

Método Taguchi: qualidade voltada para o projeto do produto e do processo

Henrique Silveira de Almeida

Professor Assistente Doutor do Dept° de Engenharia de Produção da Escola Politécnica - USP

Superintendente do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

José Carlos de Toledo

Professor Assistente do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos

Resumo

O texto consiste numa revisão bibliográfica e análise crítica do chamado Método Taguchi que, partindo do conceito de qualidade robusta, apresenta uma metodologia que permite a quantificação e avaliação da qualidade do produto (e de suas conseqüências) nas fases de pré-produção (projeto do produto e do processo).

Palavras-chave:

- qualidade do produto
- qualidade robusta
- função de perda
- controle da qualidade fora da produção

INTRODUÇÃO

A estratégia convencional de controle da qualidade caminha no sentido de buscar controles mais rígidos para o sistema de produção. Essa estratégia teria limitações dadas pelos custos crescentes associados a controles mais rígidos, levando a um ponto onde o retorno econômico, associado ao investimento, passa a ser decrescente.

A proposta de Taguchi (1986) caminha no sentido de reverter essa tendência de concentração de esforços no controle do processo, voltando-se para o projeto do produto e do processo. Sua premissa básica é bastante simples: ao invés de concentrarem-se os esforços constantemente no processo de produção (equipamentos, ferramentas, mão-de-obra etc.) para assegurar qualidade consistente, deve-se procurar projetar um produto que seja robusto o suficiente para garantir alta qualidade, a despeito de variações que venham a ocorrer no processo de produção bem como no ambiente de uso do produto.

Quando o consumidor adquire um produto, a variedade associada ao mesmo é conhecida e previamente decidida, uma vez que são conhecidos aspectos como cor, padrão, tamanho e preço, no ato da escolha. Entretanto, embora a função e preço sejam transparentes quando o bem é adquirido, qualidade tende a ser incerta, pois muitas das características do produto tornar-se-ão claras somente após seu uso e quando a experiência obtida com o produto for avaliada comparativamente a outros produtos concorrentes substitutos.

O autor analisa a questão do ponto de vista da "falta" de qualidade e, para isso, define qualidade (parece que o mais correto seria dizer falta de qualidade) em associação à variabilidade da função do produto e às conseqüências de seu uso. Ele avalia qualidade pela perda que um produto causa à sociedade após sua venda, com exceção das perdas causadas por sua função intrínseca, ou seja, sem entrar no mérito das conseqüências da aplicação do produto. Quanto maior a perda associada ao produto, menor sua qualidade. Taguchi trabalha com o conceito de perda associada à qualidade para facilitar a quantificação, em valores monetários, da qualidade do produto, conforme veremos adiante.

No âmbito desta definição, as perdas restringem-se a dois tipos:

- perdas causadas pela variabilidade da função intrínseca do produto;
- perdas causadas pelos efeitos colaterais nocivos do produto.

O primeiro refere-se às perdas causadas pela variabilidade da função do produto, durante sua vida útil. O segundo, aos efeitos colaterais associados ao seu uso.

Assim, Taguchi define como produto de boa qualidade aquele que desempenha sua função sem variabilidade e que causa poucas perdas (ou nenhuma) à sociedade através de seus efeitos colaterais nocivos. O Controle de

Qualidade, portanto, deveria estar voltado para a redução desses dois tipos de perdas que o produto impõe à sociedade após sua venda.

FUNÇÃO DE PERDA

A partir da definição da qualidade como "a perda que um produto impõe à sociedade após sua venda", Taguchi introduz um novo conceito que se refere à perda na qualidade (*quality loss*). Essa perda é definida como o valor esperado da perda monetária causada por desvios da característica de desempenho em relação ao valor desejado (ou especificado). A idéia subjacente é: qualquer variação em uma característica de desempenho de produto, em relação ao valor nominal, implica numa perda para o consumidor. De modo geral, a perda para o consumidor pode ser desde mera inconveniência até perda monetária ou dano físico. As perdas consideradas aqui são medidas em valor monetário e estão associadas a características quantificáveis do produto.

Chamamos de Y o valor real de uma característica de interesse de certo produto e m o valor nominal para essa mesma característica. $L(Y)$ representa a perda na qualidade, em valores monetários, devido ao desvio de Y em relação a m . De modo geral, quanto maior o desvio da característica em relação ao seu valor nominal m , maior é a perda para o consumidor; entretanto, é difícil determinar a forma da função $L(Y)$.

Taguchi (1985) propõe a aproximação de $L(Y)$ por uma função quadrática obtida a partir da expansão em série de Taylor. A função de perda quadrática mais simples é:

$$L(Y) = k (Y - m)^2$$

Onde k é uma constante. A perda é mínima quando $Y = m$. O valor de k poderá ser determinado se conhecermos o valor de $L(Y)$ para um particular valor de Y .

Supondo que a tolerância para a característica seja $m \pm \Delta$ e que o produto tem um desempenho não satisfatório quando Y ultrapassa esse intervalo e ainda que o custo para se reparar ou descartar o produto nesse ponto é de A unidades monetárias, teremos que:

$$A = k \cdot \Delta^2 \text{ e portanto } k = \frac{A}{\Delta^2}$$

Esta versão da função de perda é particularmente útil quando um valor nominal específico é melhor para a característica de desempenho e a perda aumenta simetricamente à medida em que Y se desvia do valor nominal. A figura 1 ilustra esse tipo de função de perda.

Deve se ressaltar que $L(Y) = k (Y - m)^2$ é a perda para uma unidade do produto. Entretanto, se pensarmos na produção de n unidades teremos que a perda média

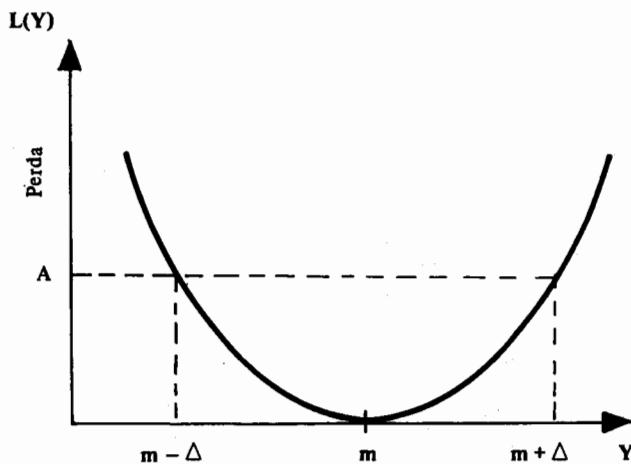


Figura 1: Função de Perda Quadrática

para o consumidor, devido à variação de desempenho, é dada pelo valor esperado da função de perda quadrática $L(Y) = k(Y - m)^2$ para todos os n valores de Y ou seja, para Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Assim, a perda média seria:

$$L(Y) = k \cdot \frac{1}{n} [(Y_1 - m)^2 + (Y_2 - m)^2 + \dots + (Y_n - m)^2]$$

Além desse caso, onde o valor nominal é o melhor para a característica, têm-se dois outros especiais: o primeiro é o caso em que quanto menor o valor da característica, melhor é a situação. Exemplo: quando a característica em questão é a quantidade de impurezas num produto. O segundo é aquele em que quanto maior o valor da característica, melhor a situação. Exemplo: quando a característica é a resistência de uma peça mecânica.

De modo geral, podemos escrever o valor esperado da função de perda quadrática, para o caso de n unidades, como sendo: $L(Y) = k \cdot \sigma_*^2$, sendo que σ_*^2 e k assumem os seguintes valores, conforme o caso:

- característica "melhor quando no valor nominal"

$$k = \frac{A}{\Delta^2}$$

$$\sigma_*^2 = \frac{1}{n} [(Y_1 - m)^2 + \dots + (Y_n - m)^2]$$

Deve-se observar que σ_*^2 não representa a variância, pois o desvio é medido em relação ao valor nominal (m) e não em relação ao valor médio de Y ;

- característica "quanto menor melhor"

$$k = \frac{A}{\Delta^2}$$

$$\sigma_*^2 = \frac{1}{n} (Y_1^2 + \dots + Y_n^2)$$

Este caso é equivalente ao anterior substituindo-se m por zero;

- característica "quanto maior melhor"

$$k = A \cdot \Delta^2$$

$$\sigma_*^2 = \frac{1}{n} \left(\frac{1}{Y_1^2} + \dots + \frac{1}{Y_n^2} \right)$$

Este caso é obtido a partir da expansão de $L(Y)$ em série de Laurent.

RUÍDOS E CONTROLE DA QUALIDADE OFF-LINE

As causas que afetam a variabilidade da função do produto recebem o nome de ruídos ou fatores de perturbação, que podem ser enquadrados em três tipos:

- **Ruídos Externos:**

estão relacionados tanto com as condições de uso do produto quanto com o ambiente. Exemplos: operação ou utilização incorreta do produto, umidade do ar, tensão da rede de energia, poeira, temperatura do ambiente etc.

- **Ruídos Internos ou Ruídos Degenerativos:**

estão associados aos parâmetros (características) do produto que se alteram durante o uso ou estocagem.

- **Ruídos da Produção ou Imperfeições na Produção:**

correspondem à variabilidade entre unidades do produto manufaturadas sob as mesmas especificações. São decorrentes de variações na produção.

Tendo em vista objetivos de eficácia econômica, o produto e o processo de produção devem ser projetados de modo que os seus desempenhos sejam os menos sensíveis a todos os tipos de ruídos. Essa resistência ou robustez deve ser interpretada no sentido de que as características funcionais do produto sejam insensíveis aos ruídos.

Para atingir-se essa robustez os esforços de controle da qualidade devem ser iniciados durante a fase de projeto do produto. A qualidade nessa fase é particularmente importante. Embora a variabilidade entre unidades produzidas (ruídos da produção) possa ser reduzida durante a fase de produção, a degeneração do produto (ruídos internos), bem como a variação de desempenho frente ao ambiente (ruídos externos) não o podem. Entretanto, to-

dos esses tipos de ruídos podem ser enfrentados durante o projeto do produto.

A Tabela 1 mostra, para cada fase do ciclo de desenvolvimento do produto, as possibilidades de prevenção contra as fontes de variação.

Taguchi define como objetivo principal da Engenharia de Qualidade a obtenção de produtos que sejam resistentes aos ruídos ou fontes de variação do desempenho.

Para fazer frente aos ruídos, a Engenharia da Qualidade deveria atuar a três níveis:

● **Controle da Qualidade durante o projeto do produto**

Este controle teria por finalidade estudar e buscar a eliminação das variações no desempenho ou nas funções do produto, causadas por todos os tipos de ruídos.

O projeto do produto desenvolve-se em três etapas consecutivas de otimização:

- Projeto do Sistema: a partir dos recursos e da tecnologia disponíveis, desenvolve-se o projeto básico do produto que atenda às necessidades do mercado.
- Projeto dos Parâmetros: nesta segunda etapa procura-se otimizar o desempenho do sistema (produto) através da experimentação, definindo-se valores para os parâmetros de todos os componentes do sistema que tornem o seu desempenho o mais uniforme possível e que minimizem o efeito dos ruídos.
- Projeto de Tolerâncias: nesta etapa, procura-se remover as causas dos ruídos, levando-se em consideração tanto a perda na qualidade por desvios em relação a valores nominais fixados, quanto o custo das diferentes classes de componentes e materiais disponíveis. Examina-se, por exemplo, as possibilidades de melhoria do desempenho, através da utilização de matérias-primas de melhor qualidade e maior custo. Portanto, procura-se controlar as fontes de ruído atuando-se sobre as

causas, geralmente aumentando os custos associados ao produto.

As etapas de Projeto dos Parâmetros e Projeto de Tolerâncias são desenvolvidas com a utilização, como ferramentas principais das técnicas de delineamento de experimentos.

● **Controle de Qualidade durante o Projeto do Processo**

O objetivo aqui é buscar as especificações do processo de produção que assegurem a obtenção de produtos uniformes e a nível econômico. Para tanto, deve-se recorrer, de forma similar, às três etapas já mencionadas:

- Projeto do Sistema (escolha do processo).
- Projeto dos Parâmetros (otimização de parâmetros do processo, de modo a minimizar o efeito dos ruídos que surjam durante a produção).
- Projeto de Tolerâncias (remoção das causas dos ruídos que perturbam o processo).

● **Controle da Qualidade durante a Produção**

Mesmo com o processo de produção e condições de operação previamente determinados, ainda persistem algumas fontes de variabilidade no dia-a-dia, tais como: variabilidade da matéria-prima, falha de máquina, desgaste de ferramentas, erro humano etc. Essas fontes de variabilidade são acompanhadas pelo Controle da Qualidade durante a produção, através de três formas de atuação:

- diagnóstico do processo e ajustagem, que são tradicionalmente conhecidos como controle de processo;
- predição e correção, também conhecidos como controle por retroalimentação;
- medição e ação, conhecidas como inspeção.

Tabela 1

Possibilidades de prevenção contra as fontes de variação

Fases de Desenvolvimento do Produto	FONTES DE VARIAÇÃO		
	Ruídos Externos (Variáveis ambientais e uso incorreto do produto)	Ruídos Degenerativos (Deterioração do produto)	Ruídos da Produção (Diferenças entre unidades do produto)
Projeto do Produto	0	0	0
Projeto do Processo	X	X	0
Produção	X	X	0

0 = é possível contramedidas

X = é impossível contramedidas

A "medição e ação" é dirigida para o produto, enquanto "diagnóstico e ajustagem" e "predição e correção" são voltados para o processo. Deve-se ressaltar que, neste caso, Taguchi está se referindo ao Controle da Qualidade convencional.

O Controle de Qualidade durante os projetos do produto e do processo define o que Taguchi chama de Controle da Qualidade *Off-Line*, enquanto o Controle da Qualidade durante a produção seria o *On-Line*.

O Controle da Qualidade *Off-Line* consiste num método sistemático para otimização dos projetos do produto e do processo de produção, com vistas a obter produtos de alta qualidade (dentro do âmbito da definição de qualidade de Taguchi) e de baixo custo.

As etapas do Controle da Qualidade *Off-Line* são:

- identificação dos fatores de ruídos e dos parâmetros de projeto que afetam significativamente o desempenho e que possam ser manipulados, bem como os seus níveis potenciais de atuação;
- realização de experimentos fatoriais fracionais no produto e no processo utilizando-se matriz ortogonal;
- análise dos resultados dos experimentos para determinar o nível ótimo de operação dos parâmetros estudados (consideram-se nesta análise tanto a média como a variância do desempenho);
- realização de um experimento adicional para certificar-se que esse nível de operação dos parâmetros melhora, de fato, a qualidade.

A característica principal do Controle da Qualidade *Off-Line* é o uso de delineamento de experimentos através de matriz ortogonal e a análise da relação sinal/ruído. O delineamento em matriz ortogonal permite, de maneira econômica, estudar-se simultaneamente o efeito de muitos fatores sobre a média e a variância dos desempenhos do produto e do processo. A razão sinal/ruído é uma medida da variabilidade do desempenho, que veremos a seguir.

Segundo Taguchi, essa otimização assegura que as condições ótimas dos projetos do produto e processo obtidas são robustas e estáveis, significando que apresentam variação mínima frente aos ruídos.

DELINEAMENTO DE EXPERIMENTO E RAZÃO SINAL/RUÍDO

Taguchi (1986) propôs uma abordagem de delineamento de experimentos para o projeto de parâmetros do produto ou processo. As variáveis que afetam as características de desempenho são classificadas em dois tipos: parâmetros do projeto e fontes de ruído.

Parâmetros do projeto são aqueles do produto, ou processo, cujo valor nominal define as especificações de projeto. As fontes de ruído compreendem todas as variáveis que fazem com que a característica de desempenho se desvie de seu valor nominal.

Obviamente, nem todos as fontes de ruído podem ser incluídas em um delineamento de experimentos para definição dos parâmetros de projetos. As fontes de ruído que podem ser variadas sistematicamente em um experimento são chamadas de fatores de ruído, incorporando-se no experimento os mais significativos.

O objetivo do delineamento de experimentos, proposto por Taguchi, é encontrar os valores para os parâmetros de projetos para os quais o efeito dos fatores de ruído na característica de desempenho é mínimo. Esses valores "ótimos" para os parâmetros de projeto são obtidos com a variação sistemática dos valores dos parâmetros no experimento e comparação do efeito dos fatores de ruído para cada teste realizado.

Assim, o delineamento de experimentos de Taguchi é desenvolvido em duas etapas: uma matriz de parâmetros de projeto e uma matriz de fatores de ruído. A matriz de parâmetros de projeto especifica os níveis de teste dos mesmos. As colunas representam os parâmetros de projeto e as linhas representam diferentes combinações de níveis de teste. A matriz de fatores de ruído especifica os níveis de teste dos mesmos. As colunas representam os fatores de ruído e as linhas representam diferentes combinações de níveis de ruídos.

O experimento de Taguchi consiste na combinação das duas matrizes. Cada teste realizado na matriz de parâmetros de projeto é seguido de testes com todas as linhas da matriz de fatores de ruído. A característica de desempenho do produto ou processo é avaliada para cada um dos testes da matriz de fatores de ruído, associada a cada teste de parâmetros.

No caso de características de desempenho contínuas, os resultados de cada teste são usados para computar uma "estatística de desempenho". A "estatística de desempenho" estima o efeito dos fatores de ruído para determinada combinação de parâmetros. A partir da análise dessa estatística obtém-se os melhores valores para os parâmetros do projeto. O melhor valor previsto é, em seguida, verificado através de um experimento de confirmação.

Taguchi recomenda o uso de delineamento ortogonal para construir as matrizes de parâmetros do projeto e dos fatores de ruído, e sugere o uso de uma estatística chamada "razão sinal/ruído" como "estatística de desempenho". Em sua forma elementar, a razão sinal/ruído representa 10 vezes o logaritmo do quadrado da razão entre a média e o desvio-padrão dos resultados de cada teste, ou seja, é medida em decibéis. Essa relação representa o inverso do coeficiente de variação medido em decibéis tradicionalmente conhecido. Os parâmetros de projeto associados à máxima razão sinal/ruído garantem a qualidade robusta, isto é, o desempenho menos sensível às variações de ruído.

Supondo que Y_1, Y_2, \dots, Y_n representem valores para a característica de desempenho, a razão sinal/ruído (S/R) de Taguchi, para cada caso, é o seguinte:

- característica “melhor no valor nominal”

$$S/R = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{Y}^2}{s^2} \right)$$

onde $\bar{Y} = \frac{\sum Y_i}{n}$ e $s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2$

- característica “quanto menor melhor”

$$S/R = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum Y_i^2 \right)$$

- característica “quanto maior melhor”

$$S/R = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum \frac{1}{Y_i^2} \right)$$

COMENTÁRIOS FINAIS

O método de Taguchi procura resolver os problemas de qualidade por uma perspectiva não-ortodoxa, “robustecendo” os projetos do produto e do processo, de modo que as variações naturais do processo, do ambiente e do uso não tenham uma influência decisiva sobre o desempenho. Essa perspectiva, considerada de menor custo, parte do pressuposto que as condições de variabilidade e adversidade do ambiente sempre existirão, afetando tanto o desempenho do produto quanto o do processo. Conseqüentemente, o objetivo do método de Taguchi é otimizar a qualidade do produto, tendo em vista a existência de condições adversas que interferem no seu desempenho.

Do ponto de vista das técnicas utilizadas, o trabalho de Taguchi tem recebido críticas quanto à falta de sofisticação de alguns métodos estatísticos propostos e particularmente com relação à razão sinal/ruído. Deve-se observar que, nesses tipos de aplicação, costuma-se analisar a média e a variância separadamente e que Taguchi propõe a combinação desses dois parâmetros através da razão sinal/ruído.

Um mérito incontestável dos trabalhos de Taguchi consiste no uso de difusão do ferramental estatístico disponível sobre delineamento de experimentos, junto às

áreas de Controle de Qualidade e de Engenharia do Produto e do Processo.

Taguchi define qualidade como a perda que o produto impõe à sociedade após sua venda. O autor considera que as perdas ocorridas durante a produção (materiais, energia etc.) estão embutidas no preço do produto. Poderíamos acrescentar que as perdas no processo não são por ele enfatizadas, pois já são amplamente abordadas pela literatura tradicional da área de Controle de Qualidade.

O objetivo subjacente à proposta de Taguchi é a busca da máxima homogeneidade, com redução da variação de desempenho do produto durante seu uso, bem como da variação entre unidades do produto, caminhando-se em direção ao valor nominal. Esse objetivo, de não apenas cumprir os limites de especificações, como tradicionalmente se faz, mas de alcançar o valor nominal a fim de reduzir as perdas, obviamente exige e leva a um contínuo processo de aperfeiçoamento da qualidade.

A abordagem do autor demonstra a estreita relação que deve existir entre as áreas de Pesquisa & Desenvolvimento, Projeto do Produto, Projeto do Processo e Controle da Qualidade.

Os métodos de Taguchi originaram-se de sua experiência na empresa Electrical Communications Laboratories, do Japão. Suas técnicas vêm sendo incorporadas aos sistemas CAE – Engenharia Assistida por Computador, visando assegurar robustez, confiabilidade e manufaturabilidade do produto desde o seu projeto.

Esses métodos estão sendo aplicados com amplo sucesso particularmente em empresas dos setores eletroeletrônico e de comunicações como a IBM, Control Data, ITT, Xerox etc. Segundo a Revista *Business Week* (8 jun.1987), a ITT, a partir do uso dos métodos de Taguchi, conseguiu reduzir os seus níveis de defeitos em mais de 50% e economizou 60 milhões de dólares no período de 1985 a 1987.

Os investimentos em projetos de melhoria da qualidade, a partir da proposta de Taguchi, tornam-se muito mais atrativos à medida que se tem como referência espectro de preocupações mais abrangente e horizonte de longo prazo.

Pode-se dizer que a aplicação da metodologia de Taguchi supõe que a empresa possua capacidade de pesquisa e experimentação em termos de mão-de-obra qualificada, laboratórios, conhecimento científico e tecnológico, informações sobre desempenho do produto e processo etc., além de amplos conhecimentos de custos para todas as fases do produto e do processo considerado. Obviamente, no Brasil, estas condições são preenchidas, principalmente, pelas empresas multinacionais e pelas grandes empresas nacionais de alguns setores.

Deve-se ressaltar que as decisões a serem tomadas visam não só reduzir a variação do desempenho, mas também minimizar o custo total para a sociedade, mesmo com aumento em algumas parcelas desse custo.

A tentativa de aplicação desses métodos de forma despreparada ou inadequada, sem conhecimento e infor-

mações necessárias, poderá levar não só a resultados equivocados mas, principalmente, à vulgarização e descrédito do método, dificultando a médio prazo a sua difusão e adoção pelas empresas brasileiras, a exemplo do que ocorreu com o programa de Círculos de Controle da Qualidade (CCQ).

O nosso objetivo não foi o de aprofundar o tratamento estatístico do Método, mas contribuir para a difusão dos novos conceitos introduzidos por Taguchi. Evidentemente, ainda se faz necessário o aprofundamento da discussão de muitos dos pontos aqui levantados.

Abstract

This work presents a survey and critical analysis of the Taguchi Method which from the concept of "robust quality" shows a methodology that permits the quantification and evaluation of the product quality (and its implications) in the stage of pre-production (product design and process design).

Unlterms:

- product quality
- robust quality
- loss function
- quality control off-line

Referências Bibliográficas

ALSTER, N. The revitalization of high-tech manufacturing. *Electronic Business*, January, 1987. p. 52-64

BARKER, T.B. Quality Engineering by design: Taguchi's philosophy, *Quality Progress*, Wisconsin, (Dec.):32-42, 1986.

The push for quality: special report. *Business Week*, New York, (June 8):130-44, 1987.

KACKAR, R.N. Taguchi's quality philosophy: analysis and commentary, *Quality Progress*, Wisconsin, (Dec.):21-9, 1986.

PRADKE, M.S. et alii. Off-line quality control in integrated circuit fabrication using experimental design. *The Bell System Technical Journal*, 62(5):1273-309, May/June 1983.

TAGUCHI, G. *Introduction to quality engineering*. Tokyo Asian Productivity Organization, 1986.

_____. Quality engineering in Japan. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 19(4):237-42, 1985.

Recebido em janeiro/89

2ª Versão em abril/89