

**THOMÁS JOSÉ BONINI VIEIRA DA ROCHA**

**QUALIDADE EM PROJETOS**

Relatório apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de  
São Paulo para obtenção do Título de Engenheiro de Materiais

Área de Concentração:  
Garantia da Qualidade

Orientador:  
Prof. Dr. Tibério Cescon

**São Paulo**

**2002**

**Aos imortais politécnicos, a quem provoquei,  
mas que me incitaram neste objetivo. Que  
possa gozar em minha vida de outras experi-  
ências tão ricas quanto esta.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao mestre e orientador Prof. Dr. Tibério Cescon, pelos ensinamentos e permanente estímulo pela magia que é inerente ao aprendizado.

A minha família, pelo incentivo e incansável apoio.

A minha namorada Juliana, pelo doce instigar.

A meus sinceros amigos do MaMeMi ou não, por compartilharem os momentos de filosofia.

Em especial aos colegas Danilo, Fábio, Lílian e Melissa (5º ano), que contribuíram diretamente com este trabalho.

A todos que contribuíram indiretamente na execução deste trabalho.

A Deus, cuja paciência é notável a cada instante...

## **RESUMO**

Visando a aproveitar a oportunidade que a disciplina oferece, o presente trabalho pretende abordar o tema da Qualidade e esclarecer as interfaces que este possui com os projetos de Engenharia, em especial de Materiais. Nos últimos anos muitas empresas líderes de mercado investiram maciçamente em sistemas de qualidade, visando otimizar suas linhas de produção. Os esforços em melhorar os processos trouxeram grande impacto na produção e no projeto dos novos produtos, diminuindo o desperdício e os custos, tanto na produção quanto para o cliente. Mas uma nova visão está se instalando nas empresas. Os administradores estão deixando de lado o slogan “defeito zero”, e passando a ver o outro lado da moeda: o lado do consumidor. É do conhecimento geral que a grande qualidade de um produto ou serviço associada à satisfação dos clientes são a chave para a sobrevivência de qualquer empresa. E é a satisfação dos clientes que o Método Taguchi, que será analisado, discutido e ilustrado para exemplos de Engenharia neste trabalho, tem como prioridade. O trabalho tem intenção de ser um produto interessante tanto para Engenheiros de Materiais, como para Engenheiros em geral.

## **ABSTRACT**

Aiming to take the opportunity that the subject offers, the present report, intends to approach the Quality theme and clarify the interfaces that it has with Engineering projects, particularly Materials Engineering. For the latest years, many market-leader companies invested massively in quality systems, aiming to optimize their manufacturing lines. The efforts to improve operations brought great impact to new products project and manufacturing, reducing waste and costs, for operations as well as for the customer. However a new vision is settling down on the companies. The managers are omitting the slogan “zero defects”, and beginning to see the other side of the matter: the customer side. It is known that the high quality of a product or service associated to the client satisfaction are the key factors that the Taguchi method, which will be analyzed, discussed and shown for Engineering examples in this report, take as a priority. This research has the intention of being an interesting product either for Materials Engineers as well as Engineers in general.

## RÉSUMÉ

En visant à profiter l'occasion que la discipline offre, le présent rapport prétend approcher le thème de la Qualité et éclaircir interfaces que celui-ci possède avec des projets d'Ingénierie, particulièrement de Matériels. Dans les dernières années beaucoup de sociétés leaders de marché ont investi massivement dans des systèmes de qualité, en visant optimiser leurs chaînes de production. Les efforts pour améliorer leurs procédés leur ont apporté grande incidence dans la production et dans le projet de leurs nouveaux produits, en diminuant leur gaspillage et leurs coûts, tant dans la production comme pour leurs clients. Toutefois une nouvelle vision est si d'en installer dans les sociétés. Les administrateurs laissent de côté le slogan "défaut zéro", et sont en passant à voir l'autre côté de la monnaie: le côté de leur consommateur. C'est de connaissance générale que la qualité supérieure d'un produit ou le travail associé à la satisfaction de leurs clients sont elles clés pour la survie de toute société. Et c'est la satisfaction de leurs clients que la Méthode Taguchi, qui sera analysé, discuté et illustré par des exemples d'Ingénierie dans ce travail, a comme priorité. Cette recherche a l'intention d'être un produit intéressant tant pour les Ingénieurs de Matériels de même que que les Ingénieurs en général.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 5.1 - Função Perda de Taguchi (KACKAR, 1986 apud LOCHNER; MATAR, 1990)	18
Fig. 5.2 - Diagrama de Parâmetros (P-diagram) de um produto/processo/sistema. (CARASTAN et al, 2002) .....	19

## LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Níveis de fatores para experimento exemplo.....	27
Tabela 6.2 - Relatório para experimento-exemplo .....	27
Tabela 6.3 - Tabela resposta para o exemplo .....	28
Tabela 6.4 - Resposta média em diferentes níveis de temperatura de vazamento e de moldagem .....	28
Tabela 6.5 - Matriz-modelo para um experimento de 5 fatores em 8 iterações.....	29
Tabela 7.1 - Matriz-modelo para 3 fatores em 4 iterações (LOCHNER; MATAR, 1990) .	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOM	- Análise da média
ANOVA	- Análise de variância
CEP	- Controle estatístico de processo
CQ	- Controle de qualidade
Fig.	- Figura
FMEA	- Análise de modo e efeito de falhas
LIE	- Limite inferior de especificação
LSE	- Limite superior de especificação
PIB	- Produto interno bruto
Pol.	- Polegada
QFD	- Emprego da função da qualidade
QLF	- Função perda de qualidade
S/N	- Razão sinal-ruído

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

- \$A** - Custo de se produzir um produto fora de especificação
- T** - Alvo central

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. CONTROLE MODERNO DE QUALIDADE .....	2
3. QUALIDADE EM PROJETOS DE ENGENHARIA.....	5
4. HISTÓRIA DA ENGENHARIA DE QUALIDADE: REGISTROS AMERICANOS E JAPONESES.....	8
5. A ABORDAGEM TAGUCHI DA QUALIDADE .....	11
5.1. Definição de Qualidade.....	11
5.2. Método Taguchi: Objetivos, Características e Metodologia.....	13
5.2.1. Engenharia da Qualidade.....	14
5.3. Função Perda .....	15
5.4. Etapas do Projeto Robusto .....	18
5.2.1. Projeto do Sistema.....	18
5.2.2. Projeto de Parâmetros.....	18
5.2.3. Projeto de Tolerâncias .....	21
6. MODELOS DE FATORES: EXPERIMENTOS EM 2 NÍVEIS.....	22
6.1. Melhoria do Produto .....	22
6.2. Método Tradicional X Projeto Robusto .....	24
6.3. Modelos de Fatores Fracionais .....	25
6.3.1. Exemplo (LOCHNER; MATAR, 1990).....	26
6.3.2. Cinco fatores em oito iterações.....	28
7. AS MATRIZES INTERNA E EXTERNA DE TAGUCHI.....	30
7.1. Fatores de Ruído .....	30
7.2. Modelos Experimentais para Fatores de Controle e Ruído.....	31
8. CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES .....	34
8.1. Projetos de Engenharia e Melhoria da Qualidade.....	34
8.2. Passos para Implementar o Uso de Projetos de Engenharia.....	35
9. CONCLUSÕES.....	38
LISTA DE REFERÊNCIAS .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

O conceito de Qualidade foi primeiramente associado à definição de conformidade às especificações. Posteriormente o conceito evoluiu para a visão de Satisfação do Cliente.

Obviamente a satisfação do cliente não é resultado apenas e tão somente do grau de conformidade com as especificações técnicas, mas também de fatores como prazo e pontualidade de entrega, condições de pagamento, atendimento pré e pós-venda, flexibilidade, etc.

Paralelamente a esta evolução do conceito de Qualidade, surgiu a visão de que o mesmo era fundamental no posicionamento estratégico da empresa perante o Mercado.

Pouco tempo depois se percebeu que o planejamento estratégico da empresa enfatizando a Qualidade não era suficiente para seu sucesso. O conceito de satisfação do cliente foi então estendido para outras entidades envolvidas com as atividades da Empresa.

O termo Qualidade Total representa a busca da satisfação, não só do cliente, mas de todos os "stakeholders" (entidades significativas na existência da empresa) e também da excelência organizacional da empresa.

A função tradicional do controle da qualidade é, basicamente, eliminar das linhas de produção os itens que não atendam às especificações, inspecionando e ensaiando os produtos finais. Desta forma, deve certificar-se propriamente de tudo ou com base em amostras.

A propaganda e a preferência vêm recaindo sobre produtos de **qualidade superior** com baixo custo. Além da competição de além-mar pelo mercado norte-americano, aumentou a importância do controle da qualidade. Conseqüentemente, as suas diversas etapas têm sido redefinidas para assegurar a qualidade do produto durante todo seu ciclo de vida. Este trabalho descreve o controle da qualidade do ponto de vista da Engenharia, procurando ampliar este conceito durante a fase de produção.

## 2. CONTROLE MODERNO DE QUALIDADE

Há 30 anos a maioria dos departamentos de Controle de Qualidade (CQ) eram operações de inspeção. O chefe do departamento freqüentemente tinha o título de Inspetor-chefe. Hoje o controle de qualidade, ou garantia da qualidade, é muito mais que inspeção. Algumas companhias até delegaram a maioria das responsabilidades de inspeção aos operadores de produção, deixando os profissionais da qualidade livres para se concentrarem em atividades de melhoria da qualidade. Em outras companhias as pessoas de controle de qualidade ainda ocupam a maior parte de seu tempo procurando por produtos defeituosos. Este é um uso limitado dos recursos humanos. Pessoas de CQ devem ajudar a prevenir problemas mais do que reagir a eles.

Como se parece um sistema moderno de qualidade? Antes de tudo, *é focado no consumidor*. Os produtos são projetados e produzidos e os serviços fornecidos para alcançar os requisitos do cliente. Nada de criar mercados para novos produtos. Há também um reconhecimento de clientes internos (da companhia) assim como externos. Todos na companhia identificam quem são seus clientes e fornecedores e quais são seus requisitos. Se um relatório deve ser preparado, é responsabilidade do gerente (fornecedor) preparar o material para a secretária (cliente) de forma que o relatório possa ser propriamente preparado e enviado à pessoa que precisa do relatório (outro cliente). A prática de cada departamento otimizando suas próprias operações, sem atenção às necessidades de outro departamento na companhia, não é mais aceitável.

Outra característica de um sistema moderno de qualidade é que o processo de melhoria da qualidade é *liderado pela alta administração*. Se a responsabilidade pela qualidade é delegada ao departamento de CQ, então todos na companhia entendem que qualidade não é uma preocupação chave. Deve haver envolvimento ativo e visível da alta administração no esforço de qualidade. O antigo ministro do trabalho americano William E. Brock disse que “A maioria dos funcionários quer fazer um bom trabalho, quer entregar um produto de qualidade, quer fornecer um serviço de qualidade, e quer estar orgulhosa do que faz. Mas o tom deve ser acertado com a administração. Se qualidade não está em sua agenda, não estará na dos funcionários. Se os funcionários percebem que o único interesse da administração é no que eles descrevem como a última linha da corporação, então seu interesse em mudar será apenas em suas últimas linhas – salários e benefícios”. (National Quality Fórum III, 1988 apud LOCHNER et al, 1990)

É importante que *todos entendam suas responsabilidades específicas para a qualidade*. Embora seja verdade que “Qualidade é função de todos”, também é verdade que todos tenham uma responsabilidade diferente, dependendo de sua posição dentro da companhia. Desenvolvimento de Produto é responsável por projetar novos produtos que alcancem os requisitos do cliente e que possam ser consistente e economicamente produzido por Manufatura (Manufatura é um cliente de Desenvolvimento de Produto). Compras deve não só comprar materiais sob preço e entrega apenas. A Alta Administração deve mostrar verbalmente e na prática que qualidade é de suma importância para a sobrevivência da companhia. Dr. W. Dekker, presidente do quadro de gerência da Philips Corporation, uma das maiores empresas de manufatura do mundo, disse que “a qualidade de produtos e serviços é da suma importância para a continuidade de nossa empresa. Adotando uma política de qualidade focada no controle completo de cada atividade, máxima qualidade, produtividade, flexibilidade e redução de custos... serão alcançados. Cada funcionário deve ser incumbido de uma atitude direcionada para uma busca contínua de melhorias”. (FILLELY, 1985 apud LOCHNER et al, 1990)

Uma quarta característica de um sistema moderno de qualidade é que ele é *orientado para a prevenção de defeitos* mais que ser focado na detecção de defeitos. Qualidade através de inspeção não é suficiente, e é cara demais. Embora seja necessário fazer algum tipo de inspeção ou auditoria de produtos acabados, os esforços de qualidade de uma companhia devem ser focados na prevenção do acontecimento de defeitos – fazendo a coisa certa certo na primeira vez. Um sistema moderno de qualidade trabalha com os processos de controle ao invés de focar nos produtos acabados. Se o processo está certo, o produto acabado estará certo. David T. Kearns, presidente da Xerox Corporation, disse que “controle de qualidade... não tem nada a ver com inspecionar um produto no fim da linha de produção. É o envolvimento de custo e qualidade em cada função, e a preocupação que um provoca no outro. Alta qualidade reduz seus custos”.

Finalmente, *qualidade deve ser um modo de vida*. Assuntos de qualidade são discutidos em cada reunião de gerenciamento; não há consideração dada ao envio de um produto inaceitável de maneira a atender programações de produção. Todos os funcionários recebem treinamentos em conceitos e métodos modernos de qualidade. Todos na companhia podem participar no esforço de melhoria da qualidade. John E. Young, presidente da Hewlett-Packard, disse que “qualidade não vem simplesmente de se ter uma grande equipe de garantia de qualidade para reprovar produtos e serviços defeituosos antes que eles cheguem

ao cliente; é alcançada fazendo o processo de melhoria uma parte permanente da cultura de uma empresa”. (Fortune, 1985 apud LOCHNER et al, 1990)

Um sistema moderno de qualidade pode ser dividido em duas partes:

- Qualidade de projeto
- Qualidade de conformidade

*Qualidade de projeto* refere-se àquelas atividades que garantem que os produtos e serviços novos ou modificados são projetados para alcançar as necessidades e expectativas do cliente, e são economicamente alcançáveis. Qualidade de projeto é primariamente a responsabilidade de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), Engenharia de Processo, Pesquisa de Mercado, e grupos relacionados.

*Qualidade de conformidade* refere-se à manufatura de produtos ou fornecimento de serviços que alcancem especificações previamente determinadas e claramente definidas. Produção, Programação, Compras, e Despacho têm responsabilidade primária por qualidade de conformidade. A Administração tem a responsabilidade de ver que as pessoas têm treinamento instrumentos, e outros recursos para realizar seus trabalhos, e têm a oportunidade de tornarem-se envolvidas no processo de melhoria da qualidade.

### 3. QUALIDADE EM PROJETOS DE ENGENHARIA

“Qualidade não pode ser inspecionada de um produto, deve ser intrínseca.” Ouvimos esta afirmação tão freqüentemente que poderíamos começar a pensar que todos estão ocupados fazendo isto – projetando e construindo qualidade em produtos, processos, e serviços. Mas a realidade é que poucas pessoas sabem como “construir qualidade”. O que passa por “construção” em muitas empresas é resolução de problemas. Resolução de problemas é, é claro, uma atividade importante. Mas não seria melhor se pudéssemos projetar produtos e processos de forma que os problemas nunca ocorressem em primeiro lugar? James E. Olson, presidente da AT&T disse, “Acreditamos que qualidade não é algo que se adiciona a um produto, e sim algo que se põe em um produto ou serviço desde o projeto até a opinião do cliente. Quando as pessoas dizem que qualidade custará dinheiro – eu não acredito. Quando se faz certo da primeira vez, se terminará com um cliente satisfeito e de fato custos reduzidos”. (Quality, 1985 apud LOCHNER et al, 1990) Um sonho? Não exatamente. Existem empresas onde os problemas são prevenidos na fase de projeto, onde a qualidade de produtos é lidada antes das especificações. Nessas empresas alguns ou todos os seis métodos seguintes são usados por engenheiros de projeto e desenvolvimento:

- Engenharia simultânea;
- Desdobramento da função qualidade (QFD);
- Análise de confiabilidade;
- Análise de modo e efeito de falhas (FMEA);
- Métodos de Taguchi;
- Experimentos projetados estatisticamente.

*Engenharia simultânea* se refere ao desenvolvimento integrado de produtos, seus processos de manufatura, e sistemas de suporte. Mais do que fazer Pesquisa e Desenvolvimento projetar um novo produto, passar o novo projeto para engenheiros de manufatura para desenvolverem procedimentos de manufatura, e então voltar o novo processo para que o pessoal de manufatura e suporte trabalhe junto sob o projeto de engenharia simultânea. O resultado são custos de desenvolvimento e manufatura reduzidos, e um produto que alcance as expectativas do cliente. Engenharia simultânea é mais uma filosofia de engenharia que um método. É similar a engenharia de sistemas. (WINNER et al, 1988 apud LOCHNER et al, 1990)

*Desdobramento da função qualidade* foi desenvolvido no estaleiro de Kobe no Japão no início dos anos 70. Sem sido usado sucessivamente por muitas firmas japonesas, mais notavelmente a Toyota. QFD é uma técnica altamente estruturada para assegurar que a “voz do cliente” não é perdida no ruído do desenvolvimento de produto. Sullivan (1986) apud Lochner et al (1990) descreve os seguintes quatro componentes básicos:

- **Matriz de planejamento** – As linhas da matriz representam os requisitos do cliente em termos do cliente, e as colunas listam as características de controle finais do produto. Marcas feitas na matriz representam as relações entre os requisitos do cliente e as características de controle do produto;
- **Matriz de emprego** – Os requisitos do cliente e as características de controle do produto são listados detalhadamente nesta matriz, de forma que as características críticas de componente possam ser identificadas;
- **Plano de processo e diagramas de controle de qualidade** – O diagrama de plano de processo mostra a relação entre processos de manufatura e características críticas de componente. Ele ajuda na identificação de onde os pontos de monitoramento para o processo são precisos. O diagrama de controle de qualidade inclui um esquema do fluxo de processo e descreve os pontos necessários de controle por localização, tipo e frequência de uso;
- **Instruções de operação** – Este documento descreve operações cujo pessoal de fábrica deve realizar para assegurar que os requisitos críticos de produto são alcançados.

QFD consome tempo, mas o trabalho adicionado “de antemão” pode significar economias significativas e satisfação do cliente adicional no produto.

*Análise de confiabilidade* relaciona a qualidade de um produto com o tempo. O produto irá operar propriamente durante o tempo de uso requerido? Análise estatística de dados de falha, teste de vida, modelos probabilísticos de sobrevivência, e FMEA são importantes ferramentas em engenharia de confiabilidade.

*Análise de modo e efeito de falha* é uma ferramenta usada por engenheiros de projeto e comitês de revisão de projeto para proteger-se contra problemas potenciais em processos e produtos. A FMEA é uma abordagem sistemática para identificação de falhas potenciais em produtos e processos (modos de falha), seus efeitos em termos de funcionalidade e segurança, e quais passos devem ser tomados para protegê-los contra essas falhas. A FMEA deve ser feita durante o desenvolvimento de produto, e novamente quando falhas

não previstas ocorram ou haja mudanças de projeto. Com o tempo, o uso da FMEA pode evitar modificações caras por revelar deficiências ou acasos potenciais de projeto anteriores à produção real. Normalmente uma FMEA é conduzida de baixo para cima, começando no nível dos componentes através de subsistemas até o sistema completo. A FMEA deve examinar a performance sob condições ambientais extremas e deve tentar antecipar possível uso ou aplicação indevidos pelos consumidores. A FMEA foi usada originalmente na indústria aeroespacial para prevenir falhas de equipamentos potencialmente catastróficas. A técnica é agora aplicada em processos de produção e também operações de serviços. Indústrias alimentícias e farmacêuticas usam FMEA sob o nome Análise de Acasos e Pontos de Controle Críticos (HACCP) como uma maneira de prevenir contaminação de produtos durante a produção e manuseio.

*Métodos de Taguchi* referem-se a técnicas de engenharia de qualidade desenvolvidas pelo Dr Genichi Taguchi. Durante os anos 50 e 60, Dr. Taguchi desenvolveu uma abordagem abrangente à qualidade que toca todos os aspectos de projeto, manufatura e uso de um produto.

*Experimentos projetados estatisticamente* são o coração da engenharia de qualidade. A era de experimentação através da mudança de uma variável por vez acabou. Projetos experimentais modernos tornam possível obter uma quantidade incrível de informação sobre um processo usando um número limitado de iterações experimentais. Há um debate considerável ultimamente sobre os méritos relativos dos projetos experimentais de Taguchi e os projetos desenvolvidos por estatísticos ocidentais. Devemos dizer que em linhas gerais estamos falando da diferença entre seis e meia-dúzia – terminologia diferente para o mesmo item básico.

#### **4. HISTÓRIA DA ENGENHARIA DE QUALIDADE: REGISTROS AMERICANOS E JAPONESES**

Tem sido dito que os americanos são os maiores inovadores no mundo. Os Estados Unidos são também reconhecidos como líderes mundiais em aumento de produtividade. Mas a melhoria da qualidade é uma área na qual a indústria americana tem levado desvantagem na competição internacional. Embora algumas empresas americanas tenham qualidade excelente nos seus produtos e processos, outras perderam grandes fatias de mercado para a competição internacional, mais notavelmente a japonesa, por causa de qualidade secundária.

Sistemas de Qualidade como compreendemos são um fenômeno do século XX. Antes da revolução industrial, qualidade era construída nos produtos à medida que eram feitos. Era simplesmente caro demais fazer um produto que fosse inaceitável. As pessoas envolvidas na manufatura conheciam seus produtos da cabeça aos pés. Cada item era produzido, do início ao fim, ou por uma pessoa ou por uma pequena equipe de artesãos que conheciam o que os consumidores esperavam do produto. Grandes projetos públicos como estradas, aquedutos, ou palácios eram construídos usando mão-de-obra desqualificada, mas supervisores com conhecimento e inspetores do governo estavam presentes a todo instante para assegurar que o trabalho estava sendo feito corretamente. Com a revolução industrial de repente havia milhares de trabalhadores desqualificados envolvidos em processos de manufatura em alta velocidade. Na maior parte das vezes eles não entendiam os processos de manufatura ou a tecnologia por trás deles. Para complicar ainda mais, os gerentes tinham pouca experiência em conduzir grandes processos. Por volta de 1900, Frederick Taylor apresentou seus métodos de “Gerenciamento Científico”. Ele afirmou que os gerentes devem gerenciar o sistema e os operários devem fazer conforme dito. Ele defendeu a quebra de cada processo até seus menores passos, e então tendo procedimentos escritos que descreviam em detalhes como cada um desses passos deveriam ser conduzidos. As idéias de Taylor foram rapidamente adotadas como modo de finalmente trazer ordem para grandes processos de manufatura. A produtividade aumentou, mas qualidade permaneceu um problema. Alguns argumentaram que a maneira de alcançar boa qualidade era eliminar variabilidade: um nobre, talvez inalcançável objetivo. Por volta de 1920 Walter Shewhart introduziu suas tabelas de controle como instrumento para a estabilização de processos. Ele disse que não seríamos capazes de remover toda a variação do processo. O que precisávamos fazer era medir a variabilidade em processos de produção e remover toda a variabili-

dade que conseguíssemos. Suas tabelas de controle forneceram um meio de distinguir entre variabilidade que era inerente em um processo e distúrbios externos ao processo.

Em anos subseqüentes houve intensificações das tabelas de Shewhart. Dodge, Roming, Juran, e outros desenvolveram tabelas de planos de amostragem para colocar inspeções de recebimento e inspeções de amostras de produtos finais em firmas estatísticas. Mas através de tudo isso o foco estava na qualidade através de inspeção, ou melhor, qualidade através de processos de monitoramento de produção. Quando veio a Segunda Guerra Mundial o Ministério da Guerra dos Estados Unidos fez extensivo uso desses planos de amostragem estatística ao comprar materiais de guerra de fornecedores. Eles também montaram cursos de treinamento em todo o país em planos de amostragem, uso de gráficos de controle e conceitos e métodos básicos de estatística. Através desses programas de treinamento, engenheiros e outros aprenderam como monitorar processos de produção estatisticamente.

Antes do fim da Segunda Guerra Mundial, muita da capacidade de manufatura na Europa e na Ásia foi destruída. As capacidades de manufatura americanas, que cresceram como parte do esforço de guerra, estavam prontas para serem convertidas para produção de tempos de paz, e houve uma demanda instável mundial por produtos manufaturados. A regra principal era que se se pudesse produzi-lo, se poderia vendê-lo. Se alguns dos itens produzidos fossem defeituosos, não haveria problema. O consumidor poderia trazê-los de volta para conserto, troca ou reembolso. Quando alguém comprava um carro novo nos anos 50, a primeira coisa que o novo dono fazia era colocar um bloco de notas e um lápis no porta-luvas. À medida que vários defeitos eram descobertos, o dono anotava-os no bloco. Depois de algumas semanas, o carro era levado de volta ao revendedor para ter os defeitos corrigidos. Mais uma vez, não havia problemas. Ninguém esperava que um produto tão complicado como um automóvel fosse feito completamente certo da primeira vez. A IBM construiu sua reputação em qualidade, mas seus primeiros computadores nunca funcionavam direito na primeira instalação. Todas as dependências de computadores tinham “engenheiros residentes” para consertá-los quando quebravam. Mas a IBM fornecia bom serviço quando problemas surgiam, e isto é no que boa qualidade se resumia nos anos 50 e 60 – bom serviço.

No fim da Segunda Guerra Mundial, as capacidades de manufatura do Japão estavam em muito pior estado do que era o caso nos Estados Unidos. O Japão parecia incapaz de produzir produtos manufaturados em um nível de qualidade aceitável pelo resto do mundo. Em suma, “Made in Japan” significava lixo. A União Japonesa de Cientistas e Engenheiros (JUSE), tomou a iniciativa de negociar com este problema que ameaçava a exis-

tência econômica do Japão. Em 1950 eles pediram ao Dr. W. Edwards Deming para ir e explicar suas idéias para a melhoria da qualidade a alguns dos líderes da indústria japonesa. O Dr. Deming vinha recomendando gerenciamento de qualidade nos Estados Unidos, mas ninguém o escutava – todos estavam muito ocupados ganhando dinheiro. Os japoneses criaram tempo para escutá-lo. Eles seguiram seu conselho. Eles mudaram suas indústrias. Outros especialistas americanos em qualidade também visitaram o Japão para ajudá-los a melhorar. O Dr. Joseph Juran é creditado por introduzir controle estatístico de processo no Japão.

Hoje o Japão é o aclamado líder mundial em qualidade. Os americanos agora estão lendo os trabalhos de especialistas japoneses em qualidade como o Dr. Kaoru Ishikawa e o Dr. Genichi Taguchi. Nos anos 50, Masaaki Imai organizou excursões a fábricas americanas para engenheiros e gerentes japoneses ansiosos por descobrir os segredos da qualidade americana. Em um livro mais recente, Imai (1986) apud Lochner et al (1990) creditou o sucesso do Japão em qualidade principalmente pela sua busca persistente por melhoria da qualidade em tudo que fazem. Ele afirmou que os americanos dependiam demasiadamente de avanços tecnológicos, e perdiam oportunidades para melhoria gradual.

Muitas empresas americanas estão realizando ganhos notáveis em qualidade de produtos e processos. Vemos alguns produtos americanos competindo com sucesso no Japão. Mas a batalha será longa. Os requisitos atuais de qualidade não podem ser alcançados através de inspeção simplesmente. Mesmo o CEP não é suficiente. A qualidade deve ser construída nos produtos na etapa de projeto. O Dr. Juran afirmou, “meu obscuro prognóstico é que nós no Ocidente passaremos o resto do século no topo absoluto desta crise de qualidade. Mesmo esse ritmo não será realizado se continuarmos a tentar resolver problemas básicos de gerenciamento através de engenhosas advertências ou de apertadas técnicas. Nossos gerentes, e especialmente altos gerentes, devem armar-se com treinamento em como gerenciar para a qualidade. Eles então devem usar esse treinamento para tomar liderança ativa na função da qualidade” (Quality, 1985 apud LOCHNER et al, 1990)

## 5. A ABORDAGEM TAGUCHI DA QUALIDADE

### 5.1. Definição de Qualidade

Pode ser bastante desencorajador para alguém apenas começando a explorar o mundo da qualidade descobrir que os maiores “gurus” da qualidade não concordem na definição do termo. O Dr. Juran (1964) apud Lochner et al (1990) define qualidade como “adequação ao uso.” Philip Crosby, o promotor líder dos conceitos de “zero defeito” e autor de *Qualidade é Livre* (1979) apud Lochner et al (1990), define qualidade como “conformidade aos requisitos.” O Dr. Deming afirma que “Qualidade deve ser almejada nas necessidades do cliente, presentes e futuras” (1986) apud Lochner et al (1990). A Sociedade Americana para o Controle da Qualidade (1983) define qualidade como “a totalidade de características de um produto ou serviço que desempenha sua habilidade de satisfazer das necessidades” (1983, página 4) apud Lochner et al (1990).

Embora essas definições sejam todas diferentes, alguns traços são comuns entre elas:

- Qualidade é a medida da extensão até a qual os requisitos e especificações do consumidor são satisfeitos;
- Qualidade não é estática, já que as expectativas do consumidor podem mudar;
- Qualidade envolve o desenvolvimento de especificações e padrões de produto ou serviço para atender as necessidades do consumidor (qualidade de projeto) e então manufaturar produtos ou prover serviços que satisfaçam tais especificações e padrões (qualidade de conformidade).

É importante notar que qualidade no contexto acima não se refere a grau ou características. Por exemplo, um S10 da Chevrolet tem mais características e é geralmente considerado um carro de uma categoria mais alta que um Corsa. Mas isto não significa que seja de melhor qualidade. Um casal com 2 crianças pequenas pode achar que um Corsa com 4 portas desempenha muito melhor a função de alcançar seus requisitos em termos de facilidade de embarque e desembarque, conforto quando a família inteira está no carro, consumo de combustível, manutenção, e é claro, custo básico do veículo. Como outro exemplo, frangos inteiros vendidos em supermercados têm mais água neles que os vendidos há vinte anos. Os consumidores preferem a água adicionada porque resulta em carne mais suculenta

após o preparo. Ainda assim algumas pessoas vêem os frangos com água adicionada a eles como de pior qualidade. Algumas pessoas preferem relógios de pulso de quartzo com face analógica aos menos caros relógios digitais. Ambos os tipos mantêm igualmente a hora certa e o modo de ler digital permite mais precisa leitura da hora. Mas as pessoas pagam mais pela *característica* da face analógica.

Quando pensamos em qualidade em termos de alcance das expectativas do cliente, precisamos considerar ambas as expectativas expressas e não-expressas, mas entendidas. Por exemplo, quando alguém compra um produto alimentício, há a expectativa entendida que o produto seja homogêneo, corretamente rotulado, e alcança todos os outros requisitos regulamentares. Se alguém decide ir para o ramo dos lápis nos Estados Unidos e começa a pesquisar os consumidores para determinar o que eles querem em lápis de madeira, os americanos poderiam responder que eles querem lápis que mantenham a ponta por um longo tempo, forneçam linhas nítidas, tenham grafite que não quebre facilmente e borrachas que durem até que o lápis esteja pelo menos pela metade. Os comedores de lápis iriam querer que a tinta do lápis fosse livre de chumbo. E quase todos iriam querer que os lápis fossem pintados de amarelo, embora provavelmente ninguém o diria. Sabemos que os americanos querem lápis amarelos porque quase todos os lápis vendidos nos EUA são amarelos. Isto não seria um requisito expresso, mas é de qualquer forma importante para o público americano comprador de lápis.

Genichi Taguchi tem uma definição incomum para a qualidade de produtos: “Qualidade é a perda que um produto causa à sociedade depois de ser expedido, mais do que quaisquer perdas causadas por suas funções intrínsecas.” Por “perda” Taguchi se refere às seguintes 2 categorias:

- Perda causada por variabilidade de função;
- Perda causada por efeitos colaterais danosos.

Um exemplo de perda causada por variabilidade de função seria um automóvel que não dá a partida em baixa temperatura. O dono do carro sofreria uma perda se ele(a) tivesse que pagar alguém para dar a partida. O empregador do dono do carro perde os serviços do empregado que agora está atrasado para o trabalho. A variabilidade em qualidade de serviços fornecidos por funcionários de uma empresa aérea pode resultar em bagagem e/ou vôos perdidos, telefonemas interurbanos. Um exemplo de uma perda causada por um efeito colateral danoso seria um resfriado sofrido pelo dono do carro que não dá a partida.

Um produto inaceitável que é descartado ou retrabalhado antes da expedição é visto por Taguchi como um custo para a empresa, mas não uma perda de qualidade. Além disso,

perdas causadas quando um produto funciona como pretendido não são consideradas perdas de qualidade por Taguchi. Suas razões aqui são que tais situações refletem problemas culturais ou legais, não de Engenharia. Um exemplo disto é um acidente automobilístico causado por alguém que tem um detector de radares e está dirigindo muito depressa. A extensão à qual o funcionamento correto do detector de radares causou uma perda à sociedade não é tratada como uma perda de qualidade.

## 5.2. Método Taguchi: Objetivos, Características e Metodologia

O objetivo principal do método Taguchi é melhorar as características de um processo ou de um produto através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis, os quais irão minimizar a variação do produto final em relação ao seu objetivo (ponto ótimo de funcionamento).

Ao ajustar os fatores ao seu nível ótimo, os produtos podem ser fabricados de forma a se tornarem mais robustos a toda e qualquer mudança que possa ocorrer e que seja incontrollável, tais como: condições ambientais, variação dimensional e tempos de acondicionamento. Por este motivo, as técnicas de Taguchi também são conhecidas como *Projeto ou Engenharia Robusta*.

Os quatro pontos principais da filosofia Taguchi são:

- Num mercado competitivo, a melhoria contínua da qualidade e a redução de custos são necessárias para que as empresas sobrevivam.
- Uma medida importante da qualidade de um determinado produto é o custo total que ele infringe à sociedade, desde a sua fabricação até o seu descarte.
- O custo gerado pela perda de um consumidor devido à má qualidade é aproximadamente igual ao quadrado do desvio da característica de performance do produto ou serviço em relação ao seu objetivo principal (Função perda de qualidade).
- A variação da performance de um produto ou de um serviço pode ser reduzida se observarmos os efeitos não lineares que os parâmetros têm nas características de performance. Qualquer pequeno desvio do valor alvo conduz a uma perda de qualidade e conseqüente custo.

Conforme já mencionado anteriormente, o Projeto Robusto vem sendo utilizado cada vez mais no desenvolvimento de novos produtos ou processos, em diferentes partes do mundo.

Isto se deve principalmente às suas vantagens em relação aos outros métodos. Dentre elas pode-se citar:

- O número de experimentos necessários para a análise da influência de diversos fatores na característica de qualidade é muito menor quando comparado com o método comum. Isto porque ele permite a análises de diversas variáveis simultaneamente.
- Por permitir a análise de diferentes variáveis de forma simultânea, é possível identificar possíveis interações entre elas, as quais não seriam identificadas pelo método comum.

O tempo de desenvolvimento diminui consideravelmente.

#### 5.2.1. Engenharia da Qualidade

O objetivo da Engenharia da qualidade é fabricar produtos que sejam robustos com respeito a todos os fatores de ruído.

Robustez significa que as características funcionais do produto devem ser insensíveis às variações nos fatores de ruído. Para obter robustez, empenhos devem ser iniciados já durante o planejamento do produto e continuar através do planejamento do processo de produção e fabricação.

O empenho em controlar a qualidade durante o planejamento do produto e o planejamento do processo de produção é chamado controle de qualidade fora da linha (off-line), enquanto o empenho durante a produção é chamado controle de qualidade na linha (on-line).

No controle de qualidade fora da linha, Taguchi direciona sua abordagem, através de um procedimento de três passos, descritos abaixo, para determinar e controlar fatores que podem causar desvios das características funcionais do produto de seus valores objetivos:

a) planejamento do sistema - Consiste na definição do planejamento do modelo básico que apresenta as funções esperadas do produto. Nesta etapa, é realizada a seleção do material, das partes, dos componentes e do sistema de montagem;

- b) planejamento de parâmetros/otimização do planejamento - Determinação de valores para os fatores controláveis que minimizam os efeitos dos fatores de ruído sobre as características funcionais do produto. Isto é, seleção dos valores para as variáveis do planejamento ou fatores, que tornam o produto menos sensível às causas de variações. Os valores selecionados são denominados valores ótimos. A principal técnica estatística utilizada em planejamento dos parâmetros é o planejamento de experimentos, utilizando arranjos ortogonais e análise de variância;
- c) planejamento de tolerâncias - Tolerâncias ou intervalos de variação para os valores dos fatores ou variáveis do planejamento, determinados durante o estágio de planejamento de parâmetro, são obtidas para melhorar a qualidade. Isto é, se o planejamento de parâmetro falha na escolha dos níveis dos fatores para produção de baixa variação funcional do produto, então as tolerâncias são seletivamente reduzidas com base em seus custos efetivos.

### 5.3. Função Perda

Tradicionalmente, a qualidade do produto tem sido medida comparando-se características críticas de produto às suas especificações de Engenharia. As especificações de produto são também importantes, mas o foco hoje tende para controlar características de projeto, já que são os processos de produção que determinam a qualidade do produto final. Procura-se reduzir processos e variabilidade de produtos, e mover características de qualidade mais perto de valores-alvo. Isto resulta em uma perda reduzida de qualidade. As especificações de Engenharia indicam quanta variabilidade pode ser tolerada em características de produto ou processo. Elas freqüentemente aparecem em formas como as seguintes:

- Padrão de variável simples: Cura a 82°C
- Limites de tolerância em intervalo: Manter a temperatura de cura entre 80 e 84°C
- Valor-alvo com intervalo de tolerância: 82°C±2°C
- Apenas limite superior de tolerância: Despachar produto até 72 horas depois de receber o pedido
- Apenas limite inferior de tolerância: Tensão de ruptura deve ser pelo menos de 30MPa.

O primeiro exemplo, um padrão de variável simples, não é adequado a muitos processos. Não dá critério definitivo para decidir quando a especificação não está sendo alcan-

çada. Não podemos manter a temperatura de cura a exatamente 82 graus. Poderíamos ajustar o termostato a 82 graus, mas sabemos que haverá alguma variação em torno do número. Quanta variação é aceitável? Não sabemos. O Dr. Deming ressaltou a necessidade por “definições operacionais,” isto é, definições “com as quais as pessoas possam fazer negócio.” De acordo com o Dr. Deming, uma definição operacional consiste de “(1) um critério a ser aplicado a um objeto ou um grupo, (2) um teste do objeto ou do grupo, (3) decisão: sim ou não: o objeto ou o grupo satisfaz ou não satisfaz os critério.” Claramente, nosso primeiro exemplo de uma especificação de Engenharia não é uma definição operacional; o critério não foi definido para o que constitui variação aceitável do objetivo; portanto uma “decisão sim ou não” não pode ser tomada. Os três exemplos seguintes são definições operacionais, presumindo que os métodos de medição de temperatura e tempo de transporte são inambíguos. O quinto exemplo pode requerer clarificação como exatamente o ensaio de resistência deve ser realizado antes da especificação ser tratada como uma definição operacional.

O segundo exemplo tem limites de tolerância, mas não valor-alvo. Embora isto forneça uma definição operacional e especifica adequadamente requisitos de qualidade do ponto de vista tradicional de Engenharia, não é adequado para interpretações mais recentes de qualidade, incluindo a idéia de melhoria sem fim exposta por Deming, Taguchi, Imai, e outros (Deming resalta a necessidade por medidas quantitativas de qualidade, usando definições operacionais, mas ele quer que essas medidas sejam usadas na redução da variabilidade do processo). Um exemplo clássico da importância de se ter um valor-alvo assim como limites de tolerância é uma experiência que a Ford Motor Company teve com transmissões automotivas. A Ford contratou uma empresa japonesa para produzir algumas transmissões para um de seus modelos automotivos. As transmissões manufaturadas com as mesmas especificações no Japão e na Ford foram entregues às unidades finais de montagens e foram colocadas nos automóveis basicamente aleatoriamente. Dados de garantia mostraram que as transmissões japonesas tinham menos problemas. Análises subseqüentes mostraram que todas as transmissões foram manufaturadas sob as especificações em todas as características críticas, mas as transmissões japonesas tenderam a estarem mais próximas aos valores-alvo mais freqüentemente. (Isto não deve ser interpretado como prova que a Ford faz automóveis inferiores. A Ford é uma líder no movimento de melhoria da qualidade nos Estados Unidos. A passagem mostra a boa vontade da Ford em dividir uma experiência de aprendizado que menores empresas teriam enterrado em um arquivo “confidencial”.)

Os exemplos de 3 a 5 são as formas nas quais as tolerâncias devem ser especificadas. O exemplo 3 inclui um valor-alvo específico. Não há valores-alvo centrais para os exemplos 4 e 5, mas está claro que minimizar o tempo de transporte no exemplo 4 e maximizar tensão de ruptura no exemplo 5 são “alvos”. O Dr. Taguchi se referiria à característica de qualidade no exemplo 3 como um tipo “nominal é melhor”. Ele chamaria a característica de qualidade no exemplo 4 uma do tipo “maior é melhor”.

O ponto inicial da filosofia de Taguchi está em sua não-convencional definição de qualidade. Em contraste aos conceitos como “adequação ao uso”, “conformidade com os requisitos”, ou “satisfação do cliente”, a definição de Taguchi “perdas para a sociedade”, reflete dois valores orientais comuns, isto é, aspiração para o perfeccionismo, e trabalho para o bem coletivo.

Perdas para a sociedade são medidas pelo desvio real da característica de qualidade do produto do seu valor alvo. O uso desta função perda, uma expressão matemática que pode declarar, particularmente para propósitos gerenciais, o valor monetário da consequência de qualquer aperfeiçoamento em qualidade.

Embora tal valor monetário não represente uma virtual perda ou dano, ele é um conveniente índice de desempenho que pode ser facilmente apreciado pelos tomadores de decisão, uma característica muito importante e lisonjeada pelos promotores dos métodos de Taguchi para atrair o interesse dos tomadores de decisão. (GOH, 1993 apud COLLIN; PAMPLONA, 1997)

O significado de aperfeiçoamento da qualidade é mudado para solucionar problemas através da redução da variabilidade em torno do valor alvo, tendo como ponto importante, como medir o aperfeiçoamento da qualidade. O principal foco do aperfeiçoamento da qualidade é a redução de custos.

O conceito da função perda é demonstrado na Figura 5.1. O gráfico demonstra a função perda associada com a idéia de estar dentro ou fora dos limites de especificação. O alvo central,  $T$ , representa o nível ideal do parâmetro de projeto. Os dois limites de especificação LSE e LIE, são os limites de especificação simétricos padronizados. O eixo vertical é a medida do valor de perda devido ao desvio da característica do nível desejado.

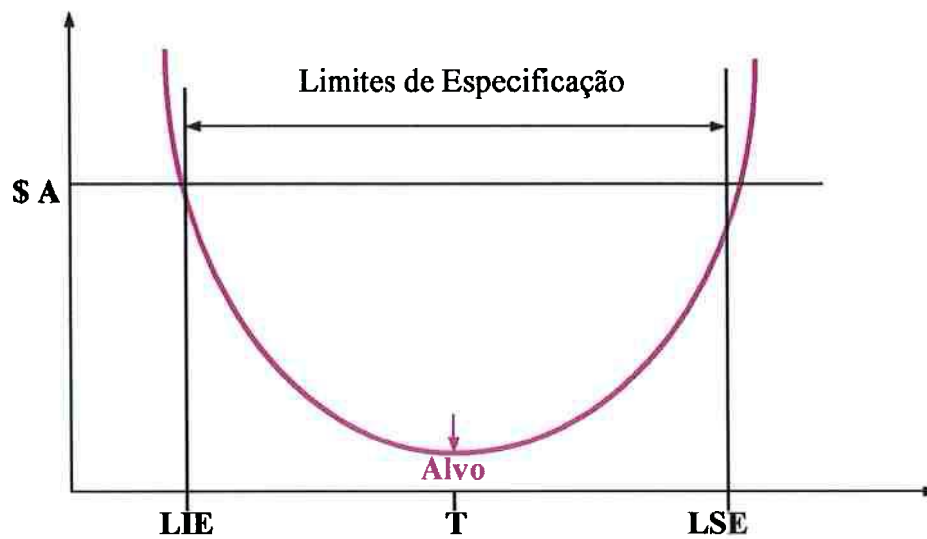


Fig. 5.1 - Função Perda de Taguchi (KACKAR, 1986 apud LOCHNER; MATAR, 1990)

#### 5.4. Etapas do Projeto Robusto

Taguchi dividiu o desenvolvimento de um produto em três etapas: System Design (projeto do sistema), Parameter Design (projeto de parâmetros) e Tolerance Design (projeto de tolerâncias). Cada uma destas etapas está descrita a seguir.

##### 5.2.1. Projeto do Sistema

O System Design é a primeira etapa do projeto. Nesta etapa, o objetivo é desenvolver conceitualmente o produto, utilizando-se conhecimento científico, engenharia teórica e experiência prática para se decidir quais características o produto deve ter para ser bem aceito no mercado. Projetos anteriores ou produtos similares são comparados para se procurar desenvolver um produto de melhor qualidade. Nesta etapa geralmente não se aplicam os métodos estatísticos de análise do projeto robusto.

##### 5.2.2. Projeto de Parâmetros

Nesta etapa procura-se otimizar o desempenho do projeto a partir de experimentos que indicam fatores que minimizam a variação da resposta do produto a fatores incontrolláveis do usuário e do meio. O Projeto de Parâmetros pode ser dividido em quatro partes, descritas a seguir.

### Formulação do problema

Inicialmente são identificadas as características de qualidade do produto que mais afetam o seu desempenho, especialmente as que mais afetam o consumidor. Por exemplo, uma característica de qualidade de um automóvel é que ele dê a partida fácil e rapidamente, quaisquer que sejam as condições externas. O maior número de características de qualidade diferentes deve ser identificado. Geralmente utiliza-se brainstorming, fluxogramas e/ou diagramas de Ishikawa, com grupos multidisciplinares para se obter uma visão completa das qualidades desejadas do produto. Então se constrói o Diagrama de Parâmetros, ou P-diagram, que indicará de maneira sucinta todos os fatores que controlam o projeto, divididos em fatores de sinal, controle e ruído, como mostra a Figura 5.2.

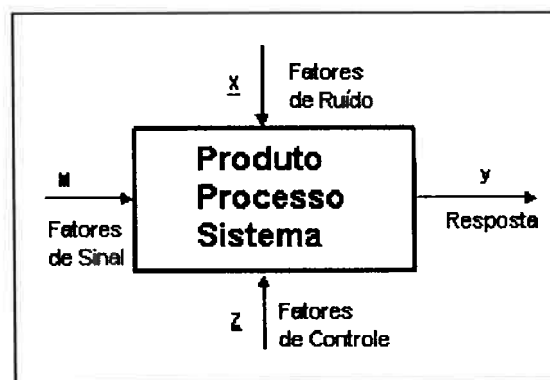


Fig. 5.2 - Diagrama de Parâmetros (P-diagram) de um produto/processo/sistema.

(CARASTAN et al, 2002)

Primeiro são definidos os fatores de sinal (entrada), também chamados parâmetros, e suas respostas (saída) correspondentes. Por exemplo, no projeto de um sistema de ar condicionado o ajuste do termostato é o sinal e a temperatura resultante é a resposta. Idealmente a temperatura do ambiente refrigerado pelo aparelho seria sempre igual à temperatura do termostato. Porém existem fatores que desviam esse resultado da idealidade. Estes são os fatores de ruído, incontroláveis. O objetivo, então, é tornar os parâmetros robustos em relação a esses ruídos, ou seja, projetar fatores de controle que diminuam ao mínimo a sensibilidade do projeto aos ruídos, a baixo custo.

A partir desses dados pode-se planejar os experimentos utilizando as matrizes ortogonais (vide Glossário). Para isso deve-se definir o número de níveis para cada fator e montar duas matrizes: uma para os fatores de controle, chamada matriz interna e outra para os fatores de ruído, chamada matriz externa. É importante identificar os fatores que possam interagir entre si, introduzindo essas interações na matriz ortogonal, se possível.

### **Coleta de dados / simulação**

Os experimentos são, então, realizados. Algumas vezes é possível utilizar simulações, não sendo necessária a realização do experimento fisicamente. Em alguns casos, também, podem-se utilizar modelos em escalas menores, contanto que sigam corretamente o conceito do projeto. Desse modo o custo para a realização dos experimentos é consideravelmente mais baixo.

### **Análise dos fatores de efeito**

Os resultados obtidos dos experimentos são analisados pelas diversas ferramentas disponíveis (método de observação, método de classificação, método dos efeitos da coluna, ANOVA, ANOVA S/N, gráficos da média, gráficos da interação, etc.). Cada experimento gera uma razão S/N (signal-to-noise, ou sinal/ruído) diferente. Esta razão é um valor que expressa o quanto distante de sua função ideal o projeto está. É o método operacional de incorporar a QLF no projeto experimental. Quanto maior a razão S/N, menor a variabilidade ao redor da média, e menor a perda de qualidade. Porém, não basta escolher o experimento que deu a maior razão S/N. Dificilmente esta será a configuração ótima do projeto. Pelo fato de se utilizar matrizes ortogonais é possível analisar o efeito de cada fator na média e na variância da característica de qualidade estudada. Para isso utilizam-se ferramentas como ANOM e ANOVA, explicadas mais adiante. A partir destes resultados é possível separar os fatores de acordo com seu efeito: fatores que afetam bastante a razão S/N podem ser utilizados para reduzir a variabilidade; fatores que afetam bastante a média são utilizados para ajustar o desempenho, chegando-se o mais próximo do alvo (fatores de ajuste); dentre os fatores que não afetam a média pode-se selecionar o mais barato para reduzir custos (fatores de ajuste de custo).

### **Predição / confirmação**

Após selecionar a configuração ótima obtida a partir da análise dos experimentos, realizam-se os experimentos de confirmação. Se estes não derem os resultados previstos, ou o engenheiro se esqueceu de um fator importante, ou a combinação dos fatores selecionados resulta em um cancelamento mútuo das propriedades, resultando em baixa qualidade. Em ambos os casos deve-se voltar ao início do projeto de parâmetros.

### 5.2.3. Projeto de Tolerâncias

Se todos os resultados do projeto de parâmetros foram otimizados, mas as propriedades do produto final ainda não suficientes para competir com a concorrência, então se deve utilizar o projeto de tolerâncias. Nesta etapa deve-se calcular a porcentagem de contribuição de cada fator para o desempenho em cada característica de qualidade. Assim, o engenheiro estreita as tolerâncias de cada fator de modo que se possa atingir os níveis de qualidade desejados. Porém esta redução de tolerâncias quase sempre resulta em aumento de custos (trocar peças, componentes, processos por outros mais caros). É neste momento que se utiliza a função QLF. Aumenta-se o custo para a diminuição de tolerâncias até o ponto em que não se vá ter uma perda tão grande após a expedição do produto. Um teste de confirmação final deve ser feito para garantir que o projeto está otimizado.

## 6. MODELOS DE FATORES: EXPERIMENTOS EM 2 NÍVEIS

### 6.1. Melhoria do Produto

Todos realizamos experimentos. No colegial mergulhamos papel de tornassol em um ácido e o observamos mudar de cor; medimos a força necessária para mover um bloco sobre uma mesa; procuramos pelos órgãos reprodutores em uma minhoca. Em casa nós “experimentamos” diversas explicações para chegar em casa tarde em um sábado à noite. Também experimentamos diferentes botões, bolinhas e palhetas enquanto jogávamos futebol-de-botão. Com o experimento que iremos estudar neste relatório, pretendemos ajudar a melhorar a qualidade de projetos e processos. Por “melhorar” queremos dizer:

- *Otimizar o valor de resposta médio.* Este tem sido tradicionalmente o foco principal de modelos experimentais como usados no Ocidente. Queremos maximizar o rendimento, ter os diâmetros externos de tubos de 1,2 cm, ou ter lâminas de poliuretano o mais lisas possível. Modelos experimentais foram usados para identificar quais combinações de ajustes, ou “níveis,” para certos fatores-chave produziram os melhores valores médios para a característica de interesse de produto ou processo. Este capítulo irá focar no uso de modelo experimental porque é importante e é a aplicação mais fácil de se entender.
- *Minimizar os efeitos de variabilidade na performance de processo ou produto.* Isto também é chamado de *projeto robusto*. Na abordagem Taguchi para a Engenharia de Qualidade, o papel principal do modelo experimental é fazer o processo ou produto insensível (robusto) à variação de fatores incontrolláveis. Em outras palavras, projeto robusto se refere à redução de variabilidade em medições de performance através da conversão da medida em insensível a fatores de ruído.

Antes de olharmos para o exemplo de experimento, alguns termos precisam ser definidos. Um *experimento* pode ser definido amplamente como qualquer ato de observação. Portanto, medir a resistência à ruptura de um fio ou a condutividade elétrica de uma liga, entrevistar eleitores, ou apenas observar as nuvens se moverem no céu em um dia de verão podem todos ser chamados de experimentos. Usaremos uma definição mais restrita, apesar disso, e dizer que um experimento é uma série de tentativas ou ensaios que produzem resultados quantificáveis. Observar a temperatura na porta da frente ao nascer do Sol amanhã

seria um experimento. Algumas pessoas o chamariam de experimento *aleatório* já que o valor observado não pode ser previsto exatamente com antecedência. Um experimento no qual o resultado pode ser completamente previsto com antecedência é então chamado um experimento *determinístico*. Embora os experimentos produzam resultados quantificáveis, os dados iniciais necessários não precisam ser números. É suficiente que a informação seja conversível em números. Por exemplo, poderíamos observar se uma parte de equipamento funciona ou não, e então dizer que o resultado do experimento foi “1” se funcionou e “0” se não. Se se avalia o gosto da primeira xícara de café de manhã como bom, regular ou ruim, pode-se então arbitrariamente atribuir valores 1, 2, e 3, respectivamente, a essas 3 categorias.

Experimentos são conduzidos por uma série de razões. Experimentos industriais são geralmente realizados para explorar, estimar, ou confirmar.

- *Exploração*: recolher dados para aprender mais sobre uma característica de produto ou processo. Suponha, por exemplo, que queremos entender melhor os efeitos do tempo e da temperatura de cura na resistência de uma peça moldada. Curaremos amostras do produto a diferentes temperaturas e por diferentes tempos e então mediremos suas tensões de ruptura.
- *Estimação*: usar dados para estimar os efeitos de certas variáveis em outras. Por exemplo, se nosso estudo exploratório mostrou que a resistência à ruptura de uma peça moldada é afetada por ambos tempo e temperatura de cura, talvez iríamos querer estimar as resistências médias à ruptura em várias combinações desses dois fatores de processo. Essa informação poderia ser usada para estimar os ajustes dos dois fatores que iriam maximizar a tensão de ruptura.
- *Confirmação*: recolher dados para verificar uma hipótese sobre uma relação entre variáveis. Por exemplo, uma vez que o tempo e temperatura “ótimos” foram determinados, experimentos adicionais são executados nesses e ao redor desses valores para verificar que os ajustes são de fato “ótimos”.

Nas pesquisas de engenharia de produtos, a experimentação é bastante usada, principalmente, onde novos produtos estão sendo desenvolvidos ou os já existentes estão sendo melhorados. As características de um produto acabado dependem dos ingredientes ou dos componentes que o compõem, das condições sob as quais é construído e das condições sob as quais é estocado ou usado.

O desenvolvimento de um produto usualmente envolve a comparação de certo número de produtos experimentais, os quais são produzidos variando os ingredientes, ou os componentes e as condições. Qualquer ingrediente, componente ou condição que seja variado no decorrer da experimentação é chamado um fator de tratamento, e suas diferentes formas são chamadas níveis do fator. Muitos experimentos industriais envolvem o estudo simultâneo de dois ou mais fatores. Portanto, toda observação experimental é uma resposta obtida de uma das possíveis combinações dos níveis de seus fatores experimentais. Estas combinações são chamadas combinações de tratamento. O objetivo principal da experimentação é estudar o efeito da variação dos fatores, ou seja, determinar as melhores combinações dos ingredientes ou dos componentes.

Idealmente, toda observação deve ser tomada sob condições idênticas (condições que não fazem parte do experimento). Algumas vezes, esta situação ideal não pode ser alcançada. Por exemplo, um experimento pode ser conduzido ao longo de vários dias com grande variação de temperatura e umidade; observações podem ser coletadas por diferentes técnicos, cujo procedimento experimental pode diferir, ou coletadas em diferentes laboratórios, cujos equipamentos podem não ser idênticos; observações que são coletadas sob condições experimentais similares são ditas serem do mesmo bloco. As condições experimentais podem ser bem diferentes para observações em blocos diferentes. Estas diferenças são ajustadas durante a fase de análise dos dados experimentais. Se todo bloco contém uma observação de todas as combinações de fatores, o experimento é dito ser arranjado como um planejamento de blocos completos. Frequentemente, os blocos não são grandes o suficiente para acomodar uma observação de cada combinação dos fatores. Nestes casos, deve ser decidido quais combinações de fatores serão observadas e em que bloco. Um planejamento deste tipo de experimento é chamado planejamento de blocos incompletos.

## **6.2. Método Tradicional X Projeto Robusto**

As melhorias em um produto são feitas através de experiências pré-produtivas que depois de analisadas irão contribuir para melhoria da qualidade do mesmo.

O método mais tradicional de melhoria da qualidade de um produto consiste em ajustar-se um fator de cada vez nestas experiências pré-produtivas. Neste método o engenheiro observa o resultado de cada uma das experiências, mudando somente 1 variável (parâmetro) em cada uma delas.

Tal metodologia tem como desvantagens os custos elevados de preparação de cada experiência e o tempo necessário para realizar todas as combinações possíveis. Por exemplo, num processo com 13 parâmetros diferentes e que em cada um deles tenha 2 graus de liberdade, ou seja, 3 níveis de trabalho (Parâmetro: Velocidade de Rotação; níveis de trabalho: 1000rpm, 1100rpm, 1200rpm), o número de experiências necessárias para cobrir todas as hipóteses possíveis seria de 1.594.323.

A execução de tantos experimentos seria impossível de se realizar, não só pelo fator do custo de execução, mas também devido ao tempo que seria gasto no projeto dos produtos, sendo assim deve-se criar modelos para se prever como será a influência de cada parâmetro no resultado final.

Para fazer essa previsão o método Taguchi utiliza matrizes ortogonais, baseado na teoria do planejamento das experiências a serem realizadas. Usando estas matrizes ortogonais é possível reduzir significativamente o número de experiências.

Nestas matrizes as colunas representam os parâmetros que podem ser estudados, e as linhas os diversos experimentos a serem realizados. No caso do exemplo anterior com 13 variáveis e 2 graus de liberdade cada uma, o número de experiências necessárias cairia para apenas 27.

O método do projeto robusto foi desenvolvido pelo Dr. Genichi Taguchi depois do fim da Segunda Guerra Mundial. A sua definição de qualidade visa fundamentalmente o cliente final.

Taguchi utiliza uma combinação de métodos de engenharia e de estatística para alcançar melhorias rápidas na qualidade e no custo através da otimização do *design* do produto e do processo de produção. Ele relaciona qualidade e custos como nenhum outro e procura também desenvolver a compreensão do balanço de energia do processo. Tem ganhado aceitação mundial por parte de empresas líderes em qualidade em todo o mundo.

### 6.3. Modelos de Fatores Fracionais

É possível analisar os efeitos de 2 fatores em  $2^2 = 16$  tentativas; 3 fatores em  $2^3 = 8$  tentativas; e 4 fatores em  $2^4 = 16$  tentativas (LOCHNER; MATAR, 1990). Mas devemos sempre usar  $2^k$  tentativas quando trabalhamos com k fatores? A resposta, felizmente, é não. Na verdade, podemos às vezes analisar os efeitos de k fatores em apenas k + 1 tentativas. Mas devemos pagar um preço por isto – quando menos de  $2^k$  tentativas são usadas para analisar os efeitos de k fatores, nem todos os efeitos de interação podem ser claramente

estimados, e os principais fatores podem ser “atribuídos” (vide Glossário) a termos de interações. Entretanto experimentos de planejamento avançados cuidadosos podem ser modelados de forma a requerer mínimos números de tentativas e ainda fornecer estimativas da maioria dos efeitos de interação.

#### 6.3.1. Exemplo (LOCHNER; MATAR, 1990)

Um processo de moldagem por injeção produz chapas de filmes estruturais. O grau de planicidade (flatness) dessas lâminas é uma característica crítica de qualidade. Quatro fatores foram pensados para afetar o grau de planicidade: temperatura de vazamento, temperatura de moldagem, tempo de cura, e velocidade de injeção. Um experimento de 8 iterações foi realizado usando os níveis para esses fatores listados na Tabela 6.1. A Tabela 6.2 dá o relatório completo do experimento, com as tentativas listadas na ordem (aleatória) na qual foram realizadas. A variável resposta mede planicidade em milésimos de polegada. Menores valores indicam uma superfície mais regular (plana). A tabela de respostas completa para o experimento está mostrada na Tabela 6.3.

Baseando-nos nas estimativas no fim da Tabela 6.3, os fatores A e B apresentam relativamente grandes efeitos na resposta. A coluna AB fornece o seguinte maior efeito estimado. Mas isto é possível devido a uma interação AB ou seu pseudônimo, a interação CD? Neste caso, como A e B têm grandes efeitos principais estimados, enquanto que ambos C e D têm pequenos efeitos principais estimados, é razoável atribuir provisoriamente este efeito de interação, se for real, à interação AB. Na Tabela 6.4 a resposta média é calculada para cada combinação de níveis de fatores A e B. Como o objetivo aqui é minimizar a resposta média, surge que os fatores A e B devem ambos ser ajustados a seus mais altos níveis, já que a resposta média é menor para essa combinação de níveis de fatores. Iterações adicionais devem naturalmente ser feitas para confirmar essa decisão.

Fator	Nível mínimo	Nível máximo
A. Temperatura de vazamento	500° F	550° F
B. Temperatura de moldagem	80° F	140° F
C. Tempo de cura	150s	200s
D. Velocidade de injeção	1,00s	2,25s

Tabela 6.1 - Níveis de fatores para experimento exemplo

Ordem da iteração-tentativa	Número de ordem padrão	Temperatura de vazamento	Temperatura de moldagem	Tempo de cura	Velocidade de injeção	Planicidade ( $10^{-3}$ pol)
1	3	500	140	150	2,25	46
2	1	500	80	150	1,00	54
3	6	550	80	200	1,00	45
4	4	500	140	200	1,00	50
5	2	500	80	200	2,25	55
6	7	550	140	150	1,00	30
7	5	550	80	150	2,25	46
8	8	550	140	200	2,25	24

Tabela 6.2 - Relatório para experimento-exemplo

Número da Tentativa em Ordem Aleatória	Número da Tentativa em Ordem Padrão	Valores Observados para Resposta (10 <sup>-3</sup> pol)	A = Temperatura de Vazamento		B = Temperatura de Moldagem		C = Tempo de Cura		A x B		A x C		B x C		D = Velocidade de Injeção	
			500 °F	550 °F	80° F	140 °F	150 s	200 s							1,00 s	2,25 s
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
2	1	54	54		54		54			54		54		54	54	
5	2	55	55		55			55		55	55		55			55
1	3	46	46			46	46		46		46		46			46
4	4	50	50			50		50	50		50		50	50	50	
7	5	46		46	46		46		46		46			46		46
3	6	45		45	45			45	45			45	45		45	
6	7	30		30		30	30			30	30		30		30	
8	8	24		24		24		24		24		24		24		24
TOTAL			350	205	145	200	150	176	174	187	163	181	169	176	174	179
NÚMERO DE VALORES			8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
MÉDIA			43,8	51,3	36,3	50,0	37,5	44,0	43,5	46,8	40,8	45,3	42,3	44,0	43,5	44,8
EFEITO				-15,0		-12,5		-0,5		-6,0		-3,0		-0,5		-2,0

Tabela 6.3 - Tabela resposta para o exemplo

		B: Temperatura de Moldagem	
		1: 80° F	2: 140° F
A: Temperatura de Vazamento	1: 500° F	$54 + 55 = 109$ $A_1B_1 = \frac{109}{2} = 54,5$	$46 + 50 = 96$ $A_1B_2 = \frac{96}{2} = 48,0$
	2: 550° F	$46 + 45 = 91$ $A_2B_1 = \frac{91}{2} = 45,5$	$30 + 24 = 54$ $A_2B_2 = \frac{54}{2} = 27,0$

Tabela 6.4 - Resposta média em diferentes níveis de temperatura de vazamento e de moldagem

### 6.3.2. Cinco fatores em oito iterações

Suponha agora que queremos avaliar os efeitos de 5 fatores em oito iterações experimentais. Mais uma vez começaríamos com o experimento descrito na Tabela 6.1, atribuiríamos os 2 fatores adicionais, D e E, a 2 das últimas colunas na Tabela 6.1. Que colunas na Tabela 6.1 devem ser atribuídas aos fatores D e E? Para o experimento de 4 fatores, D foi atribuída a ABC. Suponha que mais uma vez ajustáramos D = ABC, e então ajustáramos E = AB. Que tipo de estrutura pseudônimo irá resultar? Os pseudônimos para os efeitos principais e interações de 2 fatores são:

$$A = BE, B = AE, C = DE, D = CE, E = AB = CD, AC = BD, AD = BC.$$

(Essas relações de atribuições são obtidas pelo tratamento das expressões  $D = ABC$  e  $E = AB$  como equações algébricas. Claramente elas não são de fato equações algébricas, mas pode ser provado que essa “ilusão” identifica corretamente a estrutura pseudônimo do modelo.) Note que os fatores principais estão agora atribuídos às interações de 2 fatores. Suponha que tentamos um par diferente de geradores de modelos, como  $D = AB$  e  $E = AC$ . Isto produziria um modelo com a seguinte estrutura pseudônimo para os principais efeitos e interações de 2 fatores:

$$A = BD = CE, B = AD, C = AE, D = AB, E = AC, BC = DE, BE = CD.$$

Mais uma vez o mesmo resultado básico. Na verdade qualquer tentativa de se analisar 5 fatores com 8 tentativas sempre produzirá atribuição de efeitos principais a interações de 2 fatores. A matriz-modelo para este experimento é dada na Tabela 6.5.

Ordem padrão	EFEITOS PRINCIPAIS				
	A	B	C	D	E
1	-1	-1	-1	1	1
2	-1	-1	1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	1
4	-1	1	1	-1	-1
5	1	-1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1

Tabela 6.5 - Matriz-modelo para um experimento de 5 fatores em 8 iterações

## 7. AS MATRIZES INTERNA E EXTERNA DE TAGUCHI

### 7.1. Fatores de Ruído

O modelo experimental discutido no capítulo anterior focou na seleção de níveis de fatores que otimizariam, de alguma forma, a performance de um processo. Por exemplo, queremos determinar que ajustes para fatores de processo irão maximizar a resistência média ou minimizar a variabilidade da espessura de revestimento. Fatores que podem e devem ser controlados são chamados *fatores de controle* por Taguchi e *parâmetros de projeto* por Kackar apud Lochner et al.

Alguns fatores que afetam a performance de produtos ou processos não podem ser controlados ou são difíceis de se controlar. Por exemplo, a temperatura externa ou a vibração podem afetar a performance de um carburador automotivo; a composição do metal de refugo que entra irá afetar lingotes produzidos em um processo de refino; a umidade em uma fábrica pode afetar características de qualidade em um processo de revestimento. Os fatores que afetam características de produto ou processo mas são difíceis, caras ou impossíveis de se controlar são chamadas *fatores de ruído* pelo Dr. Taguchi. Ele identificou 3 tipos de fatores de ruído: *ruído externo*, ou variação de condições ambientais, tais como poeira, temperatura, umidade, ou voltagens de fornecedores; *ruído interno* ou deterioração, tais como uso de produto, envelhecimento de materiais, ou outras mudanças em componentes ou materiais com o tempo ou uso; e *variações na produção*, que são diferenças em produtos construídos sob as mesmas especificações, e são causadas por variabilidade em materiais, equipamentos de manufatura, e processos de montagem.

No passado, muitos engenheiros tentaram lidar com problemas relacionados a fatores de ruído através do controle dos próprios fatores de ruído: eles selavam componentes hermeticamente à umidade; isolavam componentes sensíveis a vibração; condicionavam o ar de processos nos quais a temperatura era um fator-chave, ou asseguravam consistência em materiais ou peças que recebiam através de intensa inspeção ou ensaios. O Dr. Taguchi propôs que tais ações de controle fossem usadas apenas como último recurso, já que são normalmente muito caras. Ao invés disso ele recomendou que, através de experimentos, esses níveis de parâmetros de design que *minimizam o impacto que os fatores de ruído têm na performance de produtos e processos* sejam identificados. Os fatores de controle são então ajustados para esses níveis que farão o produto *robusto* ou insensível aos fatores de ruído.

## 7.2. Modelos Experimentais para Fatores de Controle e Ruído

Três abordagens foram sugeridas para modelar experimentos para analisar ambos fatores de controle e ruído.

*Abordagem 1.* Não fazer tentativas para controlar fatores de ruído durante o experimento. Em vez disso, executar tentativas repetidas para combinações selecionadas de fatores de controle e medir a variabilidade do processo com desvios-padrão de amostra calculados em cada “ponto” experimental. O ambiente no qual o experimento é realizado deve estar o mais próximo possível ao real de uso ou manufatura.

*Abordagem 2.* Identificar fatores de ruído antes da experimentação, e incluir os fatores de ruído com os fatores de controle no modelo experimental. Por exemplo, se for necessário lidar com 6 fatores de controle e 2 fatores de ruído, um experimento de 16 iterações em 8 fatores seria usado. Interações entre fatores de design e ruído seriam avaliadas, e níveis de fatores de controle que minimizam os efeitos dos fatores de ruído seriam identificados.

*Abordagem 3.* Selecionar um modelo experimental para os fatores de controle. Taguchi chamou essa matriz-modelo uma *matriz interna*. Selecionar um segundo modelo experimental para os fatores de ruído. Este é chamado uma *matriz externa*. Para cada combinação de fatores na matriz interna, executar todas as combinações de fatores de ruído na matriz externa. (Assim se a matriz interna contém 8 linhas e a matriz externa contém 4 linhas, então o experimento combinado terá  $8 \times 4 = 32$  tentativas experimentais).

Tem havido considerável debate de qual é a melhor abordagem para modelar um experimento para considerar ambos os fatores de controle e de ruído. A Abordagem 3 foi proposta por Taguchi. Pode ser vista como um caso especial da Abordagem “2” na qual parâmetros são impostos na atribuição de fatores nas colunas de uma matriz-modelo. Ela tem algumas características desejáveis considerando as atribuições de relações. Em particular, todos os fatores na matriz interna são ortogonais a todos os fatores na matriz externa. Não há atribuição de efeitos ou interações de fatores de controle a efeitos ou interações de fatores de ruído. Entretanto a Abordagem 3 pode necessitar um grande número de iterações experimentais, e apesar do grande número de tentativas, os efeitos e interações dos fatores de controle podem ainda ser confundidos entre eles. Vide Lochner e Matar (1988) para discussão posterior.

Como exemplo, considere uma situação experimental envolvendo 5 fatores de controle e 3 fatores de ruído. Suponha que um modelo de 8 iterações seja selecionado para a matriz interna e um experimento de 4 iterações para a matriz externa. Precisar-se-á de  $8 \times 4 = 32$  tentativas experimentais. As seguintes relações de atribuição ocorreriam nesse experimento de 32 iterações:

- Todos os efeitos principais para fatores de controle são atribuídos a interações de 2 fatores de controle.
- A matriz-modelo para 3 fatores em 4 iterações é obtida pela atribuição de C igual a AB no modelo fatorial para 2 fatores em 4 iterações produzindo a matriz-modelo na Tabela 7.1. Cada um dos 3 fatores de ruído seria atribuído a uma interação de 2 fatores de ruído (que, aliás não é geralmente vista como um problema sério quando consideramos fatores de ruído).

Considere agora usar a Abordagem 2 para lidar com 5 fatores de controle e 3 fatores de ruído. Há um total de  $5 + 3 = 8$  fatores. Um experimento de 16 iterações em 8 fatores permite estimar todos os efeitos principais independentes de interações de 2 fatores (LOCHNER; MATAR, 1990).

Bradley Jones, Cientista-chefe da Catalyst Inc., faz a seguinte observação em relação ao uso de matrizes externas (1988) apud Lochner et al (1990):

Tipicamente, fatores de ruído são caros para se controlar. Entretanto, os fabricantes americanos normalmente devem controlar esses fatores de forma a reduzir a variabilidade da resposta. Isto aumenta os custos de operação de processos. Em contraste, firmas que descobriram regiões de operação nas quais a resposta não é relativamente afetada pelas mudanças nos fatores de ruído irão desfrutar de uma vantagem competitiva. Em um experimento do tipo Taguchi os fatores de ruído são freqüentemente rigidamente controlados por uma matriz externa. Isto é caro, mas válido se o experimento tiver sucesso.

A matriz externa pode ser qualquer uma das comumente usadas matrizes ortogonais. O ponto-chave aqui é que as matrizes externas são *ortogonais*. Em um modelo ortogonal, os efeitos de fatores são independentes uns dos outros, o que é freqüentemente desejável. Entretanto, ortogonalidade na matriz externa também implica que os fatores de ruído variem *independentemente* na realidade. Esta é uma aceitação não garantida e perigosa. Não é garantida porque as variáveis do processo freqüentemente se movem em sequência, não independentemente. É perigosa porque essa correlação entre os fatores de ruído pode significar que a variação das res-

postas na matriz externa pode tanto superestimar ou subestimar a variação real da resposta...

Ordem padrão	FATORES		
	A = BC	B = AC	C = AB
1	1	1	2
2	1	2	1
3	2	1	1
4	2	2	2

Tabela 7.1 - Matriz-modelo para 3 fatores em 4 iterações (LOCHNER; MATAR, 1990)

Desta maneira, na prática, se os fatores de ruído são correlacionados, então as medidas da variabilidade nas matrizes externas podem superestimar o ruído para alguns pontos e subestimá-lo para outros. Seria impossível encontrar com confiança o ajuste dos fatores de controle que minimiza o ruído através do uso de matrizes externas. Uma alternativa é repetir o ponto da matriz interna tantas vezes quanto uma matriz externa precisaria, mas de forma a permitir que os fatores de ruído variem aleatoriamente durante o curso do experimento. [Nota: Esta é a Abordagem 1 acima.] Seguindo essa estratégia, total aleatoriedade é prudente. Nessa maneira a variabilidade natural dos fatores de ruído deve produzir uma melhor estimativa comportamental da variabilidade na resposta.

Uma outra opção seria usar um estudo histórico para determinar as correlações dos fatores de ruído no processo, então continuar a usar uma matriz ortogonal para as matrizes externas, mas usar um esquema ponderado nos pontos da matriz externa quando formar as estatísticas de performance (razões sinal-ruído) de interesse.

Os autores consultados recomendam uma combinação das Abordagens 1 e 2. Os fatores de ruído que são considerados críticos devem ser tratados da mesma forma que os fatores de controle sempre que possível. A variabilidade devido aos fatores de ruído que não estão sendo controlados pode ser avaliada pela repetição do experimento e cálculo de desvios-padrão a cada ponto do experimento.

## **8. CONSIDERAÇÕES COMPLEMENTARES**

### **8.1 Projetos de Engenharia e Melhoria da Qualidade**

A profissão de Qualidade percorreu um longo caminho desde o tempo quando o Departamento de Controle de Qualidade era liderado por um “Inspetor-chefe”. Mas as mudanças na percepção ocidental da qualidade não têm sido rápidas o suficiente. Nos anos 50 engenheiros e gerentes japoneses viajaram aos Estados Unidos para aprender como melhorar a qualidade de produtos manufaturados. Hoje engenheiros e gerentes americanos estão visitando o Japão para aprender os segredos da qualidade japonesa. Mas na verdade não há “segredos.” Existem apenas alguns princípios básicos que devem ser seguidos e ferramentas que devem ser aprendidas, tais como:

- O gerenciamento não deve ser deixado para os gerentes. Todos na empresa são gerentes de um ou mais processos, e aqueles mais próximos de um processo devem participar de seu gerenciamento.
- A variabilidade aleatória está presente em todos os processos. Projetos de engenharia e métodos de controle que falham em levar em conta aleatoriedade em medidas levam a produtos fora de especificação e altos custos de produção.
- Os mercados não podem ser simplesmente submetidos ao uso da última tecnologia. Hoje os consumidores querem produtos testados, confiáveis, de baixo custo e projetados para alcançar suas expectativas. As empresas devem tornar-se campeãs de seus consumidores.
- A experimentação pertence tanto ao chão de fábrica quanto ao laboratório de pesquisas. É ingênuo presumir que o ambiente de produção pode ser exatamente reproduzido no laboratório ou que ao pessoal de produção não podem ser ensinados métodos de experimentação.
- A qualidade por inspeção não é mais uma opção competitiva. O uso de Controle Estatístico de Processo como método primário de garantir qualidade irá atrasar mas não prevenir o fim de uma empresa. A única maneira de aumentar a fatia de mercado e lucros é projetar qualidade em todos os produtos e processos.

Os Estados Unidos costumavam emprestar dinheiro ao mundo. Hoje é a nação mais devedora no mundo. Hoje o PIB per capita e salários pagos aos trabalhadores dos EUA estão atrás dos do Japão. Muitas pessoas culpam o Japão por essas dramáticas mudanças. Reclamações sobre “as condições não são as mesmas” são freqüentemente ditas. Mas em exame mais próximo os problemas podem ser encontrados um pouco mais perto de casa. A mensagem é clara – muitos produtos produzidos em países ocidentais não podem competir em mercados mundiais porque eles não alcançam as expectativas de qualidade, custo e performance dos clientes. E eles não irão alcançar essas expectativas se os países ocidentais continuarem a depender de departamentos de controle de qualidade para qualidade de produtos e processos. É tempo de ação:

- A gerência deve reavaliar a maneira como gerenciam. Ela deve fornecer liderança contínua no esforço de melhoria da qualidade. Um grande obstáculo para a qualidade na maioria das empresas é um rígido sistema de gerenciamento de baixo para cima que não estimula a melhoria do processo.
- Os processos devem ser padronizados, avaliados por capacidade para alcançar expectativas e submetidos a controle estatístico. Experimentos modelados estatisticamente devem ser usados para melhorar processos.
- Todos devem ser treinados em composição de equipes, uma abordagem estruturada para a melhoria do processo e instrumentos de análise de dados. Os funcionários devem ser envolvidos em processos de gerenciamento e melhoria.

Um programa ativo de qualidade focado no projeto de qualidade e performance em produtos e processos é essencial para empresas que têm esperança de sobreviver neste século.

## **8.2. Passos para Implementar o Uso de Projetos de Engenharia**

Em uma organização onde o projeto de processos e produtos já é bem-organizado, a implementação dos métodos apresentados neste relatório deve envolver apenas a incorporação de algumas novas técnicas nos procedimentos estabelecidos. Para muitas empresas, entretanto, o uso efetivo deste relatório irá necessitar mudanças básicas em suas práticas de projeto e desenvolvimento. A última situação será discutida nesta seção.

O primeiro projeto de implementação deve ser realizado por um pequeno grupo de 3 a 8 pessoas. Se possível, pessoas de projeto, desenvolvimento, e manufatura devem estar

na equipe. Todos devem ser familiares com os fundamentos de formação de equipes. O entendimento pelo grupo dos conceitos básicos de controle estatístico de processo seria também benéfico. Seria bom ter um “especialista” na equipe ou como um conselheiro da equipe. Por “especialista” queremos dizer alguém que fez um curso de modelo estatístico experimental. Tome cuidado aqui – modelo experimental não tem sido muito usado na melhoria da qualidade em muitas indústrias, portanto um ótimo consultor em gerenciamento de qualidade ou controle estatístico de processo pode ser uma novidade em modelagem estatística experimental.

Os sete passos seguintes são baseados nos sete passos para a melhoria de processo recomendados em *Métodos Estatísticos para a melhoria de Qualidade*, de Hitoshi Kume. Modelo experimental é usado primariamente no terceiro passo.

### **Passo 1: Seleção do projeto**

É provavelmente melhor começar com um projeto existente. Escolha uma linha de produção onde problemas de qualidade são ocorrências muito comuns. Algumas das características de qualidade do produto devem ser do tipo de medição (contínua) de variáveis mais do que apenas aprovado/reprovado. O processo de produção deve ter controles que são, ou podem ser, ajustados por operadores.

### **Passo 2: Observe o processo**

Coloque o processo em um fluxograma. Identifique quais características do processo e produto estão no momento sendo medidas ou monitoradas. Recolha quaisquer dados que estejam disponíveis no momento. Determine se o processo está em um estado de controle estatístico. Se não estiver, tome medidas para remover causas de instabilidade. Compare dados de características de qualidade com as especificações. Se o processo não for capaz de alcançar as especificações, reduzir a variabilidade do processo deve ser uma prioridade máxima para a equipe de projeto.

### **Passo 3: Analise o processo**

A maior parte do tempo da equipe de projeto será gasta neste passo. Prepare um diagrama causa-efeito listando possíveis causas da variabilidade do processo que você procura reduzir, ou listando aqueles fatores de ruído que têm maior impacto na qualidade. Modele um ou mais experimentos para analisar o impacto dos fatores críticos na(s) característica(s) de qualidade escolhida(s). Baseado no(s) experimento(s), selecione os fatores-chave para serem controlados ou ajustados.

### **Passo 4: Execute**

Baseado nos resultados dos experimentos realizados no passo 3, prepare um plano para implementar mudanças no processo. Apresente o plano, com dados de sustentação, para o indivíduo ou grupo responsável pela operação do processo. Informe os funcionários que trabalham no processo das mudanças a serem feitas, e porquê. Implemente a mudança. Normalmente é melhor fazer a mudança em apenas uma linha e/ou um turno.

**Passo 5: Verifique a eficácia da ação**

Monitore o processo para estudar a eficácia da mudança. Quando possível, envolva os operários na avaliação da mudança do processo. Atente para efeitos colaterais não previstos. Se a mudança não produzir os resultados desejados, repita os passos 2 a 5.

**Passo 6: Padronize a mudança**

Uma vez demonstrado que as mudanças do processo produziram os resultados desejados, padronize as mudanças através de treinamento e documentação para assegurar que as melhorias não se percam. Este é um passo crítico mas frequentemente negligenciado. Implemente a mudança em todas as linhas ou processos. Monitore para a conformidade.

**Passo 7. Revise e planeje**

Revise o projeto. O que foi bem? O que deve ser feito de modo diferente na próxima vez? Que outras oportunidades para a melhoria do processo usando experimentos modelados foram descobertas durante o projeto? Já estamos prontos para usar modelamento experimental para um novo produto/processo ou outro projeto deve ser feito em um processo existente?

## 9. CONCLUSÕES

A qualidade de um produto não pode ser aperfeiçoada a menos que suas características possam ser identificadas e medidas. Dentro deste contexto, a variabilidade é uma característica importante de controle para o bom desempenho do produto. Genichi Taguchi, recentemente popularizou o conceito da função perda, focalizando o impacto da variação da qualidade. Ele tem retratado a idéia de que a variação do alvo desejado acarreta perdas para a sociedade.

Taguchi aponta que, mesmo o produto estando dentro dos limites de especificação, há um custo definido para a sociedade se a característica não está exatamente no valor nominal; quanto mais longe do nominal, maior o custo.

**LISTA DE REFERÊNCIAS**

CARASTAN, D.J; LEMOS, F.L.N.; PALOMO, L.B.; SUDA, M.N. **Projeto Robusto – Método de Taguchi**. Trabalho apresentado para a disciplina PMT-511 da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.

COLLIN, L; PAMPLONA, E. A Utilização da Função Perda de Taguchi na Prática do Controle Estatístico de Processo. In: **ENEGEP**, 17. Gramado. 1997 Disponível em: <<http://www.iem.efei.br/edson/download/Collin.doc>>. Acesso em: 16 out. 2002.

GUEDES, T.A. **Procedimentos de Otimização no Planejamento e Controle da Qualidade de Produtos e Processos**. 1996. 104p. Pesquisa - Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996.

LOCHNER, R; MATAR, J; **Designing for Quality**, London, Chapman and Hall, 1990.

PROJETO ROBUSTO. **Apresenta conceitos básicos e informações adicionais sobre o tema.** Disponível em: <[http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos\\_port/pag\\_conhec/Projeto\\_robustov5.html#Fontes%20de](http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/Projeto_robustov5.html#Fontes%20de)> Acesso em: 11 de nov. 2002.

QUALIDADE TOTAL. **Apresenta conceitos sobre o tema.** Disponível em: <<http://www.qualidade.com/>>. Acesso em: 15 de jun. 2002.

TAGUCHI, G; **Introduction to Quality Engineering**, Hong Kong, Nordica, 1986.

TAGUCHI, G; **System of Experimental Design**. White Plains, 1987. Vv. 1 e 2.

## GLOSSÁRIO

**atribuição** – se um experimento é modelado de tal maneira que 2 efeitos (principais ou de interação) não possam ser estimados independentemente um do outro, então os 2 efeitos são ditos atribuídos.

**característica de qualidade maior-é-melhor** – uma característica de produto ou processo a qual o experimentador quer maximizar. Pressão, resistência à ruptura ou resistência a embalagem e adesão são exemplos.

**característica de qualidade menor-é-melhor** – uma característica de produto ou processo a qual o experimentador quer minimizar. Distorção, refugo e tempo de entrega são exemplos.

**característica de qualidade nominal-é-o-melhor** – uma característica que tem um valor-alvo específico que otimiza a performance do produto. Uma medida como o diâmetro de um cabo teria um valor-alvo.

**efeito** – um efeito de um fator é a mudança em resposta média quando o fator vai de seu nível baixo para o seu nível alto.

**efeito de interação** – uma medida da extensão à qual 2 ou mais fatores em conjunto influenciam a maneira que cada um afeta uma variável-resposta.

**efeito principal** - vide efeito

**estrutura-pseudônimo** – uma lista das atribuições que ocorrem em um modelo experimental.

**experimento aleatório** – um experimento para o qual os resultados observados não possam ser previstos exatamente com antecedência. Quase todos os experimentos de Engenharia são aleatórios.

**experimento repetido** – um experimento no qual um dado modelo experimental é conduzido mais de uma vez.

**fator de ruído** – uma fonte incontrolável de variação nas características funcionais de um produto ou processo de produção.

**fatores de controle** – fatores usados em um experimento que podem ser controlados durante o experimento e também durante a produção normal.

**função perda** – o custo ou perda associada com um dado valor de característica de qualidade expresso como uma função da distância de um valor-alvo. A função perda pode envolver limites de especificação.

**matriz externa** – um modelo experimental para fatores que são todos de ruído.

**matriz interna** – um modelo experimental para fatores que são todos controláveis.

**modelo de fatores fracionais** – um modelo experimental no qual alguns dos efeitos são atribuídos a outros.

**modelo fatorial** – vide modelo fatorial completo.

**modelo fatorial completo** – um modelo experimental no qual cada combinação possível de fatores é incluída uma vez. Modelos fatoriais completos não têm efeitos atribuídos.

**ortogonalidade** – 2 efeitos são ortogonais se nenhum efeito estimado é afetado ou influenciado pelo outro. Se 2 colunas de números têm a propriedade que a soma dos produtos de seus termos respectivos é igual a zero, as colunas são ortogonais e os efeitos estimados baseados nessas colunas são ortogonais.

**parâmetros de modelo** – vide fatores de controle.

**qualidade de conformidade** – manufaturar produtos ou fornecer serviços que alcancem especificações previamente determinadas.

**qualidade de projeto** – atividades que assegurem que produtos ou processos novos ou modificados sejam projetados para alcançar as necessidades e expectativas do cliente, e sejam economicamente atingíveis.

**razão sinal-ruído** – uma classe de estatística usada com medida do efeito de fatores de ruído em características de performance.

**relatório** – um formulário que contém uma lista das tentativas experimentais a serem realizadas, incluindo os níveis para os fatores experimentais, mais espaço para registrar as respostas observadas. As tentativas experimentais devem ser listadas na ordem na qual devem ser realizadas.

**robusto** – um projeto de produto ou processo de fabricação é robusto se for relativamente insensível a fatores de ruído que estejam presentes.

**ruído de variações na produção** – diferenças em produtos feitos sob as mesmas especificações causadas por variabilidade em materiais, equipamentos de manufatura e processos de montagem.

**ruído externo** – variação em fatores ambientais que não podem ser controladas e que podem afetar as características do produto.

**ruído interno** – variação em uma característica de produto ou processo de produção causada pelo uso ou outros fatores relativos ao envelhecimento ou tempo de uso.

**tabela resposta** – um formulário usado para simplificar o cálculo de efeitos. Os valores-resposta observados são escritos em uma coluna da tabela resposta, e os cálculos realizados como sugerido pelo arranjo da tabela.

**valor-alvo é o melhor** – vide característica de qualidade nominal-é-o-melhor.

**variável resposta** – uma característica mensurável de um produto ou processo que é afetada por outros fatores. Em um experimento, vários níveis são ajustados para os fatores experimentais e o valor resultante para a variável resposta é então medido.

**variabilidade** – os efeitos mensuráveis de ruído em produtos e processos.