SISPRED 2023
XV SIMPÓSIO NACIONAL DE SISTEMAS PREDIAIS
BOAS PRÁTICAS, INOVAÇÃO, DESEMPENHO E SUSTENTABILIDADE
19 E 20 DE OUTUBRO DE 2023 - JOINVILLE - SC

# ANÁLISE DO CONSUMO DE ÁGUA EM AGÊNCIAS BANCÁRIAS UTILIZANDO GRÁFICOS DE CONTROLE: EVIDÊNCIAS DE UMA AGÊNCIA BANCÁRIA EM JOINVILLE

## Bank branch water consumption analysis using control charts: a case study in Joinville

**Lucas Lepinski Golin Freitas [1]; Andreza Kalbusch [2]; Elisa Henning [3]; Marcio Ferreira de Lima [4]**

Recebido em 07 de junho de 2023, aprovado em 20 de julho de 2023, publicado em 19 de outubro de 2023

**Palavras-chave:**
Gráficos de Controle
Consumo de água
Sustentabilidade
Edificações públicas
Monitoramento Estatístico

**Keywords:**
Control charts
Water consumption
Sustainability
Public buildings
Statistical monitoring

**RESUMO**: O monitoramento remoto do consumo de água em edificações, com frequência diária e horária, apresenta-se como um possível método para implementar medidas rápidas e eficazes para reduzir o desperdício de água. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho de dois tipos de gráficos de controle estatístico de processos no monitoramento de consumo de água em uma agência bancária localizada na cidade de Joinville, Brasil. Os gráficos de controle foram utilizados para identificar eventos atípicos que ocorreram durante o período de coleta de dados, de 31/10/2018 até 03/11/2019. Os gráficos de controle estatístico de Shewhart e EWMA foram selecionados para análise neste estudo. A média de consumo diário encontrada foi de 4,51 m³/dia. Ambos os modelos de gráfico apresentaram resultados satisfatórios quanto à detecção de vazamentos e consumo excessivo de água, assim como a detecção de eventos atípicos ocorridos durante o período analisado. Complementarmente, o gráfico EWMA apresentou melhor desempenho para a detecção de pequenas variações de consumo.

**ABSTRACT**: Remotely monitoring water consumption in buildings, by daily and hourly intervals, is presented as a possible fast and reliable method for implementing procedures to reduce the amount of wasted water. The objective of this study was to analyse the performance of two distinct statistical control charts when used to monitor the water consumption in a bank agency located in the city of Joinville, Brazil. The control charts were used in order to identify special events that occurred during the data gathering period, ranging from 10/31/2018 to 11/03/2019. The statistical control charts selected for this study were the Shewhart and EWMA charts. The average daily water consumption found was 4.51 m³/day. Both types of charts presented satisfactory results in detecting leakages and excessive water consumption, as well as the detection of unusual events that occurred during the analysed period. Complementarily, the EWMA chart performed better in the detection of small water volume shifts.

**CONTATO DOS AUTORES:**

[1] **FREITAS, Lucas Lepinski Golin**: Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville – Santa Catarina, lgolin4@gmail.com.

[2] **KALBUSCH, Andreza**: Doutora em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville-SC, Brasil. andreza.kalbusch@udesc.br.

[3] **HENNING, Elisa**: Doutora em Engenharia de Produção, Departamento de Matemática, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Joinville-SC, Brasil. elisa.henning@udesc.br.

[4] **LIMA, Marcio Ferreira de**: Engenheiro de Produção. Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial (Engenharia Química - UFPR) - Caixa Econômica Federal, marcio.f.lima@caixa.gov.br.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das sociedades atuais é fortemente pautado na interdependência entre as ambições sociais e a disponibilidade e qualidade dos recursos naturais, como a água (COSGROVE; LOUCKS, 2015). Entretanto, nas últimas décadas, o aumento percentual do uso da água em escala global superou os percentuais de crescimento populacional, levando diversas regiões do mundo a situações de estresse hídrico (COSGROVE e LOUCKS, 2015). O planejamento e implementação de estratégias de gestão da demanda de água é importante para garantir o abastecimento de água de maneira econômica e confiável (COMINOLA *et al*., 2015). Neste sentido, monitorar o consumo de água é essencial para uma adequada gestão do uso da água pois permite o conhecimento detalhado dos padrões de consumo (COMINOLA *et al*., 2015).

Britton *et al*. (2008) mencionam que a utilização de sistemas de monitoramento remoto do consumo de água gera benefícios como decréscimo do uso de água, otimização do processo de bombeamento de água e aumento no tempo de vida da infraestrutura. Kim *et al*. (2008) mencionam a importância de novas tecnologias e métodos no processo de monitoramento de recursos hídricos com intuito de reduzir perdas ocasionadas por desperdício e/ou vazamentos.

Os Gráficos de Controle Estatístico (GCE) são ferramentas utilizadas para controle estatístico, com origem no setor produtivo, mas vêm ampliando suas aplicações nas últimas décadas em diferentes setores da sociedade (SHAMSUZZAMAN *et al*., 2016). Vasconcellos *et al*. (2020) aplicaram gráficos de controle para monitorar a vazão de água em usinas de pequeno porte no país. Wan *et al*. (2022) propuseram um sistema de detecção de vazamento on-line baseado no uso de gráficos de controle adaptados. Freitas *et al*. (2019) utilizaram gráficos de controle para monitorar o consumo de água em bacias sanitárias antes e após a troca dos acabamentos de válvulas de descarga por modelos de duplo acionamento em um edifício de um campus universitário. Assim, os GCE apresentam-se como uma alternativa para o monitoramento do consumo de água. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a utilização de Gráficos de Controle Estatístico para monitoramento de consumo de água em agências bancárias, a partir da análise de um estudo de caso.

## 2 GRÁFICOS DE CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

A área de controle de qualidade estatístico pode ser definida de forma ampla por métodos estatísticos e de engenharia utilizados em medições, monitoramento, controle e melhoria de qualidade (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Um gráfico de controle pode ser definido por pontos que representam uma estatística de medições de amostras obtidas em um determinado processo ao longo do tempo (MONTGOMERY, 2012). Utilizando-se da média, é determinada uma Linha Central (LC), que representa o valor médio dos dados coletados correspondentes a um estágio do processo que está sob controle. Um processo é definido como sob controle quando todos os pontos amostrais coletados apresentam valores satisfatórios e/ou esperados dentro do contexto do processo. Por esta razão Limites de Controle são utilizados para determinar se pontos amostrais coletados posteriormente estão de acordo com os parâmetros esperados (MONTGOMERY, 2012).

Limites de controle são duas linhas horizontais de referência denominadas de Limite de Controle Superior (LCS) e Limite de Controle Inferior (LCI). Estes limites de controle

determinam se o processo está sob controle, considerando uma situação em que quase todos os pontos amostrais estejam contidos entre os limites LCS e LCI. Os gráficos de controle são normalmente segmentados em duas seções: Fase 1, que representa os dados sob controle estatístico e que são utilizados para calcular os limites de controle, e Fase 2, que representa os dados em que se deseja exercer controle estatístico, ou seja, a fase de monitoramento do processo (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Os gráficos de controle de Shewhart, propostos em 1931, são amplamente utilizados para o controle de processos em diversos setores da indústria, e podem ser operados com amostras agrupadas ou observações individuais (QIU, 2014). Os limites de controle LCS, CL e LCI para o gráfico de Shewhart são expressos, respectivamente, pelas Equações 1, 2 e 3 (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

$$LCS = \bar{X} + 3 * \hat{\sigma} \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$CL = \bar{X} \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$LCI = \bar{X} - 3 * \hat{\sigma} \quad \text{(Eq. 3)}$$

Sendo $\bar{X}$ a média amostral e $\hat{\sigma}$ o desvio padrão das observações originais, definido pela Equação 4 (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad \text{(Eq. 4)}$$

Sendo $\overline{MR}$ o intervalo móvel de duas observações consecutivas, de acordo com a Equação 5 (MONTGOMERY; RUNGER, 2003), e $d_2$ representa a média de distribuição do intervalo relativo do processo, que para um gráfico de observações individuais, possui valor de 1,128.

$$\overline{MR} = |X_i - X_{i-1}| \quad \text{(Eq. 5)}$$

Uma desvantagem do gráfico Shewhart é sua baixa sensibilidade para detectar pequenas variações no processo. Uma razão é que o gráfico de Shewhart utiliza somente a informação do último ponto computado, e ignora a informação contida na sequência de pontos (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Uma alternativa ao gráfico de Shewhart é o gráfico de Média Móvel com Ponderação Exponencial (EWMA) (ROBERTS, 2000). O EWMA é construído baseando-se em uma média ponderada de todas as observações disponíveis até um determinado instante, atribuindo pesos para as informações. Assumindo as observações originais como $X_1, X_2, \ldots X_i$, e $Z_1, Z_2, \ldots Z_i$ como as observações com seus pesos respectivos atribuídos, o gráfico EWMA é definido pela Equação 6 (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

$$Z_i = \lambda * X_i + (1 - \lambda) * Z_{i-1} \quad \text{(Eq. 6)}$$

Sendo $X_i$ o valor mais recente observado, λ o parâmetro de peso ($\lambda \in (0,1]$), e o valor inicial é o próprio valor nominal ( $Z_1 = X_1$ ). Da Equação 6, é possível inferir a Equação 7 (MONTGOMERY, 2012).

$$Z_i = \lambda * \sum_{j=1}^{i} (1 - \lambda)^{i-j} * X_j + (1 - \lambda)^i * \bar{X} \quad \text{(Eq. 7)}$$

O peso $\lambda$ é expresso pela Equação 8 (MONTGOMERY, 2012).

$$1 = \lambda * \sum_{j=1}^{i} (1 - \lambda)^{i-j} * X_j + (1 - \lambda)^i \quad \text{(Eq. 8)}$$

$Z_i$ é a média ponderada de $\bar{X}$ e de todas as observações coletadas até o ponto $i$, e que o peso $\lambda * (1 - \lambda)^{i-j}$ obtido da observação $i$ decai exponecialmente quando $i$ se distancia de $j$. Também pode ser observado que quando se opta por um $\lambda$ maior, um peso maior será

atribuído à observação atual $X_i$ e um peso menor será atribuído às observações anteriores. O oposto ocorre quanto menor for o valor de $\lambda$. No caso particular $\lambda = 1$ observamos que $Z_i = X_i$, e o gráfico EWMA se torna um gráfico de Shewhart (QIU, 2014).

Assumindo que as observações $X_i$ são variáveis independentes e com variância $\sigma^2$, então a variância de $Z_i$ é dada pela Equação 9 (QIU, 2014).

$$\sigma_{Zi}^2 = \sigma^2 * \left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right) * (1 - (1-\lambda)^{2i}) \quad \text{(Eq. 9)}$$

A linha central (CL) corresponde à média das observações, e o cálculo dos limites de controle UCL e LCL, respectivamente, é apresentado nas Equações 10 e 11 (QIU, 2014).

$$UCL = \mu_0 + L * \sigma * \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right)(1 - (1-\lambda)^{2i})} \quad \text{(Eq. 10)}$$

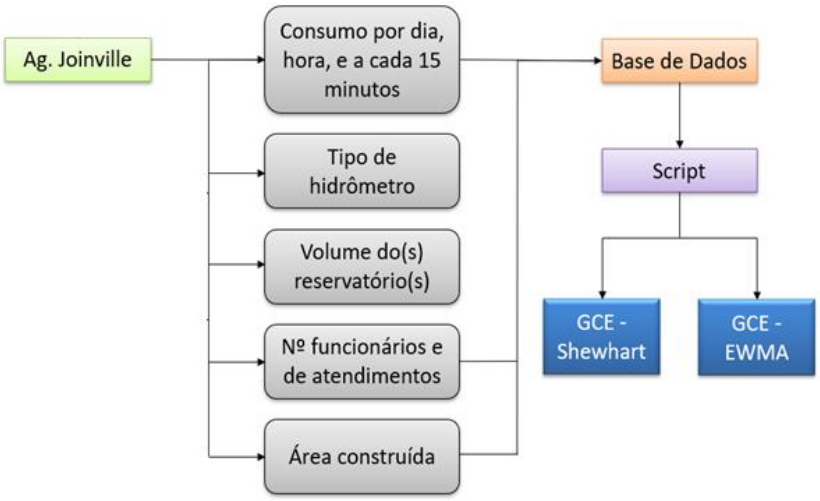
$$LCL = \mu_0 - L * \sigma * \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right)(1 - (1-\lambda)^{2i})} \quad \text{(Eq. 11)}$$

L corresponde à extensão dos limites de controle sendo um valor frequentemente utilizado para L é 3 (MONGOMERY; RUNGER, 2003). Pequenos valores para λ são bons para detectar pequenas variações no processo, enquanto que valores maiores para λ apresentam um melhor desempenho para detectar grandes variações (QIU, 2014). O valor de λ adotado neste estudo foi de 0,2.

## 3 METODOLOGIA

Para a elaboração dos gráficos de controle foi realizada a coleta de dados de consumo de água da agência utilizando um sistema de telemetria. O sistema realiza leituras de consumo de água a cada 15 minutos, 24 horas por dia. Os dados foram obtidos em três formatos: consumo por dia, por hora e a cada 15 minutos. Complementarmente foram obtidas informações referentes ao tipo de hidrômetro, quantidade e volume dos reservatórios, número de funcionários, número de atendimentos diários e área construída da agência bancária. Para complementar as informações obtidas e averiguar características que pudessem influenciar o consumo de água, foi realizada uma vistoria na agência bancária. O Fluxograma presente na Figura 1 apresenta os procedimentos metodológicos empregados.

**Figura 1 – Procedimentos metodológicos empregados**




Fonte: autor.

A agência está localizada no município de Joinville, Santa Catarina e possui área interna de 2.032,23 m², garagem coberta com 312,08 m², que em conjunto com as áreas externas totalizam uma área construída de 3.165,40 m². Foi inaugurada no dia 01/06/1978 e durante o período deste estudo contava com 57 funcionários. A estrutura da agência é constituída pelo pavimento térreo, pavimento superior (primeiro andar), mezanino e subsolo.

O hidrômetro do tipo unijato instalado na agência possui uma vazão nominal de 1,50 m³/h. A agência possui dois reservatórios de água, um deles localizado no subsolo com capacidade de 30.000 litros, e outro reservatório superior com capacidade de 20.000 litros. Na agência constam os seguintes equipamentos sanitários: 28 bacias sanitárias (duas com válvula de descarga e 26 com caixa acoplada), um mictório, 18 lavatórios, seis bebedouros (três reservados ao público e três reservados aos funcionários) e três torneiras. A agência não possui nenhum sistema alternativo de abastecimento e possui um sistema de resfriamento a água (ar condicionado).

Os gráficos de controle de Shewhart e EWMA foram gerados utilizando os dados disponíveis nos seguintes formatos: consumo por hora e consumo diário. Devido à grande e rápida variação presente nas leituras horárias, optou-se por alargar os limites sigma, na ordem de 3 sigmas para 6 sigmas. A utilização de limites alargados é também uma alternativa para contornar dados auto correlacionados (CLARO *et al*., 2007). Foi utilizada a linguagem R (R CORE TEAM, 2021) e o pacote qcc (SCRUCCA, 2004) para a construção dos gráficos de controle.

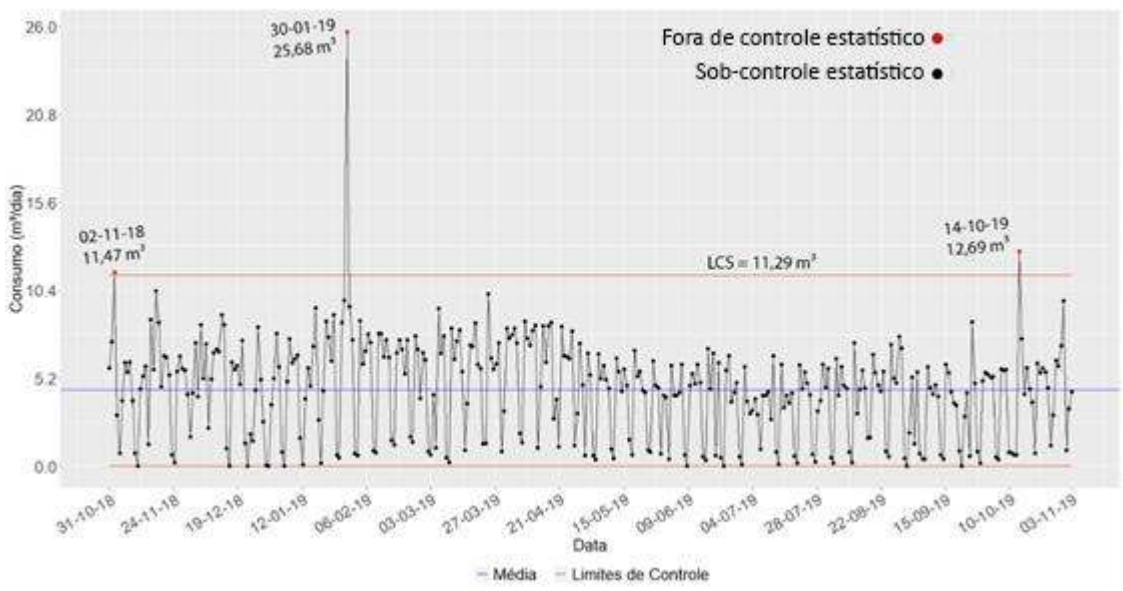
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram obtidas 369 leituras diárias e 8.856 leituras horárias, correspondentes ao período de 31/10/2018 a 03/11/2019, representando um total de 10 meses consecutivos de coleta de dados. Os gráficos presentes nas Figuras 2 e 3 expressam, respectivamente, gráficos de controle de Shewhart e EWMA de consumo diário para a agência de Joinville. Considerando os dados diários, na agência bancária foi encontrada a média de consumo diário de 4,51 m³/dia, consumo máximo de 25,68 m³/dia e desvio padrão de 2,94 m³/dia.

No dia 30/01/2019 ocorreu um consumo alto atípico, como demonstrado nos gráficos pelos pontos acima da LCS. De acordo com a vistoria realizada na agência, este consumo foi provavelmente causado por pessoas em situação de rua utilizando uma torneira na parte externa da agência. De acordo com as informações obtidas junto à gerência da agência, essas pessoas realizavam a abertura da torneira utilizando uma chave manual improvisada, porém não realizavam o fechamento após o uso, o que ocasionou o consumo atípico (25,68 m³/dia) observado nos gráficos.

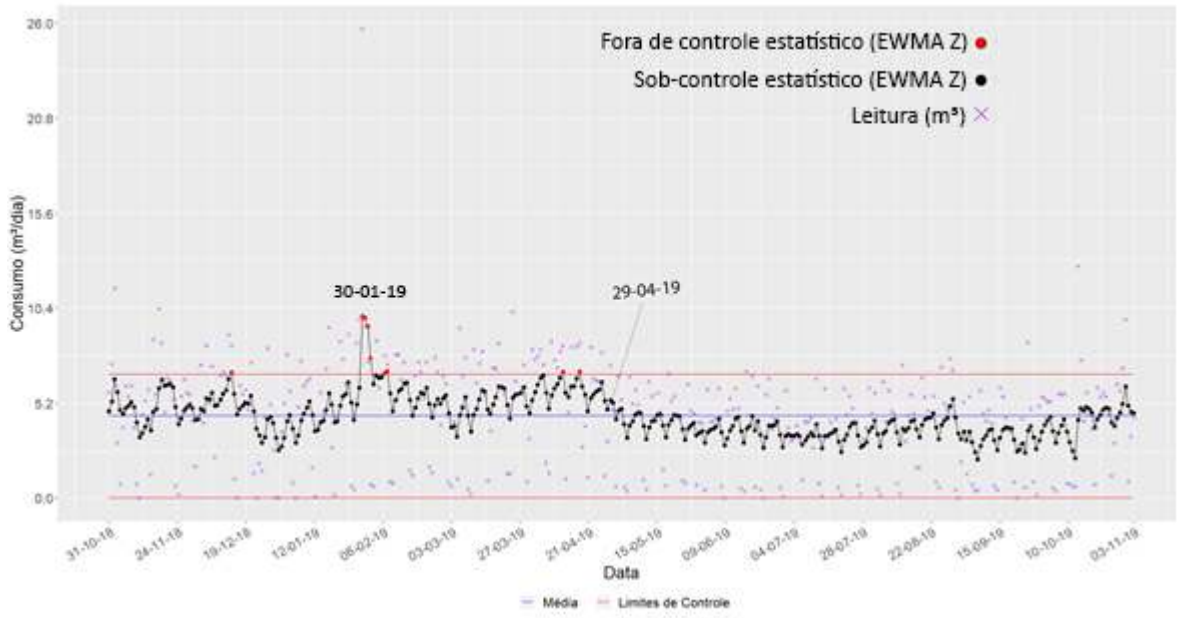
É possível identificar este evento nas Figuras 2 e 3. Todavia, o gráfico EWMA (Figura 3) apresentou três dias consecutivos (31/01/2019, 01/02/2019 e 02/02/2019) como fora de controle, isso ocorreu devido à natureza do gráfico EWMA, que atribui peso às variáveis de acordo com as observações antigas (neste caso o consumo atípico do dia 30/01/2019). Sendo assim, os demais dias foram considerados alarmes falsos. Também foi possível observar uma gradual redução na média de consumo a partir do dia 29/04/2019. Este decréscimo foi mais visível no gráfico EWMA (Figura 3), em razão do potencial do gráfico EWMA para detectar pequenas e graduais mudanças.

**Figura 2 – Gráfico de controle de Shewhart – Consumo diário**




Fonte: autor.

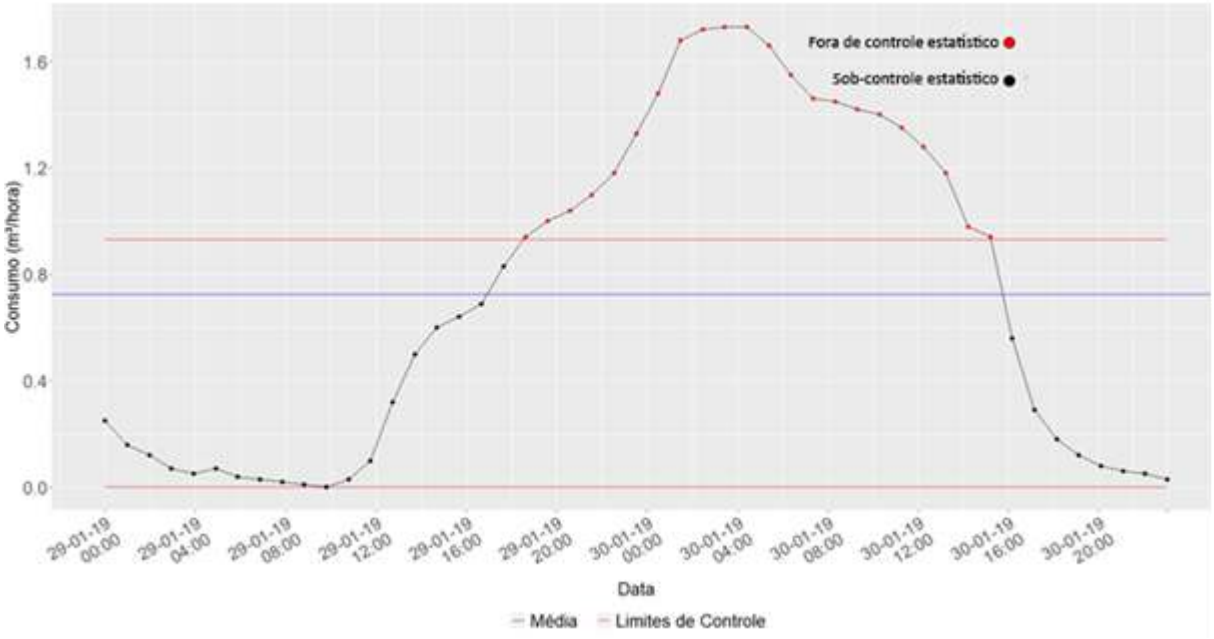
**Figura 3 – Gráfico de controle EWMA – Consumo diário**




Fonte: autor.

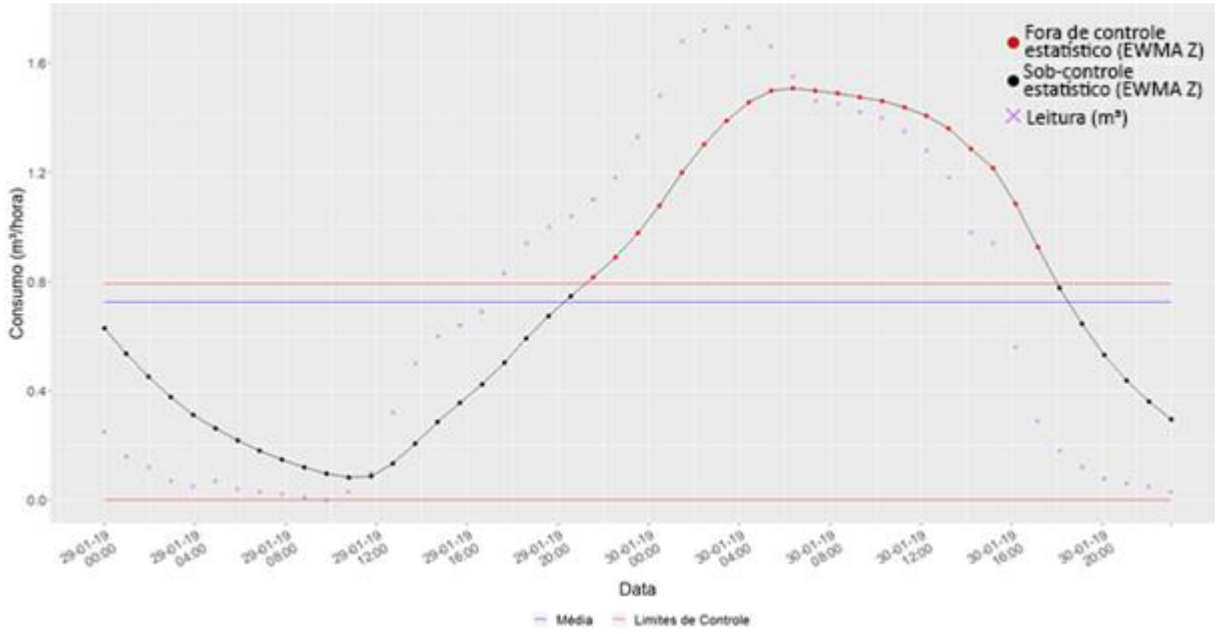
Nos gráficos presentes nas Figuras 4 e 5 podem-se observar respectivamente os Gráficos de Controle de Shewhart e EWMA em intervalo horário no período de 29/01/2019 até o final do dia 30/01/2019 para a agência de Joinville.

**Figura 4 – Gráfico de controle de Shewhart: Consumo horário no período de 29/01/2019 até 30/01/2019**




Fonte: autor.

**Figura 5 – Gráfico de controle EWMA – Consumo horário no período de 29/01/2019 até 30/01/2019**




Fonte: autor.

Como pode ser observado nas Figuras 4 e 5, o consumo atípico inicia no período noturno do dia 29 e finalmente volta ao normal ao final do período vespertino do dia 30, indicando que a torneira externa foi fechada.

## 5 CONCLUSÕES

Ambos os tipos de gráficos de controle abordados neste estudo apresentaram um bom desempenho quanto ao monitoramento do consumo de água da agência, salientando as vantagens e desvantagens de cada gráfico, como o rápido tempo de resposta perante a grandes variações no processo demonstrado pelos gráficos de Shewhart e a alta sensibilidade do gráfico EWMA para detecção de pequenas variações no processo. Tais diferenças demonstram que um monitoramento ideal do consumo de água poderia fazer uso de ambos os modelos consecutivamente. Existem outros modelos de gráficos de controle não abordados nesta pesquisa que, mediante estudo e análise, podem também ser incorporados ao sistema de monitoramento.

Os gráficos podem ser implementados em sistemas de telemetria, com os gráficos sendo gerados em função do intervalo de tempo de coleta de amostras (consumo horário, diário, mensal, etc.). Quanto menor for este intervalo de tempo, possivelmente menor será o tempo de resposta para a identificação e subsequente correção de problemas no sistema. Os gráficos não necessariamente precisam ser avaliados visualmente, uma vez que pode-se utilizar de um algoritmo incorporado ao sistema de medição de consumo que avalie se um ponto está sob ou fora de controle estatístico. Se um ponto fora de controle estatístico fosse detectado, o algoritmo enviaria um alerta para o gestor de sistema, que assim poderia dar continuidade no processo de investigação do problema.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico [423090/2021-6] e da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina—FAPESC [2023TR334].

## REFERÊNCIAS

BRITTON, T.; COLE, G.; STEWART, R.; WISKAR, D. Remote Diagnosis of leakage in residential households. **Water**, Australia, v. 35, n. 6, p. 56-60, 2009.

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.

COMINOLA, A.; GIULIANI, M.; PIGA, D.; CASTELLETTI, A.; RIZZOLI, A. E. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A **review,Environmental Modelling & Software**, v. 72, p. 198-214, 2015.

COSGROVE, W. J.; LOUCKS, D. P. Water management: Current and future challenges and research directions, **Water Resour. Res**., v. 51, p. 4823– 4839, 2015.

FREITAS, L. L. G.; HENNING, E.; KALBUSCH, A.; KONRATH, A. C.; WALTER, O. F. C. Analysis of water consumption in toilets employing Shewhart, EWMA, and Shewhart-EWMA combined control charts. **J. Clean. Prod.**, Brasil, v. 233, p. 1146-1157, 2019.

KIM, Y.; SCHMID, T.; CHARBIWALA, Z. M.; FRIEDMAN, J.; SRIVASTAVA, M. B.; NAWMS: Nonintrusive autonomous water monitoring system. *In*: 6 ed. ASSOCIATION FOR COMPUTING MACHINERY - ACM CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORK SENSOR SYSTEMS, 2008, Nova York. **Anais Eletrônicos**.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons. 2003.

MONTGOMERY, D. C. (2012). **Introduction to Statistical Quality Control**. 7. ed. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons. 2012.

QIU, P. **Introduction to statistical process control**. Estados Unidos da America, Universidade da Florida: Chapman and Hall/CRC. 2014. Disponível em: https://www.routledge.com/Introduction-to-Statistical-Process-Control/Qiu/p/book/9781439847992. Acesso em: 10 dez. 2020.

R CORE TEAM. A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2018. Disponível em: https://cran.r-project.org/bin/windows/. Acesso em 01. abr. 2021.

ROBERTS, S.W. Control Charts Tests Based on Geometric Moving Averages. **Technometrics**, Reino Unido, v. 42, p. 97-101, 2000. Disponível em: https://www.jstor.org/stable/1271439?seq=1#metadata_info_tab_contents. Acesso em: 19 mai. 2019.

SCRUCCA, L. qcc: **An R package for quality control charting and statistical process control**. R News 4/1, 11-17. 2004.

SHAMSUZZAMAN, M.; KHOO, M. B. C.; HARIDY, S.; ALSYOUF, I. An optimization design of the combined Shewhart-EWMA control chart. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 86, p. 1627-1637, 2016.

VASCONCELLOS, Bruna T. C.; FILHO, Geraldo L. T.; BONATTO, Benedito D.; DE SOUZA JUNIOR, Oswaldo H. Applying an Exponentially Weighted Moving Average control chart using flow history and assured energy levels to small hydroelectric power plants, **Brazilian Journal of Water Resources**, Brasil, v. 25, 2020. https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190159.

WAN, Xi; FARMANI, Raziyeh; KEEDWELL, Edward. Online leakage detection system based on EWMA-enhanced - Tukey method for water distribution systems, **Hydroinformatics**, Reino Unido, v. 25, n. 1, p. 51-69, 2022. https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190159.