

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS (DOE) - 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 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
2.0.1	Caracterização do problema	7
2.0.2	Escolha dos fatores de influência e níveis, e listar restrições	7
2.0.3	Seleção das variáveis de resposta	8
2.0.4	Determinação de um modelo de planejamento de experimento	8
2.0.5	Condução do experimento	8
2.0.6	Análise dos dados	8
2.0.7	Conclusões e recomendações	8
3	EXPERIMENTO	9
4	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	13
5	CONCLUSÃO	15
	REFERÊNCIAS	17

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.(O... , 2020)

Planejamento de Experimentos ou DOE, é a técnica usada 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.(ENTENDA... , 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. (ENTENDA... , 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.

2.0.1 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 como qualidade, engenharia, clientes e operadores, fazer um relato preciso sobre o problema para que dessa forma possa ser possível a compreensão do processo e uma possível solução do problema.

2.0.2 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, melhor manter baixo o número de níveis, geralmente dois níveis. 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.

2.0.3 Seleção das variáveis de resposta

Nesta etapa o responsável pelo experimento irá escolher a variável 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 reposta vem da teoria, especialistas, experiência e até experimentos anteriores.

2.0.4 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, ou se a formação de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas. Exemplos de tipos de planejamento são: Fatorial, Completamente aleatorizado com um único fator, Fatorial 2k em blocos, Fatorial 2k fracionário, Blocos aleatorizados, Blocos incompletos balanceados, blocos incompletos parcialmente balanceados, Quadrados latinos, Quadrados de Youden, Hierárquico e Superfície de resposta.

2.0.5 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.

2.0.6 Análise dos dados

Para analisar os dados deve-se empregar os métodos estatísticos, para se obter resultados e conclusões, não opiniões. Se o experimento foi planejado e executado corretamente, logo, o tipo de método estatístico não será complicado.

Geralmente utiliza-se as técnicas de apresentação e análise como ANOVA, regressão, plots e t test.

2.0.7 Conclusões e recomendações

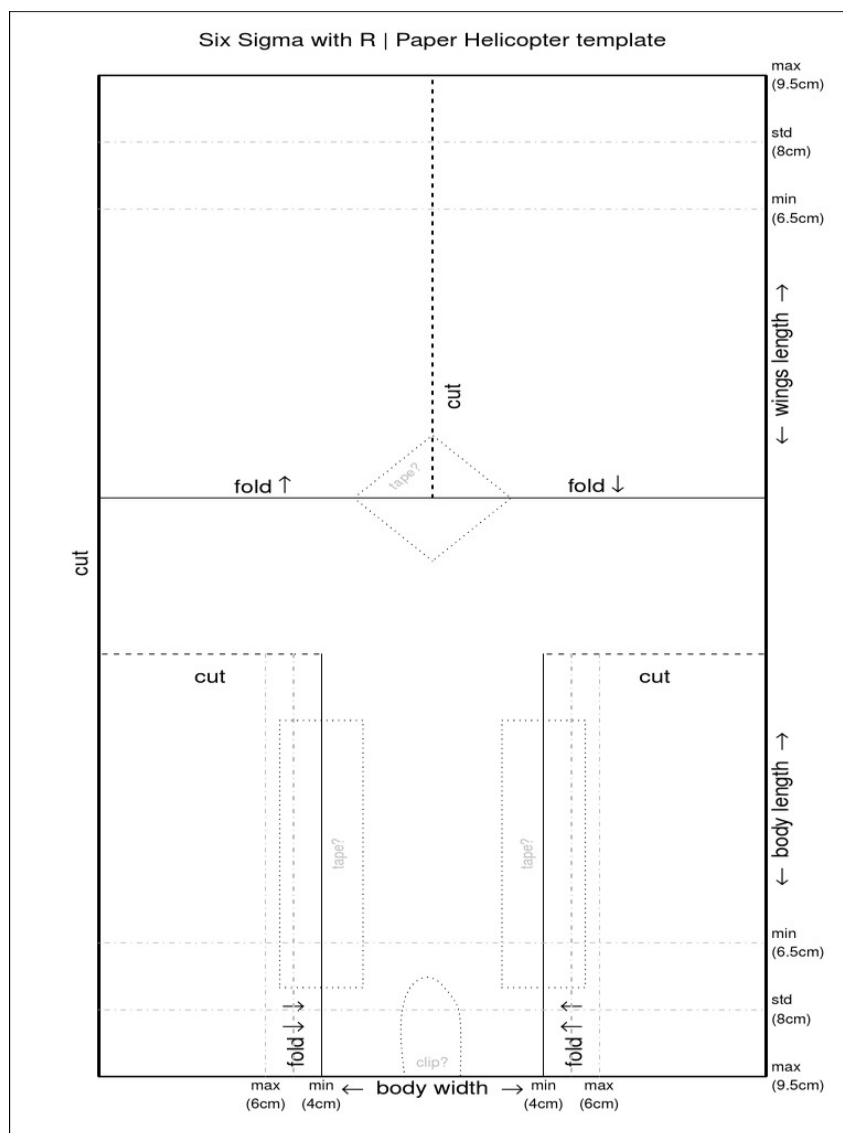
Após os dados serem analisados, o experimento deverá apresentar conclusões práticas sobre os resultados e recomendar uma ação. Nessa etapa são usados métodos gráficos para passar os resultados para outras pessoas. Também devem ser realizados sequências de acompanhamento e testes de confirmação para validar as conclusões do experimento.

3 EXPERIMENTO

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

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.

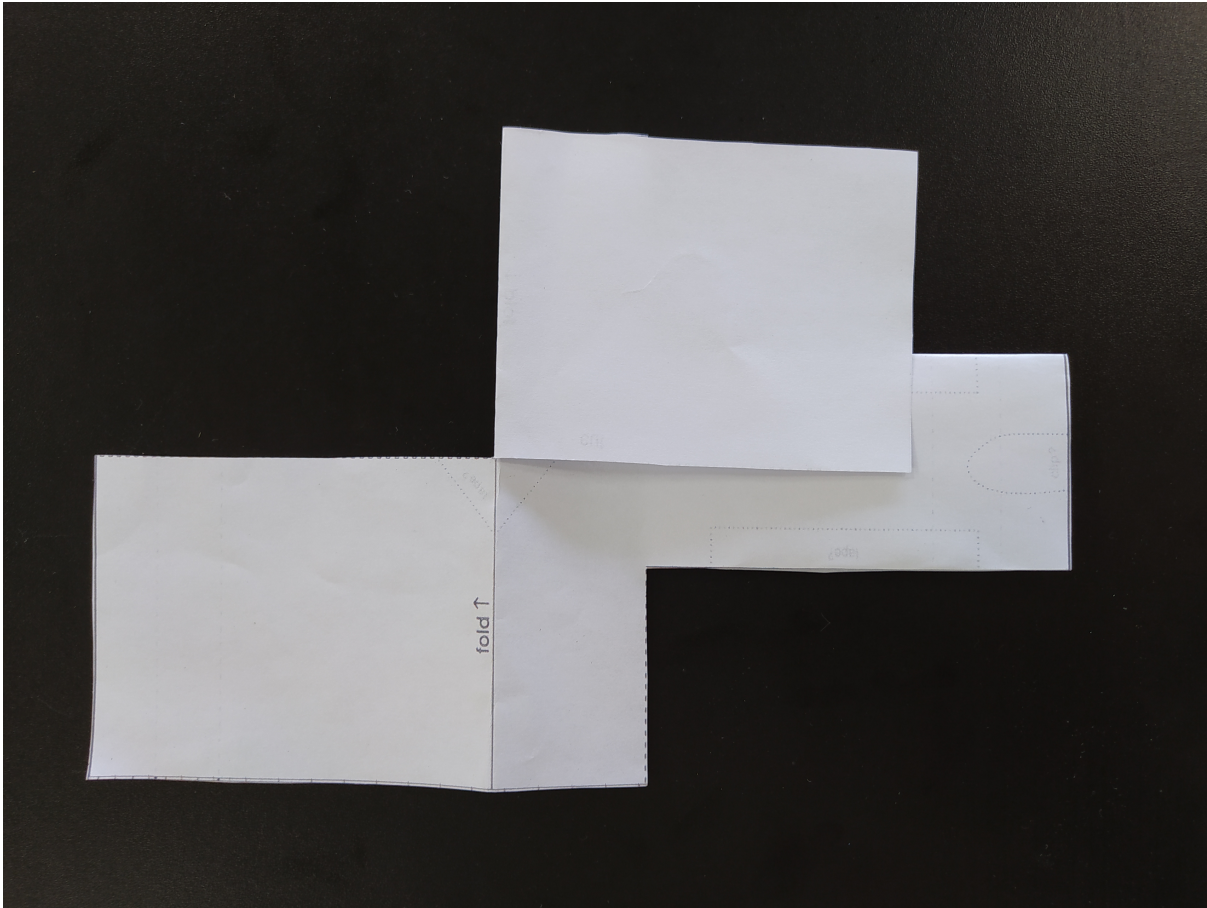


Fonte: (DESIGN..., 2018)

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 (9,5 cm), e 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 o mesmo 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)	1,30	2,10
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 possíveis 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 1,30 metros e o “-” representa a altura de 2,10 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
+	-	-	-	-	1,27
-	+	-	-	-	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 linear encontrado, considerando a interação entre dois elementos, é disposto a seguir.

```
## Call:
## lm(formula = score ~ (altura + clipe + ad_top + ad_left + ad_right) +
##      altura * clipe + altura * ad_top + altura * ad_left + altura *
##      ad_right + clipe * ad_top + clipe * ad_left + clipe * ad_right +
##      ad_top * ad_left + ad_top * ad_right + ad_left * ad_right,
##      data = helicoptero)
##
## Residuals:
##      Min      1Q  Median      3Q      Max
## -0.180625 -0.055313 -0.009375  0.059687  0.120625
##
## Coefficients:
##              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## (Intercept)      1.60813    0.07069   22.750 1.30e-13 ***
## altura-          0.18625    0.07903    2.357  0.03151 *
## clipe-          -0.42375    0.07903   -5.362 6.36e-05 ***
## ad_top-          0.00375    0.07903    0.047  0.96274
## ad_left-         0.14125    0.07903    1.787  0.09284 .
## ad_right-        0.18625    0.07903    2.357  0.03151 *
## altura:clipe-    -0.03250    0.07069   -0.460  0.65186
## altura:ad_top-   -0.03750    0.07069   -0.531  0.60304
## altura:ad_left-   0.06750    0.07069    0.955  0.35382
## altura:ad_right- -0.14250    0.07069   -2.016  0.06092 .
## clipe:ad_top-     0.09500    0.07069    1.344  0.19771
## clipe:ad_left-    -0.04000    0.07069   -0.566  0.57932
## clipe:ad_right-   -0.02000    0.07069   -0.283  0.78085
## ad_top:ad_left-   -0.13500    0.07069   -1.910  0.07425 .
## ad_top:ad_right-  -0.00500    0.07069   -0.071  0.94448
## ad_left:ad_right- -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 este modelo os elementos que possuem importância estatística, ou seja $Pr < 0.05$ são: altura ($Pr = 0.03151$), clipe ($Pr = 6.36e-05$), ad_right ($Pr = 0.03151$) e ad_left:ad_right ($Pr = 0.00901$).

Considerando os elementos de importância estatística, a equação que representa o modelo é descrita da seguinte forma:

$$score = mean(scores) + \frac{coef(altura)}{2}altura + \frac{coef(clipe)}{2}clipe + \frac{coef(ad_right)}{2}ad_right + \frac{ad_left : ad_right}{2}ad_left : ad_right$$

Desta forma, fazendo as devidas substituições, temos que:

$$score = 1.54 + \frac{0.18625}{2}altura + \frac{-0.42375}{2}clipe + \frac{0.18625}{2}ad_right + \frac{-0.21}{2}ad_left : ad_right$$

$$score = 1.54 + 0.0931altura - 0.2119clipe + 0.0931ad_right - 0.105ad_left : ad_right$$

$$score_max = 1.54 + 0.0931 * (1) - 0.2119 * (-1) + 0.0931 * (1) - 0.105 * (-1) = 2.04$$

$$score_min = 1.54 + 0.0931 * (-1) - 0.2119 * (1) + 0.0931 * (-1) - 0.105 * (1) = 1.04$$

5 CONCLUSÃO

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.

DESIGN of the Paper Helicopter. 2018. <<https://cran.r-project.org/web/packages/SixSigma/vignettes/HelicopterInstructions.pdf>>, note = Accessed: 2020-07-18. Citado na página 9.

ENTENDA o que é DOE - Design of experiments. 2020. <<https://www.escolaedti.com.br/entenda-o-que-e-doe>>, note = Accessed: 2020-07-18. Citado na página 5.

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>>, note = Accessed: 2020-07-18. Citado na página 5.