

# 1 Introdução

O primeiro aspecto a ser focado quando tratamos de controle da qualidade é a própria conceituação do que seja qualidade. Este termo tem recebido abordagens variadas por parte de diversos autores, conhecidos como “gurus da qualidade”: Deming, Juran, Feigenbaum, Crosby e Taguchi. Cada um deles contribuiu para a teoria da qualidade, através do desenvolvimento de conceitos e técnicas específicas.

William Edwards Deming foi o precursor do movimento da qualidade, em âmbito mundial (Deming, 2000). A filosofia da qualidade, a ele atribuída, resultou da combinação dos seus conhecimentos técnicos com a sua experiência na implementação de técnicas de qualidade em organizações nos Estados Unidos e no Japão. Para Deming, qualidade significa atender e, se possível, exceder as expectativas do consumidor (Deming, 2000). Dentre todos os “gurus” da qualidade, Deming foi o que mais enfocou a estatística dentro da qualidade, por conferir o rigor da análise necessária para solucionar problemas.

Joseph Juran, juntamente com Deming, é considerado o pai da revolução da qualidade no Japão e o responsável pelo desenvolvimento industrial japonês após a II Guerra Mundial. Juran é o autor da definição de que “qualidade é adequação ao uso” (Juran & Godfrey, 1999). A sua obtenção é o resultado do gerenciamento da organização para a mudança. Um ponto comum entre a sua obra e a de Deming é o reconhecimento de que a maioria das oportunidades surgidas para melhorar a qualidade requer ações decisivas da administração para serem aproveitadas.

Armand V. Feigenbaum é o pai do conceito de “Controle de Qualidade Total”, usado por ele pela primeira vez em 1956 (Feigenbaum, 1961), quando propôs a idéia de que a qualidade só poderá resultar de um trabalho em conjunto de todos os que estão envolvidos no desempenho da organização, não apenas de um grupo de pessoas. Definiu qualidade como um conjunto de características do produto ou serviço em uso, as quais satisfazem as expectativas do cliente (Feigenbaum, 1961). Mais do que uma técnica de eliminação de defeitos nas operações industriais, a qualidade é uma filosofia de gestão e um compromisso com a excelência.

Philip Crosby deu uma contribuição fundamental para a teoria da qualidade ao defender o conceito de “zero defeitos”, ou “produto sem defeito” (Crosby, 1979). Definiu qualidade em termos de conformidade do produto com as suas especificações técnicas, introduzindo a idéia de que a qualidade compensa sempre o investimento, desde que se garanta que o processo vai produzir bem “à primeira” (“right the first time”).

Genichi Taguchi contribuiu de forma importante para a teoria da qualidade e para o conjunto de ferramentas da qualidade. Segundo ele, é preferível ter um produto que tem um desempenho médio fora de especificação, mas muito consistente, do que um produto com desempenho médio próximo da especificação, mas pouco consistente. Isto porque é mais fácil corrigir o desvio médio de desempenho do que a falta de consistência. Desta forma, Taguchi acrescentou ao conceito de qualidade uma dimensão de consistência (Taguchi, 1986).

Há ainda quem defina a qualidade como o valor do bem ou do serviço que quantifica o grau de satisfação do consumidor com respeito a vários quesitos, tais como preço, confiabilidade, durabilidade, estética, sabor, conforto, entre outros. Entretanto, o enfoque moderno considera que qualidade é inversamente proporcional à variabilidade (Montgomery, 2001) e, seguindo esta linha de conceituação, melhoria de qualidade consiste na redução da variabilidade em processos e produtos.

O início formal de Controle Estatístico de Processos (CEP) deu-se quando o físico Walter A. Shewhart, por volta de 1924, desenvolveu e aplicou ferramentas estatísticas, os gráficos de controle, nos *Bell Telephone Laboratories* para examinar quando uma ação corretiva deveria ser aplicada a um processo (Montgomery, 2001). No entanto, somente a partir da 2ª Guerra Mundial é que este campo alcançou grande desenvolvimento. Isto porque o exército americano exigiu a adoção de controle estatístico de qualidade para reduzir o número de peças defeituosas fabricadas pela indústria bélica.

O controle estatístico de processos (CEP) é um método efetivo para melhorar a produtividade e a qualidade de uma empresa. Consiste em monitorar um processo através do uso de procedimentos estatísticos. Tem sido usado, em geral, para processos industriais, mas pode também ser utilizado na indústria de serviços como, por exemplo, no monitoramento de variáveis relacionadas à saúde (Sellick, 1993; Burnett & Chesher, 1995; Benneyan, 1998, 2001a,b; Curran et.al., 2002) e também no monitoramento de variáveis ambientais (Aparisi et.al., 2003; Marti & Angus, 2004).

Um processo, por mais bem projetado e controlado que seja, possui uma variabilidade inerente, impossível de ser eliminada. É a chamada variabilidade natural do processo, provocada por causas comuns ou aleatórias, resultantes de uma série de pequenas perturbações. Diz-se que o processo está sob controle estatístico, quando apenas causas desta natureza atuam sobre o mesmo e, o seu comportamento é previsível. No entanto, outras variações podem estar presentes em um processo, provocadas por causas não aleatórias, chamadas causas especiais, que, na maioria das vezes, podem ser descobertas e eliminadas. Tais formas de variação são geralmente grandes quando comparadas com as formas de variação natural. Diz-se que um processo está fora de controle estatístico quando opera na presença de tais causas. O gráfico de controle é a principal ferramenta utilizada para monitorar os processos e sinalizar a presença de causas especiais. Informa quando se deve agir ou não agir no processo. Se a ação for tomada em momento oportuno e adequado, ela se mostrará econômica e eficaz. Ao se agir no processo, tem-se em vista uma orientação para o futuro, evitando-se assim, o desperdício.

Na utilização de gráficos de controle, costuma-se fazer uma distinção entre duas fases, denominadas fase I e fase II. Quando os parâmetros do processo, como por exemplo, a média e/ou variância são desconhecidos, tem-se uma fase anterior ao monitoramento, denominada fase I. Na fase I, são analisados dados históricos do processo, para que possa haver uma compreensão da variação do processo através do tempo, bem como para avaliar a estabilidade do mesmo; nesta fase, são estimados os parâmetros do modelo. Na fase II, com base nos parâmetros estimados na fase I, é feito o monitoramento do processo usando dados em tempo real para detectar desvios no processo (Woodall et al., 2004). Todavia, quando os parâmetros do processo são conhecidos parte-se direto para o monitoramento do mesmo.

Em determinados processos, apenas uma característica de qualidade é monitorada; em outros, várias características são monitoradas. Há ainda situações em que os processos são caracterizados por perfis, ou seja, uma relação funcional entre uma variável resposta e uma ou mais variáveis explicativas. Kang & Albin (2000) propuseram o uso do gráfico de controle multivariado  $T^2$  de Hotelling para monitorar perfis lineares. Este gráfico é usado para monitorar os parâmetros de um modelo de regressão linear simples, ou seja, o intercepto e a inclinação. Como é assumido que, quando o processo encontra-se em controle, o intercepto, a inclinação e o desvio-padrão do

processo são conhecidos, este gráfico também é chamado, na literatura, de gráfico multivariado  $\chi^2$  ou simplesmente, gráfico de controle  $\chi^2$ .

Mais recentemente, com a finalidade de aumentar a eficiência dos gráficos de controle, ou seja, detectar mais rapidamente pequenos a moderados desvios nos parâmetros do processo em estudo foram propostos gráficos de controle adaptativos. Tais gráficos baseiam-se no fato de que um ou mais parâmetros de projeto do gráfico variam durante o monitoramento. Assim, foram desenvolvidos gráficos apresentando variação no intervalo entre amostras, variação no tamanho da amostra e variação nos limites de controle (Reynolds et al., 1988; Prabhu et al., 1993, 1994; Costa, 1994, 1997, 1999; Aparisi, 1996; Zimmer et al., 1998; De Magalhães et al., 2002, 2009).

O objetivo dessa dissertação é propor um gráfico de controle com tamanho de amostra variável (TAV) para o monitoramento de uma característica de qualidade que pode ser descrita por um perfil linear. Mais especificamente, o gráfico de controle  $\chi^2$  com TAV será proposto para monitorar perfis lineares ao longo da fase II. Trata-se de um trabalho inédito, uma vez que, não há na literatura um gráfico de controle adaptativo para o monitoramento de um perfil linear. O desempenho do gráfico proposto será comparado com o gráfico de controle existente na literatura no monitoramento de perfis lineares, ou seja, o gráfico de controle  $\chi^2$  com parâmetros fixos (PF) empregado por Kang & Albin (2000). A medida de desempenho utilizada será o número médio de amostras até um sinal obtida através de uma cadeia de Markov. Como objetivo específico da dissertação tem-se a análise do desempenho do gráfico proposto na presença de deslocamentos com valores variados nos parâmetros do processo.

Após esta introdução, o capítulo 2 destaca trabalhos publicados sobre gráficos de controle adaptativos e gráficos de controle para monitoramento de perfis, uma vez que neste trabalho propõe-se um gráfico de controle adaptativo para o monitoramento de perfis lineares.

O capítulo 3 aborda o monitoramento de uma característica de qualidade que pode ser representada por um perfil linear simples. São destacados três exemplos de características de qualidade que são representadas por um perfil linear. Posteriormente, são apresentados o modelo de regressão linear simples e o método de estimação dos mínimos quadrados que é empregado na estimação do intercepto e do coeficiente de

inclinação do modelo de regressão linear simples. Por fim, é apresentado o gráfico proposto neste trabalho, gráfico  $\chi^2$  com tamanho de amostra variável.

Já no capítulo 4 é apresentada uma medida de desempenho utilizada em gráficos de controle, a saber, o número médio de amostras até um sinal (*NMA*). Neste trabalho o *NMA* foi obtido através de uma cadeia de Markov. No capítulo 5 são feitas comparações envolvendo o desempenho do gráfico utilizado por Kang & Albin (2000) para monitorar perfis lineares e o gráfico proposto nesta dissertação, o gráfico de controle  $\chi^2$  com tamanho de amostra variável para perfis lineares. O desempenho dos gráficos foi medido através do *NMA*.

No capítulo 6 é apresentada uma análise de sensibilidade com respeito ao desempenho do gráfico de controle  $\chi^2$  com tamanho de amostra variável, levando em consideração diferentes deslocamentos nos parâmetros do processo, bem como diferentes valores dos parâmetros de projeto do gráfico, a fim de verificar impactos causados no *NMA*. Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões.