

1 Introdução

O controle estatístico do processo (CEP), que constitui uma área do controle estatístico da qualidade (CEQ), tem como objetivo a detecção de alterações no processo ao longo do tempo. Todo e qualquer processo estará sujeito a certa variabilidade, inevitável e difícil de ser eliminada, por melhor que seja o seu planejamento e controle. Trata-se da variabilidade natural do processo, que é fruto de uma série de pequenas perturbações que ocorrem aleatoriamente. Quando o processo apresenta apenas a variabilidade natural, devida às causas aleatórias, diz-se que ele está sob controle estatístico. Um processo pode apresentar, também, outros tipos de variabilidade, decorrentes de causas especiais (chamadas também de atribuíveis ou assinaláveis), que são maiores quando comparadas à variabilidade natural do processo e têm o efeito de modificar a distribuição da variável aleatória X , deslocando a média e/ou o desvio-padrão em relação a seus valores sob controle (valores-alvo). Quando, além das causas aleatórias de variabilidade, causas especiais estiverem presentes, diz-se que o processo está fora de controle estatístico.

Para detectar a presença de causas especiais, na tentativa de se evitar o aumento da variabilidade nos processos, estes devem ser constantemente monitorados. A principal ferramenta utilizada no monitoramento e identificação de variações no processo são os gráficos de controle, pois permitem a distinção entre causas aleatórias e especiais. Os gráficos de controle foram introduzidos nos anos 20, pelo Dr. Walter A. Shewhart, dos Laboratórios da Companhia Telefônica Bell (*Bell Telephone Laboratories*), e constituem uma representação gráfica de uma característica de qualidade no tempo. Em muitos casos, os gráficos de controle contêm uma linha central, que representa o valor médio da característica de qualidade em estudo, quando sob controle, e duas linhas superior e inferior em relação à linha central, denominadas limites superior (LSC) e inferior (LIC) de controle. Os limites dos gráficos de controle são determinados com base na média e no desvio-padrão (designados por parâmetros) da estatística monitorada, quando

o processo está isento de causas especiais. Em muitos casos, ou mesmo na maior parte das vezes, os parâmetros da distribuição não são conhecidos *a priori* e necessitam ser estimados. A estimação dos parâmetros deve ser obtida a partir de amostras do processo retiradas durante um período em que se supõe que o processo esteja sob controle estatístico. Quando isso não ocorre, os parâmetros são incorretamente estimados (as causas especiais deslocam a média e/ou a dispersão do processo em relação aos seus valores em controle) e, conseqüentemente, os gráficos de controle, cujos limites são obtidos a partir dessas estimativas, têm o seu desempenho comprometido.

Quando os parâmetros que representam uma característica de qualidade são desconhecidos e, portanto, necessitam ser estimados, os gráficos de controle podem ser aplicados em um procedimento com duas fases. A primeira delas, chamada de *Fase I*, representa a *Fase Inicial* do uso dos gráficos de controle, quando são estimados os parâmetros, a partir de um conjunto de dados do processo (estudo retrospectivo do processo). Nesta fase, deseja-se colocar o processo sob controle estatístico, através da identificação e eliminação de causas especiais, podendo-se recalculá-los várias vezes. Na *Fase II*, parte-se do pressuposto de que já se possuem estimativas suficientemente precisas dos parâmetros do processo, isto é, que as amostras nas quais as estimativas se basearam foram provenientes de um processo sob controle e em número e tamanho suficientes para adotá-las como valores “conhecidos” dos parâmetros. A partir daí, coletam-se amostras do processo em tempo real, para verificar eventuais alterações decorrentes de novas causas especiais.

Há toda uma linha de pesquisa em CEP sobre a análise de desempenho dos gráficos de controle, baseada na suposição de que os parâmetros do processo são conhecidos ou estimados com precisão absoluta. No entanto, observando-se os artigos de CEP em qualquer periódico ou em um conjunto deles, pode-se constatar que a maior parte dos trabalhos destina-se ao estudo da *Fase II* dos gráficos de controle, em que a distribuição sob controle é assumida como completamente conhecida.

Woodall e Montgomery (1999) reconhecem a importância de estudar a *Fase I*, especialmente ao longo das três linhas seguintes: análise do efeito das estimativas dos parâmetros do processo (isto é, da sua precisão ou imprecisão) sobre o desempenho dos gráficos (especialmente na *Fase II*); determinação do

número de amostras necessário para garantir um desempenho adequado (próximo ao “nominal”: o desempenho esperado no caso de parâmetros conhecidos com precisão); e métodos para determinar valores para os limites de controle (especialmente na *Fase I*, e possivelmente variáveis ao longo do tempo, de acordo com o acúmulo de informação das novas amostras) que compensem o efeito de estimação dos parâmetros e garantam o desempenho desejado para os gráficos.

A maioria dos trabalhos acerca do efeito da estimação dos parâmetros dos gráficos de Shewhart tem se dedicado aos gráficos para monitoramento da média, apesar de estudos realizados por Chen (1998) indicarem que os efeitos da estimação dos parâmetros são mais severos para os gráficos que monitoram a dispersão do processo.

Segundo Jensen et al. (2006), trabalhos adicionais são necessários para investigar os temas relacionados ao efeito da estimação dos parâmetros e para preencher as “lacunas” das pesquisas já realizadas. Dentre as constatações e recomendações feitas pelo autor acerca dos gráficos de Shewhart, destacam-se a pouca orientação existente sobre como analisar a *Fase I* dos gráficos de controle; a investigação de outros estimadores diferentes dos estudados, para verificar se o desempenho não pode ser melhorado; a comparação dos métodos de correção dos limites de controle quando não há dados suficientes para a *Fase I*; entre outras.

Não apenas o desempenho dos gráficos é afetado pela estimação dos parâmetros do processo. A análise de capacidade de processos também é baseada em estimativas desses parâmetros (e, portanto, afetada por tais), pois os índices de capacidade são definidos em termos dos valores das especificações e dos parâmetros do processo em questão.

Assim, o objetivo desta dissertação é analisar o efeito da imprecisão das estimativas sobre as medidas de desempenho dos gráficos de S , um gráfico de controle da dispersão do processo freqüentemente utilizado; e sobre as medidas de capacidade dos processos. Foi escolhido o gráfico de S por haver uma carência de estudos sobre o efeito da imprecisão nas estimativas do desvio-padrão do processo sobre o seu desempenho. Além disso, Chen (1998) mostrou que os diversos gráficos de Shewhart para monitoramento da dispersão do processo (gráfico de R , S e de S^2) são afetados pela imprecisão das estimativas de modo semelhante. O gráfico de S é mais usado que o de S^2 e no cenário atual, desapareceram as

circunstâncias (dificuldade de cálculo do desvio-padrão amostral) que levavam a privilegiar o gráfico de R .

Jensen et al. (2006) afirmam que, embora haja outros trabalhos sobre o assunto – Burroughs et al. (1993), Chen (1998), Maravelakis et al. (2002) e Zhang et al. (2005) - estes são poucos, e não o esgotam. A abordagem aqui adotada é distinta, e os resultados são calculados para uma gama maior de situações que nos trabalhos citados.

Além da análise quantitativa do efeito da imprecisão nas estimativas sobre o desempenho dos gráficos, para uma maior faixa de valores de n (tamanho de amostra) e m (número de amostras iniciais usadas na estimação) que as apresentadas em trabalhos precedentes, e que tem o propósito de servir de orientação para a definição pelo usuário dos gráficos de controle do número de amostras a serem usadas antes de ele “congelar” os valores dos limites de controle, também é feita uma análise do efeito da imprecisão nas estimativas sobre a avaliação da capacidade do processo.

O trabalho se inicia (Capítulo 2) com uma síntese dos trabalhos sobre o tema, uma vez que estes estão dispersos e, do conhecimento da autora dessa dissertação, não existe ainda nenhuma síntese dos mesmos em língua portuguesa. Essa revisão bibliográfica é precedida por uma breve exposição das definições e de uma fundamentação teórica comum a todos os trabalhos, necessária para o entendimento dos mesmos, bem como dos desenvolvimentos nesta dissertação; o Capítulo 3 descreve o modelo matemático adotado para cálculo das medidas de desempenho do gráfico (e dos índices de capacidade do processo) em função do erro na estimativa de S ; o Capítulo 4 apresenta as formas de análise, a partir do modelo matemático definido no Capítulo 3, para as medidas de desempenho e para a capacidade do processo e fornece os resultados dessas análises em tabelas e gráficos, em função do tamanho e do número de amostras.