Completamente aleatorizado com um único fator, Fatorial 2^k em blocos, Fatorial 2^k fracionário, Blocos aleatorizados, Blocos incompletos balanceados, blocos incompletos parcialmente balanceados, Quadrados latinos, Quadrados de Youden, Hierárquico e Superfície de resposta (MONTGOMERY; RUNGER, 2013).

2.5 Condução do experimento

Nesta etapa é de extrema importância o monitoramento do processo de forma a garantir que seja feito de acordo com o que foi planejado. Os erros no procedimento experimental que ocorrem durante a condução do experimento destruirão a validade do mesmo, requerendo uma repetição dos testes.

2.6 Análise dos dados

Para analisar os dados deve-se empregar métodos estatísticos como ANOVA, regressão, plots e t test, e com isso obter resultados e conclusões. Se o experimento foi planejado e executado corretamente, logo, não serão encontradas dificuldades nas análises decorrentes do tipo de método estatístico aplicado.

2.7 Conclusões e recomendações

Após os dados serem analisados, o experimento deverá apresentar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar uma ação. Nessa etapa são usados métodos gráficos para apresentar os resultados a outras pessoas envolvidas no processo. Devem ser realizadas sequências de acompanhamento, a análise dos resíduos decorrente do processo e testes de

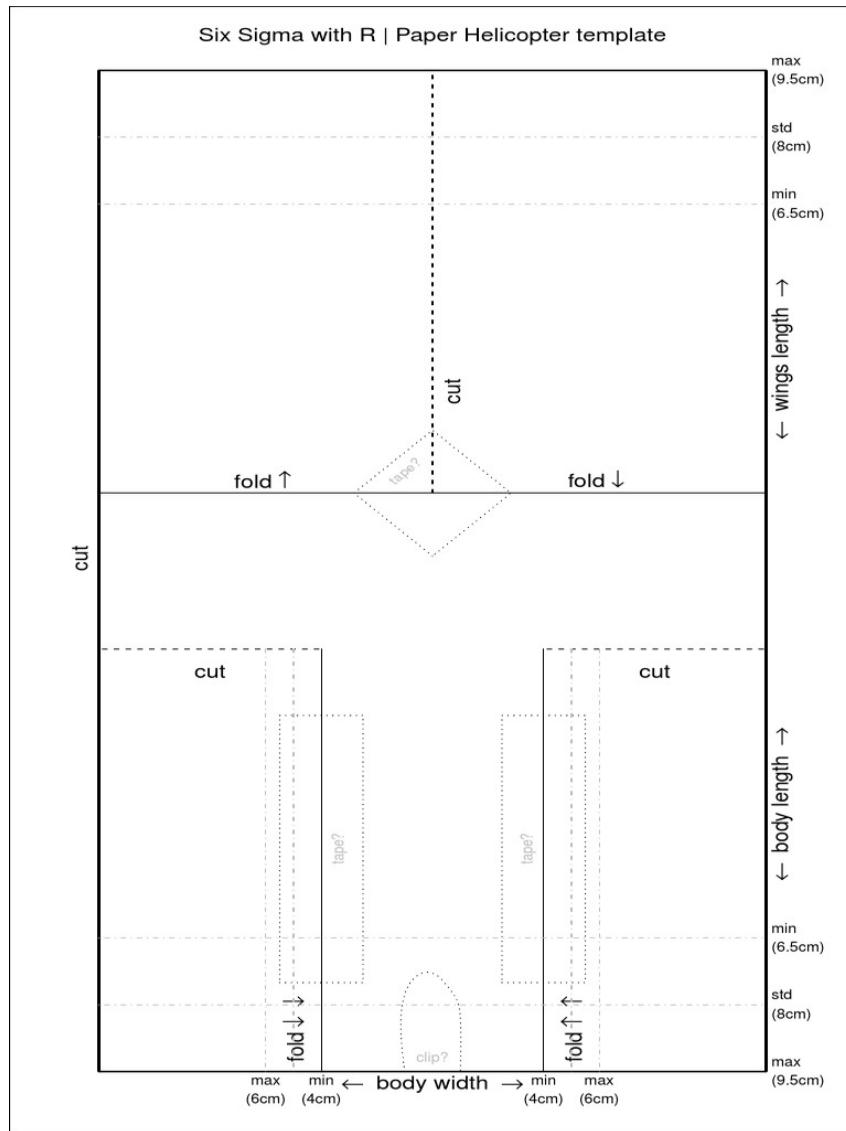
confirmação, para validar as conclusões do experimento.

3 EXPERIMENTO

Para aplicar os conceitos vistos na seção 2, foi proposto um desafio que consiste em modelar um experimento contendo um helicóptero de papel. O objetivo deste desafio é observar como a saída desejada, neste caso o tempo de voo, está relacionada às variáveis de entrada: altura, clipe e adesivos.

Para conceber o protótipo do helicóptero para o estudo, foi utilizado o modelo proposto pela metodologia *SixSigma*, conforme visto na Figura 1.

Figura 1: Modelo do helicóptero de papel.

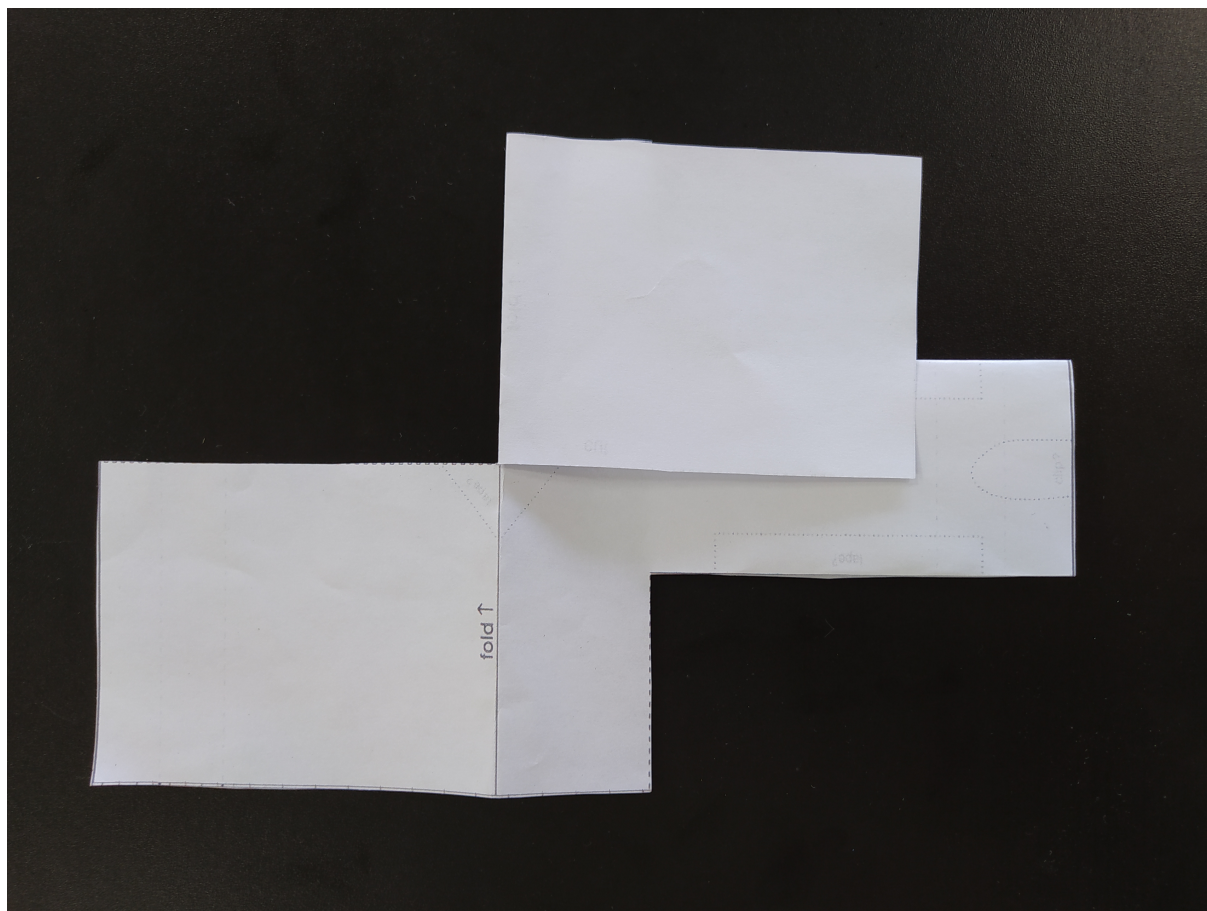


Fonte: (LOPEZ, 2018)

Seguindo as recomendações do *template*, foi obtido como modelo de configuração inicial o helicóptero visto na Figura 2. Este apresenta as asas e o corpo com o comprimento

máximo de 0,095 m que não deverá ser alterado. O seu tempo de voo é medido desde o momento em que é lançado da altura definida até o momento em que atinge o solo.

Figura 2: Helicóptero de papel.



Fonte: Autoria própria.

Para realizar os testes foram considerados alguns fatores que influenciam no tempo de voo, conforme vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Fatores considerados para alterar a estrutura.

Fatores	Configuração atual	Alteração permitida
Comprimento (asa e corpo) (m)	0,095	Não
Clipe	Não	Sim
Altura (m)	2,10	1,30
Adesivo (Asa)	Não	Sim
Adesivo (Corpo/Esquerdo)	Não	Sim
Adesivo (Corpo/Direito)	Não	Sim

Fonte: Autoria própria.

Por fim, foi construída a Tabela 2 que contém o tempo de voo para cada uma das pos-

síveis combinações dos fatores. Para as variáveis *clipe*, *Ad_top*, *Ad_esquerda* e *Ad_direita* o símbolo “+” indica a sua presença enquanto o “-” representa a sua ausência, já para a variável *Altura* o “+” retrata sua configuração inicial de 2,10 metros e o “-” representa a altura de 1,30 metros. O próximo passo é utilizar a ferramenta R para realizar o estudo de planejamento de experimentos (DOE) e analisar qual das configurações está exercendo uma maior influência no experimento, que será discutido na seção 4.

Tabela 2: Dados do experimento.

Altura	Clipe	Ad_top	Ad_esquerda	Ad_direita	Tempo
-	-	-	-	-	1,27
+	-	-	-	-	1,57
-	+	-	-	-	1,10
+	+	-	-	-	1,70
-	-	+	-	-	1,31
+	-	+	-	-	1,82
-	+	+	-	-	1,30
+	+	+	-	-	1,75
-	-	-	+	-	1,36
+	-	-	+	-	1,92
-	+	-	+	-	1,52
+	+	-	+	-	1,71
-	-	+	+	-	1,40
+	-	+	+	-	1,83
-	+	+	+	-	1,32
+	+	+	+	-	1,74
-	-	-	-	+	1,50
+	-	-	-	+	1,91
-	+	-	-	+	1,23
+	+	-	-	+	1,55
-	-	+	-	+	1,42
+	-	+	-	+	2,04
-	+	+	-	+	1,35
+	+	+	-	+	1,68
-	-	-	+	+	1,44
+	-	-	+	+	1,58
-	+	-	+	+	1,25
+	+	-	+	+	1,73
-	-	+	+	+	1,32
+	-	+	+	+	1,86
-	+	+	+	+	1,17
+	+	+	+	+	1,63

Fonte: Autoria própria.

4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

O modelo de regressão linear encontrado, considerando a interação entre dois elementos, é disposto a seguir.

```
##
## Call:
## lm(formula = tempo ~ (altura + clipe + ad_top + ad_esquerda +
##      ad_direita) + altura * clipe + altura * ad_top + altura *
##      ad_esquerda + altura * ad_direita + clipe * ad_top + clipe *
##      ad_esquerda + clipe * ad_direita + ad_top * ad_esquerda +
##      ad_top * ad_direita + ad_esquerda * ad_direita,
##      data = helicoptero)
##
## Residuals:
##      Min       1Q   Median       3Q      Max
## -0.180625 -0.055312 -0.009375  0.059687  0.120625
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)      1.24188    0.07069   17.569 6.99e-12 ***
## altura+          0.42125    0.07903    5.330 6.77e-05 ***
## clipe+         -0.04125    0.07903   -0.522  0.60885
## ad_top+         0.07875    0.07903    0.996  0.33386
## ad_esquerda+    0.17625    0.07903    2.230  0.04040 *
## ad_direita+     0.19125    0.07903    2.420  0.02779 *
## altura+:clipe+  -0.03250    0.07069   -0.460  0.65186
## altura+:ad_top+  0.09500    0.07069    1.344  0.19771
## altura+:ad_esquerda+ -0.04000    0.07069   -0.566  0.57932
## altura+:ad_direita+ -0.02000    0.07069   -0.283  0.78085
## clipe+:ad_top+  -0.03750    0.07069   -0.531  0.60304
## clipe+:ad_esquerda+  0.06750    0.07069    0.955  0.35382
## clipe+:ad_direita+ -0.14250    0.07069   -2.016  0.06092 .
## ad_top+:ad_esquerda+ -0.13500    0.07069   -1.910  0.07425 .
## ad_top+:ad_direita+ -0.00500    0.07069   -0.071  0.94448
## ad_esquerda+:ad_direita+ -0.21000    0.07069   -2.971  0.00901 **
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
## Residual standard error: 0.09996 on 16 degrees of freedom
## Multiple R-squared: 0.9161, Adjusted R-squared: 0.8375
## F-statistic: 11.65 on 15 and 16 DF, p-value: 6.57e-06
```

Pode-se observar que, para o nosso modelo, as variáveis que possuem relevância estatística, ou seja $Pr < 0.05$ são: altura ($Pr = 6.77e-05$), *ad_esquerda* ($Pr = 0.04040$), *ad_direita* ($Pr = 0.02779$) e *ad_esquerda:ad_direita* ($Pr = 0.00901$).

Considerando as variáveis que possuem relevância estatística, a equação linear que representa o modelo é descrita da seguinte forma:

$$tempo = média(tempo) + \frac{coef(altura)}{2}altura + \frac{coef(ad_esquerda)}{2}ad_esquerda + \frac{coef(ad_direita)}{2}ad_direita + \frac{coef(ad_esquerda : ad_direita)}{2}ad_esquerda : ad_direita$$

Desta forma, fazendo as devidas substituições, temos que:

$$tempo = 1.54 + \frac{0.42125}{2}altura + \frac{0.17625}{2}ad_esquerda + \frac{0.19125}{2}ad_direita + \frac{(-0.21)}{2}ad_esquerda : ad_direita$$

, logo:

$$tempo = 1.54 + 0.210625altura + 0.088125ad_esquerda + 0.095625ad_direita - 0.105ad_esquerda : ad_direita \quad (4.1)$$

É fácil de verificar na equação 4.1 que as variáveis *altura*, *ad_direita* e *ad_esquerda* influenciam positivamente no tempo de voo (possuem coeficientes positivos) enquanto a interação entre as variáveis *ad_esquerda:ad_direita* influencia negativamente (possui coeficiente negativo). Desta forma, considerando que nossas variáveis de entrada assumam apenas valores de -1 ou 1, para encontrar o maior valor de tempo de voo devemos atribuir valor positivo às variáveis *altura*, *ad_direita* e *ad_esquerda* e valor negativo à interação *ad_esquerda:ad_direita*, o que resulta em:

$$tempo_max = 1.54 + 0.2106 * (1) + 0.0881 * (1) + 0.0931 * (1) - 0.105 * (-1) = 2.04seg$$

De forma análoga, para encontrar o menor valor de tempo de voo devemos atribuir valor negativo às variáveis *altura*, *ad_direita* e *ad_esquerda* e valor positivo à interação *ad_esquerda:ad_direita*, resultando em :

$$tempo_min = 1.54 + 0.2106 * (-1) + 0.0881 * (-1) + 0.0931 * (-1) - 0.105 * (1) = 1.15seg$$

Os valores esperados para cada teste de lançamento do helicóptero ($Tempo$), bem como os previstos pelo modelo de regressão linear ($Tempo_p$) e seus respectivos resíduos podem ser visualizados na Tabela 3.

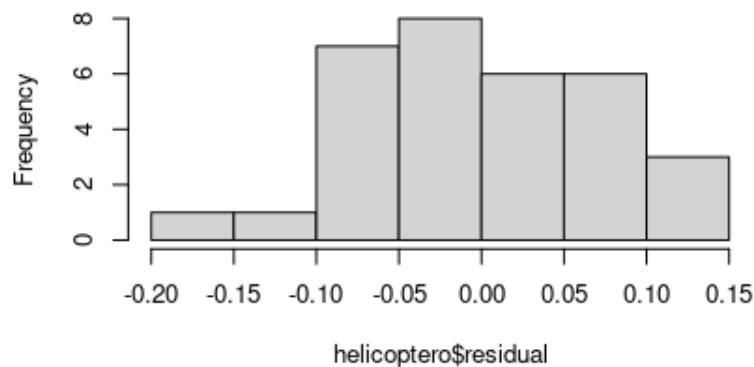
Tabela 3: Valores Previstos e Resíduos

Tempo	Tempo_p	Resíduo
1,27	1,241875	0,028125
1,57	1,663125	-0,093125
1,1	1,200625	-0,100625
1,7	1,589375	0,110625
1,31	1,320625	-0,010625
1,82	1,836875	-0,016875
1,3	1,241875	0,058125
1,75	1,725625	0,024375
1,36	1,418125	-0,058125
1,92	1,799375	0,120625
1,52	1,444375	0,075625
1,71	1,793125	-0,083125
1,4	1,361875	0,038125
1,83	1,838125	-0,008125
1,32	1,350625	-0,030625
1,74	1,794375	-0,054375
1,5	1,433125	0,066875
1,91	1,834375	0,075625
1,23	1,249375	-0,019375
1,55	1,618125	-0,068125
1,42	1,506875	-0,086875
2,04	2,003125	0,036875
1,35	1,285625	0,064375
1,68	1,749375	-0,069375
1,44	1,399375	0,040625
1,58	1,760625	-0,180625
1,25	1,283125	-0,033125
1,73	1,611875	0,118125
1,32	1,338125	-0,018125
1,86	1,794375	0,065625
1,17	1,184375	-0,014375
1,63	1,608125	0,021875

Fonte: Autoria própria.

De posse desses valores, para garantir a veracidade do modelo de regressão linear encontrado deve-se então realizar a análise dos seus resíduos, os quais espera-se possuírem distribuição normal e aleatoriedade em torno da regressão obtida. A Figura 3 exibe o histograma dos resíduos calculados e pode-se observar a distribuição normal dos valores, conforme o esperado.

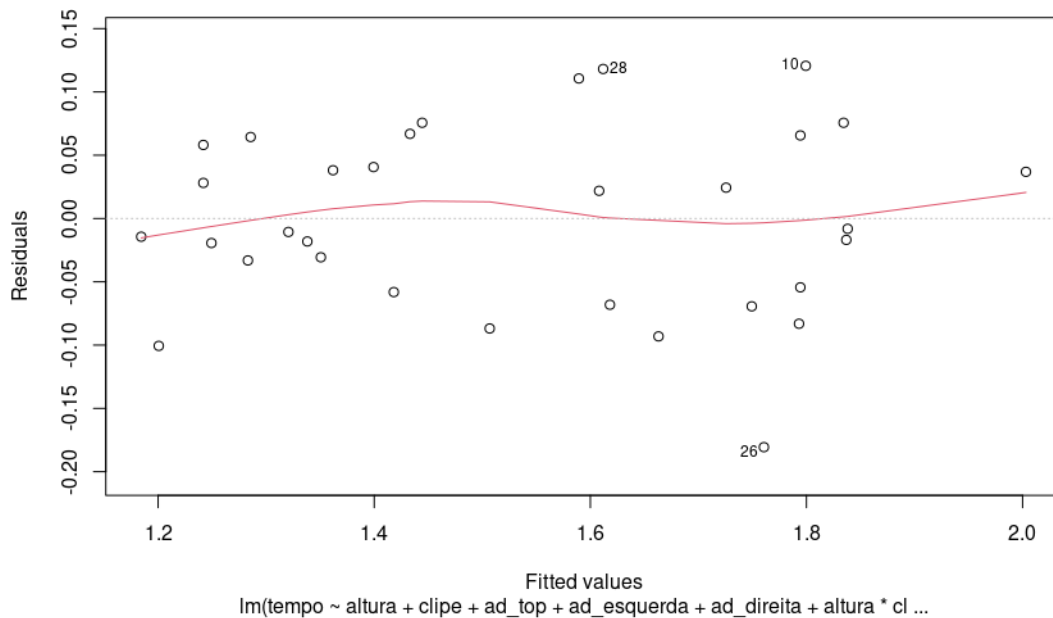
Figura 3: Histograma dos resíduos



Fonte: Autoria própria.

Ao usar a função **plot()** para o nosso modelo, o primeiro gráfico gerado é o *Residuals vs Fitted*, exibido na Figura 4, que dá uma indicação se há padrões não-lineares nos resíduos. Pode-se verificar na figura que o nosso modelo exibe uma regressão linear através de um certo número dos pontos, o que o valida sobre este aspecto.

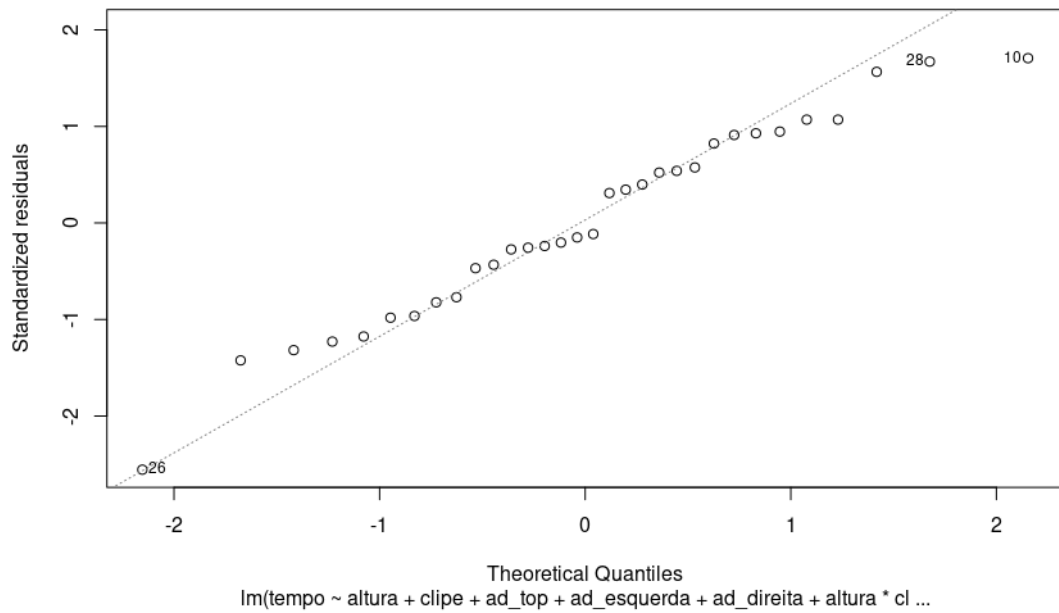
Figura 4: *Residuals vs Fitted*



Fonte: Autoria própria.

Uma outra forma de verificar a distribuição normal dos resíduos é através da Normal Q-Q. Podemos visualizar na Figura 5 a Normal Q-Q para o nosso modelo, na qual os resíduos seguem próximos à linha reta em diagonal, sendo uma boa indicação de que encontram-se normalmente distribuídos.

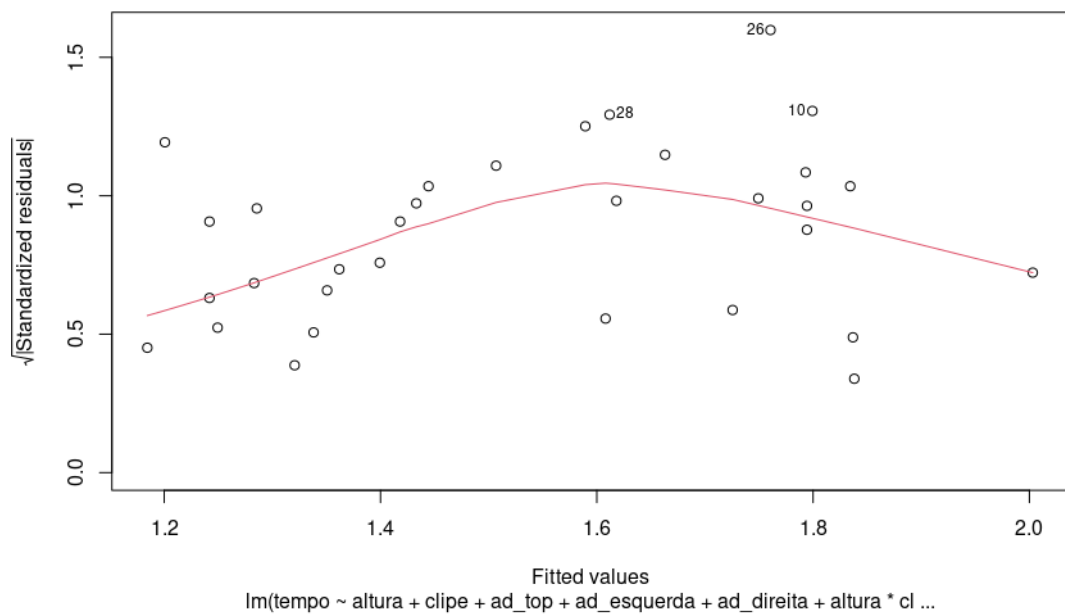
Figura 5: Normal Q-Q



Fonte: Autoria própria.

É necessário verificar também se os resíduos possuem homocedasticidade, ou seja, possuam variância comum ao longo da regressão. Pode-se observar no gráfico exibido na Figura 6 que os resíduos apresentam-se aleatoriamente pela linha, sem concentrar-se nem ao topo nem abaixo da mesma, comportamento que se assemelha ao esperado.

Figura 6: *Scale-Location*



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Com base na pesquisa elaborada neste relatório, foi possível constatar que o experimento com helicóptero de papel possui eficiência na implementação dos conceitos relativos ao DOE. Durante o processo experimental pôde-se observar a importância de uma escolha acertada para as variáveis de entrada e saída, bem como da aleatoriedade de cada teste ao evitar ao máximo, por exemplo, a interferência do vento durante a coleta de dados.

A partir da análise realizada é possível então inferir que o modelo de regressão linear encontrado na equação 4.1 é válido para o helicóptero de papel utilizado, com as variáveis *altura*, *ad_direita* e *ad_esquerda* possuindo relevância para a resposta observada na variável de saída (*tempo*), sendo sugerido a otimização destes fatores para a construção de um helicóptero que possua um tempo de voo maior.

REFERÊNCIAS

- COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematic approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, Taylor & Francis Group, v. 35, n. 1, p. 1–12, 1993. Citado na página 7.
- DÁVILA, V. H. V. H. L. *Experimentos planejados para a melhoria do processo*. 2018. <<https://www.ime.unicamp.br/~hlaachos/planejamento.pdf>>, Accessed: 2020-09-21. Citado na página 8.
- LOPEZ, E. *Design of the Paper Helicopter*. 2018. <<https://cran.r-project.org/web/packages/SixSigma/vignettes/HelicopterInstructions.pdf>>, Accessed: 2020-09-18. Citado na página 11.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros, 5^a. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013. Citado na página 8.
- NORTEGUBISIAN. *O que é design of experiments e como aplicar!* 2020. <<https://www.nortegubisian.com.br/blog/entenda-o-que-e-design-of-experiments-e-como-aplicar>>, Accessed: 2020-09-18. Citado na página 5.
- PETENATE, M. *Entenda o que é DOE - Design of experiments*. 2020. <<https://www.escolaedti.com.br/entenda-o-que-e-doe>>, Accessed: 2020-09-18. Citado na página 5.
- ROZENFELD, H. *Planejamento de Experimentos (DOE) - USP*. 2014. <<http://www5.eesc.usp.br/portaldeconhecimentos/index.php/por/Conteudo/Planejamento-de-Experimentos-DOE>>, Accessed: 2020-09-21. Citado na página 7.