

## DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

**Ricardo Ayer Taveira**

### CONCEITUAÇÃO

Quando se faz mudanças muito profundas no âmbito da produção, temos que levar em consideração vários problemas que podem aparecer no decorrer do projeto. Para se reconstruir totalmente um sistema de produção, com o objetivo de operar sob novos paradigmas de produtividade, vários fatores podem ser esquecidos, o que levaria a problemas graves. Como relata Franzese [FRAN94], o problema mais comum quando se adota o sistema JIT é uma perda de volume de produção em números absolutos, em comparação com o que se tinha antes. Para prevenir este tipo de problema e extrair ao máximo que o sistema Just in Time pode fornecer, será usada a técnica de projeto robusto de experimentos, mais conhecida como Arranjos Ortogonais de TAGUCHI [TAGU90] [ROSS93].

Segundo Taguchi [TAGU90], o objetivo desta técnica é reduzir ao máximo a variabilidade do processo, e direcionar os seus parâmetros para maximizar a meta a ser alcançada. Em seu famoso artigo *Robust Quality* [TAGU90], Taguchi afirma :

*"Quando um produto falha, nós devemos consertá-lo ou substituí-lo. Em ambos os casos, precisamos catalogá-lo, transportá-lo, e nos desculparmos por ele. Perdas são muito mais caras do que custos de fabricação, e nada disso será suficiente para recuperar nossa imagem. Taiichi Ohno, o renomado vice presidente executivo da Toyota Motor Company, colocou dessa forma: Qualquer que seja a perda por má qualidade de um produto que um executivo pense que teve, ela será na verdade seis vezes maior.*

*Como as empresas podem minimizá-las ? Se os gerentes americanos aprendessem apenas um dos novos princípios das técnicas conhecidas como Métodos Taguchi, poderia ser da seguinte maneira: Qualidade é uma virtude do projeto. A robustez dos produtos é mais uma função do projeto do produto do que do controle de qualidade on-line do processo de manufatura. Realmente, apesar de não ser tão óbvio assim, um **lack** de robustez no projeto do produto é o primeiro indício de custos excessivos de manufatura. Mas os gerentes precisam aprender mais do que um princípio para entender o porque."*

Uma analogia com essa descrição pode ser feita para o modelo apresentado nessa dissertação: se algo sair errado no projeto de um sistema de produção, a perda para a empresa poderá ser várias vezes maior do que o custo de projeto.

Para complementar o poder de previsão de situações que a simulação nos fornece, precisamos de uma ferramenta que nos auxilie na otimização do funcionamento do sistema de produção em estudo. A metodologia Taguchi fornece uma gama de técnicas que nos permitem saber quais os fatores que estão influenciando no desempenho de um produto, processo ou mesmo sistema.

A técnica usada nesse trabalho é os Arranjos Ortogonais de Taguchi. Essa técnica foi desenvolvida na década de 60 por Genichi Taguchi, e nesta mesma década mais de 600

engenheiros japoneses foram treinados na sua aplicação. Alguns termos usados nesta metodologia precisam ser primeiramente definidos para que se possa ter uma compreensão melhor [ROSS91]:

*Robustez* : Maximização das características de funcionalidade do produto ou processo.

*Fator de Controle* : Fator que pode ser determinado pelo fabricante, e não ser afetado diretamente pelo consumidor quando da utilização do produto ou processo.

*Fator de Ruído* : Fator que perturba a função do produto ou processo; fator que pode ser controlado durante um experimento, porém no uso comum pelo consumidor não poderá ser controlado pelo fabricante; fator que o fabricante não deseja controlar.

*Relação Sinal-Ruído* : Medida do valor da variação observada existente com relação à média observada dos dados.

*Níveis* : Valores atribuídos aos diversos fatores num experimento fatorial; valores altos e baixos de pressão, temperatura, etc; opção de possuir múltiplos níveis de um fator; equivale ao número de níveis de um fator.

*Graus de liberdade* : Número de medições independentes disponíveis para estimar partes de informação; número de comparações independentes (regulares) que podem ser realizadas dentro de uma série de dados.

Taguchi [TAGU90] relata como as empresas "Classe Universal" aperfeiçoam a qualidade de seus projetos:

*"As empresas Classe Universal usam um processo de tomada de decisão baseado em três passos:*

- 1. Elas definem o objetivo específico, selecionando ou desenvolvendo o mais apropriado sinal e estimando o ruído.*
- 2. Elas definem opções possíveis para os parâmetros críticos de projeto, como dimensões ou características elétricas.*
- 3. Elas selecionam a opção que fornece a maior robustez ou a melhor taxa Sinal/Ruído."*

## **TÉCNICAS DE PROJETO DE EXPERIMENTOS**

Engenheiros e cientistas se deparam, na maior parte das vezes, com duas situações de desenvolvimento de produtos e processos. Uma situação de desenvolvimento consiste em encontrar um certo parâmetro que aperfeiçoe determinada característica de desempenho, levando a um valor aceitável ou ótimo. Uma segunda situação consiste em descobrir um projeto alternativo, material ou método menos caro, que proporcione o mesmo desempenho. Diferentes estratégias poderão ser empregadas, conforme a situação apresentada para o experimentador. O primeiro problema, que consiste na necessidade de melhoria do desempenho, constitui a situação mais típica.

Na busca por projetos aperfeiçoados ou equivalentes, o profissional normalmente executa determinado ensaio, observa o desempenho do produto (ou sistema) e toma uma decisão quanto a utilizar ou rejeitar o novo projeto. É a qualidade desta decisão que pode ser aperfeiçoada, quando são utilizadas estratégias adequadas em ensaios; em outras palavras, evitar o erro de utilizar um projeto apenas aceitável, mas não ótimo.

As estratégias existentes hoje para esse tipo de experimentação podem ser divididas em três grupos, como será descrito a seguir.

- *Experimentos Isolados* : É o método mais intuitivo e que exige um maior número de ensaios para se obter um conhecimento do processo em estudo. Esses experimentos podem ser feitos com fator único ou diversos fatores isoladamente. Normalmente, são necessários muitos ensaios diferentes para que se chegue a um resultado aceitável com este tipo de estratégia. Os experimentos são conduzidos de maneira totalmente desordenada.
- *Experimentos Fatoriais Saturados* : Um experimento fatorial saturado pode ser simbolizado na Tabela 4.1.

| <i>Ensaio n°</i> | <i>Fator e nível do fator</i> |          | <i>dados y</i> |
|------------------|-------------------------------|----------|----------------|
|                  | <i>A</i>                      | <i>B</i> |                |
| 1                | 1                             | 1        | 76 78          |
| 2                | 1                             | 2        | 77 78          |
| 3                | 2                             | 1        | 73 74          |
| 4                | 2                             | 2        | 79 80          |

Tabela 4.1. Experimento fatorial saturado

Nesse caso, todas combinações dos fatores de controle **A** e **B** serão analisadas nos ensaios. O número total de ensaios nesse caso será igual a  $2^n$  (  $n$ = número total de fatores). Um experimento fatorial saturado é considerado aceitável quando somente alguns fatores devem ser investigados; porém, o experimento não é muito aceitável quando existem muitos fatores. Quando se fala, por exemplo, em um experimento com sete fatores, apenas três fatores independentes podem ser analisados, consistindo na maior desvantagem deste método. Contudo, muitos estudos têm chegado a resultados altamente positivos na aplicação destes experimentos, pois além de organizar os ensaios, também fornece o melhor resultado possível entre os fatores. Isso acontece porque todas as combinações possíveis dos fatores de controle são levadas em conta.

- *Experimentos Fatoriais Fracionários* : Taguchi desenvolveu um tipo de matriz especial que pode ser empregada em várias situações. Os experimentos conduzidos segundo essa matriz são chamados de fatoriais fracionários. Nestes experimentos, deixa-se de analisar todas as combinações possíveis entre os fatores, para dar lugar a mais fatores independentes ao mesmo tempo. Em outras palavras, não são mais analisadas todas as combinações de fatores como no caso anterior. Neste caso, substitui-se combinações que podem ser consideradas como não influentes, por outros fatores independentes dos primeiros. Este tipo de substituição pode ser considerada como uma suposição. A tabela 4.2 mostra um

arranjo L8, em que os fatores podem assumir dois níveis cada. A combinação de fatores na tabela 4.2 segue um experimento fatorial saturado, analisando todas as combinações. Entretanto, se trocarmos as combinações por outros fatores, o experimento se configura como na tabela 4.3. Na verdade, o arranjo da Tabela 4.3 abriga sete fatores, quatro a mais que a primeira. Em outras palavras, combinações foram trocadas por fatores diferentes.

|                  | <b>n° = coluna n°</b> |          |           |          |           |           |            |
|------------------|-----------------------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|
| <b>Fatores</b>   | <b>A</b>              | <b>B</b> | <b>AB</b> | <b>C</b> | <b>AC</b> | <b>BC</b> | <b>ABC</b> |
| <b>Ensaio n°</b> | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b>  | <b>4</b> | <b>5</b>  | <b>6</b>  | <b>7</b>   |
| <b>1</b>         | 2                     | 2        | 1         | 2        | 1         | 1         | 2          |
| <b>2</b>         | 2                     | 2        | 1         | 1        | 2         | 2         | 1          |
| <b>3</b>         | 2                     | 1        | 2         | 2        | 1         | 2         | 1          |
| <b>4</b>         | 2                     | 1        | 2         | 1        | 2         | 1         | 2          |
| <b>5</b>         | 1                     | 2        | 2         | 2        | 2         | 1         | 1          |
| <b>6</b>         | 1                     | 2        | 2         | 1        | 1         | 2         | 2          |
| <b>7</b>         | 1                     | 1        | 1         | 2        | 2         | 2         | 2          |
| <b>8</b>         | 1                     | 1        | 1         | 1        | 1         | 1         | 1          |

Tabela 4.2. Arranjo L8

|                  | <b>n° = coluna n°</b> |          |          |          |          |          |          |
|------------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Fatores</b>   | <b>A</b>              | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> | <b>F</b> | <b>G</b> |
| <b>Ensaio n°</b> | <b>1</b>              | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> |
| <b>1</b>         | 2                     | 2        | 1        | 2        | 1        | 1        | 2        |
| <b>2</b>         | 2                     | 2        | 1        | 1        | 2        | 2        | 1        |
| <b>3</b>         | 2                     | 1        | 2        | 2        | 1        | 2        | 1        |
| <b>4</b>         | 2                     | 1        | 2        | 1        | 2        | 1        | 2        |
| <b>5</b>         | 1                     | 2        | 2        | 2        | 2        | 1        | 1        |
| <b>6</b>         | 1                     | 2        | 2        | 1        | 1        | 2        | 2        |
| <b>7</b>         | 1                     | 1        | 1        | 2        | 2        | 2        | 2        |
| <b>8</b>         | 1                     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |

Tabela 4.3. Arranjo L8

## ARRANJOS ORTOGONAIS DE TAGUCHI

Na realidade, o arranjo L8 descrito na seção anterior é um dezesseisavos de fatorial, que possui apenas 8 das 128 combinações possíveis. Nesse arranjo, podem-se observar sete colunas, semelhantes a um outro arranjo (diversos fatores individualmente), que podem ter um fator atribuído a cada coluna. Para Ross [ROSS91], a esta altura não é surpreendente o fato de oito ensaios proporcionarem um total de sete graus de liberdade para toda a experimentação, associados às sete colunas de dois níveis, sendo que cada coluna possui um grau de liberdade. O arranjo ortogonal permite que todos os graus de liberdade do erro possam ser trocados com graus de liberdade para fatores e

proporcionem combinações específicas, que sejam compatíveis com aquele conceito. Os níveis referentes aos ensaios específicos são designados por 1 e 2, como anteriormente. É fácil observar que todas as colunas fornecem quatro ensaios no primeiro nível dos fatores e quatro ensaios no segundo nível. Este é um dos aspectos que permite a ortogonalidade entre todas as colunas (fatores). O valor real da utilização do arranjo consiste na capacidade de avaliar diversos fatores com um número mínimo de testes. Este experimento é considerado eficiente, visto que se adquire grande quantidade de informações provenientes de poucos ensaios.

Segundo Ross[ROSS91], os arranjos ortogonais se constituem numa invenção matemática, cujo registro mais antigo data de 1897, por Jacques Hadamard, matemático francês. A utilidade destes arranjos ainda não havia sido explorada, até que na Segunda Guerra Mundial, Plackett e Burman, estatísticos ingleses, empregaram o conceito de projeto saturado. As matrizes de Hadamard são matematicamente idênticas às matrizes de Taguchi; apenas as colunas e linhas são rearrumadas.

Existem algumas restrições ao uso deste tipo de experimento. Entretanto, é incomum encontrar na literatura algo que as mencione. Quando se opta por usar um experimento fatorial fracionário de Taguchi, deve-se ter em mente que existe uma possibilidade não remota de se cometer erros que podem conduzir ao fracasso do ensaio.

## **ANÁLISE DOS RESULTADOS DE EXPERIMENTOS**

Quando realizamos experimentos deste tipo, estamos sempre interessados que os resultados atinjam uma meta, ou alvo. Os tipos de problemas que precisamos resolver podem ser :

- **Maior é melhor** : Quando queremos maximizar o resultado. P.Ex. Maior volume de produção, taxa máxima de utilização de equipamentos;
- **Menor é melhor** : Ao contrário do caso anterior, quando queremos minimizar o resultado. P.ex. Menor taxa de falhas, menor índice de atrasos;
- **Nominal é o ótimo** : Quando queremos aproximar o resultado ao máximo de um valor dado. P.ex. Dimensão de qualidade de uma peça;
- **Maximizar a relação sinal/ruído** : Definida pelo usuário.

Após a execução dos ensaios em experimentos fatoriais, deve-se proceder a uma análise estatística dos resultados. Os seus objetivos são:

- Determinar o quanto significativa é a influência de cada fator sobre o resultado;
- Calcular o erro cometido no experimento;
- Predizer qual seria a combinação ótima de fatores;
- Estimar qual seria o resultado do experimento na condição ótima.

Existem duas maneiras de se fazer a análise. A primeira é usar os próprios valores coletados nos experimentos. Outro, mais usado e introduzido por Taguchi, faz com que os resultados sejam transformados em outra unidade, chamada de relação sinal/ruído. As fórmulas matemáticas para a relação sinal/ruído são mostradas abaixo.

- **Maior é melhor** :  $S/N = -10 \cdot \log_{10}(1/N \cdot \Sigma(1/y^2))$  (4.1)

- **Menor é melhor** :  $S/N = -10 \cdot \log_{10}((\sum(y^2))/N)$  (4.2)
- **Nominal é o ótimo** :  $S/N = 10 \cdot \log_{10}(\mu^2/\sigma^2)$  (4.3)

onde,

S/N = Relação sinal/ruído

N = Número de valores

y = Variável de resposta

$\mu$  = Média

$\sigma$  = Desvio padrão

Neste trabalho, será usada a segunda maneira de expressão dos dados. Para a análise dos experimentos, será usado o software Statistica for Windows, que proporciona uma interface gráfica excelente. Todos os gráficos de resultados serão mostrados.

## **RESUMO**

Neste capítulo procurou-se fazer uma explicação sobre as técnicas de projeto de experimentos. Foi mostrada também a diferença entre o que se chama projeto de experimentos (ou experimentos fatoriais saturados) e projeto robusto de Taguchi (ou experimentos fatoriais fracionários), além de algumas características peculiares à este tipo de técnica. A vantagem das técnicas de Taguchi é, principalmente, economia no número total de ensaios. Já os experimentos saturados oferecem a possibilidade de uma análise estatística mais completa.