



APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI NO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DO FOGUETE “THANOS 1” DA EQUIPE CARCARÁ ROCKET DESIGN

Alberth Rodolfo Ferreira Viana, alberth-rodolfo@hotmail.com

Universidade Estadual do Maranhão, Cidade Universitária Paulo IV, n 1000 – Jardim São Cristóvão

Resumo. *Sistemas de recuperação de foguetes são compostos basicamente por dois componentes principais: o paraquedas e o sistema de ejeção. Esses sistemas são projetados e desenvolvidos desde o início dos estudos no setor aeroespacial. O propósito desse conjunto é recuperar o foguete de forma segura, sem danos na sua estrutura e principalmente na eletrônica embarcada. Para que esse objetivo seja atingido há a necessidade de pesquisas constantes nesse setor, visando projetar sistemas cada vez mais eficientes e seguros seguindo logicamente, os parâmetros de missão e de projeto do espaçomodelo. Esse trabalho tem como foco o sistema de ejeção do foguete “Thanos 1” da equipe Carcará Rocket Design, como o método de Taguchi foi utilizado para o desenvolvimento do mesmo, fatores de qualidade, e parâmetros de interferência (ruídos).*

Palavras chave: *Sistema de ejeção. Método de Taguchi. Fatores de qualidade. Ruídos.*

1. INTRODUÇÃO

Como diz Mahler (2014), a história da humanidade é marcada por pessoas que, motivadas por um sonho, pelo conhecimento, criatividade, ou as vezes por pura curiosidade, encontraram soluções que mudaram não apenas as nossas vidas, mas o destino de todo o planeta.

E Palmerio (2017) reforça que, a compulsão do homem em sondar e transpor o espaço é inata em nossa espécie, assim como aquela dirigida a tantos outros mistérios e fronteiras. Trata-se de uma paixão inoculada em nós, que nos leva à busca do conhecimento e ao enfrentamento de desafios sob o risco da própria vida. Desde sua origem, o homem emprega sua crescente capacidade intelectual como instrumento de realização de ideais e de impulsos, que o levam a explorar aspectos da vida em toda a escala do visível e do invisível.

É possível observar que o ser humano tem por natureza o senso de descoberta e desenvolvimento, e foi justamente esse senso, que fez com que em meados do século XX, os primeiros motores para espaçomodelos foram desenvolvidos por Orville Carlise um pirotécnico, e seu irmão Robert que era um aeromodelista, os dois originalmente desenvolveram foguetes e motores para fins educativos. Mesmo com inúmeros insucessos no lançamento de foguetes naquela época, a persistência de entusiastas desse setor e o desenvolvimento de pesquisas na área aeroespacial, levaram a um grande crescimento dessa ciência e um crescente aumento na confiabilidade dessas práticas. Todo esse crescimento pode ser visto hoje por meio da popularização de competições universitárias de desenvolvimento aeroespacial, e por meio do imenso desenvolvimento tecnológico das grandes empresas desse setor, que desenvolvem veículos espaciais cada vez mais seguros e com custo benefício atraentes.

1.1 Sistema de Ejeção

Em foguetes universitários, utilizados normalmente em competições, o mesmo é dividido em sistemas específicos dentre os principais, tem-se: propulsão, eletrônica, aerodinâmica, recuperação e estrutura. Outras divisões podem ser encontradas, mas normalmente elas serão particularidades desses 5 principais setores.

O sistema de recuperação é composto basicamente pelo paraquedas e sistema de ejeção. Esse conjunto é responsável por garantir a segurança do foguete e das pessoas quando o protótipo se chocar ao solo, isso se dá pelo fato de que o paraquedas faz com que ele caia a uma velocidade predeterminada pelo grupo que projetou o sistema.

Como diz o manual de replicação da Cobruf e DPE (2015), o Subsistema de Recuperação de um foguete é um componente essencial para o bom funcionamento do veículo como um todo, bem como para a segurança de todas as pessoas envolvidas no seu lançamento – seja por estar ativamente participando do evento, ou por esta assistindo a ele, ou simplesmente por estar nas suas proximidades. É ele o que determina onde o foguete irá retornar ao solo, como acontecerá a descida, o que restará do impacto e como encontrar o veículo (ou o que sobrou dele).

Para esse trabalho será analisado especificamente o sistema de ejeção, que é particularmente responsável por ejeção de qualquer material, componentes do foguete ou pessoas (no caso de veículos espaciais que transportam pessoas), dependendo do caso.

Atualmente é possível encontrar diversas formas de ejeção. Em alguns foguetes tripulados como Saturno V e Áries são capazes de arremessar os astronautas para longe do foguete caso a missão falhe e precise ser abortada. Este sistema é conhecido como "Torre de Abortamento de Lançamento" (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009). Este sistema é bastante parecido com os assentos ejetáveis de aeronaves militares, podendo ser considerados também como foguetes de resgate por serem capazes de impulsionar os pilotos para longe de suas aeronaves (BONSOR, 2008).

Palmerio (2017) também diz que nos foguetes de sondagem, são empregadas pontas ejetáveis para permitir a realização de experimento na fase não atmosférica do voo. Em alguns experimentos, os equipamentos situados no interior da ogiva precisam ser expostos, acima da atmosfera. Portanto, são empregadas ogivas ejetáveis como mostrado na Fig. 1, para esse fim. A ejeção pode ser lateral, por desfolhamento, ou frontal.

Figura 1. Ogiva ejetável (JUNIOR, 2004)



Como foi observado são inúmeras formas de ejeção, cada uma escolhida de acordo com o objetivo da missão. Normalmente para foguetes universitários como é o caso, as formas mais comuns são: por mola, por explosão (minifoguetes), gás comprimido, mecanismo ativado por diferença de pressão (mecanismo a base de mercúrio por exemplo), por meio de atuadores, por ligas, ou por travas eletromagnéticas.

Vendo o quão importante e essencial é o sistema de ejeção é para o espaçomodelo, foi utilizado o método de Taguchi no desenvolvimento do conjunto de recuperação do foguete "Thanos 1" da equipe Carcará Rocket Design, que participou da Competição Brasileira Universitária de Foguetes no ano de 2018, visando por meio dessa ferramenta de qualidade, desenvolver um sistema com a mais alta eficiência e confiabilidade.

1.2 Método de Taguchi

Genichi Taguchi foi um engenheiro e estatístico japonês, que com o propósito de melhorar a qualidade de produtos manufaturados criou uma metodologia que utiliza métodos estatísticos para alcançar esse objetivo, metodologia essa, que leva seu nome. De acordo com Antony e Antony (2001), Dr. Genichi Taguchi foi um consultor de gestão que desenvolveu e promoveu uma filosofia e metodologia para melhoria contínua de qualidade em produtos e processos. Dentro desta filosofia, Taguchi mostra como a estatística de projetos de experimentos (SDOE ou DOE) pode ajudar engenheiros a projetar e fabricar produtos de alta qualidade e baixo custo.

Segundo Lima, *et al.*, (2011), o planejamento de experimentos é a metodologia mais adequada para estudar vários fatores de processo e a complexidade de suas interações, de forma a aumentar a probabilidade de solucionar problemas, através de análises estatísticas. Essa metodologia é considerada poderosa para a melhoria da qualidade e produtividade, tendo sido, nos últimos anos, cada vez mais aplicada na indústria brasileira, principalmente pelas do segmento automobilístico (SILVA e SILVA, 2008).

Pimenta, *et al.*, (2012) afirma que, O método Taguchi possibilita a investigação das variáveis de entrada do processo e suas interações com número reduzido de experimentos. O método torna possível reduzir significativamente a quantidade de experimentos originalmente planejados, por se tratar de uma estrutura composta por matrizes fracionadas saturadas, que proporciona grande redução de custos relativos à experimentação, podendo ser implementado em situações que envolvam produtos e/ou processos.

Taguchi (1986), defende o uso de projetos de matriz ortogonal para atribuir os fatores escolhidos para o experimento. A maioria são desenhos de matriz ortogonal comumente são usados L8 (oito ensaios experimentais), L16 ou L18. Para definição dos experimentos, são utilizados vários arranjos ortogonais (matrizes experimentais), genericamente designados por L_n , onde "n" representa o número de experiências a realizar. As matrizes mais usuais são as L4, L8, L9, L12, L16,

L18, L27 e L32 para fatores de dois e três níveis. As matrizes são utilizadas no projeto de experimentos, com a finalidade de estudar as variáveis significativas e suas interações, que ocorrem ao mesmo tempo (PIMENTA, *et al.*, 2012).

É possível observar como uma matriz experimental é formada na tab. 1, onde a mesma é do tipo L4, que consiste em quatro linhas e três colunas, dentre os quais cada linha representa um experimento específico e cada coluna identifica conjuntos de parâmetros de projeto. Na primeira condução, as três variáveis de projeto pertencem ao nível inferior (nível 1). Na segunda condução, o primeiro parâmetro é do nível 1 e os demais do nível 2, e dessa forma segue sendo preenchida a matriz.

Tabela 1. Matriz experimental L4 (Autor, 2019)

Número do Experimento	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Vale pontuar que para os demais perfis de matriz (L8, L12...), deve ser consultado na literatura como a mesma deve ser preenchida.

É possível ressaltar algumas formas de se utilizar a estatística experimental, como:

- Separar dentre várias variáveis, aquelas de maior significância;
- Compreender como cada variável afeta as propriedades do produto e/ou processo;
- Encontrar combinações ideais de variáveis.

Segundo Pillet (1992), a realização de um planejamento experimental consiste em adotar uma estratégia de otimização para condução mínima de ensaios. Ou seja, considerando o objetivo do estudo e que há diferentes estratégias, se torna conveniente dividi-las em: pesquisa de valor nominal (- fatores c/ + níveis) ou pesquisa de valores extremos (+ fatores c/ - níveis).

2. METODOLOGIA

O estudo e análises para o desenvolvimento do sistema de ejeção foi feito de maneira prática, utilizando a metodologia de projeto robusto desenvolvida por Taguchi. Para compor a matriz experimental foram escolhidos fatores de mesma constante, nesse caso todos os fatores possuem a constante de força dada em Newton (N), e todas elas foram calculadas utilizando formulas físicas já conhecidas na literatura, ou foram retiradas do software de simulação de foguetes OpenRocket 2015.

Como parâmetros de qualidade, baseado nas forças que mais influenciam na eficiência da ejeção, foram escolhidas a força peso que o paraquedas exerce sobre a mola, a força da mola sobre o paraquedas, e a força de arrasto crítica (quando o foguete cai perpendicularmente ao solo) sobre a ogiva.

Para o cálculo da força peso exercida pelo paraquedas sobre o sistema, foi utilizado a Eq. (1).

$$P = m * g \quad (1)$$

Onde,

P é a força peso,

m é a massa (paraquedas),

g é a aceleração da gravidade.

Para o cálculo da força exercida pela mola sobre o paraquedas, foi utilizado a Eq. (2).

$$F = K * x \quad (2)$$

Onde,

F é a força exercida pela mola,

K é a constante elástica da mola,

x é a deformação máxima da mola.

E a Eq. (3) mostra o cálculo da força de arrasto exercida sobre a ogiva.

$$Fa = \frac{Cd * \rho * V^2 * A}{2} \quad (3)$$

A. R. F. Viana

Aplicação do método de Taguchi no desenvolvimento do sistema de recuperação do foguete "Thanos 1" da equipe Carcará Rocket Design

Onde,

F_a é a força de arrasto,

C_d é o coeficiente de arrasto,

ρ é a densidade do ar,

V é a velocidade de descida do foguete,

A é a área da ogiva.

Tendo em vista que para a criação da matriz ortogonal são necessários 2 níveis, foram calculados para cada parâmetro de qualidade dois valores, baseados em dois paraquedas de tamanho e massa diferentes como visto nas Fig. 2 e 3, duas molas com constantes diferentes Fig. 4, e ogivas com acabamento superficial diferentes (fornece valores de coeficiente de arrasto diferentes) Fig. 5 e 6.

Figura 2. Paraquedas usado para o nível 1 (Autor, 2018)



Figura 3. Paraquedas usado para o nível 2 (Autor, 2018)



Figura 4. Molas utilizadas para níveis 2 e 1 respectivamente (Autor, 2018)

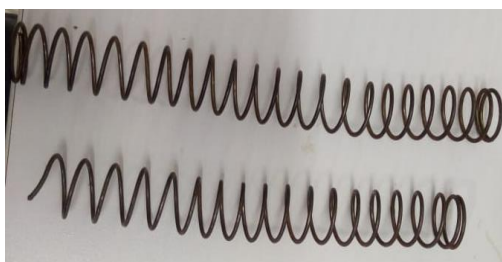


Figura 5. Cd total da ogiva polida (OpenRocket, 2015)

Componente	Pressão C_D	Base C_D	Atrito C_D	Total C_D
OGIVA	0,00 (0%)	0,00 (0%)	0,02 (7%)	0,03 (8%)
TUBO 01	0,00 (0%)	0,00 (0%)	0,08 (26%)	0,08 (26%)
EMPENAS PARA SPIN	0,00 (1%)	0,00 (0%)	0,00 (1%)	0,00 (1%)
TUBO 02	0,00 (0%)	0,13 (41%)	0,05 (15%)	0,18 (57%)
EMPENAS PRINCIPAIS	0,01 (3%)	0,00 (0%)	0,02 (5%)	0,03 (8%)
Total	0,01 (4%)	0,13 (41%)	0,17 (54%)	0,32 (100%)

Figura 6. Cd total da ogiva áspera (OpenRocket, 2015)

Componente	Pressão C_D	Base C_D	Atrito C_D	Total C_D
OGIVA	0,00 (0%)	0,00 (0%)	0,05 (15%)	0,05 (15%)
TUBO 01	0,00 (0%)	0,00 (0%)	0,08 (24%)	0,08 (24%)
EMPENAS PARA SPIN	0,00 (1%)	0,00 (0%)	0,00 (1%)	0,00 (1%)
TUBO 02	0,00 (0%)	0,13 (38%)	0,05 (14%)	0,18 (52%)
EMPENAS PRINCIPAIS	0,01 (3%)	0,00 (0%)	0,02 (5%)	0,03 (8%)
Total	0,01 (4%)	0,13 (38%)	0,20 (58%)	0,35 (100%)

Mostrado todos os dados de entrada do experimento resta deixar claro que os fatores de interferência (ruídos) foram: força demasiadamente grande sendo exercida sobre a base do sistema (mola), ineficiência da força exercida pela mola sobre o paraquedas para que ocorra a ejeção do mesmo, e a força de arrasto conseguir superar a força da gravidade somada a força de ejeção. Para a obtenção dos fatores de ruídos foi utilizado o software Minitab 2018.

3. RESULTADOS

Tendo calculado todas as forças por meio das Eq. (1), Eq. (2), e Eq. (3), e utilizando o sistema L4 (2^3), onde são relacionados 4 experimentos com 3 parâmetros de qualidade com 2 níveis, obteve-se os dados da Tab. 2.

Tabela 2. Fatores que interferem na eficiência do sistema de ejeção quantificados em Newtons (Autor, 2019)

FATORES	NÍVEL 1	NÍVEL 2
FORÇA DO PARAQUEDAS SOBRE O SISTEMA (P/S)	1,11 N	4,19 N
FORÇA DA MOLA SOBRE O PARAQUEDAS (M/P)	27,68 N	66,56 N
FORÇA DE ARRASTO SOBRE OGIVA (A/S)	98,46 N	59,07 N

Onde as massas dos paraquedas para os níveis 1 e 2 foram 114g e 428g respectivamente, as constantes elásticas (K) das molas utilizadas nos níveis 1 e 2 com deformação x de 0,09m foram 307,5N/m e 739,5N/m respectivamente, e a aceleração da gravidade utilizada foi 9,81m/s².

A Tabela 3 mostra a matriz ortogonal Tab. 1, depois de preenchida com os valores da Tab. 2.

Tabela 3. Matriz ortogonal com valores do experimento (Autor, 2019)

NÚMERO DO EXPERIMENTO	COLUNA		
	1	2	3
1	1,11 N	27,68 N	98,46 N
2	1,11 N	66,56 N	59,07 N
3	4,19 N	27,68 N	59,07 N
4	4,19 N	66,56 N	98,46 N

Como o objetivo é encontrar quais fatores influenciam mais para o sucesso no funcionamento do sistema, e qual fator de interferência influencia mais negativamente, foi retirado um valor base (mínimo) para que o sistema fosse classificado como eficiente. Considerando que no momento que ocorre a ejeção (queda do foguete), a única força contrária ao movimento é a força de arrasto, tem-se essa força como valor mínimo. Sendo assim vamos ter que o somatório da força peso do paraquedas sobre o sistema, com a força da mola sobre o paraquedas, com a força peso do foguete, devem ser maiores que a força de arrasto, como mostra a Eq. (4).

$$Fp + Fm + P > Fa \tag{4}$$

Onde,

Fp é a força peso do paraquedas sobre o sistema,

Fm é a força da mola sobre o paraquedas,

P é a força peso do foguete (para massa de 22kg),

Fa é a força de arrasto.

A Eq. (4) aplicada aos quatro experimentos da os seguintes valores:

EXP 1 – 244,61 > 98,46

EXP 2 – 283,49 > 98,46

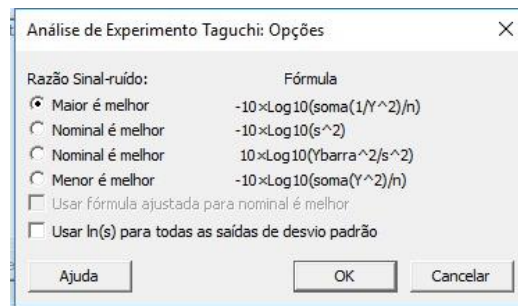
EXP 3 – 247,69 > 98,46

EXP 4 – 286,57 > 98,46

3.1 Obtenção de sinal/ruído

Posteriormente a obtenção dos quatro dados, os mesmo foram aplicados no software Minitab para que fosse possível encontrar os dados de sinal/ruído. Para tanto foi utilizado a relação “maior é melhor” como mostrado na Fig. 7, devido ao fato de que se busca o maior valor para vencer a força de arrasto.

Figura 7. Razão sinal - ruído (Minitab, 2018)



A Figura 8 mostra o comparativo das forças, onde é possível observar a que mais interfere na eficiência do sistema.

Figura 8. Resultado da análise sinal-ruído (Minitab, 2018)

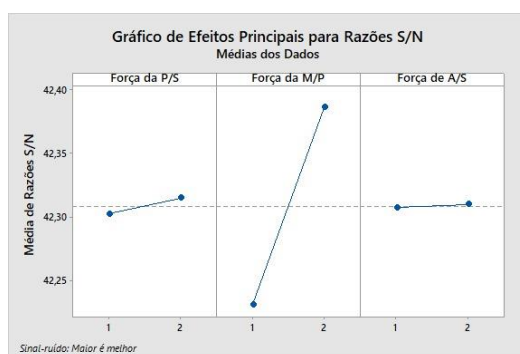
Maior é melhor

Nível	Força da P/S	Força da M/P	Força de A/S
1	42,30	42,23	42,31
2	42,31	42,39	42,31
Delta	0,01	0,16	0,00
Posto	2	1	3

Como pode ser notado a relação “força da mola sobre o paraquedas (M/P), ocupa o posto 1, que indica a relação que mais influencia no sistema, ou seja, a força que a mola exerce é o maior diferencial para que o paraquedas seja ejetado com sucesso.

O programa Minitab também mostrou o gráfico Fig. 8, reforçando os dados exibidos na Fig. 7.

Figura 9. Gráfico da razão sinal-ruído (Minitab, 2018)



É possível observar que linha da “Força da M/P”, tem uma inclinação bem acentuada quando comparada a linha média (centro do gráfico), reforçando que dentre todas as relações, essa é a que mais influencia.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no experimento, foi possível observar com maior exatidão o valor mínimo de força necessária para proporcionar confiabilidade e eficiência ao sistema de ejeção (para esse sistema específico é 98,46 N), também mostrou que apesar de todos os quatro experimento proporcionarem confiabilidade e segurança ao conjunto de recuperação por terem valores acima do valor base, o que se mostrou melhor dentre eles foi o experimento 4 (286,57 N), satisfazendo com maior afinco a premissa “maior é melhor”.

É possível tirar como conclusão também que dentre todas os parâmetros de qualidade, o fator “força da mola sobre o paraquedas” é o grande diferencial para que se tenha um sistema com os mais altos índices de confiabilidade, em segundo fica o fator “força peso do paraquedas sobre a mola” e por último “a força de arrasto sobre todo o sistema” como pode ser revisto no gráfico da Fig. 8.

A nível de projeto a utilização do método de Taguchi, por meio dessa matriz ortogonal de experimentos foi essencial para que fosse possível ter um projeto embasado em um excelente método de qualidade proporcionando segurança aos outros sistemas que compõe o foguete e as pessoas que estariam próximas ao local de pouso do espaçomodelo.

Já a nível de equipe foi imprescindível o conhecimento adquirido sobre o assunto, pois vendo o êxito obtido na implantação desse método na subequipe de recuperação, o mesmo recebeu aceitação de outras subequipes do projeto, em outros sistemas específicos, tornando o projeto do foguete como um todo, mais seguro, e tornando o seu funcionamento mais eficiente.

5. REFERÊNCIAS

Antony, J. e Antony, F.J., 2001. “Teaching the Taguchi method to industrial engineers”. *Work study*, Vol. 50, pp. 141-149.

A. R. F. Viana

Aplicação do método de Taguchi no desenvolvimento do sistema de recuperação do foguete "Thanos 1" da equipe Carcará Rocket Design

- Bonsor, K., 2008. "HowStuffWorks. Como funcionam os assentos ejetáveis", 27 Jun. 2019 <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/assentosejetaveis4.htm>>.
- COBRUF, DPE, 2015. "Foguete padrão da Cobruf: subsistema de recuperação". Manual de replicação. Jun. 2015.
- Franco, Jr., Odilon, C., 2004. VLS-1 Sistemas de separação de estágios – revisão crítica – (síntese), Workshop – IAE, São José dos Campos, novembro de 2004.
- INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009. "Inovação Tecnológica. NASA testa nave de escape de astronautas", 26 Jun. 2019 <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=nasa-testa-nave-escape-astronautas&id=010130090708>>.
- Pillet, M., 1992. *Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi*, Paris, 1ª edição.
- Lima, V. B. S., Balestrassi, P. P., Paiva, A. P., 2011. "Otimização do desempenho de amplificadores de radiofrequência banda larga: uma abordagem experimental". *Produção*, v. 21, n. 1, p. 118-131, jan/mar, 2011.
- Mahler, W.F.C., 2014. *Projeto de foguete para lançamento de nono satélites*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Minitab. Minitab 18 Statistical Software. 2018.
- OpenRocket. OpenRocket Simulator. 2015.
- Palmerio, A.F., 2017. *Introdução à tecnologia de foguetes*, São José dos Campos, 2ª edição.
- Pimenta, C. D., Silva, M. B., Ribeiro, R. B., Claro, F. A. E., 2012 "Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da decarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização". *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Ano 7, nº 2, abr-jun/2012, p. 97-108.
- Silva, H. A., Silva, M. B., 2008. "Aplicação de um projeto de experimentos (DOE) na soldagem de tubos de zircaloy-4". *Produção & Engenharia*, v. 1, n. 1, p. 41-52, set./dez. 2008.
- Taguchi, G., 1986. *Introduction to quality engineering*, Tokyo, 1ª edição.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O autor é o único responsável pelas informações incluídas neste trabalho.