

# Análise da capacidade de processos (Parte I)

Muitas organizações estão adotando novos critérios de avaliação do desempenho de seus fornecedores e de suas linhas de produção, em que é introduzido o ppm (partes por milhão) em vez de percentuais (%). A partir desta edição, BANAS QUALIDADE vai publicar, em três partes, uma pequena introdução sobre o estudo da ciência denominada Estatística, que é a base de todas estas metodologias

Carlos Bayeux

Com a publicação do livro *Economic Control of Quality Manufactured Product*, de autoria do engenheiro norte-americano Walter Shewhart, em 1931, a idéia da aplicação da Estatística, como meio para determinação do comportamento dos processos de produção, introduziu uma mudança revolucionária no enfoque gerencial da qualidade, uma vez que se passou da inspeção do produto, com o simples intuito de detectar falhas no mesmo, para o controle do processo produtivo, de modo a prevenir falhas no produto.

Apesar da ampla divulgação das técnicas do Controle Estatístico do Processo (CEP), muitas empresas ainda trabalham com o conceito de inspeção. É comum na inspeção de recebimento, o uso de planos de amostragem, preconizados pelas normas americanas Military Standard 105, com a adoção de Nível de Qualidade Aceitável (NQA) igual a 1%. E vejamos o absurdo de tal prática, de acordo com a norma citada, o consumidor concorda em aceitar 19 lotes, em 20 fornecidos, com 1% de defeitos. O mais surpreendente é que o consumidor se arrisca em aceitar um em dez lotes com até 42% de fração defeituosa, como ilustra a Figura 1.

É óbvio que uma organização que pretenda ser competitiva não pode conviver com esse sistema de inspeção (por amostragem) para aceitação de itens supridos por fornecedores externos. Por outro lado, ainda há uma outra questão de suma importância quanto à performance dos fornecedores, como o caso de um fornecedor com índice de desempenho para a qualidade igual a 99%. Certamente seria considerado como um fornecedor excelente. Agora, vamos supor que esse fornecedor coloque no mercado cem mil itens, o que significa que mil desses itens irão apresentar alguma não-conformidade e de cem consumidores um será "agraciado" com um produto defeituoso.

Faça ao quadro descrito, muitas organizações estão adotando novos critérios de avaliação do desempenho de seus fornecedores e de suas linhas de produção, em que é introduzido o ppm (partes por milhão) em vez de percentuais (%). Há casos em que fornecedores classificados como 100% na inspeção de recebimento de seus lotes, na avaliação de ppm da produção (do cliente) classificaram-se como um dos piores, devido a problemas gerados pelos itens fornecidos quando aplicados nas linhas de montagem. Na atualidade, há empresas que adotam taxas de desempenho na ordem de

40 ppm ou menos, o que é difícil de ser trabalhado com o emprego dos planos de amostragem da Mil. Std. 105, cujo menor NQA é 0,04%, o que corresponde a 400 ppm. Além disso, segundo estudos para determinar a capacidade seletiva humana, a detecção de defeitos por inspetores começa a apresentar sérias dificuldades em lotes com fração defeituosa em torno de 100 ppm. Isto tudo leva a uma conclusão inevitável: o caminho da melhoria da qualidade deve se dar mediante o controle do processo, não sobre o produto, e para isso é necessário o conhecimento da capacidade do processo. Um bom exemplo da aplicação prática do enfoque do controle estatístico do processo é representado pelo Programa Seis Sigmas (6 $\sigma$ ), que tem como meta o alcance de um nível de rejeição na ordem de 3,4 ppm, ou ainda, o que preconiza a norma QS 9000, com relação ao intenso emprego das técnicas estatísticas no controle e avaliação dos processos dos fornecedores das montadoras automobilísticas.

A análise da capacidade (capacidade) do processo produtivo é um procedimento para avaliar a condição de um processo em atender as especificações de determinada característica da qualidade do produto. Em outras palavras, isso implica na análise da estabilidade e variabilidade do processo, bem como o exame de sua posição relativa aos limites e centro do campo de tolerância da característica de interesse. Assim, o estudo da capacidade do processo visa a determinar o comportamento (existente ou desejável) do processo, de modo que as tolerâncias de projeto do produto possam ser satisfeitas com os recursos disponíveis, ou de outra forma, na especificação de características de novos equipamentos produtivos ou na comparação de processos com diferentes equipamentos. Matematicamente falando, a análise do processo é desenvolvida mediante a aplicação de técnicas estatísticas que permitem determinar o tipo e a forma da distribuição (modelo probabilístico) da saída do processo (valores medidos da característica da qualidade do produto), sua dispersão e localização, tendo como referência o campo de tolerância especificado em projeto.

Portanto, a análise da capacidade de processos é um estudo de engenharia, em geral conduzido na etapa do projeto do processo (e do produto), com a utilização de instrumental estatístico, capaz de propiciar inferências que descrevam adequadamente o comportamento do processo em consideração, a partir de um modelo de probabilidade. Em geral, o modelo mais adotado na prática é o da curva Normal (ou de Gauss). Como apresentado na Figura 2, essa curva, em forma de sino, quando limitada por uma faixa de seis desvios-

Figura 1. Curva Característica Operacional – CCO

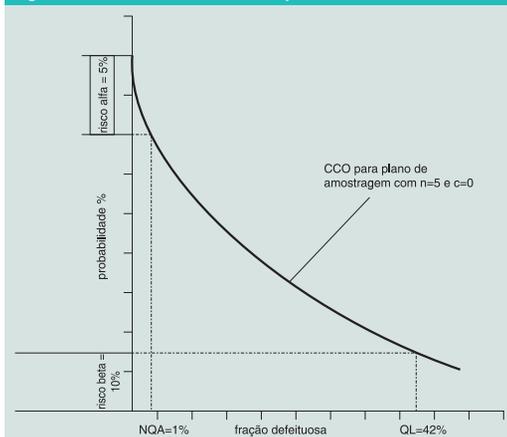
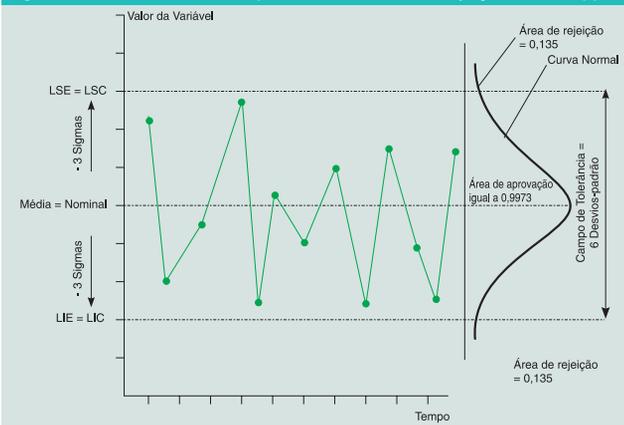


Figura 2. Carta de controle de processo estável com rejeição de 2700 ppm



padrão ( $6\sigma$  – variação natural do processo), apresenta uma área de cerca de 99,73% em relação à área total da curva, que se estende de menos infinito ( $-\infty$ ) até mais infinito ( $+\infty$ ). Um processo que se configure nessa condição tem taxa esperada de rejeição igual a 0,27% ou 2700 ppm, desde que o processo esteja centrado (nominal da característica da qualidade coincidente com a média do processo  $N = \mu$ ) e tenha campo de variação natural de mesma magnitude do campo de tolerância (bilateral) do produto ( $LSE - LIE = 6\sigma$ ).

Para a realização da análise da capacidade, o processo precisa estar na condição de controle estatístico. Nessa condição, diz-se que o processo é estável e sua variação deve-se, tão somente, as causas comuns, inerentes ao processo. A capacidade do processo pode então ser mensurada. Essa mensuração se relaciona com a taxa de rejeição de produtos que não atendem as especificações de projeto. Para que o processo seja considerado capaz, isto é, que produza com a qualidade desejada, os limites da variação natural do processo devem estar inseridos, ou pelo menos coincidir com os limites de especificação. Cumpre salientar que a capacidade do processo, no que tange ao atendimento das especificações do produto, deve ser uma condição contínua ao longo do tempo de operação produtiva do processo. Nesse sentido, é fundamental que antes de se tirar conclusões sobre o processo produtivo, verifique-se até que ponto o mesmo tem seu comportamento bem modelado pela curva Normal. No caso, em que esse modelo for assumido e, no entanto, não bem representar a realidade do comportamento do processo, decisões errôneas sobre a taxa de rejeição e capacidade do processo serão inevitáveis.

## Índices de capacidade

A capacidade pode ser especificada por meio de índices que quantificam o nível de desempenho do processo em atender as especificações do produto. Por meio desses índices é possível se comparar processos distintos e, a partir daí, classificá-los quanto as suas capacidades. Diversos são esses índices, sendo os mais comuns o  $C_p$ ,  $C_{pk}$  e o  $C_{pm}$ , tendo cada um características que fazem com que expressem informações diferentes sobre a capacidade do processo considerado. Os índices de capacidade e de performance do processo (mais adiante examinados) vêm ganhando grande aceitação por representarem o comportamento complexo de um processo em um único e simples número. O emprego desses índices tem se tornado atraente como solução prática na demonstração da capacidade dos processos aos clientes, como por exemplo, preconiza a norma QS 9000, aplicada na cadeia de fornecedores da indústria automobilística.

O crescente emprego desses índices não tem sido acompanhado de certos cuidados quanto a aspectos de ordem estatística. É comum que sejam calculados sem nenhuma consideração quanto ao tamanho da amostra de dados obtidos junto ao processo e nem tão pouco por considerações quanto as condições em que ocorre a tomada da amostra, comprometendo a representatividade e aleatoriedade do processo de amostragem. Além disso, não raro, são de-

terminados sem nenhuma evidência a respeito da estabilidade (ausência de causas especiais) do processo produtivo ou conhecimento se a distribuição subjacente se configura segundo a curva normal (ou outra função) e, ainda se os dados coletados no processo são independentes. Conseqüentemente, os índices, assim determinados, não bem representam a capacidade do processo em exame, levando a conclusões incongruentes com o comportamento real do processo. Também é importante notar que esses índices têm caráter probabilístico, o que implica em riscos de decisão, com base nesses números, isto é, pode-se aceitar um processo como capaz, quando na realidade o mesmo não é assim caracterizado, e vice-versa.

Os principais elementos considerados na determinação dos índices de capacidade são a nominal e respectivos limites de tolerância da característica da qualidade do produto e os parâmetros estatísticos do processo. No caso da nominal e seus limites, esses são definidos com base em requisitos dos clientes, determinações técnicas ou exigências regulatórias, devendo-se ter em mente que essas definições podem ser alteradas face a aspectos tecnológicos, econômicos ou mercadológicos. Os parâmetros estatísticos, mais comuns, são as medidas de tendência central (ou de localização como a média  $\mu$ ) e de dispersão (desvio-padrão  $\sigma$ ) da distribuição dos dados coletados, em um intervalo de  $\mu \pm 3\sigma$ . Os índices de capacidade empregados na prática são:

▣ Índice de Capacidade Potencial ( $C_p$ ): é uma medida de capacidade que não considera a localização do processo no campo de tolerância do produto, nem tão pouco a nominal desse campo, necessariamente bilateral. O  $C_p$  é determinado pelo quociente entre a dimensão da faixa de tolerância especificada para o produto e a variação natural do processo, definida pela amplitude de  $(6\sigma)$  seis desvios-padrão do processo, estatisticamente estável.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Preferencialmente, a determinação do desvio-padrão do processo deve ser conduzida a partir de valores individuais tomados no processo para construção dos gráficos de controle (faz-se  $s = S$ ), depois que se verificou que a normalidade esta presente e as causas especiais (assinaláveis) foram eliminadas.

Outra forma de cálculo do desvio-padrão do processo pode ser realizada mediante a expressão:

$$\sigma = S_m \sqrt{n}, \text{ onde:}$$

$S_m$  = desvio-padrão das médias dos subgrupos racionais.

$n$  = tamanho do subgrupo racional empregado na construção da carta  $\bar{X}$ .

Em vez de  $s$ , é também comum o uso da estimativa estatística do desvio-padrão do processo ( $s^\wedge$ ) a partir de:

Quadro 1	
$\sigma^\wedge =$	<b>Comentários</b>
$MR/\bar{d}2$	$MR =$ Amplitude móvel média $d2 =$ coeficiente estatístico tabelado
$R/\bar{d}2$	$R =$ Amplitude média
$S/\bar{c}4$	$S =$ Desvio-padrão médio $c4 =$ coeficiente estatístico tabelado

Em teoria, para um processo absolutamente ideal, qualquer um dos métodos anteriores apresentaria o mesmo valor para o desvio-padrão do processo, contudo a realidade é outra. Os processos não são perfeitos. A estabilidade não é absoluta, mesmo que uma carta de controle a demonstre. As cartas têm um limite de detecção que impede ou limita em certa magnitude, a percepção das variações de subgrupo a subgrupo, o que contribui para a manifestação das diferenças entre os valores obtidos por cada um dos métodos. Por outro lado, o procedimento de determinação da estimativa  $s^{\wedge}$  reflete a variação média interna ao subgrupo, fazendo com que as inevitáveis variações subgrupo a subgrupo (do processo) não sejam capturadas. Assim os dois primeiros procedimentos tendem a dar resultados mais próximos entre si e mais realísticos com relação à dispersão do processo do que o método das estimativas  $s^{\wedge}$ .

Índice de Capacidade Relativo à Localização (Cpk): esse índice considera a localização do processo ( $\mu$ ), sendo determinado pelo quociente da menor distância entre a média do processo e um dos limites de tolerância (o mais próximo) e a metade da faixa de variação natural do processo ( $3s$ ).

$$C_{pk} = \min \{C_{pu}, C_{pl}\} = \frac{Z \cdot \min}{3}$$

Z = número de  $\sigma$  da curva normal padronizada

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad \text{e} \quad C_{pl} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad \text{onde } \mu = \bar{X}$$

$$C_{pk} = C_p (1 - k) \quad \text{onde } k = 0 \text{ a } 1, \quad k = \frac{2|\mu - \mu_0|}{LSE - LIE}$$

Índice de Capacidade Relativo ao Alvo (Nominal) (Cpt): esse índice considera o valor da nominal do campo de tolerância do produto (N), sendo determinado pelo quociente da menor distância entre a nominal e um dos limites de tolerância (o mais próximo) e a metade da faixa natural do processo ( $3s$ ).

$$C_{pt} = \min \{C_{ptu}, C_{ptl}\}$$

$$C_{ptu} = \frac{LSE - N}{3\sigma}$$

$$C_{ptl} = \frac{N - LIE}{3\sigma}$$

Índice de Capacidade Relativo à Localização e ao Alvo (Cpkt): esse índice considera, simultaneamente, a distância entre um limite de especificação e a nominal, e a distância entre a média do processo e a nominal da tolerância do produto.

$$C_{pkt} = \min \{C_{pktu}, C_{pktl}\}$$

$$C_{pktl} = \frac{(N - LIE)}{X} \left( \frac{1 - \frac{|\mu - N|}{LSE - LIE}}{3} \right)$$

$$C_{pktu} = \frac{(LSE - N)}{X} \left( \frac{1 - \frac{|\mu - N|}{LSE - LIE}}{3} \right)$$

Índice de Capacidade Relativo à Localização e à Dispersão (Cpm)<sup>2</sup>: esse índice considera simultaneamente a localização do processo e a dispersão em relação ao alvo. É definido como o quociente entre a faixa de tolerância especificada para o produto e a faixa de variabilidade do processo, definida pela amplitude de ( $6\delta$ ) seis desvios-padrão em relação ao alvo (N).

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\delta} \quad \text{onde } \delta = \sqrt{\sigma^2 + (\mu - N)^2}$$

Índice de Capacidade Ponderado (Cpw)<sup>3</sup>: esse índice tem caráter generalizante em relação aos demais (Cp, Cpk e Cpm), permitindo comparação mais acurada entre os diferentes índices de capacidade. É determinado pelo quociente entre a faixa de tolerância do produto e a faixa de variação do processo definida por seis desvios-padrão ponderados ( $6s_w$ ).

$$C_{pw} = \frac{LSE - LIE}{6s_w}$$

$$s_w = \sqrt{\sigma^2 + w(\mu - N)^2}$$

w = função ponderada

Verifica-se que, por exemplo, quando  $w =$  zero,  $C_{pw} = C_p$  ou quando  $w=1$ ,  $C_{pw} = C_{pm}$ .

#### Índices de Performance

Os índices de performance (Pp, Ppk, Ppt e Ppkt) são determinados pelas mesmas fórmulas dos respectivos índices de capacidade, observando-se que nesse caso o valor de  $s$  (ou  $s^{\wedge}$ ) é substituído pelo valor de S (valor do desvio-padrão dos dados considerados individualmente). Os índices de performance são uma resposta à crítica referente ao procedimento de cálculo dos índices de capacidade, que elimina os pontos em cartas de controle considerados fora de controle (causas especiais). A diferença dos índices de performance é que são calculados sem levar em consideração se o processo está ou não estável, ou é normal, bem como não partir de subgrupos racionais. Eles são determinados empregando-se todos os dados coletados, sem nenhuma preocupação sobre o estado estatístico desses pontos, incorporando portanto à idéia, de que foram obtidos em condição do processo, caracterizada pela atuação das causas comuns e especiais. Uma exigência essencial na coleta dos dados é que esta seja realizada durante um período de tempo representativo, de modo a capturar as diferentes variações do processo, permitindo com isso que os índices de performance sejam mais realísticos na quantificação da capacidade qualitativa do processo. Cabe, por fim, chamar a atenção para a impossibilidade de se determinar a incerteza presente nesses índices, uma vez que não é possível se determinar intervalos de confiança.

## Histograma

O histograma é uma representação gráfica da distribuição de freqüências dos valores medidos (de uma característica da qualidade de um produto) na saída de um processo, constituindo-se em uma técnica simples e valiosa na análise da capacidade dos processos. Para tal, é necessário dispor-se de pelo menos 50 observações, de modo que o histograma construído configure-se com adequada representatividade do comportamento do processo.

Com base no histograma, é possível se examinar a capacidade do processo, bem como se ter uma estimativa da taxa de rejeição presente no mesmo. O Quadro 2 apresenta alguns valores típicos para Cp, Z e respectivas taxas de rejeição. Cabe observar que os valores das taxas de rejeição apresentados foram determinados a partir da consideração de que a distribuição é modelada pela curva normal e que o processo está centralizado em um campo de tolerância bilateral. Algumas organizações produtivas especificam a capacidade por meio de um índice (ICP), que expressa percentualmente o quanto a faixa do processo ocupa do campo de tolerância, sendo determinado por:

$$ICP = \frac{1}{C_p} \cdot 100$$

A construção do histograma pode ser realizada tomando-se os valores individualmente ou agrupando-os por classes. Nesse caso o número de classes (i) pode ser determinado por  $\sqrt[3]{n}$  (n – número de observações) ou por consulta ao Quadro 3.

Quadro 2			Quadro 3	
Cp	Z	Taxa de rejeição	n	Nº de Classes (i)
0,33	1,0	317 400 ppm	Abaixo de 50	5 a 7
0,50	1,5	133 600 ppm	De 50 a 100	6 a 10
0,66	2,0	45 600 ppm	De 100 a 250	7 a 12
1,00	3,0	2 700 ppm	Acima de 250	10 a 20
1,33	4,0	60 ppm		
1,66	5,0	2 ppm		
2,00	6,0	2 ppb - partes por bilhão		

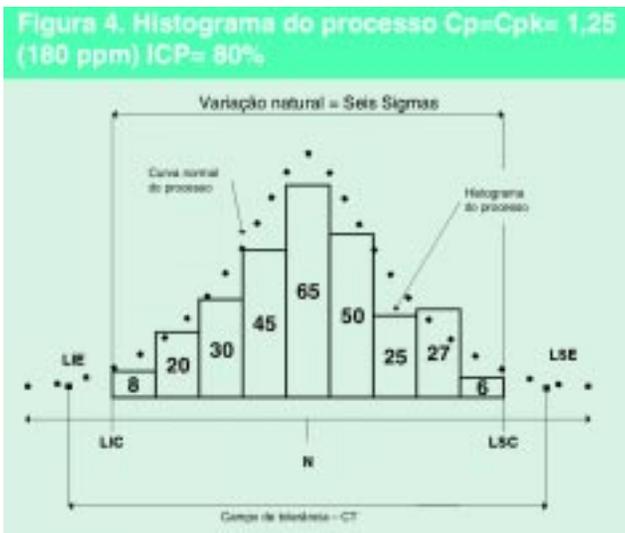
  

$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S}$	$X_i = \text{LSE ou LIE}$
$Z = n^{\circ} \text{ de desvios a}$	contar da média

A construção do histograma se dá segundo as seguintes etapas:

- ❑ Identificar o maior e o menor valor obtido, determinando a amplitude;
- ❑ Determinar se o histograma será do tipo agrupado ou individual;
- ❑ Se agrupado, determinar o número de classes observando que as classes devem ser iguais em tamanho (mesmo intervalo), os limites dessas classes são de uma casa decimal a mais do que os dados observados, o limite superior de uma classe é também o limite inferior da classe seguinte e o intervalo da classe (**A || R/i**);
- ❑ Elaborar uma tabela onde serão registradas as classes e suas respectivas freqüências;
- ❑ Com base na freqüência simples determinada, construir o histograma.

A partir do histograma é possível se verificar se o processo está centralizado em relação a faixa de tolerância, bem como se ter idéia da dispersão do processo e a forma aproximada da distribuição. O ideal é que o processo seja representado por um histograma simétrico, cujo centro coincida com o centro do campo de tolerância e que esteja totalmente contido nesse campo com folga. Muitas empresas exigem de seus fornecedores que esta folga seja de pelo menos 10% em cada lado do histograma, o que determina que o processo ocupe 80% do campo de tolerância (ICP), a variável Z igual a 3,75 e Cp = Cpk igual a 1,25 com taxa de rejeição de 180 ppm, como apresentado na Figura 4.



A assimetria (em relação à linha vertical) da distribuição de freqüências, representada pelo histograma, pode ser mensurada por um coeficiente definido por:

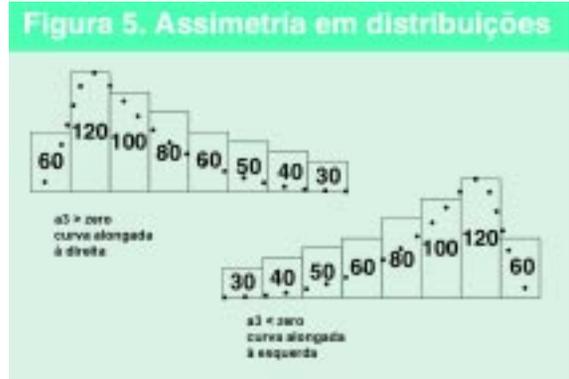
$$a_3 = m_3/s^3, \text{ onde } m_3 \text{ é o momento central}$$

Determinado por:

$$m_j = \sum f_i (\bar{X}_i - \bar{X})^j / n, \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

Quando  $a_3 = \text{zero}$  a distribuição é simétrica,  $a_3 < \text{zero}$  é alongada à esquerda e  $a_3 > \text{zero}$  alongada à direita, como ilustra a Figura 5. Cabe ainda observar que em distribuições simétricas tem-se que:

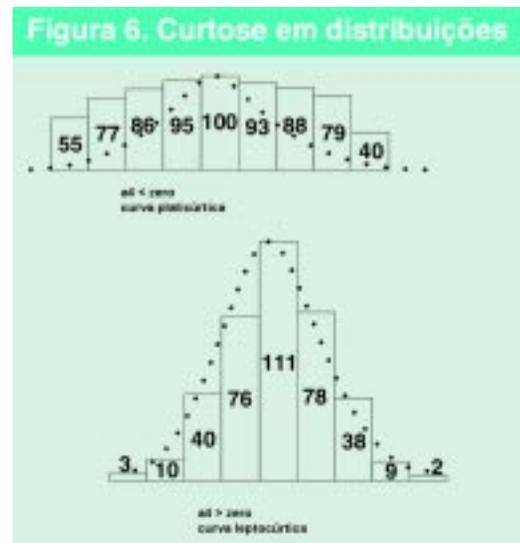
$$\text{Moda} \approx 3 \text{ Mediana} - 2 \text{ Média}$$



Também é possível a mensuração do achatamento da distribuição de freqüências mediante o coeficiente de curtose, definido por:

$$a_4 = m_4 / s^4$$

Quando  $a_4 < \text{zero}$  a distribuição é delgada (leptocúrtica),  $a_4 > \text{zero}$  é achatada (platicúrtica) e  $a_4 = \text{zero}$  é de configuração "normal" (mesocúrtica), como apresentado na Figura 6.



## REFERÊNCIAS

- 1 Kane, V.E. (1986) "Process Capability Indices", *Journal of Quality Technology*, 18, pp. 41-52.
- 2 Chan, L.K., Cheng, S.W. e Spiring, F.A (1988) "A New Measure of Process Capability: Cpm", *Journal of Quality Technology*, 20, pp. 162-175.
- 3 Spiring, F.A. (1997) "A Unifying Approach to Process Capability Indices", *Journal of Quality Technology*, 29, pp.49-59. Q

**Carlos Bayeux** é M.Sc., CQE/ASQ, e professor do Centro Federal de Educação Tecnológica - RJ