

Tuiuiu Papercóptero: Um exemplo didático para a metodologia Seis Sigma na otimização de duas respostas simultâneas utilizando planejamento de experimentos.

Thiago P. Arouca Toledo (UNIFEI) thiagarouca@hotmail.com
Pedro Paulo Balestrassi (UNIFEI) pedro@iem.efei.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma aplicação didática para a fase de Melhoria do ciclo DMAIC da metodologia Seis Sigma. Tal aplicação faz uma adaptação de um trabalho clássico de Box, Bisgaard e Fung (2000) que descreve a construção de um helicóptero de papel. Foi assim criada uma empresa fictícia que desenvolve um produto denominado Tuiuiu Papercóptero. Em tal aplicação considera-se a otimização de um planejamento fatorial fracionado com sete fatores e duas respostas simultâneas em um contexto de ensino ativo e cooperativo.

Palavra-Chave: DOE, Seis Sigma, Otimização.

1. Introdução

O gerenciamento Six Sigma é rigoroso na busca da redução da variabilidade existente em todos os processos críticos de uma organização buscando a melhoria da qualidade e satisfação de seus clientes. Na metodologia Seis Sigma busca-se atingir níveis de 3.4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO) para as características críticas de qualidade de um processo ou produto (BREYFOGLE, 2000). O método de controle utilizado para alcançar tais índices é comumente chamado de *DMAIC*, iniciais de **D**efinir, **M**edir, **A**nalisar, **I**mprovement (melhoria) e **C**ontrolar.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma aplicação didática para a fase de Melhoria do ciclo DMAIC da metodologia Seis Sigma. Tal aplicação faz uma adaptação de um trabalho clássico de Box, Bisgaard e Fung (2000) que descreve a construção de um helicóptero de papel. Foi assim criada uma empresa fictícia denominada Papercópteros do Brasil SA que tem o Tuiuiu Papercóptero como seu mais importante produto de mercado. Em tal aplicação considera-se a otimização de um planejamento fatorial fracionado com sete fatores e duas respostas simultâneas em um contexto de ensino ativo e cooperativo. Toda a aplicação pode ser reproduzida a partir do presente trabalho usando o programa Minitab® e será descrita ao longo deste artigo.

2. O Seis Sigma e a Otimização de Respostas

Seis Sigma é um conceito que se encontra entre o cliente e o produto tendo como objetivo conseguir a excelência na competitividade pela melhoria contínua dos processos. O termo sigma mede a capacidade do processo em operar livre de falhas ou erros.

A metodologia Seis Sigma utiliza ferramentas e métodos estatísticos para **definir** problemas e situações a melhorar, **medir** para obter informações e dados, **analisar** a informação, incorporar a **melhoria** e finalmente **controlar** os processos a fim de se alcançar um ciclo de melhoria contínua. Esta metodologia para melhoria de processos faz com que se atinjam níveis de defeitos de 3,4 ppm (defeitos por milhão) para as características críticas de qualidade (CTQ's) dos clientes (HARRY, 1998).

O padrão de controle adotado pela metodologia Seis Sigma chamado DMAIC, que pode ser visto na tabela 1:

Fases	Características
Define (Definir)	Estabelecimento dos CTQ's dos clientes e definição do projeto a ser desenvolvido.
Measure (Medir)	Coleta de dados do desempenho do processo, análise do sistema de medição e cálculo da capacidade do processo.
Analysis (Análise)	Levantamento de potenciais causas básicas de variação e definição da capacidade Seis Sigma do processo atual estabelecendo-se os objetivos de melhoria do projeto.
Improvement (Melhoria)	Tomada de decisões sobre o processo. É onde a melhoria se materializa no processo.
Control (Controle)	Controla as variáveis vitais, devendo-se também estabelecer e validar um sistema de medição de modo que sua capacidade seja mantida.

Tabela 1 – Fases do DMAIC

A otimização de respostas em um processo é fundamental para o Seis Sigma na fase de melhoria. As ferramentas mais importantes e que representam o objetivo principal deste trabalho através de uma aplicação prática são o Planejamento de Experimentos (DOE) e a Resposta Otimizada (*Response Optimizer*). Nesse contexto os principais objetivos do DOE são:

- Determinar quais fatores de entrada têm maior influência na resposta desejada;
- Auxiliar no ajuste dos fatores de entrada de modo que a resposta tenha o valor desejado e consequentemente uma menor variação;
- Determinar como ajustar os fatores de entrada de modo que o efeito das variáveis incontroláveis seja o menor possível na resposta.

Nesse caso, O DOE busca combinar os fatores de um processo com o objetivo de otimizar a resposta desejada extraindo o máximo possível de informações com um número mínimo de experimentos. A técnica de Resposta Otimizada permite que duas ou mais respostas possam ser otimizadas simultaneamente de acordo com o que se busca. As respostas podem ser classificadas de três formas: Maior melhor, Menor melhor ou Nominal melhor.

3. Aplicação Didática

Vários poderiam ser as aplicações utilizadas para apresentar o conceito de otimização de duas ou mais respostas de maneira simultânea, como por exemplo, a otimização do rendimento de determinada reação química influenciada por certos fatores, como: temperatura, tempo de reação e concentração dos reagentes. Certamente este e outros exemplos se aproximam muito de uma situação real, o que a princípio parece bom.

Na prática, o que tem sido observado, é que exemplos como os descritos acima são adequados para o treinamento de funcionários acostumados com tarefas rotineiras em suas experiências. Quando se trabalha com o treinamento de *Green Belts* ou *Black Belts*, da Metodologia Seis Sigma, por exemplo, onde o grupo é heterogêneo e nem todos tem experiência de atuação em áreas similares, o exemplo citado torna-se de difícil compreensão e enfadonho para alguns. A atenção é voltada para a execução de experiências, ao invés de estar voltada para os objetivos do aprendizado.

No exercício presente é mostrada a aplicação da otimização de duas respostas simultâneas utilizando o método de Resposta Otimizada a partir dos resultados obtidos em um planejamento fracionado com sete fatores em dois níveis, com a utilização do software Minitab®.

3.1 Apresentação do problema: A Empresa Papercópteros do Brasil SA.

A empresa Papercópteros do Brasil SA. fabrica helicópteros de papel mundialmente conhecidos pela sua qualidade e estabilidade de vôo, que proporciona aos proprietários das aeronaves, bons períodos de diversão e descontração. O Tuiuiu Papercóptero é a aeronave que apresenta a maior rentabilidade para a empresa, além de ser a versão mais completa das que são postas em venda. Desta forma a mesma é de grande importância para os negócios da empresa. A figura 1 mostra o modelo de construção do Tuiuiu Papercóptero (com possíveis variações) bem como o mesmo em perspectiva.

No projeto do Tuiuiu Papercóptero conforme figura 1 e tabela 2 existem sete características que regem o sucesso do seu vôo. Infelizmente a Papercópteros do Brasil SA vem recebendo algumas reclamações de seus clientes que alegam que o modelo Tuiuiu não vem apresentando bons resultados durante o seu vôo. O ideal é que o Tuiuiu permaneça o maior tempo no ar e que caia próximo a um certo alvo (duas respostas).

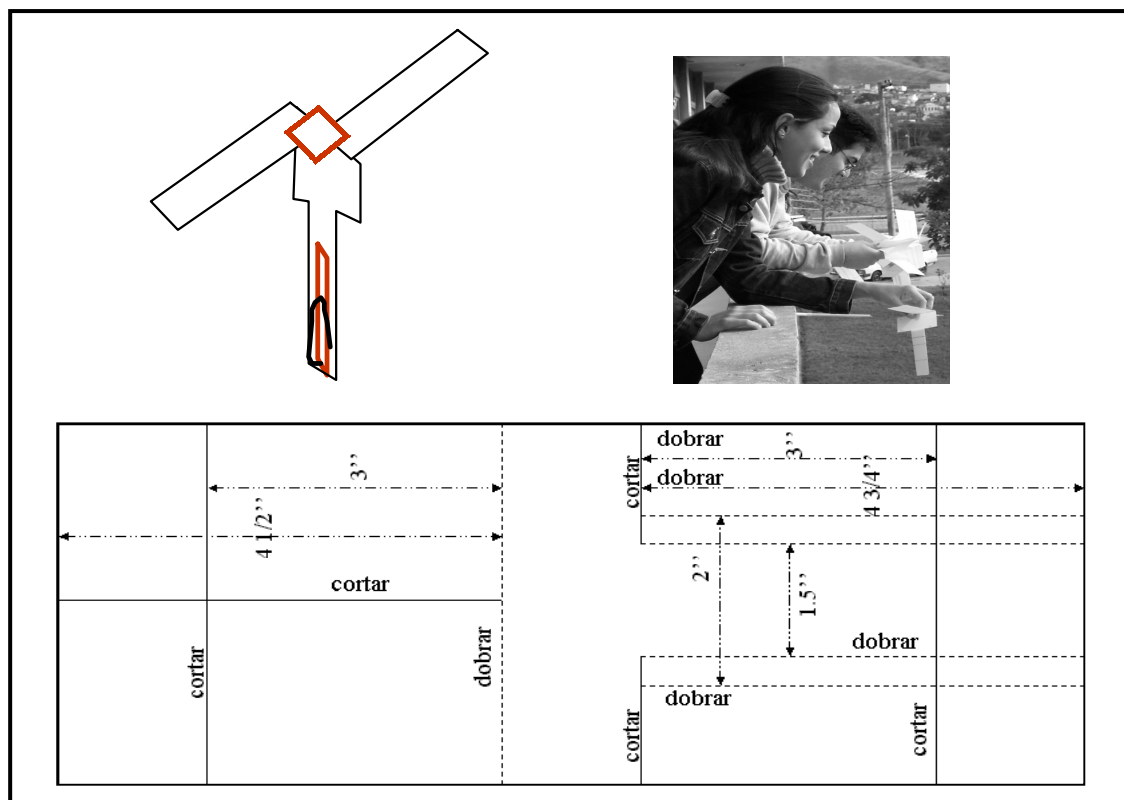


Figura 1 –Tuiuiu Papercóptero (modelo, teste de vôo e especificações)

Preocupada com uma possível queda de vendas e conseqüente redução nos lucros da Papercópteros do Brasil SA, a diretoria da empresa determinou que o departamento de engenharia realizasse um estudo no projeto original do Tuiuiu para que fosse apresentada uma possível solução para uma melhoria da qualidade dos helicópteros, conseqüentemente eliminando as reclamações dos clientes, que afirmavam: “Os Tuiuius Papercópteros não estão apresentando tempo de vôo satisfatórios nem mesmo precisão em relação a um

referencial fixo”.

Para que o estudo pudesse ser realizado da melhor forma possível, a empresa Papercópteros do Brasil SA formou uma equipe encarregada da solução do problema, na qual estão presentes os seguintes cargos com suas respectivas funções:

Engenheiro Chefe: Lidera a equipe na decisão de qual aeronave construir. Tem a palavra final sobre quais aeronaves serão construídas e testadas.

Engenheiro de Testes: Lidera a equipe na condução dos testes de vôo de todas as aeronaves. Tem a palavra final quanto a condução dos testes.

Engenheiro de Montagem: Lidera a equipe na construção das aeronaves. Tem a palavra final quanto a todos os aspectos da construção.

Gerente de Finanças: Lidera a equipe no rastreamento das despesas. Tem a responsabilidade de manter a equipe dentro do orçamento.

Analista: Lidera a equipe no registro dos dados gerados durante os testes.

Para facilitar o estudo o mesmo foi dividido em fases e restrições financeiras foram impostas para que a escolha do número de experimentos não variasse muito. A escolha do tipo de DOE assim, fica limitado à quantidade de dinheiro existente. É do conhecimento da empresa que o custo de cada Tuiuiu Papercóptero é R\$ 100.000 e cada teste de vôo R\$ 10.000.

A primeira fase, chamada *Baseline*, consiste em avaliar a capacidade do processo atual (configuração atual) do Tuiuiu Papercóptero. A restrição orçamentária para a realização dos testes é de R\$ 650.000. A segunda fase é chamada de *exploração* e tem como objetivo avaliar os fatores que possam impactar nas respostas desejadas, e tem como restrição orçamentária o valor de R\$ 4.000.000. A terceira fase é a etapa na qual busca-se a *otimização* do projeto, onde através dos resultados obtidos na etapa anterior desenvolve-se o método de resposta otimizada. A restrição orçamentária para esta fase é de R\$ 2.000.000. A quarta e última fase busca *verificar* da capacidade do processo otimizado comparando-o com os resultados da primeira fase, sendo a restrição orçamentária de R\$ 650.000.

De acordo com os estudos da equipe responsável foram apresentadas possíveis alterações a partir da configuração atual, para a possível solução do problema:

Fatores	Configuração Atual	Alteração Permitida
Tipo de Papel	Amarelo	Branco
Presença de clipes	Não	Sim
Corpo com Fita	Não	Sim
Junta da Asa Colada (Fita)	Não	Sim
Largura do Corpo	1,42	2,00
Comprimento do Corpo	3,00	4,75
Comprimento da Asa	3,00	4,75

Tabela 2 – Configuração do Tuiuiu Papercóptero

Baseada na tabela 2, a equipe realizou ensaios com o intuito de solucionar o problema mencionado, ou seja, (i) aumentar o tempo de vôo e (ii) diminuir a distância em relação a um

referencial fixo (alvo), otimizando desta maneira as duas respostas de modo simultâneo.

3.2 Planejamento Fracionário de Experimentos

O *planejamento fatorial fracionado* pode ser utilizado quando os experimentadores pouco conhecem sobre o processo a ser estudado, e neste caso torna-se importante que o maior número possível de fatores seja levado em consideração, já que não se conhecem ainda suas influências sobre o resultado. Na maioria dos casos, o efeito das interações de ordem mais elevado não é significativo e podem, portanto ser desconsiderados, não sendo necessário executar todos os experimentos previstos em um fatorial completo. Logo se conclui que pode não ser necessário cobrir todo o espaço amostral com um fatorial completo, mas sim parte deste, e o planejamento fatorial fracionado como o próprio nome sugere, é uma redução do número de experimentos do fatorial completo pela metade, mas podendo ser também de 1/4, 1/8, 1/16,... até se atingir o limite de experimentos mínimos necessários. O número de experimentos é dado pela fórmula 2^{k-P} , onde $k = \{1,2,3,\dots,n\}$ é o número de fatores escolhidos e P é o número de fatores principais confundidos com interações.

3.3 Otimização de Respostas

A Resposta Otimizada ajuda a identificar a combinação de ajustes das variáveis de entrada que juntamente otimizam uma única resposta ou um grupo de respostas. A otimização deve satisfazer as exigências para todas as respostas no grupo. Existe também uma medida chamada *desirability* (ou *desejabilidade* - d) que mostra como está a satisfação da combinação dos objetivos para todas as respostas (DERRINGER, 1980). A desejabilidade tem uma amplitude que varia de 0 a 1 podendo ser ajustada diretamente no gráfico fornecido pelo Minitab®, de acordo com o que se deseja, simulando assim as diversas situações para a resposta ou grupo de resposta.

3.4 Obtenção dos Resultados

Para a realização do estudo foram necessárias as seguintes especificações:

- Limite inferior de especificação para o tempo de vôo: 2,0 segundos;
- Limite inferior de especificação para a distância ao alvo: 30,54 centímetros;
- Altura de queda: 4,0 metros;
- Fatores controláveis: tipo de papel (branco: 75 g/cm² e amarelo: 90 g/cm²), presença de cliques (tamanho nº 02), corpo com fita (comprimento de 50 mm), junta da asa colada (comprimento de 50 mm), largura do corpo, comprimento do corpo, comprimento da asa;

O planejamento do estudo para cada fase proposta levou em consideração aspectos técnicos e econômicos. Na fase *Baseline* construiu-se cinco aeronaves sendo que cada uma foi lançada três vezes com o intuito de avaliar o erro e a variabilidade experimental. Na fase de exploração foi realizado um planejamento fatorial fracionado 1/8, o que implica em uma *resolução IV* e um número de 16 (dezesseis) experimentos que foram replicados com o intuito de avaliar a variabilidade experimental, resultando em 32 aeronaves construídas.

Para fase seguinte, otimização, selecionou-se as variáveis a serem otimizadas simultaneamente, definindo-se o objetivo para cada uma delas: *maximizar o tempo de vôo e minimizar a distância ao alvo*. Para maximizar o *tempo de vôo* é necessário fornecer o valor mínimo e o nominal que foram de 2,90 e 4,04 segundos respectivamente. Em relação à resposta alvo foram necessários o maior valor e o nominal, que foram 36 e 23,53 centímetros respectivamente. Vale ressaltar que estes valores foram obtidos das estatísticas descritivas calculadas na fase anterior.

A partir dos resultados obtidos na terceira fase, foram construídos mais cinco aeronaves com três lançamentos cada de acordo com a configuração otimizada dos fatores, a fim de se verificar a eficácia dos resultados encontrados.

No exercício, o professor estimula os alunos a formularem hipóteses sobre quais fatores os mesmos julgam ser mais significativos para o tempo de vôo e distância ao alvo. Após a etapa de análise dos resultados estas hipóteses poderão ser confrontadas com os resultados obtidos e melhores analisadas.

3.5 Análise dos Resultados

Com os dados colhidos foram feitas análises em cada fase do experimento. Na primeira fase a partir das estatísticas descritivas e do estudo de capacidade, calculou-se o nível sigma global do processo que é igual 2,8, que é função dos níveis sigma de qualidade para o tempo de vôo e alvo e do índice de defeitos por milhão (87139 ppm). Segundo Harry (1998), o cálculo do nível sigma global é dado por: $\sigma g = 0,8406 + (29,37 - 2,221 \times \ln(36970))^{1/2}$.

Na fase de exploração, após conhecer a capacidade do processo atual, a equipe responsável realizou um planejamento fatorial fracionário 1/8, que foi replicado. O resultado deste planejamento fatorial realizado pelo software Minitab®, bem como os dados colhidos são apresentados no quadro 1:

Tipo Papel	Clipes	Junta Asa	Junta Corpo	Comp. Corpo	Comp. Asa	Larg. Corpo	Tempo	Alvo
Branco	Sim	Sim	Sim	3	3	1,5	3,47	21,5
Amarelo	Sim	Sim	Sim	4,75	3	2	3,01	22
Branco	Não	Sim	Sim	4,75	4,5	1,5	4,99	21
Amarelo	Não	Sim	Sim	3	4,5	2	3,91	28
Branco	Sim	Não	Sim	4,75	4,5	2	4,31	16
Amarelo	Sim	Não	Sim	3	4,5	1,5	3,96	23,5
Branco	Não	Não	Sim	3	3	2	3,97	14,5
Amarelo	Não	Não	Sim	4,75	3	1,5	3,62	12,5
Branco	Sim	Sim	Não	3	4,5	2	4,38	6
Amarelo	Sim	Sim	Não	4,75	4,5	1,5	4,17	20
Branco	Não	Sim	Não	4,75	3	2	3,96	14,5
Amarelo	Não	Sim	Não	3	3	1,5	2,9	99
Branco	Sim	Não	Não	4,75	3	1,5	3,3	17
Amarelo	Sim	Não	Não	3	3	2	3,94	13
Branco	Não	Não	Não	3	4,5	1,5	5,28	27
Amarelo	Não	Não	Não	4,75	4,5	2	4,13	16
Branco	Sim	Sim	Sim	3	3	1,5	3,7	3
Amarelo	Sim	Sim	Sim	4,75	3	2	3,39	19
Branco	Não	Sim	Sim	4,75	4,5	1,5	5,28	20
Amarelo	Não	Sim	Sim	3	4,5	2	3,84	44,5
Branco	Sim	Não	Sim	4,75	4,5	2	4,23	13,5
Amarelo	Sim	Não	Sim	3	4,5	1,5	4,49	12,5
Branco	Não	Não	Sim	3	3	2	3,56	15,5
Amarelo	Não	Não	Sim	4,75	3	1,5	3,82	36
Branco	Sim	Sim	Não	3	4,5	2	4,94	13,5
Amarelo	Sim	Sim	Não	4,75	4,5	1,5	4,37	14
Branco	Não	Sim	Não	4,75	3	2	4,22	16
Amarelo	Não	Sim	Não	3	3	1,5	3,91	24,5
Branco	Sim	Não	Não	4,75	3	1,5	3,78	17
Amarelo	Sim	Não	Não	3	3	2	3,47	20,5
Branco	Não	Não	Não	3	4,5	1,5	4,87	32
Amarelo	Não	Não	Não	4,75	4,5	2	4,32	80

Quadro 1 – Especificações para os helicópteros e resultados obtidos

De posse dos dados foi possível gerar todos os gráficos necessários para as análises: Estatística descritiva, gráfico de Pareto, distribuição normal de probabilidade dos fatores, gráfico dos efeitos principais e gráfico de interação dos fatores.

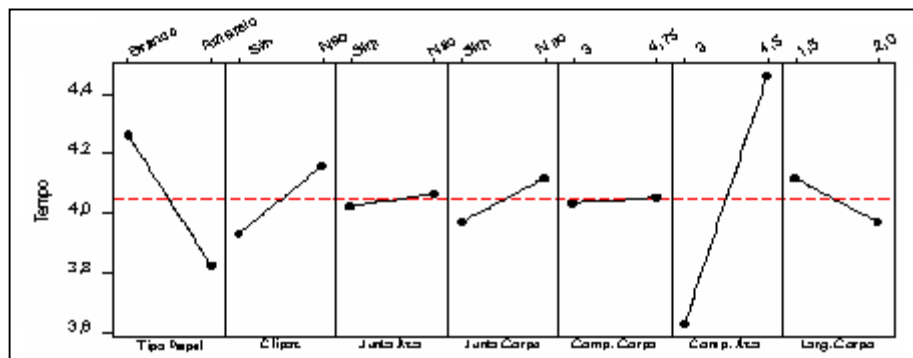


Figura 2 – Efeitos principais dos fatores para tempo de voo

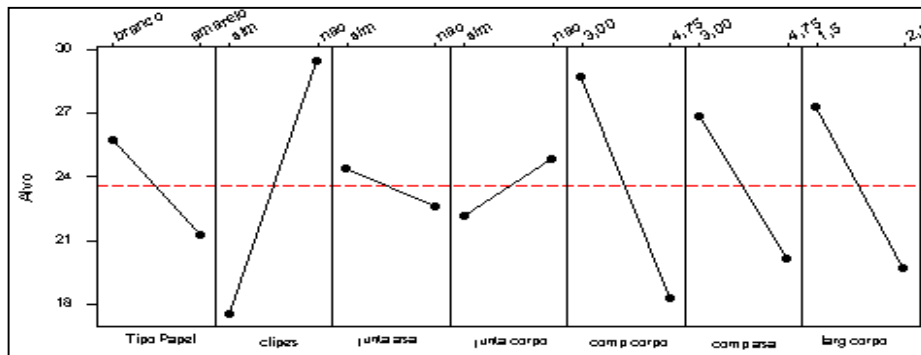


Figura 3 – Efeitos principais dos fatores para alvo

Os gráficos das figuras 2 e 3 permitem descobrir qual o melhor nível para cada fator em face de sua necessidade e também se um determinado fator realmente está sendo significativo na resposta. O grau de significância é analisado comparando-se a linhas plotadas com a linha horizontal. Se as linhas de cada fator forem paralelas a esta, este fator não é de grande influência, sendo que esta aumenta a medida em que se aumenta a inclinação das linhas. Desta maneira temos que o maior comprimento da asa (4,5), seguido do papel branco, sem clipes e com menor largura do corpo (1,5) são os principais fatores influentes para o maior tempo de voo. Enquanto que a presença de clipes, o maior comprimento do corpo (4,5) e a maior largura do corpo (2,0) são os fatores mais influentes para a menor distância ao alvo.

Após as análises efetuadas na segunda fase, inicia-se a etapa de otimização na qual gera-se um gráfico para as duas respostas simultâneas com os fatores em seus níveis ótimos.

O gráfico da figura 4 fornece um tempo de voo otimizado de 4,3 segundos com uma desejabilidade de 1,0 e uma distância do alvo de 11,1 centímetros também com desejabilidade de 1,0, valores estes obtidos em função da melhor combinação dos fatores influentes em seus respectivos níveis. Deste modo, pode-se afirmar que o papel branco, a presença de clipes, o corpo com fita, a junta da asa colada, a largura do corpo igual a 1,75 cm, o comprimento do corpo de 4,75 cm e o comprimento da asa igual a 3,9 cm são os níveis ótimos dos fatores influentes analisados que propiciam a otimização das duas respostas.

Após a determinação dos níveis ótimos dos fatores, o projeto entrou na fase de verificação com a construção de mais cinco aeronaves de acordo com as configurações obtidas, sendo

cada um deles lançados três vezes com o intuito de calcular a capacidade do processo otimizado. O resultado forneceu um nível sigma global final de qualidade igual a 3,3, com um índice de defeitos por milhão de 36970 ppm, que comprova a melhoria do processo, além de uma economia de R\$ 2.480.000 (em função do número total de aeronaves que foram construídas).

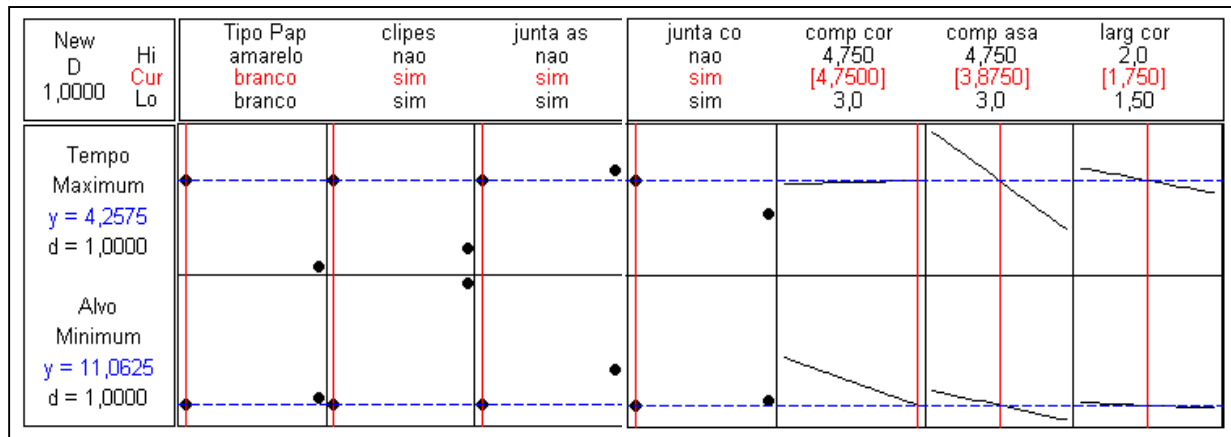


Figura 4 – Gráfico de resposta otimizada dos fatores e seus níveis

4. Conclusões

O exercício proposto nesse artigo tem se mostrado bastante eficaz e eficiente no aprendizado da técnica planejamento de experimentos, tanto na formação de *Green Belts*, *Black Belts* e de Estudantes de Engenharia.

A atuação dos alunos, de forma ativa, faz com que eles percebam facilmente os objetivos do estudo. O fato de eles fazerem parte do problema incentiva-os a buscarem uma solução. Eles começam a formular hipóteses e ficam ávidos pela comprovação das mesmas. Existem muitas possibilidades de humor durante a realização do exercício.

A intervenção do professor é mínima. Ele apresenta o problema e elucida algumas dúvidas relacionadas aos conceitos e a metodologia. É também correto afirmar que o professor ensina menos e os alunos aprendem mais.

A aplicação feita neste artigo, através de uma adaptação de um trabalho clássico de Box, Bisgaard e Fung (2000), descreve a otimização não de apenas uma resposta, mas de duas respostas simultâneas podendo estender-se a um número maior de respostas, o que mostra a importância e relevância da técnica utilizada.

Referências

- BOX, BISGAARD AND FUNG (2000) – *Designing Industrial Experiments: The Engineer's Key to Quality*
- BREYFOGLE III, F. W. (1999) – *Implementing Six Sigma, Smarter Solutions Using Statistical Methods*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- DERRINGER, G. & SUICH, R. (1980) – Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology* Vol. 12, n.04, p.214-219.
- HARRY, M. J. (1998) – *Six Sigma - a breakthrough strategy for probability*. Quality Progress, p. 60 – 64.
- RASIS, D. & GITLOW, H.S. (2002) – Paper Organizers International: A Fictitious Six Sigma Green Belt Case Study I. *Quality Engineering*, p.127-145.