

APLICAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE EM REDES DE ABASTECIMENTO PREDIAL DE ÁGUA

APPLICATION OF STATISTICAL PROCESS CONTROL CHARTS ON WATER SUPPLY NETWORKS IN BUILDINGS

Elisa Henning¹, Andréa Cristina Konrath², Andreza Kalbusch³, Isadora Mezzari Zoldan⁴, Nathalia Miranda Correa⁵

¹Doutora em Engenharia de Produção. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil.
E-mail: elisa.henning@gmail.com

²Doutora em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
E-mail: andrea.ck@ufsc.br

³Doutora em Engenharia Civil. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil.
E-mail: andreza.kalbusch@udesc.br

⁴Graduanda em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil. E-mail: isazoldan@gmail.com

⁵Graduanda em Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil. E-mail: mirandacnathalia@gmail.com.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo apresentar os resultados da análise da aplicação de gráficos de controle para o monitoramento do consumo de água em uma universidade. As tendências (aumento ou redução) no consumo de água, além da detecção de vazamentos são algumas das alterações que este artigo visou verificar. Os gráficos de controle foram aplicados a uma série histórica de dados referentes ao consumo de água em válvulas de descarga de bacias sanitárias de uma instituição de ensino superior. Hidrômetros foram instalados de modo a medir o consumo de água com acabamentos convencionais nas válvulas de descarga. Após o período inicial de medições, os acabamentos foram substituídos por sistemas com duplo acionamento para verificação da hipótese de economia de água. Com a aplicação de gráficos de controle, duas situações foram verificadas: ocorrência de vazamento e efetiva economia de água quando da troca dos equipamentos convencionais por economizadores. Como resultado, os gráficos de controle permitiram identificar tanto a sinalização do vazamento, como a redução do consumo de água quando da substituição dos equipamentos.

Palavras-chave: Rede de abastecimento predial; Monitoramento; Consumo de água; Detecção de vazamentos; Controle Estatístico de Processos.

ABSTRACT

The objective of this paper is to present some results of the application of control charts for monitoring variables related to water consumption. Tendencies (increase or decrease) in water consumption, besides leak detection, are some of the issues that this article intends to verify. The charts were applied to a time series of data on the water consumption of flush valves at a university. Water meters were installed to measure water consumption with ordinary and dual flush valves. Two situations were verified using control charts: the occurrence of leakage and effective water savings when replacing ordinary by water saving devices. As a result, control charts allowed us to identify the presence of leaks and the reduction of water consumption when water saving devices were installed.

Keywords: Building supply network; Monitoring; Water consumption; Leak detection; Statistical Process Control.

1 – INTRODUÇÃO

Os fatores como o crescimento populacional e consequente aumento da demanda de água fizeram com que a gestão do uso da água tenha se tornado questão imperativa em áreas urbanas (WILLIS *et al.*, 2011). Além disso, a necessidade de promoção de sustentabilidade faz com que haja interesse crescente na adoção de novas tecnologias e mudanças comportamentais com vistas à economia de água (LIU; GIURCO; MUKHEIBIR, 2015).

Sendo assim, o planejamento e gestão do uso da água no ambiente construído assumem papel fundamental na busca por sustentabilidade em áreas urbanas. O uso racional da água em edifícios pode ser alcançado com a

adoção de equipamentos hidrossanitários economizadores de água. Dentro deste contexto, o presente trabalho procura contribuir com pesquisas que envolvam o uso eficiente da água nas edificações. Tem como objetivo propor o uso de gráficos de controle estatístico de processo para analisar se a troca de equipamentos convencionais por economizadores é efetiva na redução do consumo de água, além da detecção de vazamentos em sistemas prediais.

Os métodos estatísticos são importantes recursos para detectar mudanças em vários tipos de processos. Entre os métodos, destacam-se os gráficos de controle, usados em processos industriais, os quais usam procedimentos estatísticos para descrever a variabilidade e monitorar melhorias (ZANINI *et al.*, 2016). Até pouco tempo, o

paradigma tradicional do uso dos gráficos de controle eram os processos industriais. No entanto, o número de aplicações relatadas em domínios fora dos sistemas de produção convencionais se estendeu para outras áreas e aumentou nos últimos anos (MACCARTHY; WASUSRI, 2002; SAMOHYL, 2009), dentre as quais podem se citar o monitoramento dos parâmetros da água (HENNING *et al.*, 2014), detecção do bioterrorismo, saúde pública, vigilância espacial e estratégias de operação na área financeira, entre outros (FRISEN, 2011). Especificamente em vigilância epidemiológica, gráficos de controle são usados para auxiliar tanto na compreensão, quanto na avaliação da estabilidade de processos e identificar as alterações que indicam melhoria ou agravamento de um estado (WOODALL; ADAMS; BENNEYAN, 2012).

Diversos estudos foram realizados sobre a racionalização do uso da água a partir da utilização de equipamentos economizadores, cada qual com suas especificidades. As medidas descritivas e gráficas, os modelos de regressão e a análise multivariada aparecem como técnicas estatísticas para avaliar a redução do consumo de água (ILHA *et al.*, 2010; LOMBARDI, 2012; BARBERÁN *et al.*, 2013; WILLIS *et al.*, 2011; WILLIS *et al.* 2013). Os gráficos de controle se configuram como alternativa à finalidade proposta e esta razão motivou a escolha deste método para avaliar o impacto da substituição de equipamentos hidrossanitários convencionais por economizadores de água em uma edificação.

Os vazamentos também podem representar alterações no consumo de água. Assim sendo, duas situações específicas são propostas como foco neste artigo: alterações no consumo devido à troca de equipamentos e também devido à presença de vazamentos.

A detecção de vazamentos de água em uma rede predial, principalmente os não visíveis é uma tarefa complexa e importante. Portanto, espera-se que, a partir do uso de gráficos de controle seja possível conhecer mais rapidamente a existência de um vazamento e com isso localizá-lo e repará-lo mais rapidamente.

Os estudos realizados acerca de vazamentos reforçam a importância de pesquisas na área, nomeadamente voltadas à sinalização e quantificação. Em um estudo realizado na Austrália, Willis *et al.* (2013) propuseram a divisão de um total de 151 residências em diferentes regiões (utilizando uma classificação socioeconômica) para verificação de padrões de consumo de água. Neste estudo foram verificados valores médios de perdas por vazamento entre 1,5 e 2,6 litros por usuário por dia. Neste caso, os vazamentos representaram em média 1% do consumo total das edificações e não foram apresentadas correlações entre os vazamentos e a classificação socioeconômica da região em que os grupos de residências estavam localizados. Roberts (2005), também para a tipologia residencial em outra região da Austrália, estimou em 5,7% a contribuição média de vazamentos no consumo total de água em uma amostra de 100 residências.

Beal *et al.* (2011) realizaram um estudo acerca do consumo de água em 250 residências e da percepção dos usuários sobre o consumo. Os autores estimaram as perdas

por vazamento em 3,3 litros por usuário por dia no grupo que, quando da auto avaliação, classificou o próprio consumo como baixo. Este índice equivale a 2,3% do consumo diário nestas residências. Os vazamentos contabilizados no sistema predial de abastecimento de água para o grupo que classificou o próprio consumo como alto foi de 13,3 litros por usuário por dia, 10,2% do consumo diário. O valor médio de índice de vazamentos encontrados nas residências de usuários que responderam não saber classificar o próprio consumo foi de 17,8 litros por usuário por dia (13,4% do consumo diário).

Os vazamentos de água em sistemas prediais podem ser classificados como visíveis e não visíveis. Os vazamentos não visíveis são, muitas vezes, responsáveis por parcela considerável do volume de água gasto em uma edificação. Embora existam técnicas e equipamentos para detecção de vazamentos não visíveis, ainda há carência de aplicação efetiva (BERGOGLIO; MARI, 2012).

Além disso, grande parte dos estudos existentes sobre vazamentos de água em tubulações se concentra na área de saneamento urbano (BRITTON; STEWART; O'HALLORAN, 2013). Os autores classificam a literatura relativa a vazamentos em sistemas prediais como limitada e afirmam que o desenvolvimento de políticas para redução de perdas físicas após o medidor de consumo não é uma das prioridades das concessionárias de água.

No estudo conduzido por Chen (2005) foram avaliadas fontes de defeitos em áreas molhadas de edifícios não residenciais e os vazamentos foram apontados como um dos principais problemas encontrados. No estudo realizado por Britton, Stewart e O'Halloran (2013) foram identificadas as frequências de ocorrência de vazamentos nos sistemas prediais das edificações e os vazamentos em bacias sanitárias foram os mais frequentes.

A aplicação de gráficos de controle para detecção de vazamentos e desperdício de água pode ser considerada recente e foi abordada, no setor residencial, por Rasmani, Hanife e Nozaran (2014) e em tubulações da rede de abastecimento por Bakker *et al.* (2014) e Jung *et al.* (2015). Todos os autores são unânimes à dificuldade e importância do tema.

Assim, o objetivo geral deste trabalho é estudar a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo de Shewhart, das Somas Acumuladas (CUSUM) e da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA) no monitoramento de características relativas ao consumo de água. Este artigo está assim estruturado: na seção 2 é apresentada uma breve visão sobre os gráficos de controle; na seção 3 são apresentados os procedimentos metodológicos; na seção 4 estão os resultados e discussão; e na seção 5, as conclusões e considerações finais.

2 – GRÁFICOS DE CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

Um gráfico de controle é uma ferramenta visual na qual uma característica da qualidade, que foi mensurada ou calculada é plotada em função do número de amostras ou do tempo (MONTGOMERY, 2008). O gráfico exibe a variável de interesse na ordenada (eixo Y) versus o tempo,

ou o número de amostras, na abcissa (eixo X). O gráfico costuma apresentar três linhas horizontais que são desenhadas para a média, ou outra característica a ser monitorada, e para os limites de controle superior e inferior. Os limites são calculados a partir de uma medida de variabilidade, como o desvio padrão (WESTGARD *et al.*, 1981).

Os limites de controle são definidos de modo que, se o processo estiver sob controle, aproximadamente todos os pontos analisados estarão entre eles. Se um ponto ficar fora dos limites de controle, há evidências de que o processo está fora de controle estatístico. Isto significa que, há grande probabilidade de que tenha havido uma causa de variação especial, que deve ser investigada, identificada e se necessário, eliminada (MONTGOMERY, 2008; HIRATA, 2002).

Assim sendo, gráficos de controle podem ser considerados como uma forma de representação visual da aplicação consecutiva e cronológica de sucessivos testes de hipóteses estatísticos. A hipótese nula é que o processo se encontra sob controle estatístico, que é confrontada contra a hipótese alternativa, de que o processo está fora de controle estatístico. (MONTGOMERY, 2008). Os testes de hipóteses estão sujeitos a dois tipos de erro, o erro tipo I (α) e o erro tipo II (β). A escolha dos limites de controle é equivalente a estabelecer a região crítica para os testes de hipóteses. O erro tipo I (α), aplicado neste trabalho, corresponde a considerar o processo fora de controle estatístico quando na verdade está sob controle (alarme falso). Assim, a escolha do valor de α é essencial para o desempenho do gráfico (MONTGOMERY, 2008).

O processo de operacionalização de um gráfico de controle usualmente é composto por duas fases. A fase 1, de estimação de parâmetros, consiste em obter uma amostra representativa dos dados com o objetivo de determinar os limites de controle. Nesta fase são verificadas as suposições necessárias para a aplicação dos gráficos de controle. Para a construção e eficiência dos gráficos de controle é necessário que os dados possuam independência entre si (não autocorrelacionados) e sejam normalmente distribuídos (RAMOS; ALMEIDA; ARAÚJO, 2013; CLARO; COSTA; MACHADO, 2007). Caso alguma destas exigências não seja atendida, o gráfico de controle pode gerar um número elevado de alarmes falsos (MONTGOMERY, 2008).

A fase 2, de monitoramento, consiste da utilização do gráfico de controle com os limites definidos na fase 1, em amostras tomadas sequencialmente ao longo do tempo visando detectar mudanças. Sempre que acontecer alguma mudança, o processo deve ser analisado e, se necessário, executada uma ação corretiva para reestabelecer o estado de controle (MONTGOMERY, 2008).

Gráficos de controle podem ser construídos para variáveis mensuráveis e atributos (SAMOBYL, 2009). Neste artigo são aplicados gráficos de controle de Shewhart, CUSUM e EWMA para medidas individuais, ou seja, são variáveis contínuas com tamanho de amostra igual a um, isto é, a amostra consiste em uma unidade individual (MONTGOMERY, 2008).

Nas subseções seguintes os gráficos de Shewhart, CUSUM e EWMA são descritos com mais detalhes.

2.1 Gráficos de Shewhart

Os gráficos de controle surgiram por volta dos anos 1920, tendo como pioneiro, o engenheiro e estatístico, Walter A. Shewhart. Sua motivação veio por meio da busca por métodos que possibilitassem o controle de qualidade durante a produção para que falhas pudessem ser corrigidas de forma imediata, sem depender exclusivamente da inspeção ao fim da manufatura (DEMING, 1990).

Os gráficos de Shewhart para medidas individuais servem para monitorar a média \bar{X} de um processo. São construídos plotando os valores da medida x , em um gráfico delimitado por linhas horizontais, os limites de controle.

Tradicionalmente, as linhas de controle ficam a uma distância 3σ (erros padrão) da linha central. Neste caso, a probabilidade de ocorrer o erro tipo I é $\alpha = 0,0027$ (MONTGOMERY; 2008), ou seja, a probabilidade de um ponto cair fora dos limites de controle quando o processo estiver sob controle estatístico é 0,0027. Do ponto de vista prático, para o planejamento de um gráfico de controle é utilizado o ARL_0 , (*average run length*) dado por $ARL_0 = 1/\alpha$, para um gráfico de Shewhart. Para $\alpha = 0,0027$, o ARL_0 é igual a 370, e significa que mesmo que o processo se encontre sob controle, é esperado (em média) um ponto além dos limites de controle a cada 370 amostras. Este valor é comum na literatura (SAMOBYL, 2009; MONTGOMERY, 2008).

As Equações 1, 2 e 3 (MONTGOMERY, 2008) correspondem ao Limite Inferior de Controle (LIC), Linha Central (LC) e Limite Superior de Controle (LSC) de um gráfico para medidas individuais.

$$LIC = \bar{X} - \left(3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \right) = \bar{X} - E_2 \overline{MR} \quad (1)$$

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

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

Em que: $\overline{MR}_i = (1/m) \sum_{i=1}^m \overline{MR}_i$; $\overline{MR}_i = |x_i - x_{i-1}|$ para $i = 1, 2, \dots, m$ e $E_2 = 3/d_2$ é uma constante tabelada que depende do valor de m , o número de amostras.

Os gráficos de Shewhart alcançaram sucesso devido à sua simplicidade, uma vez que a regra de decisão se baseia apenas na averiguação do último ponto observado. Mas esta é também uma grande desvantagem, pois ignora qualquer informação dada pela sequência anterior de pontos. Isto torna o gráfico do tipo Shewhart relativamente insensível a pequenas mudanças no processo, da ordem de $1,5\sigma$ (desvios-padrão) ou menos (MONTGOMERY, 2008).

Para o monitoramento de processos sujeitos a alterações menores, gráficos como o EWMA e CUSUM são recomendados. Nestes gráficos, as informações acerca do estado do controle estatístico do processo são obtidas a partir das diversas amostras anteriores, e não somente na última. Desse modo, é possível sinalizar mais rapidamente pequenos distúrbios no processo, como também identificar, o momento em que ocorre uma mudança (MONTGOMERY, 2008; WALTER *et al.* 2013).

2.2 Gráficos de Controle de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA)

O gráfico de controle de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA) pode ser considerado como uma média ponderada de todas as observações passadas e correntes. Por suas próprias características, o gráfico EWMA sinaliza quando há uma mudança no processo, seja um aumento ou uma redução na característica da qualidade (MONTGOMERY, 2008).

O gráfico de controle EWMA é desenvolvido pela plotagem de z_i versus o número de amostras i (ou tempo), definido na Equação 4 (MONTGOMERY, 2008).

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}, \quad (4)$$

Em que: X_i é o valor observado mais recentemente, λ é o parâmetro que pondera essa combinação, $0 < \lambda < 1$. Quanto mais próximo de zero, maior é o peso que se dá as observações mais antigas. Se $\lambda = 1,0$ o gráfico EWMA é equivalente ao gráfico de Shewhart. Assim, quanto menor for o λ , com maior facilidade poderão ser detectadas pequenas mudanças no processo. Usualmente é utilizado $\lambda = 0,1$ ou $\lambda = 0,2$ (MONTGOMERY, 2008). O valor inicial é o valor alvo do processo com $Z_0 = \mu_0$, e μ_0 também é empregado como valor de referência (ou linha central) no gráfico. Quando não se dispõe de um valor alvo, pode-se substituir μ_0 pela média de um número grande de amostras ou observações passadas, sob controle estatístico. Supondo que as observações x_i são variáveis aleatórias independentes com variância σ^2 , então a variância de z_i calculada por meio da Equação 5 (MONTGOMERY, 2008).

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

Para o cálculo dos limites de controle são usadas as Equações 6, 7 e 8.

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} (1 - (1 - \lambda)^{2i})} \quad (6)$$

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

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} (1 - (1 - \lambda)^{2i})} \quad (8)$$

Em que: L é a amplitude dos limites de controle; frequentemente ser usado como igual a três σ usuais (MONTGOMERY, 2008).

O gráfico EWMA é também robusto a pequenas fugas da normalidade (SAMOHYL, 2009)

2.3 Gráficos de Controle de Soma Cumulativa (CUSUM)

O gráfico de controle de soma cumulativa (CUSUM) foi proposto por Page (1954), sendo indicado quando se tem interesse em detectar pequenas e constantes mudanças. Estes gráficos também incorporam toda a sequência de informações definindo as somas acumuladas dos desvios em relação ao valor alvo ou valor nominal (MONTGOMERY, 2008).

O procedimento para a elaboração do gráfico CUSUM é simples. A Equação 9 exemplifica o monitoramento da média de um processo, $n > 1$ com μ_0 o valor alvo e \bar{x}_j a média da j -ésima amostra. A estatística CUSUM é obtida plotando-se a quantidade (Equação 9) em relação à amostra i .

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \mu_0) \quad (9)$$

Se o processo permanece sob controle no valor alvo, a soma acumulada é um passeio aleatório com média zero e variância constante, ou seja, nenhum padrão de aumento ou redução é observado no gráfico (MONTGOMERY, 2008).

No entanto, se a média se desloca, então uma tendência, para cima, ou para baixo, de acordo com o deslocamento, se desenvolve na soma acumulada (HENNING *et al.*, 2012). A Equação 9 é sensível a qualquer desvio do valor alvo, mesmo de pequena magnitude. Todos os processos têm algum grau de variabilidade e variações muito pequenas não são preocupantes. Logo, esta tolerância com pequenas alterações é formalizada nas equações do CUSUM com um valor de referência k . O valor k é diminuído dos desvios positivos e somado aos desvios negativos (SAMOHYL, 2009).

Assim, um gráfico CUSUM padronizado trabalha acumulando desvios da média acima ou abaixo do valor alvo. Estas estatísticas C_i^+ e C_i^- , denominadas CUSUM superior e CUSUM inferior, são unilaterais e sumarizadas pelas Equações 10 e 11, com os valores iniciais $C_0^+ = C_0^- = 0$.

$$C_i^+ = \max[0, C_i^+ + y_i - (\mu_0 + k)] \quad (10)$$

$$C_i^- = \min[0, C_i^- + y_i - (\mu_0 - k)] \quad (11)$$

Em que: $y_i = (x_i - \mu_0)/\sigma$; com x_i o valor da i -ésima amostra do processo e k é o valor de referência, que depende da magnitude da mudança que se deseja detectar.

Se C_i^+ ou C_i^- excede um limite de controle h , o processo é considerado fora de controle estatístico. De

acordo com Montgomery (2008) na construção de um gráfico CUSUM padronizado são frequentemente usados os valores $k = 0,5$ e $h = 5$. Este gráfico é recomendado para detecção de mudanças de cerca de um desvio padrão na média. O gráfico CUSUM admite avaliar individualmente os desvios positivos e negativos da média.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa é considerada de natureza aplicada, uma vez que se caracteriza pelo interesse prático, ou seja, seus resultados são utilizados para solucionar problemas reais. Possui abordagem quantitativa, pois se utiliza de recursos e técnicas estatísticas, procurando demonstrar em números os conhecimentos gerados em sua aplicação (GIL, 2010).

Os gráficos foram aplicados aos dados reais de consumo de água em bacias sanitárias de um edifício de uma instituição de ensino superior com aproximadamente 2.500 usuários. A coleta dos dados foi realizada por meio da instalação de hidrômetros no sistema predial de água fria de um bloco de salas de aula. A coleta foi feita de modo a permitir mensurar o consumo isolado de cada classe de equipamentos. Os dados (consumo de água L/usuários/dia) de cada hidrômetro instalado foram coletados diariamente, sempre com intervalo de 24 horas entre cada medição, com exceção dos domingos. Não foi necessário realizar medições aos domingos uma vez que não há acesso ao campus e conseqüentemente, não há consumo de água.

Procedeu-se da mesma forma para todas as etapas do estudo. Na primeira etapa, os equipamentos convencionais existentes na edificação foram mantidos. Na segunda etapa de coleta de dados, os acabamentos das válvulas de descarga foram substituídos por modelos economizadores de água, com duplo acionamento.

Para análise dos dados de consumo de água nas bacias sanitárias foram considerados 26 dias na fase 1 e 34 dias na fase 2.

Na fase 1 inicialmente foram verificadas as suposições necessárias para aplicação dos gráficos de controle. A presença de autocorrelação foi analisada por meio do gráfico da função de autocorrelação amostral (FAC). Para a verificação da normalidade foi aplicado o teste Lilliefors (CONOVER, 1999). Os limites de controle do gráfico de Shewart, CUSUM e EWMA foram calculados a partir das equações das seções 2.1, 2.2 e 2.3, respectivamente.

Para o gráfico de controle EWMA foi utilizado o estimador do erro padrão com desvio padrão ao invés da amplitude móvel, com $\lambda = 0,2$ e $L = 2,86$. No gráfico CUSUM padronizado foram utilizados $k = 0,5$ e $h = 5$. Nos dois gráficos, EWMA e CUSUM, os limites correspondem aos limites convencionais de 3σ do gráfico de Shewart. Os três gráficos apresentam a mesma probabilidade de erro I.

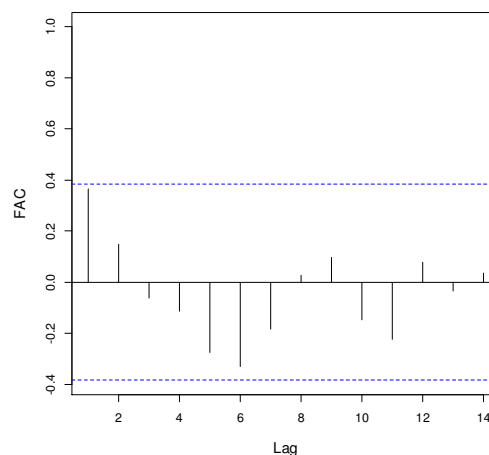
Na fase 2 os limites calculados na fase 1 foram aplicados para analisar os dados restantes. A análise estatística foi realizada por meio do *software* R (R CORE TEAM, 2015), com auxílio dos pacotes *nortest* (GROSS; LIGGES, 2015) e *qcc* (SCRUCCA, 2004). O R é uma

linguagem de programação e também um ambiente para computação estatística. Gratuito e com código fonte disponível sob a licença GNU GPL, o R pode ser instalado nos sistemas operacionais Windows, Linux e Mac. Além da instalação padrão, diversos pacotes estendem o R acrescentando-lhe diversas funcionalidades. Com o R é possível a importação e exportação de dados em vários formatos e também a geração de documentos em editores de texto (HENNING *et al.*, 2016). Também é possível construir aplicações interativas na *web* (BEELEY, 2016).

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

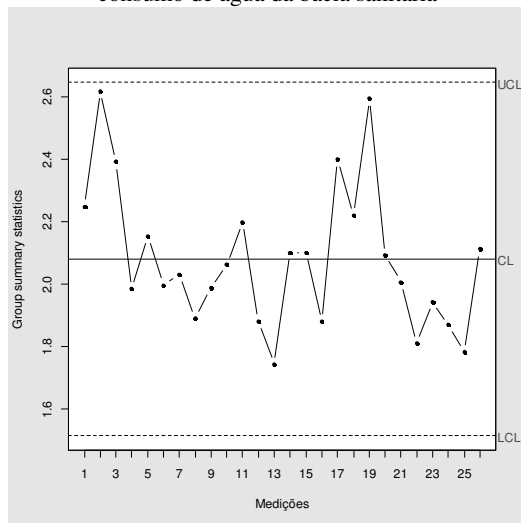
Para a construção da carta de controle faz-se necessário um estudo das observações iniciais, verificando a independência e se são identicamente distribuídos. Na fase 1 foram usadas 26 medições e verificou-se que os dados não apresentam autocorrelação (Figura 1). Para a hipótese de normalidade, foi escolhido o teste Lilliefors (CONOVER, 1999), usando-se o pacote *nortest* (GROSS; LIGGES, 2015). Os dados apresentam distribuição normal (p -valor = 0,2256) para um nível de significância α de 5%.

Figura 1 – Gráfico da função de autocorrelação amostral (FAC) para os dados



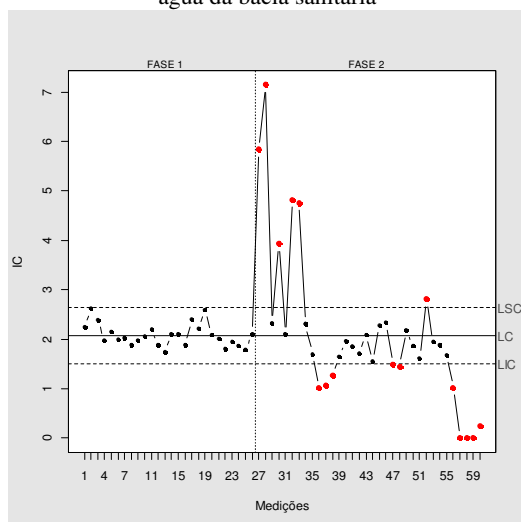
Uma vez que as suposições foram atendidas, foi possível aplicar os gráficos de controle de Shewart, EWMA e CUSUM. Para os três gráficos o ARL_0 adotado foi igual à 370. Na Figura 2 apresenta-se o gráfico de Shewart. Inicialmente foram calculados os limites de controle (fase 1 do processo). Os limites de controle inferior e superior calculados foram de $LIC = 1,4662$; $LSC = 2,8356$ e a linha central $LC = 2,1509$. Nota-se que para nenhuma amostra os limites de controle do gráfico de controle são ultrapassados, portanto o processo está sob controle estatístico.

Figura 2 – Gráfico de Shewhart (Fase 1) para os dados do consumo de água da bacia sanitária



Em seguida passou-se para a fase 2 aplicando-se às novas observações os limites estabelecidos na fase 1 (Figura 3).

Figura 3 – Gráfico de Shewhart para os dados do consumo de água da bacia sanitária

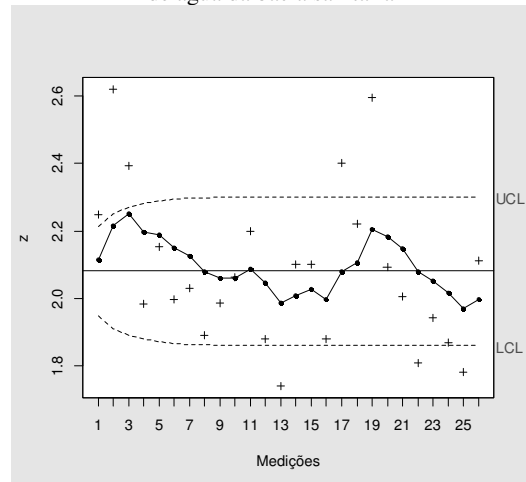


Podem ser visualizadas na Figura 3, após a linha vertical tracejada, várias medições (em vermelho) com valores além dos limites de controle. As medições, 27, 28, 30, 32 e 33, acima do limite de controle superior, denotam um aumento de consumo devido à instalação incorreta dos acabamentos economizadores das válvulas de descarga, o que resultou em vazamento. Na sequência, se pode observar que o processo volta ao estado de controle estatístico (pontos 34 e 35), uma vez que o problema do vazamento foi resolvido. Em seguida são observados vários pontos que extrapolam os limites de controle. O gráfico Shewhart, não permite visualizar se há realmente diminuição do consumo de água. No entanto, alguns pontos abaixo do limite inferior de controle (LIC) a partir da medição 57, podem indicar que exista alguma redução na média do consumo de água.

Na Figura 4 apresenta-se a fase 1 do gráfico EWMA,

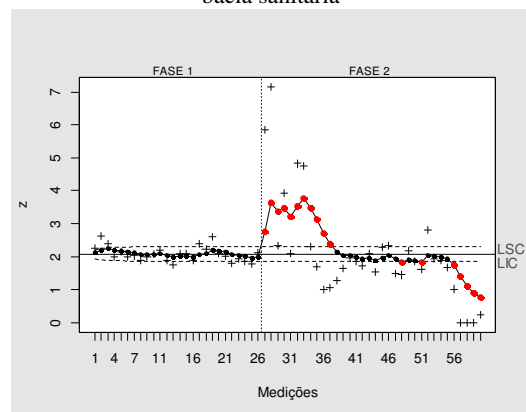
com os dados sob controle estatístico de processo.

Figura 4 – Fase 1 do Gráfico EWMA para os dados do consumo de água da bacia sanitária



Já na fase 2 (Figura 5), logo após a amostra 26, observa-se um aumento de consumo decorrente do vazamento em razão dos problemas de instalação.

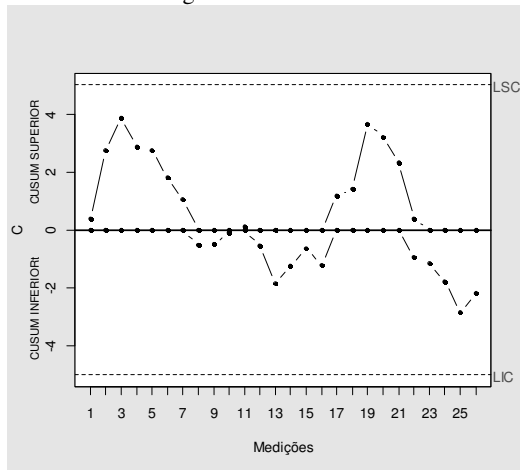
Figura 5 – Gráfico EWMA para os dados do consumo de água da bacia sanitária



Uma vez resolvido o problema, o gráfico sinaliza a redução de consumo em virtude da substituição das válvulas, a partir da amostra 56.

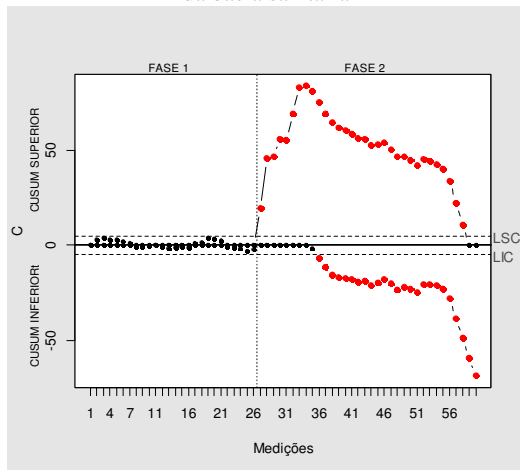
Na Figura 6 tem-se a fase 1, com os dados em estado de controle estatístico de processo. O gráfico CUSUM permite avaliar separadamente os aumentos e reduções, observando as linhas superior e inferior, respectivamente.

Figura 6 – Fase 1 do Gráfico CUSUM para os dados do consumo de água da bacia sanitária



Na Figura 7 pode ser visualizado o gráfico CUSUM com as duas fases. Verifica-se que a linha correspondente ao CUSUM superior sinaliza o aumento de consumo em razão do vazamento e depois seu retorno à condição de controle. Já o CUSUM inferior, detecta a redução de consumo a partir da observação 36.

Figura 7 – Gráfico CUSUM para os dados do consumo de água da bacia sanitária



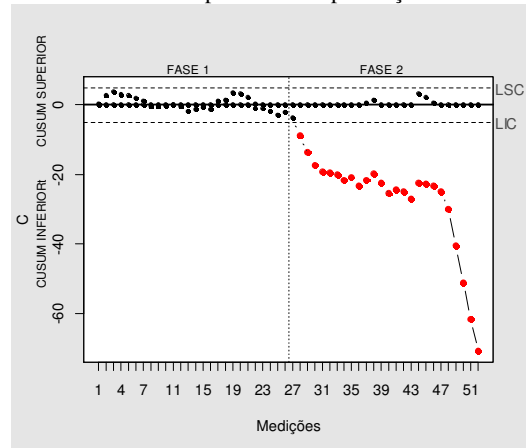
Os três gráficos detectam o problema do vazamento já na primeira amostra após a troca dos equipamentos. Como a magnitude do vazamento é desconhecida, pois se trata de um caso real, não é possível avaliar os três gráficos com relação à velocidade de detecção. Neste sentido, na continuidade da pesquisa, simulações com vazamentos de diferentes dimensões são recomendadas.

Os gráficos EWMA e CUSUM sinalizam a redução do consumo de forma mais clara que o gráfico de Shewhart, uma vez que é possível visualizar no gráfico o comportamento da série. O CUSUM inferior permitiu sinalizar mais rapidamente a redução de consumo que os demais gráficos. Foi possível visualizar também que a volta ao estado de controle estatístico do CUSUM superior foi lenta. Isso se deve à dimensão do vazamento, desconhecida, e ao valor de referência adotado. No gráfico CUSUM é possível definir a magnitude da mudança a ser

detectada. Assim, estudos com simulações de vazamentos de diversas magnitudes aplicando gráficos CUSUM e combinados Shewhart-CUSUM são recomendados.

É importante ressaltar que, não existindo o vazamento decorrente da instalação inadequada, os gráficos CUSUM e EWMA possivelmente detectariam mais rapidamente a redução no consumo devido às trocas de equipamento. Para ilustrar, foram excluídas as observações 27 a 36, referentes ao período com vazamento e construído um gráfico CUSUM para as demais observações (Figura 8). Nestas condições, pode-se verificar que o gráfico CUSUM sinaliza de forma clara a redução do consumo de água.

Figura 8 – Gráfico CUSUM para o consumo de água das bacias excluídos os dados do período com presença de vazamento



Os vazamentos afetam de forma considerável o consumo de água (BARBERÁN *et al.*, 2013) e podem ocultar os resultados positivos de medidas direcionadas a promover a redução do consumo de água.

Os resultados deste trabalho concordam com Rasmani, Hanif e Nozaran (2014), que aplicaram gráficos de controle multivariados e os compararam com métodos clássicos de detecção. Os autores concluíram que gráficos de controle são aplicáveis e produzem resultados consistentes. Concordam também com Bakker *et al.* (2014), que concluíram que monitorar a demanda a partir de gráficos de controle pode contribuir para detecção de vazamentos provocados por rompimento de tubulações. Corroboram também com os resultados de Jung *et al.* (2015) no que tange à sensibilidade dos gráficos EWMA e CUSUM na detecção de vazamentos. Jung *et al.* (2015) reforçam a necessidade de sistemas consistentes de medição e registros para evitar alarmes falsos e não detecção e todos os autores ressaltam a necessidade de estudos aprofundados para avaliar a efetividade da abordagem proposta e necessidade de validação.

A utilização do R para a aplicação proposta é também uma importante contribuição. Os gráficos de controle podem ser construídos a partir da integração do R com planilhas eletrônicas. Com o R é possível desenvolver documentos dinâmicos, como aplicativos web, com representação das análises realizadas. Desta forma, o R pode ser utilizado em dispositivos móveis, como *tablets* e *smartphones*, de modo interativo e integrado (XIE, 2015; BAUMER; UDWIN, 2015; ALLAIRE *et al.*, 2016;

BEELEY, 2016). O R representa assim uma opção para o monitoramento *on-line* do consumo predial de água.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi estudar a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo de Shewhart, das Somas Acumuladas (CUSUM) e da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA), no monitoramento de características relativas ao consumo de água.

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que o gráfico de controle de Shewhart detectou rapidamente o vazamento e os procedimentos CUSUM e EWMA sinalizaram com mais clareza a redução de consumo decorrente da substituição dos acabamentos das válvulas convencionais por economizadoras.

Os gráficos de controle se apresentam como uma boa alternativa no monitoramento do consumo predial de água, pois fornecem informações facilmente observáveis indicando mudanças e problemas no processo. Essas ferramentas podem auxiliar na gestão do uso da água, na detecção de falhas, como vazamentos, e mudanças no padrão de consumo.

No que tange à detecção precoce de vazamentos, essencialmente os não visíveis, é necessário estudar a viabilidade da aplicação destas técnicas *on-line*, do mesmo modo como aplicadas nos processos produtivos industriais. Para complementar, a utilização do R, um ambiente de computação estatística, de código aberto e flexível se mostrou como uma opção para esta finalidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ (Processo n. 460310/2014-3) pela concessão do auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

ALLAIRE, J.J.; CHENG, J.; XIE, Y.; MCPHERSON, J., CHANG, W.; ALLEN, J.; WICKHAM, H.; ATKINS, A.; HYNDMAN, R. 2016. Rmarkdown: Dynamic Documents for R. **R package version 1.0**. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=rmarkdown>>. Acesso em: 02 out. 2016.

BAKKER, M.; JUNG, D.; VREEBURG, J.; ROER, M. V.; LANSEY, K.; RIETVELD, L. Detecting pipe burst using Heuristic and CUSUM methods. **Procedia Engineering**, v. 70, p. 85-92, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.011>.

BARBERÁN, R.; EGEEA, P.; GRACIA-DE-RENTERÍA, P.; SALVADOR, M. Evaluation of water saving measures in hotels: A Spanish case study, **International Journal of Hospitality Management**, v. 34, p. 181-191, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2013.02.005>.

BAUMER, B.; UDWIN, D. R Markdown. **WIREs Computational Statistics**, v. 7, n. 3, p. 167-177, 2015. <https://doi.org/10.1002/wics.1348>.

BEAL, C.; STEWART, R. A.; SPINKS, A.; FIELDING, K. Using smart meters to identify social and technological impacts on residential water consumption. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 11, n. 5, p. 527-533, 2011. <https://doi.org/10.2166/ws.2011.088>.

BEELEY, C. Web application development with R using Shiny. Packt Publishing Ltd., 2016.

BERGOGLIO, M.; MARI, D. Leak rate metrology for the society and industry. **Measurement**, v. 45, n. 10, p. 2434-2440, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.10.037>.

BRITTON, T. C.; STEWART, R. A.; O'HALLORAN, K. R. Smart metering: Enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, p. 166-176, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.018>.

CHEN, M.Y.L. Defect analysis in wet areas of buildings. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 3, p. 165-173, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.07.005>.

CONOVER, W. J. **Practical Nonparametric Statistics**, 3rd edition, Wiley, NY, 1999.

CLARO, F. A. E.; COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. Gráficos de controle de EWMA e de Xbar para monitoramento de processos autocorrelacionados. **Produção**, v. 17, n. 3, p. 536-546, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000300010>.

DEMING, W. E. **Qualidade: a revolução da administração**. Rio de Janeiro: Marques Saraiva, 1990.

FRISEN, M. On multivariate control charts. **Produção**, v. 21, n. 2, p. 235-241, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132011005000010>.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GROSS, J.; LIGGES, U. Nortest: tests for Normality. **R package version 1.0-3**, 2015. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=nortest>>. Acesso em: 06 jan. 2016.

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, n. 1, 2012.

HENNING, E.; KONRATH, A. C.; WALTER, O. M. F. C.; ALVES, C. C.; SAMOHYL, R. W. Aplicação de um gráfico Cusum binomial no monitoramento de um indicador de água potável. **Revista Produção Online**, v. 14, n.1, p. 84-114, 2014. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v14.i1.1452>.

HENNING, E.; RAMOS, M.S.; AGUIAR, R.; SANTOS, L.M.; SIPLE, I.Z. para além da computação estatística: o uso do ambiente R para o ensino de métodos numéricos. **Renote**, v. 14, n. 1, p. 1-10, 2016.

- HIRATA, Y.S. Gráficos de Controle para Laboratórios de Ensaio. **Biológico**, v. 64, n. 2, p. 183-185, jul./dez., 2002.
- ILHA, M. S. O.; OLIVEIRA, L. H.; SOUSA JÚNIOR, W. C.; GONÇALVES, O. M.; CAMPOS, M. A. S. Impact of installation of water saving technologies at the International Airport of São Paulo in Brazil. In: Symposium CIB W062, Sydney, 2010.
- JUNG, D.; KANG, D.; LIU, J.; LANSEY, K. Improving the rapidity of responses to pipe burst in water distribution systems: a comparison of statistical process control methods. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 2, p.307-328, 2015. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.101>.
- LIU, A.; GIURCO, D.; MUKHEIBIR, P. Urban water conservation through customized water and end-use information. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, n. 4, p. 3164-3175, 2015.
- MACCARTHY, B. L.; WASUSRI, T. A review of non-standard applications of statistical process control (SPC) charts. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 19, n. 3, p. 295-320, 2002. <https://doi.org/10.1108/02656710210415695>.
- MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- PAGE, E. S. Continuous Inspection Scheme. **Biometrika**, v. 41, n. 1/2, p. 100-115, 1954. <https://doi.org/10.1093/biomet/41.1-2.100>. <https://doi.org/10.2307/2333009>.
- RASMANI, K. A.; HANIF, H. M.; NOZARAN, M. R. Detecting excessive residential water consumption using statistical process control and machine learning approaches. In: GAOL, F. L.; CHACZKO, Z.; HASHIMOTO, K.; MATSUO, T.; GROSKY, W. (ed). *Advances in Intelligent Systems*. WIT Press, v. 53, 2014. <https://doi.org/10.2495/intelsys130191>.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2015. Disponível em: <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 dez. 2015.
- ROBERTS, P. **Yarra Valley Water 2004 Residential End Use Measurement Study**. 2005. Disponível em: <<https://www.yvw.com.au/yvw/groups/public/documents/document/yvw1001680.pdf>>. Acesso em: 21 jun. 2016.
- SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- SCRUCCA, L. Qcc: An R package for quality control charting and statistical process control. **R News**, v. 4, n. 1, p. 11-17, 2004.
- WALTER, O. M. F. C.; HENNING, E.; CARDOSO, M.E.; SAMOHYL, R.W. Individual and combined application of CUSUM and Shewhart control charts: an application in the metalworking sector. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 2, p. 271-286, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013000200003>.
- WESTGARD, J. O.; BARRY, P. L.; HUNT M. R.; GROTH T. A multi-rule Shewhart chart for quality control in clinical chemistry. **Clinical Chemistry**, v. 27, n. 3, p. 493-501, 1981.
- WILLIS, R. M.; STEWART, R. A.; PANUWATWANICH, K.; WILLIAMS, P. R.; HOLLINGSWORTH, A. L. Quantifying the influence of environmental and water conservation attitudes on household end use water consumption. **Journal of Environmental Management**, v. 92; n. 8; p. 1996-2009, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.023>.
- WILLIS, R.M.; STEWART, R. A.; GIURCO, D, P.; TALEBPOUR, M. R.; MOUSAVINEJAD, A. End use water consumption in households: impact of socio-demographic factors and efficient devices. **Journal of Cleaner Production**, v. 60, n. 1 2013, p 107–115, 2013.
- WOODALL, W. H.; ADAMS, B. M.; BENNEYAN, J. C. The Use of Control Charts in Healthcare. In: FALTIN, F. W.; KENETT, R.; RUGGERI (Eds.) **Statistical Methods in Healthcare**, p. 251-267, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781119940012.ch12>.
- XIE, Y. **Dynamic Documents with R and knitr**. CRC Press, 2015.
- ZANINI, R. R.; SOUZA, A. M.; JACOBI, L. F.; PERIPOLLI, A.; DAPPER, S. N.; SILVA, A. C. J. A Utilização dos Gráficos de Controle para Acompanhamento de Processos de Vigilância. **Revista Espacios**, v. 37, n. 27, p. 5, 2016.