

1 Introdução

O início do controle estatístico de processos deu-se com Walter Shewhart, na década de 20, através do desenvolvimento dos gráficos de controle. Segundo ele, todo e qualquer processo, por mais bem projetado e por mais bem controlado que seja, possui em sua variabilidade um componente impossível de ser eliminado. Trata-se da variabilidade natural do processo, proveniente de “causas aleatórias”. Quando o processo sofre somente a influência de causas aleatórias, diz-se que ele está em controle. No entanto, os processos podem estar sujeitos à ocorrência ocasional de uma variabilidade extra, fruto das chamadas “causas especiais”, que aumentam a dispersão e/ou tiram a característica de qualidade de interesse de seu valor especificado (valor-alvo ou valor em controle). Quando, além das causas aleatórias, causas especiais de variabilidade estiverem presentes, diz-se que o processo está fora de controle. Deste modo, o processo deve ser monitorado para detectar a ocorrência de causas especiais e implementar ações corretivas no menor espaço de tempo possível, de modo a não comprometer a qualidade final dos produtos. A principal ferramenta utilizada no monitoramento dos processos e na sinalização da presença de causas especiais são os gráficos de controle.

Os gráficos de controle utilizados no monitoramento de características de qualidade de interesse representadas por variáveis contínuas são denominados gráficos de controle por variáveis. Um exemplo é o gráfico da média \bar{X} .

Em muitos processos, no entanto, as características de qualidade de interesse não podem ser medidas por grandezas físicas. Nestes casos, a qualidade pode ser medida pela proporção média de produtos não-conformes (ou defeituosos) produzidos ou pela frequência de ocorrência de não-conformidades (ou defeitos). Os tipos de gráficos que monitoram estas medidas de qualidade são denominados gráficos de controle por atributos. Os gráficos de p e de np são amplamente utilizados para monitorar a proporção média de produtos não-conformes produzidos. O número de produtos não-conformes segue, tipicamente, uma

distribuição binomial. Por outro lado, os gráficos de c e de u são usados para controlar a frequência de ocorrência de não-conformidades. O número de não-conformidades segue tipicamente uma distribuição de Poisson.

São parâmetros de projeto de um gráfico de controle: os limites de controle, o tamanho de amostra, e o intervalo de tempo entre amostras. Tradicionalmente, os métodos de controle estatístico de processos por gráficos de controle utilizam parâmetros fixos; ou seja, o tamanho de amostra, o intervalo de tempo entre amostras e a abertura dos limites de controle não variam. Estes gráficos são chamados gráficos tradicionais, ou gráficos de parâmetros fixos. O monitoramento é realizado através da análise periódica de amostras: a cada intervalo de tempo h retira-se uma amostra de n itens para análise. O processo é dito em controle ou fora de controle de acordo com a posição da estatística de interesse, obtida da amostra e registrada no gráfico de controle. Se o valor da estatística estiver acima do limite superior de controle ou abaixo do limite inferior de controle, limites estes preestabelecidos, investigações no processo são feitas visando encontrar causas especiais de variabilidade; caso elas (realmente) estejam presentes, então ações corretivas são tomadas para eliminá-las. Por outro lado, se a estatística registrada no gráfico estiver dentro dos limites de controle, o processo é considerado em controle até a retirada da próxima amostra.

De acordo com Costa, Epprecht & Carpinetti (p. 19, 2004), “a eficácia de um gráfico de controle é medida pela rapidez com que esse dispositivo detecta alterações no processo. A análise da relação entre o custo de operação e a eficácia do gráfico de controle deve nortear a escolha de seus parâmetros de implementação: o tamanho das amostras, o intervalo de tempo entre amostragens e o fator que estabelece o posicionamento dos limites de controle no gráfico. Desse modo, se se pretende monitorar um processo por gráficos de controle, devem-se analisar criteriosamente quais valores atribuir a esses três parâmetros”.

Para quantificar a eficácia (rapidez de detecção) e os custos de operação de um gráfico de controle, podem-se definir, formalmente, diversas medidas de desempenho. Uma revisão conceitual das principais medidas de desempenho de gráficos de controle será realizada no *Capítulo 2*.

Os gráficos de controle tradicionais, também chamados *gráficos de Shewhart*, fazem somente uso das informações da amostra mais recente para determinar o estado do processo, ou seja, a estatística usada utiliza informação da

última amostra apenas. Este tipo de gráfico é bastante simples de ser utilizado, e é satisfatoriamente rápido para detectar alterações de grande magnitude na característica de qualidade de interesse de um processo (por exemplo, uma alteração de 1,5 desvios-padrão no caso do gráfico de \bar{X}), mas é mais lento para detectar alterações de menor magnitude.

Com os avanços na tecnologia, capazes de reduzir os níveis de variabilidade e as taxas de ocorrência de não-conformidades dos processos, os distúrbios a que estes estão sujeitos são, cada vez mais, tipicamente, de pequena magnitude. Além disso, as especificações estão mais rigorosas, ou seja, maior é o nível de exigência, e estes distúrbios de magnitude mais reduzida devem ser detectados.

Torna-se importante, portanto, encontrar maneiras de aumentar a rapidez de detecção dos gráficos, sem, porém, aumentar inaceitavelmente o custo de monitoramento. Em outras palavras, é preciso tornar o controle de processos mais eficiente, ou seja, com maior rapidez de detecção de descontroles, sem aumentar o tamanho das amostras, reduzir o tempo médio entre as amostras, nem aumentar a frequência de alarmes falsos. Essa questão relacionada aos gráficos de Shewhart é ainda mais relevante no caso de controle por atributos, porque este requer, usualmente, tamanhos de amostra muito grandes, mesmo para detecção de alterações de pequena magnitude. Esta maior eficiência dos gráficos pode ser alcançada através dos valores escolhidos para seus parâmetros de projeto, através de novos esquemas de controle (novos modelos de gráficos de controle, novas estatísticas), ou ainda através de modificações na forma de utilização dos gráficos tradicionais (incorporando novos critérios de detecção, ou permitindo que seus parâmetros de projeto sejam variáveis, por exemplo).

Outros tipos de gráficos, mais eficientes que os gráficos de Shewhart para detectar alterações de menor magnitude, foram desenvolvidos, e vários procedimentos para gráficos de controle têm sido propostos. Uma análise detalhada desses gráficos e procedimentos, através de uma revisão bibliográfica, será realizada no *Capítulo 2*.

Um desses tipos de gráficos são os chamados gráficos adaptativos, nos quais alguns ou todos os parâmetros de projeto do gráfico passam a variar durante a operação, em função de informações extraídas da amostra mais recente. Estudos têm mostrado que a flexibilidade dos gráficos adaptativos resulta em um monitoramento mais eficiente que o dos gráficos tradicionais (de parâmetros

fixos). Outro esquema de controle de reconhecida eficiência na detecção de alterações de pequena magnitude é o gráfico da Média Móvel Ponderada Exponencialmente (EWMA, de *Exponentially Weighted Moving Average*), que acumula informações de várias amostras consecutivas no processo de tomada de decisão.

Nesta pesquisa, é proposto um esquema de controle por atributos, denominado VSI EWMA, que incorpora a estratégia de gráficos adaptativos (usando um intervalo de tempo entre amostras variável) ao esquema EWMA, buscando melhorias no desempenho de gráficos de controle por atributos. O propósito da pesquisa é investigar as propriedades do esquema VSI EWMA na detecção de um aumento na frequência de não-conformidades, e comparar seu desempenho com o de outros esquemas de controle para não-conformidades. Supõe-se que, ao iniciar-se o monitoramento, o processo esteja em controle, e só saia deste estado em algum momento aleatório no futuro, devido à ocorrência de alguma causa especial. Supõe-se também que a causa especial ocorra instantaneamente, fazendo a frequência de não-conformidades ser aumentada de seu valor em controle para outro valor, e que o processo se mantenha nesse estado enquanto nenhuma ação corretiva for empreendida.

Não temos conhecimento de o esquema aqui proposto (VSI EWMA) ter sido tratado ou proposto na literatura para atributos, constituindo, portanto, uma contribuição original para a área de controle estatístico de processos.

A tese se apresenta subdividida da seguinte maneira. No *Capítulo 2*, é realizada uma revisão conceitual das principais medidas de desempenho de gráficos de controle e é apresentada a revisão bibliográfica sobre os trabalhos precedentes envolvendo procedimentos e gráficos de controle de processo para detectar alterações de pequena magnitude nas características de qualidade de interesse, com ênfase no controle de não-conformidades. No *Capítulo 3*, é realizada uma revisão da teoria de gráficos de controle EWMA. No *Capítulo 4*, é descrito o esquema VSI EWMA para não-conformidades proposto nesta pesquisa, e é apresentada a formulação do modelo matemático para cálculo das medidas de desempenho do esquema. No *Capítulo 5*, é realizada a análise de desempenho do esquema VSI EWMA para não-conformidades através da comparação com outros esquemas de controle para não-conformidades (V_p , EWMA, VSI e CUSUM). No *Capítulo 6*, são descritas as principais conclusões desta pesquisa.