

1 Introdução

A busca pela qualidade é uma preocupação atual e crescente de muitas organizações, que desejam, além da conquista de uma vantagem competitiva em relação aos seus concorrentes, atender a consumidores cada vez mais exigentes. A preferência declarada desses consumidores por produtos e serviços de maior qualidade torna crescente a importância do uso de métodos estatísticos, que deixam de ser uma ferramenta com aplicação apenas no setor industrial, passando também aos setores de saúde, ambiental, administrativo e sócio-econômico.

O Controle Estatístico de Processo (CEP) envolve um conjunto de ferramentas como gráfico de controle, diagrama de dispersão, histograma, gráfico de Pareto, dentre outras. O CEP é uma poderosa ferramenta na redução da variabilidade existente nos processos e aumento da sua capacidade, pois trabalha com a idéia de uma intervenção imediata à detecção de um problema, permitindo que o processo seja continuamente monitorado.

Desde que foram criados, em 1942, por Walter A. Shewhart¹, os gráficos de controle se tornaram uma das ferramentas mais utilizadas em CEP. Os gráficos de controle são instrumentos que permitem não só visualização da evolução de um processo e de sua variabilidade, como também, o monitoramento de algumas de suas características de qualidade, como a média de uma medida ou proporção de unidades defeituosas, que são plotadas juntamente com determinados limites de controle. Seu principal objetivo consiste na redução da variabilidade do processo através da detecção de padrões não aleatórios de comportamento. O princípio em que se baseiam é a distinção entre dois tipos de causas de variação dos processos: as chamadas causas

¹Engenheiro da empresa de telefonia Bell Laboratories, desenvolveu os gráficos de controle para aplicação industrial, sobretudo para evitar a produção de unidades defeituosas. Também em 1942, o CEP ganhou reconhecimento mundial quando utilizado na indústria bélica dos Estados Unidos durante a Segunda Guerra Mundial, sendo considerado segredo de estado pela nação americana.

comuns ou inerentes ao processo (variações aleatórias naturais e inevitáveis) e as denominadas causas especiais (variações significativas, não aleatórias, que deslocam e/ou alargam a distribuição da variável aleatória, comprometendo o bom desempenho do processo). Na presença de causas especiais, um processo é considerado fora de controle. A partir da constatação da presença dessas causas uma investigação deve ser realizada imediatamente para identificação e diagnóstico, permitindo ações para sua eliminação de modo que o processo volte a operar sob controle estatístico (apenas na presença das causas comuns).

Os gráficos de controle para variáveis são em geral os mais utilizados, com destaque para o gráfico da média (gráfico de \bar{X}) para monitoramento da tendência central de característica de qualidade mensuráveis e para os gráficos baseados na amplitude (gráfico de R) e no desvio-padrão (gráfico de S), para monitoramento da variabilidade de tal tipo de característica.

Os gráficos de controle convencionais “de Shewhart” são pouco sensíveis para a detecção de variações de pequenas magnitudes nos parâmetros controlados. Neste caso, os gráficos do tipo CUSUM (Soma Cumulativa) e EWMA (Média Móvel Ponderada Exponencialmente ou *Exponentially Weighted Moving Average*) são os mais recomendados, pois utilizam informações acumuladas sobre a característica de qualidade controlada, possibilitando uma maior rapidez na detecção de pequenos descontroles do processo.

Todos os gráficos de controle convencionais devem satisfazer duas premissas para que possam ser utilizados como ferramentas que possibilitem concluir se o processo está ou não sob controle estatístico. São elas:

1. As observações da característica de qualidade considerada devem apresentar distribuição normal, ou aproximadamente normal; e
2. As observações da característica de qualidade considerada devem ser independentes, ou seja, não podem apresentar autocorrelação.

Ao formalizar os gráficos de controle, Shewhart estabeleceu como condição para sua aplicação apenas que as observações da característica de qualidade considerada fossem independentes e identicamente distribuídas, o que significa que as amostras devem ser retiradas de forma aleatória de um processo que originalmente

esteja sob controle estatístico. Quando tal condição é violada, isto é, quando as observações do processo possuem autocorrelação, há um aumento do risco de alarme falso (probabilidade de uma observação cair fora dos limites de controle quando o processo está sob controle), comprometendo a credibilidade dos resultados. (Wheeler, 1995 e Costa *et al.*, 2005)

Já suposição da normalidade não foi uma exigência feita por Shewhart. A prova é que gráficos de R, S e por atributos aplicam-se a estatísticas que não seguem uma distribuição normal. Wheeler (1995) discute bem essa questão.

Processos autocorrelacionados são freqüentes no setor industrial, sobretudo nas indústrias química e metalúrgica, que apresentam processos contínuos e por batelada, e também em processos discretos com elevado nível de automatização. Para o controle desses tipos de processos, os gráficos de controle destinados a dados independentes e identicamente distribuídos (i.i.d). não podem ser aplicados diretamente, sendo necessárias adaptações (essencialmente na forma de seus limites), ou então, o uso de outras técnicas. Algumas dessas técnicas são discutidas por Montgomery (2004), dentre as quais pode-se destacar a abordagem que ajusta aos dados do processo modelos de séries temporais como ARIMA (modelos auto-regressivos integrados de média móvel) ou EWMA, e aplica gráficos de controle aos resíduos do modelo.

Fica claro, portanto, que antes de se iniciar o controle estatístico de um processo, é necessário conhecer as características do mesmo para que ferramentas adequadas sejam implementadas e que resultados válidos sejam gerados.

Os gráficos de controle convencionais, assim como as demais ferramentas tradicionais de CEP, foram desenvolvidos para o monitoramento de processos com apenas uma ou poucas características de qualidade provenientes de uma única saída.

No entanto, processos multicanal (PMC) também chamados processos de fluxo múltiplo (PFM) são muito comuns no setor industrial. Nesse tipo de processo, um mesmo produto é produzido simultaneamente (ou quase) em diversos canais em paralelo, como por exemplo, em operações de enchimento, encontradas nas indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e de bebidas.

Também são considerados PMC (pelo menos para fins de modelagem matemática e de CEP) processos em que diversos valores de uma mesma variável, como a espessura, por exemplo, são medidos em diversos pontos de uma mesma unidade do produto ou em diversas posições de um processo contínuo. Tais processos podem ser encontrados em algumas etapas de fabricação de automóveis e aeronaves, galvanização do aço e na produção de papel.

Nesse tipo de processo é necessário realizar o controle simultâneo da característica de qualidade nos diversos canais (sejam eles diferentes canais ou diferentes posições) em um mesmo instante de tempo.

As *group charts* ou gráficos de controle de grupos, propostos por Boyd (1950), constituem a técnica clássica, a mais conhecida, para o controle de PMC. Podem ou não ser usadas com um critério suplementar desenvolvido por L.S Nelson (1986), denominado *runs control scheme*, ou critério de corridas. Tais métodos representam a base para o desenvolvimento posterior de diversas técnicas que procuram superar algumas de suas limitações como, por exemplo, o fato de não considerarem que uma parcela da variação em PMC é comum a todos os canais.

Mortell e Runger (1995) propuseram um método alternativo para o monitoramento de PMC que elimina grande parte das limitações associadas ao esquema clássico. Atribuem a variabilidade de um PMC a duas fontes de variação distintas. Uma, comum a todos os canais e outra, referente à variação individual de cada canal e, para o controle dessas duas fontes de variabilidade, propõem o uso de dois gráficos distintos:

- Um gráfico para a média de todos os canais em cada instante de tempo e,
- Um gráfico para a amplitude entre os canais, que consiste na diferença entre o maior e o menor valores observados dentre todos os canais num dado instante de tempo.

Reconhecem ainda, como uma possível técnica alternativa, trabalhar com uma *group chart* das diferenças de cada canal em relação a média de todos os canais. Tal esquema foi posteriormente adaptado por Passos (2005), para aplicação em um processo real (cujos diversos canais apresentavam médias e desvios-padrão

diferentes). Passos (*op. cit.*) propôs ainda, como uma possível alternativa ao seu esquema, uma *group chart* de diferenças padronizadas de cada canal em relação ao nível médio. A análise teórica de desempenho desta técnica foi sugerida como uma extensão ao seu trabalho.

A presente dissertação foi motivada pela proposta de prosseguimento indicada por Passos (2005), e tem como propósito inicial a realização de uma análise de desempenho de um esquema de controle de PMC formado por um gráfico de controle para a média de todos os canais, e uma *group chart* para as diferenças de cada canal em relação à média. Vale destacar que os resultados de tal análise de desempenho também se aplicam ao caso das diferenças padronizadas.

Além do propósito inicial, o trabalho desenvolve a comparação do desempenho do presente esquema com o do gráfico da amplitude proposto por Mortell e Runger, (1995) apontando sob quais condições práticas cada uma das alternativas é mais indicada.

A contribuição do trabalho vai além da apresentação detalhada do modelo formal utilizado para controle estatístico de processos com múltiplos canais, das expressões para cálculo dos limites de controle e da análise do seu desempenho, dado que pelos resultados apresentados pode-se concluir pela superioridade do modelo aqui proposto em relação ao esquema de Mortel e Runger.

1.1. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, dos quais esta introdução é o primeiro, e sete Apêndices.

O Capítulo 2 revê conceitos fundamentais para o Controle Estatístico de Processos Multicanal, apresentando algumas técnicas alternativas às *group charts* tradicionais para controle desse tipo de processo.

O Capítulo 3 apresenta o detalhamento do modelo formal utilizado para controle de processos com múltiplos canais e as expressões para cálculo dos limites de controle e para as medidas de desempenho obtidas analiticamente.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados para o esquema de controle proposto assim como a comparação de seu desempenho com o esquema de controle desenvolvido por Mortell e Runger (1995).

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Após as Referências bibliográficas (Cap 6), vários apêndices apresentam alguns desenvolvimentos matemáticos mais longos ou demonstrações, documentam códigos de programas e rotinas utilizados, e reúnem algumas tabelas de resultados da análise mais extensas e que, se fossem incluídas no corpo da dissertação, prejudicariam o fluxo da exposição.