

## **Gráficos de Controle Shewhart, CUSUM, EWMA e combinado Shewhart-CUSUM: uma proposta de monitoramento para implantação do Controle Estatístico do Processo**

Elisa Henning (Universidade do Estado de Santa Catarina) [elisa.henning@udesc.br](mailto:elisa.henning@udesc.br)

Eduardo da Silva Fernandes (Universidade do Estado de Santa Catarina) [edu.silva.fernandes@gmail.com](mailto:edu.silva.fernandes@gmail.com)

Andrea Cristina Konrath (Universidade Federal de Santa Catarina) [andreak@inf.ufsc.br](mailto:andreak@inf.ufsc.br)

Olga Maria Formigoni Carvalho Walter (Universidade Federal de Santa Catarina) [olgaformigoni@gmail.com](mailto:olgaformigoni@gmail.com)

Murilo Thiago da Maia (Konardi Usinagem) [murilot.maia@gmail.com](mailto:murilot.maia@gmail.com)

### **Resumo:**

A competitividade acirrada induziu as indústrias a concentrarem esforços para garantir a sua competitividade e, conseqüentemente, a sua sobrevivência. Além de atender as especificações, é fundamental procurar melhorar continuamente a qualidade. Como qualidade é inversamente proporcional à variabilidade e, esta só pode ser medida a partir de métodos estatísticos, gráficos de controle estatístico de processo são recomendados para esta finalidade. Este artigo apresenta resultados parciais da análise da aplicação de gráficos de controle estatístico para o monitoramento de um processo de usinagem. O objetivo é apresentar uma proposta de monitoramento da cota do diâmetro de um bloco usinado aplicando os gráficos de controle e comparar seus resultados. Neste processo especificamente, são prejudiciais tanto as pequenas e persistentes alterações na média, assim como as mudanças grandes e repentinas. Inicialmente, foram verificadas as suposições de normalidade e independência dos dados. Foi aplicado o gráfico de controle para medidas individuais de Shewhart e, em seguida, foram utilizados gráficos de controle de Soma Acumulada (CUSUM) e da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA). Os resultados mostraram que individualmente estes gráficos apresentavam limitações na sinalização de alterações. Assim, um gráfico combinado Shewhart-CUSUM demonstrou ser mais efetivo para este processo específico.

### **Palavras chave:**

Controle Estatístico de Processos, Shewhart, CUSUM, EWMA, Processo de Usinagem.

## **Shewhart, CUSUM, EWMA and Combined Shewhart-CUSUM Control Charts: A Proposal for Monitoring Implementation of Statistical Process Control**

Fierce competition has driven industries to focus efforts to ensure their competitiveness, and hence their survival. Besides meeting specifications, it is essential to try to continuously improve quality. As quality is inversely proportional to variability (and this can only be measured using statistical methods), statistical process control charts are recommended for this purpose. This article presents the results of the analysis of the application of statistical control charts for monitoring a machining process. The goal is to present a proposal for monitoring the quota of the diameter of a machined block applying control charts, and compare the results. In this particular process, small and persistent changes are harmful, as well as large and sudden changes. Initially, we verified the assumptions of normality and independence of the data. The control chart was applied for individual Shewhart

measurements, and then Cumulative Sum (CUSUM) and Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) control charts were used. The results showed that individually these charts had limitations in detecting changes. Thus, a combined Shewhart-CUSUM chart proved to be more effective for this specific process.

**Key-words:** Statistical Process Control, Shewhart, CUSUM, EWMA, Machining Process.

## 1. Introdução

A busca pela qualidade em produtos, processos e serviços tem se tornado parte da estratégia competitiva das empresas. Isso porque a qualidade é vista pelos consumidores como fator de escolha entre produtos e serviços que competem em uma mesma área. Segundo Montgomery (2008), a qualidade está relacionada a uma ou mais características que um produto ou serviço deve apresentar.

A falta de qualidade pode trazer graves consequências tanto para o fabricante ou prestador de serviços, quanto para o consumidor. Para o primeiro, *recall*, multas, ressarcimentos e má reputação, por outro lado, para o cliente as consequências são: falta de segurança, insatisfação, desperdício de dinheiro e também danos para o meio ambiente.

Tendo consciência então da importância da qualidade para a sobrevivência das empresas, torna-se necessário desenvolver formas de mensurá-la. Em 1924, Walter Shewhart revolucionou o controle da qualidade, introduzindo o conceito de gráfico de controle, com a intenção de eliminar variações, diferenciando-as entre as causas comuns e causas especiais. Desde sua introdução por Shewhart, os gráficos de controle têm sido a ferramenta do Controle Estatístico de Qualidade (CEQ) mais utilizada para monitorar e manter o controle estatístico dos processos.

Nos dias atuais, não há fábrica no mundo que não aplica pelo menos algumas ferramentas simples de controle estatístico de processo (CEP) para a melhoria dos processos industriais (SAMOHYL, 2009). Segundo o mesmo autor a ideia principal do CEP é que, processos melhores com menos variabilidade propiciam níveis melhores de qualidade nos resultados da produção. E se tratando na melhoria dos processos isso não significa somente qualidade melhor, mas também custos menores.

Os gráficos de controle são poderosos instrumentos para visualizar e compreender os diferentes tipos de variação de um processo. Os gráficos de controle, para variáveis e atributos, mais conhecidos e amplamente aplicados são ainda os tradicionais gráficos do tipo Shewhart. A simplicidade da regra de decisão condicionada apenas à análise do último ponto assinalado no gráfico facilita avaliar se este ponto está interferindo no processo. Nestes gráficos, uma grande desvantagem é utilizar apenas a informação sobre o processo contido no último ponto, e ignorar qualquer informação dada pela sequência inteira de pontos. Esta característica faz com que esses gráficos de controle sejam insensíveis a pequenas mudanças no processo, da ordem de  $1,5 \sigma$  (erros-padrão) ou menos (MONTGOMERY, 2008).

Apesar de extremamente eficazes, esses gráficos não são as únicas ferramentas disponíveis para a análise estatística de processos. Em alguns casos, outros tipos de gráficos de controle podem complementar ou substituir com vantagens as tradicionais metodologias dos gráficos de Shewhart. É o caso dos gráficos de controle com memória *Cumulative Sum* (CUSUM) - Soma Acumulada e o *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) - Média Móvel Exponencialmente Ponderada, desenvolvidos para corrigir essa lacuna. Estes gráficos são recomendados para detectar mais rapidamente pequenas alterações nos processos e errar menos quando os processos são realmente estáveis (SAMOHYL, 2009).

A motivação deste trabalho surgiu da necessidade de implantação do CEP em uma célula de usinagem de uma indústria metal-mecânica situada na região sul do Brasil. A usinagem é um dos processos mais utilizados na manufatura em geral (ALVES; OLIVEIRA, 2007), tendo um papel fundamental nos processos de fabricação da indústria metal-mecânica (ALVES *et al.*, 2013; RAY; DAS, 2011). Os processos de usinagem são definidos como a ciência de remoção de material na forma de cavaco conferindo à peça forma, dimensão e acabamento ou uma combinação qualquer destes três itens (DINIZ, 1999).

Tendo em vista a importância dos processos de usinagem e de seu monitoramento contínuo para garantia da qualidade, o objetivo desse estudo é apresentar uma proposta de monitoramento da cota do diâmetro de um bloco usinado aplicando os gráficos de controle do tipo Shewhart, CUSUM, EWMA, combinado Shewhart-CUSUM e comparar seus respectivos resultados.

Este artigo está assim estruturado: na seção 2, é apresentada a fundamentação teórica sobre gráficos de controle; na seção 3, a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho; na seção 4 estão os resultados e discussão; e na seção 5 as considerações finais.

## 2. Gráficos de Controle

Gráficos de Controle Estatístico de Processos (CEP) possibilitam monitorar as características de qualidade de interesse, assegurando sua manutenção dentro de limites preestabelecidos e indicando quando adotar ações corretivas para a melhoria. É operacionalizado com objetivo de acompanhar o desempenho de um processo a partir da definição de uma faixa de controle aceitável (HENNING *et al.*, 2012; SAMOHYL, 2009).

Um gráfico de controle, numa visão geral, é composto por uma linha central (*LC*) que representa o valor médio da característica da qualidade correspondente à situação do processo sob controle e dois limites de controle: um deles situado abaixo da linha central denominado limite inferior de controle (*LIC*) e, outro acima da linha central, denominado limite superior de controle (*LSC*). Convencionalmente, ambos os limites ficam a uma distância de três erros-padrão da média ou alvo do processo ( $\mu \pm 3\sigma$ ) (SAMOHYL, 2009).

O desenvolvimento de um gráfico de controle é realizado em duas fases. A primeira, denominada de Fase I, consiste em obter uma amostra representativa dos dados com o objetivo de estimar os parâmetros do processo, sendo em geral um estudo retrospectivo. Esta fase, que corresponde a determinar os limites de controle, só deve ser encerrada quando se tem a certeza que o processo encontra-se estável e ajustado. Na Fase II, as informações obtidas na Fase I são aplicadas para monitorar observações futuras (SMETI *et al.*, 2007; PEDRINI, 2009; COSTA; EPPRECHT, CARPINETTI, 2008).

Os gráficos de controle podem ser classificados em gráficos para variáveis ou para atributos, sendo que os primeiros, que é o caso da variável neste artigo analisada, baseiam-se na medida das características de qualidade em uma escala contínua. As variáveis amostradas podem estar dispostas em subgrupos, isto é, amostras de tamanho *n*, ou em medidas individuais, que correspondem a amostras de tamanho unitário.

A eficácia de um gráfico de controle é medida pela rapidez com que detecta alterações no processo. Uma das medidas de desempenho estatístico de um gráfico de controle é o *Average Run Length* (*ARL*) que corresponde ao valor esperado de amostras até a sinalização de uma mudança. Para um bom gráfico, espera-se que tenha um valor alto para o *ARL* sob controle (*ARL<sub>0</sub>*), ou seja, a probabilidade de emissão de um alarme falso, e que sinalize rapidamente quando uma mudança realmente ocorreu. O *ARL<sub>0</sub>* adotado neste artigo é de 370, o que significa admitir que pode ocorrer um alarme falso a cada 370 amostras.

A aplicação dos gráficos de controle clássicos para variáveis supõe que os dados da característica da qualidade do processo sejam independentes e normalmente distribuídos. Se estas suposições não forem satisfeitas, o desempenho do gráfico de controle pode ser ineficiente, o que pode gerar um elevado número de alarmes falsos (MONTGOMERY, 2008).

## 2.1 Gráficos de Controle de Shewhart para Medidas Individuais ou Gráfico $\bar{X}$

De acordo com Samohyl (2009) os gráficos de controle do tipo Shewhart, desenvolvidos na década de 1920, são os gráficos mais utilizados no CEP hoje em dia, sendo que sua utilização tem se mostrado eficiente para monitorar o processo e melhorar o resultado numa maneira contínua e permanente. Conforme colocado na subseção anterior os gráficos de controle de Shewhart utilizados para amostras de tamanho  $n = 1$  são denominados gráficos para medidas individuais. Isso acontece geralmente quando não é possível obter amostras de tamanho maior que um (1). Para este gráfico, a variabilidade é estimada a partir da amplitude móvel - *Moving Range* (MR) de duas observações sucessivas (VIEIRA, 1999). O cálculo do *LSC*, *LC* e *LIC* do gráfico de controle para valores individuais é representado pelas Equações 1, 2 e 3.

$$LSC = \bar{X} + \left(3 \frac{\overline{MR}}{d_2}\right) = \bar{X} + E_2 \overline{MR}; \quad (1)$$

$$LC = \bar{X}; \quad (2)$$

$$LIC = \bar{X} - \left(3 \frac{\overline{MR}}{d_2}\right) = \bar{X} - E_2 \overline{MR}, \quad (3)$$

em que  $\overline{MR} = (1/m) \sum_{i=1}^m \overline{MR}_i$ ;  $\overline{MR}_i = |x_i - x_{i-1}|$  para  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $E_2 = 3/d_2$  é uma constante tabelada que depende do valor de  $m$ , o número de amostras. Normalmente o gráfico  $\bar{X}$  é acompanhado por um gráfico de Amplitudes Móveis MR, para monitorar a variabilidade. No entanto, para alguns autores este gráfico não é efetivo (SMETI *et al.*, 2007). Sendo assim, optou-se por não aplicá-lo neste artigo.

## 2.2 Gráfico de Controle da Média Móvel Exponencialmente Ponderada

O gráfico de controle EWMA introduzido por Roberts (1959) é uma boa alternativa ao gráfico de controle do tipo Shewhart, para detectar pequenas mudanças na distribuição característica da qualidade e, fornecer uma estimativa do novo nível do processo ou da nova média.

O gráfico EWMA acumula informações sucessivas ponderando as amostras atribuindo maior peso para as observações mais recentes e peso menor para as mais remotas, isto é, o peso dado às amostras decresce geometricamente da primeira até a última amostra. Esse gráfico é considerado uma ferramenta estatística de fácil implementação e efetiva em situações em que as observações do processo são correlacionadas (MASTRANGELO; MONTGOMERY, 1995). O procedimento de controle baseado na estatística EWMA ( $Z_i$ ) para monitorar o valor médio de um processo é dado por

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda) Z_{i-1}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

onde  $0 \leq \lambda \leq 10$  e  $x_j = 1, 2, 3, \dots, i$  são observações de uma característica de qualidade utilizadas no monitoramento de processos, e  $\lambda$  é a constante de ponderação ou fator de alisamento. Esta constante expressa quão remota é a memória do gráfico e o valor inicial desta estatística (exigido com a primeira amostra em  $i = 1$ ) é o alvo do processo, de modo que  $Z_0 = \mu_0$ . O valor de  $\lambda$  é determinado através de tabelas ou a partir de gráficos baseados no

desempenho de ARL desejado. Quando  $\lambda = 1$ , o gráfico EWMA reduz-se ao gráfico de Shewhart, assim como  $\lambda = 0$ ,  $Z_0 = \mu_0$ .

Sejam as observações  $x_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, i$ ) decorrentes de variáveis aleatórias  $X_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, i$ ), independentes e normalmente distribuídas com média fixada em  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ , ou seja,  $X_j \sim N(\mu, \sigma^2)$ . Neste procedimento, as observações  $x_i$ , sequencialmente coletadas, tanto podem ser observações individuais do processo, como também médias amostrais obtidas através de um plano de amostragem. Se desejarmos a estatística EWMA para médias amostrais usa-se na equação (4)  $\bar{x}_i$  ao invés de  $x_i$ . Assim, se as observações são variáveis aleatórias independentes com variância  $\sigma^2$ , então a variância de  $Z_i$  é dada por:

$$\sigma_{Z_i}^2 = \sigma^2 \left( \frac{\lambda}{2-\lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}]. \quad (5)$$

Uma vez obtido o valor da variância  $\sigma_{Z_i}^2$ , os limites de controle do gráfico EWMA não são fixos, dependem de  $i$  e são normalmente obtidos com o valor assintótico  $\lambda/(2 - \lambda)$  da variância. À medida que  $i$  cresce, a variância se aproxima do valor assintótico.

Para monitorar o processo, as observações são demarcadas no gráfico EWMA cujos limites de controle são obtidos por

$$LSC = \mu_0 + L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}; \quad (6)$$

$$LC = \mu_0; \quad (7)$$

$$LIC = \mu_0 - L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]}; \quad (8)$$

onde o fator  $L$  (equações 6 e 8) é a extensão dos limites de controle, ou seja, o número de múltiplos de desvio padrão em que os limites de controle estarão distante da LC.

A escolha dos parâmetros  $\lambda$  e  $L$  para o procedimento de planejamento ótimo de um gráfico EWMA consistem na seleção adequada desta combinação ( $\lambda, L$ ) capaz de fornecer o melhor desempenho de ARL. Quando  $L = 3$  (os limites  $3\sigma$  usuais) funciona razoavelmente bem, particularmente com valores maiores de  $\lambda$ . No entanto, quando  $\lambda$  é pequeno, por exemplo,  $\lambda = 0,1$  existe uma vantagem de reduzir a amplitude do limite de controle pela utilização de um  $L$  entre 2,6 e 2,8. O analista de processos deve ter em mente qual o menor valor de  $\lambda$  escolher para detectar pequenos deslocamentos. Assim, se um valor  $\lambda$  pequeno for utilizado, como  $\lambda = 0,01$ , então  $L$  deve ser reduzido, por exemplo, para  $L = 2$ . Outro aspecto importante é o comportamento dos limites de controle. Como  $|1 - \lambda| < 1$  a sequência  $(1 - \lambda)^{2i}$  tende para zero e  $i$  tende para o infinito. Já o termo  $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$  aproxima-se da unidade  $i$  tornando-se grande. Isto significa que, após o gráfico de controle EWMA ter percorrido diversos períodos de tempo, os limites de controle têm a forma assintótica e aproximam-se dos valores de posição fixa, dados por:

$$LSC = \mu_0 + L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}; \quad (9)$$

$$LC = \mu_0; \quad (10)$$

$$LIC = \mu_0 - L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}; \quad (11)$$

As equações (9), (10) e (11) são mais simples para efetuar o cálculo. No entanto, utilização das equações (6), (7) e (8) são altamente recomendável para pequenos valores de  $i$ . Os limites de controle no gráfico EWMA podem ser utilizados para sinalizar quando um ajuste é necessário, e a diferença entre o alvo e a previsão da média  $\mu_{i+1}$  pode ser usada para determinar quanto de ajuste é necessário (MONTGOMERY, 2008).

### 2.3 Gráficos de Controle de Soma Acumulada

Os gráficos de controle CUSUM são alternativas viáveis aos gráficos de controle de Shewhart. Estes gráficos guardam informações acumuladas de toda a sequência de pontos e por isso, são mais sensíveis para detectar pequenos desvios da média de um processo com um número médio de amostras menor do que fariam os tradicionais gráficos de Shewhart. São capazes de reconhecer pequenas alterações nos processos muito antes dos alarmes dos gráficos Shewhart. É um gráfico de controle avançado, desenvolvido para situações específicas, mas que ao mesmo tempo minimiza a ocorrência de alarmes falsos e alarmes não dados (SAMOHYL, 2009).

A ideia do gráfico de soma cumulativa é particularmente simples: considerando-se um gráfico de soma acumulada para a média de um processo, se o processo permanece sob controle no valor alvo, a soma acumulada é um passeio aleatório com média zero. Por exemplo, suponha o monitoramento da média de um processo, para amostras com  $n > 1$  com  $\mu_0$  o valor alvo da média do processo e  $\bar{x}_j$  a média da  $j$ -ésima amostra. O gráfico de controle CUSUM é obtido plotando-se a quantidade (Equação 12) em relação à amostra  $i$ .

$$C_i = \sum_j^i (\bar{x}_j - \mu_0) \quad (12)$$

Se a média se desloca, então uma tendência, para cima, ou para baixo, de acordo com o deslocamento, se desenvolve na soma acumulada. Portanto, se os pontos plotados, evidenciam uma tendência, pode-se considerar que a média do processo mudou, sendo necessário pesquisar alguma causa atribuível (MONTGOMERY, 2008). Em termos mais simples, para o cálculo a Equação 12 torna-se:

$$C_i = C_{i-1} + (\bar{x}_j - \mu_0) \quad (13)$$

Uma série de somas acumuladas  $C_i$  negativas significa que as leituras observadas são inferiores aos valores nominais, mostrando um deslocamento da média do processo para baixo. Da mesma forma uma série de somas acumuladas  $C_i$  positivas, significa que as leituras observadas são superiores aos valores nominais, mostrando um deslocamento da média do processo para cima. Ainda não é um gráfico de controle, pois faltam os limites de controle estatístico.

Um CUSUM trabalha acumulando desvios da média  $\mu_0$  que estão acima ou abaixo do alvo, com as estatísticas  $C_i^+$  e  $C_i^-$  respectivamente. Estas estatísticas são chamadas de CUSUM unilateral superior e inferior, respectivamente, e são calculadas de acordo com as Equações 14 e 15 (MONTGOMERY, 2008).

$$C_i^+ = \max[0, C_i^+ + x_i - (\mu_0 + k)] \quad (14)$$

$$C_i^- = \min[0, C_i^- + x_i - (\mu_0 - k)] \quad (15)$$

a constante  $k$  é usualmente chamada de valor de referência ou folga. A Equação 12 é sensível a qualquer desvio do valor alvo, mesmo de pequena magnitude. Todos os processos têm algum grau de variabilidade e eventualmente variações muito pequenas não são preocupantes.

Logo, esta “tolerância” com pequenas modificações é formalizada explicitamente nas Equações do CUSUM com o valor de referência  $k$ . Este valor é diminuído dos desvios positivos e acrescentado aos desvios negativos. Em gráficos CUSUM para monitoramento da média, um valor comum, tanto na literatura como na prática, é 0,5 e significa que está se deixando de se preocupar com variações de meio desvio padrão no processo. O valor de referência  $k$  ajuda a melhorar o  $ARL_1$  do processo, pois permite que o gráfico seja planejado para detectar alterações específicas, o que não ocorre com o procedimento de Shewhart (SAMOHYL, 2009).

## 2.4 Gráfico combinado Shewhart-CUSUM

Uma abordagem para aumentar a sensibilidade do gráfico CUSUM, para grandes mudanças, é o gráfico Shewhart-CUSUM (MONTGOMERY, 2008). É um procedimento probabilístico que incorpora num mesmo eixo os valores observados, os limites de controle Shewhart, a estatística CUSUM e o intervalo de decisão do CUSUM. Compõe-se de uma modificação simples do procedimento CUSUM, com a adição do gráfico de controle Shewhart. Pressupõe, de um modo geral, quatro linhas de controle: os limites superiores e inferiores de Shewhart (LCS e LCI) e o limite de controle CUSUM  $h$  ( $h+$  e  $h-$ ). Deve apresentar também os valores das estatísticas correspondentes às amostras (observadas ou padronizadas) e os valores das somas cumulativas (positiva e negativa). Algumas reduções podem ser feitas de acordo com o caso a ser tratado. Por exemplo, se apenas é desejada a investigação do problema, um gráfico unilateral superior pode ser suficiente. Neste gráfico os limites do gráfico Shewhart e do CUSUM são ajustados de modo a calcular o erro tipo I do gráfico combinado.

## 3. Metodologia

### 3.1 Natureza, Abordagem do Problema e Procedimentos Técnicos da Pesquisa

Do ponto de vista de sua natureza, este trabalho é considerado como uma pesquisa aplicada (BARROS; LEHFELD, 2000; GIL, 2010), a qual gera conhecimentos por meio da aplicação prática e é dirigida à solução de problemas específicos encontrados na realidade.

A abordagem do problema é quantitativa, pois para alcançar os objetivos propostos são avaliados os resultados das informações dos gráficos de controle aplicados. O que está de acordo com Kauark, Manhães e Medeiros (2010) que consideram como pesquisa quantitativa tudo aquilo que pode se tornar objetivo através da observação sistemática, por meio de um evento bem especificado, delimitado e mensurável.

Quanto aos procedimentos técnicos (*design* da pesquisa), ou seja, a maneira pela qual os dados necessários para a elaboração da pesquisa são obtidos, este trabalho é classificado como pesquisa-ação. Neste trabalho, estudantes da graduação de Engenharia de Produção procuraram os pesquisadores da área de garantia de controle de qualidade em busca de soluções na aplicação de gráficos de controles avançados para obterem melhorias no processo produtivo em análise. Assim os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo, desempenhando um papel ativo na própria realidade dos fatos observados. O que vem de encontro a definição geral de pesquisa-ação de Thiollent (1998), na qual a pesquisa-ação é concebida e realizada em estreita associação comum à ação ou com a resolução de um problema de interesse coletivo.

### 3.2 Coleta de Dados

A série de dados utilizada correspondente a 45 amostras de tamanho  $n = 1$ , ou seja, medidas individuais, apresentadas na Tabela 1. A característica da qualidade é a medida do diâmetro de um bloco.

Amost.	Diâmetro								
1	19,0038	10	19,0043	19	19,0037	28	19,004	37	19,0042
2	19,004	11	19,0038	20	19,004	29	19,004	38	19,004
3	19,0038	12	19,0035	21	19,0042	30	19,0043	39	19,0041
4	19,004	13	19,0038	22	19,0041	31	19,0042	40	19,0038
5	19,0041	14	19,0043	23	19,0045	32	19,004	41	19,004
6	19,0039	15	19,0041	24	19,0042	33	19,0038	42	19,0042
7	19,0038	16	19,0042	25	19,004	34	19,0041	43	19,0041
8	19,0038	17	19,0043	26	19,004	35	19,0041	44	19,0038
9	19,0041	18	19,0038	27	19,004	36	19,0038	45	19,0047

Tabela 1: Dados do processo.

O processo em estudo tem origem em uma indústria do setor metal-mecânico localizada no sul do Brasil e corresponde à fase I, um estudo retrospectivo, quando verificadas as suposições e estimados os parâmetros do gráfico de controle.

### 3.3 Análise dos Dados

A análise exploratória de dados foi feita utilizando o *software* Statistica 9. Com relação aos gráficos, foi utilizado o Statistica 9 para os correlogramas e gráfico de Shewhart para medidas individuais. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o *software* Statistica 9. Para o gráfico combinado, foi desenvolvido um *script* no R (R CORE TEAM, 2013), aplicando o pacote qcc (SCRUCCA, 2004) e rodado como macro do Statistica 9.

### 4. Análise e resultados

Primeiramente foi feito a análise exploratória de dados, com objetivo de descrever o conjunto de dados. A Tabela 2 traz as medidas descritivas do conjunto de dados em estudo.

Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Quartil inferior	Quartil superior	Máximo
19,004	19,004	0,000222	19,0035	19,0038	19,0042	19,0047

Tabela 2 – Medidas descritivas

Na Figura 1 pode ser visualizado um histograma, o qual deixa dúvidas quanto a normalidade dos dados e, por meio do teste de normalidade Shapiro Wilk, assume-se a suposição de normalidade ao nível de 1% (p-valor = 0,0349).

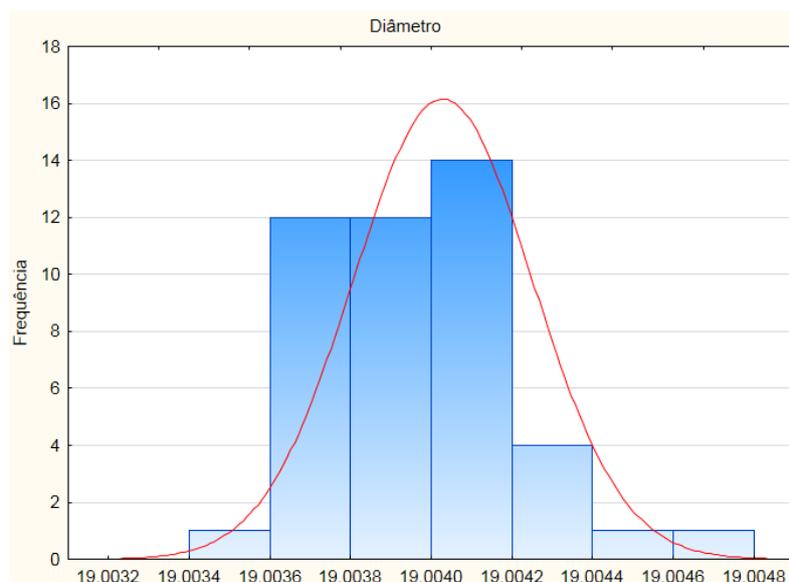


Figura 1 – Histograma da distribuição dos dados

Para Samohyl (2009) e Montgomery (2008), uma “pequena fuga” da normalidade pode ser aceita em aplicações desta natureza. Quanto à autocorrelação observada na função de autocorrelação amostral, não mostrada neste documento, evidencia a ausência de correlação serial.

Uma vez que as suposições foram atendidas, é possível aplicar os gráficos de controle de Shewhart e CUSUM. Na Figura 2 é apresentado o gráfico Shewart para os dados. Nota-se que praticamente todos os pontos coletados estão dentro dos limites de controle, com exceção do último, logo o processo não está sob controle estatístico. Verificou-se que a observação em questão não se tratava de um alarme falso, estando relacionada ao desajuste do ferramental. Quando esta falha ocorria, era produzida uma alteração significativa na cota, portanto, um problema que era importante sinalizar.

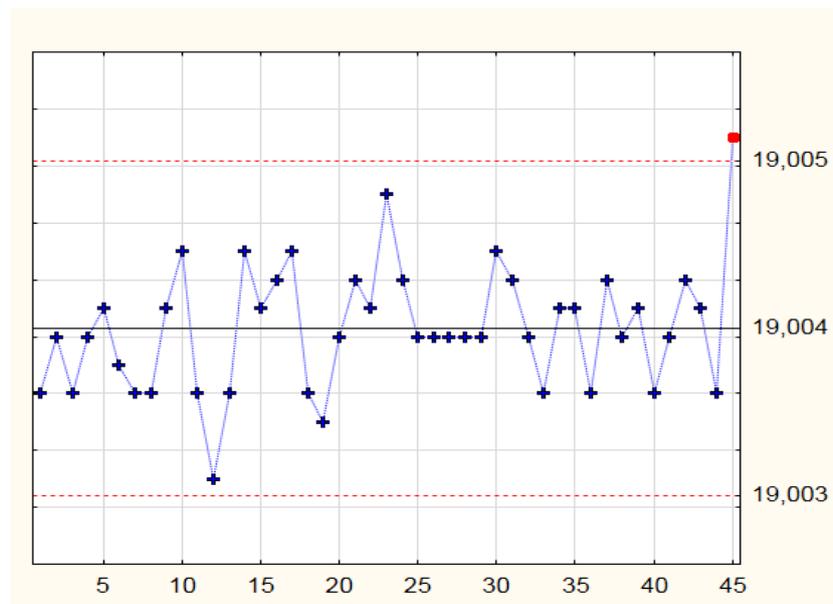


Figura 2 – Gráfico de Controle de Shewhart para os dados do processo

Na Figura 3 apresenta-se o gráfico CUSUM. Verifica-se que para nenhuma amostra os limites de controle do CUSUM são ultrapassados, portanto o processo está sob controle estatístico.

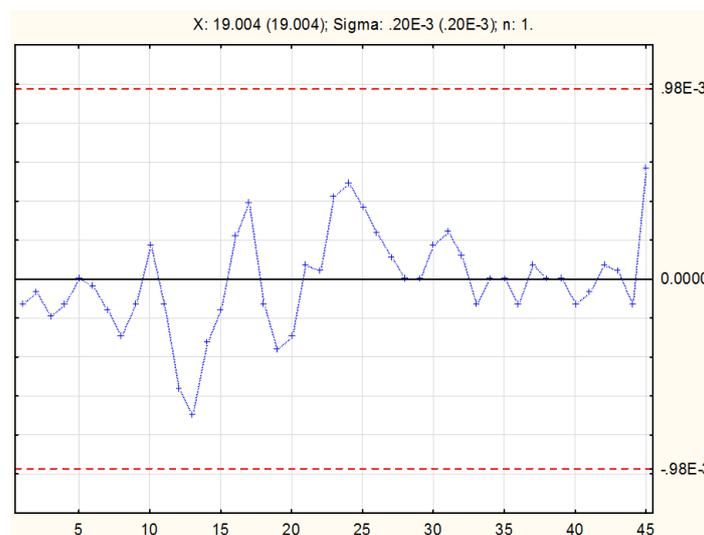


Figura 3 – Gráfico de Controle CUSUM para os dados do processo

Ressalta-se que o Statistica 9 plota apenas um dos valores (o mais extremo) da estatística CUSUM calculada de acordo com as equações 14 e 15. Deste modo o gráfico CUSUM apresenta apenas uma linha.

O gráfico EWMA pode ser visualizado na Figura 4. Nota-se que nenhum dos pontos da curva ultrapassa os limites superior e inferior, logo o processo está sob controle. Isto significa que não há até então uma alteração na média do processo.

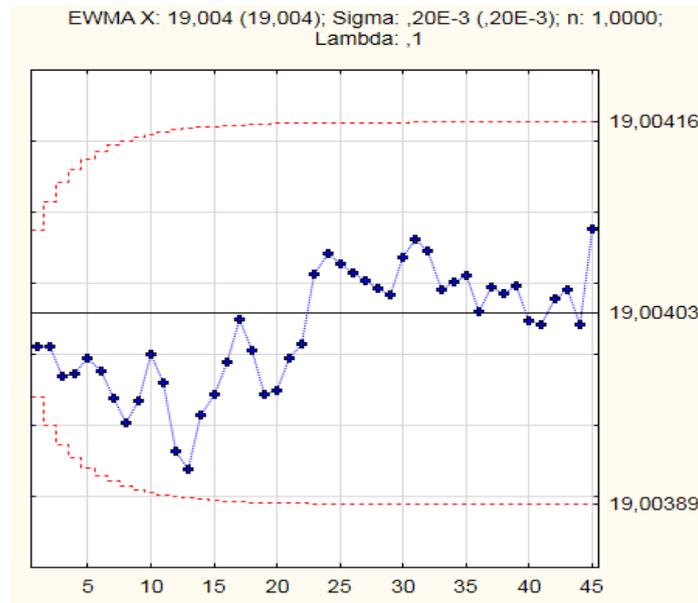


Figura 4 – Gráfico de Controle EWMA

Mas, ressalta-se aqui que tanto o CUSUM como o EWMA não sinalizaram a alteração da amostra 45, resultante do desajuste de ferramental. Esta foi uma alteração repentina, de maior magnitude. Ocorrências desta natureza são sinalizadas rapidamente pelo gráfico de Shewhart, mas passam despercebidas pelo CUSUM e EWMA. Alterações como estas necessitam ser detectadas rapidamente, pois podem resultar em problemas sérios, como não atendimento das especificações do produto. Para a empresa pode significar retrabalho ou até mesmo perda de mercado.

Assim, foi aplicado um gráfico combinado Shewhart-CUSUM. Neste gráfico foi mantido o  $ARL_0$  de 370, mas os limites do CUSUM foram levemente “alargados”. A ideia é permitir que o gráfico capte grandes alterações (como a existente) e ainda possa detectar pequenas alterações, da ordem de 1 (um) erro padrão. Deste modo, o gráfico de Shewhart tem os limites fixados em  $3,2\sigma$ , o limite  $h$  do CUSUM é igual a 5,47, mantendo-se  $k = 0,5$ . O gráfico resultante está na Figura 5. Este gráfico foi construído padronizando-se os dados e com apenas uma linha para a estatística CUSUM, similar ao gráfico CUSUM individual da Figura 3. Pode-se perceber que o combinado (Figura 5) capta a alteração da amostra 45.

Complementando, lembra-se que é fundamental para a melhoria contínua da qualidade a sinalização de desvios menores, antes que estes resultem na mudança da média do processo, o que é possível a partir de gráficos CUSUM e EWMA, e de forma integrada por meio de gráficos combinados. Mas, para iniciar o CEP, uma opção é a implantação de gráficos do tipo Shewhart. Quando a filosofia de CEP estiver estabilizada pode-se partir para a análise da aplicação de um gráfico CUSUM ou EWMA em conjunto com o gráfico de Shewhart, ou seja, um gráfico combinado.

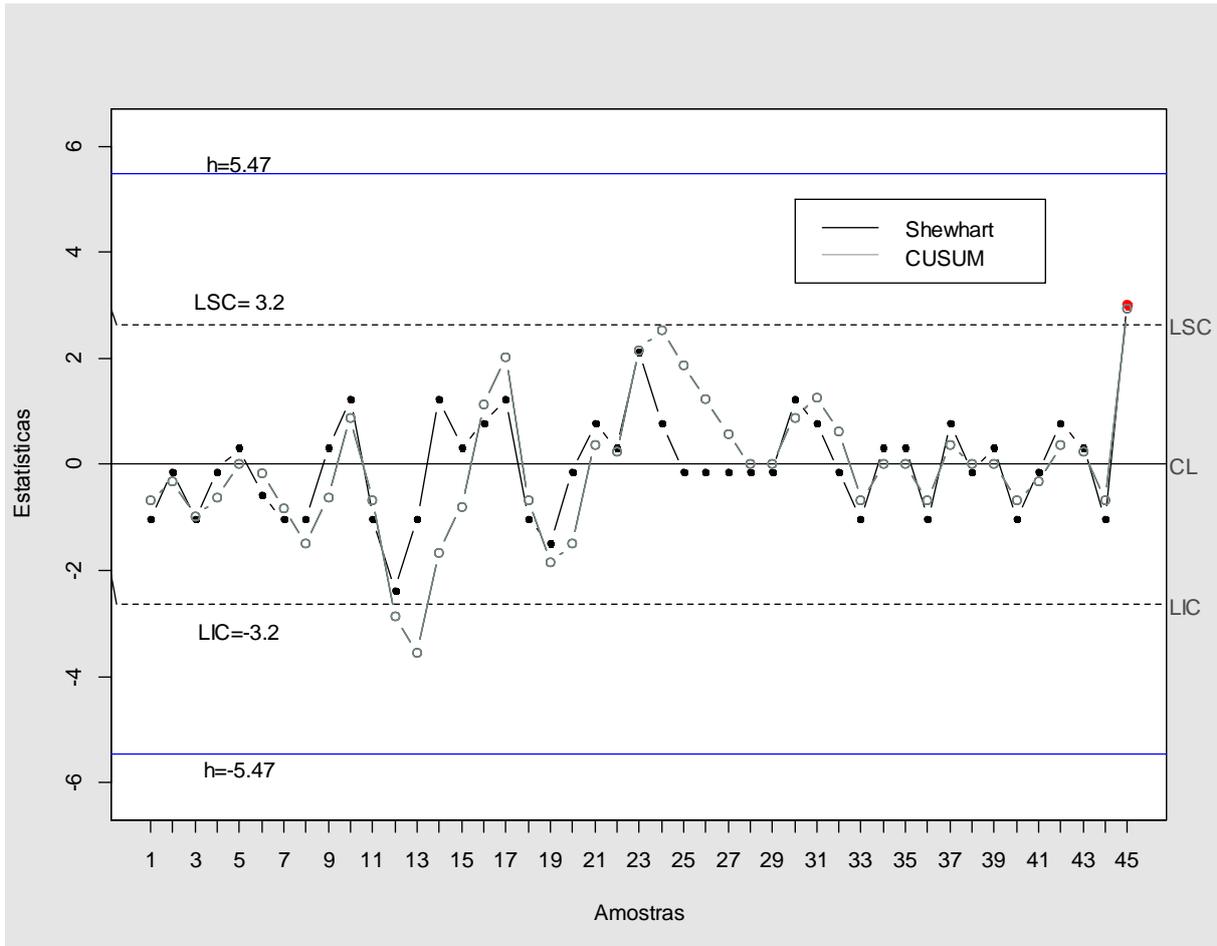


Figura 5: Gráfico Combinado Shewhart-CUSUM para os dados do processo

## 5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma proposta de monitoramento da cota do diâmetro de um bloco usinado aplicando os gráficos de controle para medidas individuais, CUSUM, EWMA e combinado Shewhart-CUSUM no monitoramento de um processo de usinagem. Os gráficos EWMA e CUSUM possuem procedimentos alternativos mais apropriados que os tradicionais gráficos de Shewhart para detectar pequenas alterações, enquanto os gráficos de Shewhart são mais apropriados para detectar grandes mudanças na média do processo. Para este processo específico, a combinação de dois gráficos, Shewhart e CUSUM, mostrou-se uma opção mais adequada de monitoramento.

Destaca-se que dependendo da magnitude de mudança qualquer um desses gráficos pode ser uma opção para monitorar dados desta natureza, possibilitando assim auxiliar no direcionamento no planejamento e execução de ações na área da qualidade. É importante salientar ainda, que a implementação de qualquer gráfico de controle, pressupõe uma escolha adequada para aplicação dessa ferramenta, uma vez que a sua eficiência depende em parte desta escolha. Para a continuidade deste trabalho, sugere-se a aplicação do um gráfico combinado Shewhart-EWMA e avaliar seu desempenho.

## Referências

ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. *Produção*, 2007, v.17, n. 1, p.129-138, 2007.

- BARROS, A.J.S.; LEHFELD, N.A.S.** *Fundamentos de Metodologia: um Guia para a Iniciação Científica*. 2.ed. São Paulo: Makron Books, 2000.
- COSTA, A.F.B.; EPPRECHT, E.K.; CARPINETTI, L.C.R.** *Controle Estatístico de Qualidade*. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- DINIZ, A.E.** *Tecnologia da usinagem dos metais*. Editora MM, São Paulo, 1999.
- GIL, A.C.** *Como elaborar projetos de pesquisa*. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- HENNING, E.; WALTER, O. M. F. C. ; ALVES, C. C. ; SAMOHYL, R. W.** Aplicação de gráficos de Controle Estatístico de Processos para o monitoramento dos casos de meningite no município de Joinville. *Revista Eletrônica Produção em Foco*, v. 2, p. 01-26, 2012.
- KAUARK, F. S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H.** *Metodologia da pesquisa: um guia prático*. Itabuna: Via Litterarum, 2010.
- MASTRANGELO, C. M.; MONTGOMERY, D. C.** SPC with correlated observations for the chemical an process industries. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 11, p.79-89, 1995.
- MONTGOMERY, D. C.** *Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade*. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- PEDRINI, D. C.** Proposta de um método para a aplicação do gráfico de controle de regressão no monitoramento de processos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 122f. 2009.
- RAY, S.; DAS, P.** Improve machinig process capability by using Six Sigma. *International Journal of Quality Research*, v. 5, n. 2, p.129 – 122, 2011.
- ROBERTS, S.W.** *Control Charts Tests Based on Geometric Moving Averages*. *Technometrics*, v.1, p. 239-250, 1959.
- SAMOHYL, R. W.** *Controle Estatístico da Qualidade*. Rio de Janeiro: Campus, 2009.
- SMETI, E. M. et al.** An approach for the application of statistical process control techniques for quality improvement of treated water. *Desalination*, v. 213, p. 273-281, 2007.
- SCRUCCA, L.** qcc: An R package for quality control charting and statistical process control. *R News*, v. 4, n. 1, p. 11-17, 2004.
- THIOLLENT, M.** *Metodologia da pesquisa-ação*. 8. ed. São Paulo: Cortez, 1998.
- VIEIRA S.** *Estatística para a Qualidade*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1999.

#### ANEXO 1 – Rotina desenvolvida no R

```
#grafico combinado
library(qcc)
o1<-qcc(diametro,type="xbar.one",plot=F)
x1.1<-(diametro-mean(diametro))/o1$std.dev
qcc(x1.1,type="xbar.one",n.sigmas=3.2,ylim=c(-6.2,6.2),title="
",add.stats=F,xlab="Amostras",ylab="Estatísticas",label.limits = c("LIC ",
"LSC"))
o2<-cusum(x1.1,decision.limit=5.47,plot=F)
linha=0
for (i in 1:length(diametro)){
linha[i]=ifelse(abs(o2$pos[i])>abs(o2$neg[i]),o2$pos[i],o2$neg[i])}
linha
lines(linha,type="b",pch=21,col=gray(0.5))
abline(h=-5.47,col="blue")
abline(h= 5.47,col="blue")
text(5,-3.2,paste("LIC=-3.2"))
text(5,+3.2,paste("LSC= 3.2"))
text(5,-5.7,paste("h=-5.47"))
text(5,5.7,paste("h=5.47"))
legend(30, 5, c("Shewhart","CUSUM"),lty=c(1,1), col =
c("black","darkgray"))
```