

APLICAÇÃO DE GRÁFICOS DE CONTROLE PARA MONITORAMENTO ESTATÍSTICO DA TURBIDEZ DA ÁGUA POTÁVEL

Nillo Gabriel Alves de Araujo (UDESC)
nilloaraujo@yahoo.com.br

Rodrigo Leite Lindoso (UDESC)
rodrigoleite91@gmail.com

Elisa Henning (UDESC)
dma2eh@joinville.udesc.br

Custodio da Cunha Alves (UNIVILLE)
custodio.alves@univille.net

Leandro Zvirtes (UDESC)
zvirtes@joinville.udesc.br



O mercado atual exige que as empresas forneçam produtos e serviços de qualidade. Para isso elas vêm buscando técnicas capazes de permitir um controle e gerenciamento da qualidade de seus serviços. Este artigo tem por objetivo principal apresentar uma proposta de monitoramento do processo de turbidez da água, com auxílio de ferramentas de Controle Estatístico de Processos (CEP). A motivação desta pesquisa surgiu da necessidade de monitoramento contínuo de alguns parâmetros que garantem a qualidade da água distribuída na cidade de Joinville. Estes parâmetros, devem atender a legislação vigente, que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano. Mas para melhorar a qualidade deste serviço é necessário avaliar também a sua variabilidade. Assim, neste trabalho, para o monitoramento da turbidez, aplicaram-se os gráficos de controle do tipo Shewhart (X), Soma Acumulada (CUSUM) e de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA). É possível verificar igualmente para os três tipos de gráficos que sem o tratamento da autocorrelação, existe a ocorrência muitos alarmes falsos. Os resultados obtidos com a aplicação destes gráficos de controle para o monitoramento deste processo são similares. No entanto, é importante ressaltar que nos gráficos CUSUM e EWMA é possível verificar uma tendência de aumento ou redução do nível da turbidez.

Palavras-chaves: Controle Estatístico de Processos, CUSUM, EWMA, Medidas Individuais, Dados Autocorrelacionados, Turbidez

1.1

2. INTRODUÇÃO

A qualidade de um serviço pode ser medida de acordo com uma fórmula bem simples cujo resultado é a diferença entre o Serviço Prestado e o Serviço Esperado. Nessa avaliação deve-se levar em consideração se a necessidade inicialmente imposta pelo cliente foi plenamente atendida (CARVALHO, 2005). A qualidade sempre foi parte integrante de quase todos os produtos e serviços, mas a conscientização de sua importância e a introdução de métodos de controle e melhoria da qualidade têm tido um desenvolvimento evolutivo.

A aplicação de métodos estatísticos para a melhoria da qualidade, a partir do controle estatístico de processos (CEP) teve início em 1924 com Walter A. Shewhart que desenvolveu o conceito estatístico de gráfico de controle (MONTGOMERY, 2004). Atualmente, podemos encontrar diversas aplicações dos métodos de controle estatístico de processo bem sucedidas no setor industrial. No entanto, gráficos de controle estatístico de processos vem sendo aplicados em outras áreas, como serviços, na saúde pública, na detecção de fraudes, na segurança, na gestão de pessoas, no estudo da genética, finanças e monitoramento ambiental (MORAIS; PACHECO, 2006).

Nesta pesquisa aplicam-se os conceitos de controle estatístico de processos (CEP) na análise dos níveis de turbidez na água potável distribuída em Joinville. Os gráficos de Soma Acumulada (CUSUM) e o de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA) são aplicados, analisados e os resultados comparados com o gráfico de controle X de Shewhart para medidas individuais, com objetivo de proposição para o monitoramento contínuo da turbidez.

O monitoramento da turbidez da água potável proposto neste trabalho justifica-se pela preocupação atual com saneamento básico. Por se tratar da qualidade da água consumida pela população, há a necessidade de uma resposta rápida quando há um desvio, por menor que seja, para que a água não seja distribuída em más condições. Neste caso, a utilização de gráficos CUSUM e EWMA poderá ser melhor, pois ambos oferecem maior sensibilidade a pequenos e moderados desvios na média de um processo, que passam despercebidos por gráficos do tipo Shewhart.

Este artigo está assim delineado: na Seção 2 descrevem-se os gráficos de controle estatístico de processos; na seção 3 focalizam-se as suposições necessárias; na seção 4 está a metodologia aplicada; na Seção 5 a descrição dos dados, na Seção 6 a análise dos resultados e finalmente na Seção 7 as conclusões e considerações finais.

2. CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

O Controle Estatístico de Processos e em particular as técnicas de controle da qualidade, tais como gráficos de controle, têm sido cada vez mais importantes pelo fato de desempenharem papel primordial na melhoria contínua de processos.

O maior objetivo do Controle Estatístico de Processos é a eliminação da variabilidade. Gráficos de controle são ferramentas eficientes que permitem a redução sistemática dessa variabilidade nas características de qualidade, seja de um produto ou serviço, representada pelas variáveis ou atributos monitorados nos gráficos. A qualidade de um produto (ou serviço) é assegurada quanto menor for a variabilidade nas características destes e nos procedimentos. Com a aplicação de ferramentas do controle estatístico de processos podem-se melhorar os processos continuamente.

Todo processo, por mais bem projetado e por mais bem controlado que seja, possui uma variabilidade natural inerente. São pequenas perturbações, causas aleatórias, contra as quais pouco ou nada se pode fazer (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2004). Segundo Samohyl (2009) são três os tipos de causas: causa especial, causa estrutural e causa comum. Uma causa especial é um evento que ocorre ocasionalmente, em períodos irregulares, essas causas devem ser eliminadas ou reduzidas. A causa estrutural, assim como as causas especiais também podem ser eliminadas ou reduzidas, a diferença entre ela é que a causa estrutural ocorre periodicamente ou em função de outra variável relacionada com a causa identificada. A causa comum é relativamente pequena e ocorre em grande número afetando a variabilidade do processo. Apesar de ocorrer em grande quantidade esta variação é inerente ao processo e são praticamente inevitáveis, embora possam ser reduzidas.

O estudo da variabilidade natural do processo é fundamental para a determinação de seus limites de controle, que é definido pelo processo e controlado pela organização. Esses limites devem ser menores que os limites de especificação e tem como objetivo estabelecer controles internos com menor tolerância, já os limites de especificação são definidos pelo mercado ou órgão regulador (RODRIGUES, 2010).

Para Alves (2003), o fator mais importante no controle de um processo é compreender o estado do mesmo com exatidão, interpretando o gráfico de controle e tomando imediatamente ações apropriadas assim que houver um alerta de causa especial ou estrutural. A implantação do controle estatístico de processo e a conseqüente redução da variabilidade geram uma redução nos custos e uma elevação na produtividade, em conseqüência disso, há um aumento da capacidade de produção com pouco ou nenhum investimento adicional em equipamentos ou força de trabalho.

A utilização de gráficos de controle no CEP é de extrema importância. São elementos visuais para o monitoramento de produtos e processos onde através deles podemos identificar rapidamente alterações desproporcionais, causas especiais, alertando sobre a necessidade de agir no processo. (SAMOHYL, 2009).

Os gráficos de controle podem ser utilizados para monitorar características de qualidade que se expressam como variáveis ou como atributos. O mais utilizado hoje é o gráfico do tipo Shewhart para média (\bar{X}) onde as características de qualidade são variáveis (SAMOHYL, 2009). Este gráfico geralmente é utilizado quando há um interesse na evolução de uma característica quantitativa contínua. Monitora-se entre as amostras, o valor médio com o gráfico \bar{X} , o desvio padrão com o gráfico S e a amplitude, gráfico R. As amostras podem ser divididas em subgrupos racionais ($n > 1$) ou em observações individuais, quando $n = 1$. Neste último caso aplica-se um gráfico de controle X para medidas individuais (MONTGOMERY, 2004).

O desempenho de um gráfico de controle é comumente avaliado através de parâmetros relacionados com a distribuição do tempo necessário para o gráfico emitir um sinal verdadeiro ou falso. Um dos parâmetros é o número médio de amostras coletadas até emissão de um sinal (*ARL-Average Run Length*). Em uma carta de controle o ARL_0 indica o número médio de amostras coletadas até a emissão de um sinal durante o período sob controle (alarme falso), enquanto o ARL_1 , representa o número médio de amostras coletadas até a emissão de um sinal que indique uma situação de fora de controle estatístico, quando uma mudança realmente ocorre (ALVES; SAMOHYL, 2005).

Os gráficos de controle tradicionais tipo Shewhart não são eficazes se o tamanho da mudança é pequeno, 2σ a $1,5\sigma$, ou menos. Os gráficos CUSUM e EWMA são uma alternativa para

pequenas mudanças. Esses dois gráficos auxiliam na tomada de decisão, pois se fundamenta nos resultados apresentados por certo número de amostras, e não em observações isoladas de amostras, ou seja, a análise deste gráfico é em função do resultado atual e dos resultados anteriores (ALVES, 2003).

2.1 CUSUM (GRÁFICO DE SOMA ACUMULADA)

O gráfico de controle de Soma Acumulada (CUSUM) foi proposto primeiramente por Page (1954). É um aprimoramento do gráfico do tipo Shewhart para média (\bar{X}) ou observações individuais (X), sendo usado para detectar mais rapidamente pequenas alterações nos processos e errar menos quando os processos são realmente estáveis (SAMOHYL, 2009).

Alves (2003) afirma também que esses tipos de gráficos de controle são muito eficazes para amostras seqüenciais de tamanho $n = 1$, ou seja, são indicadas para onde o monitoramento de processos é realizado a partir de observações individuais, que é o caso deste trabalho.

Como já citado acima, o gráfico de soma acumulada utiliza diversas amostras para decidir sobre o processo conforme as observações são obtidas, os desvios da média em relação ao valor alvo são acumulados, gerando

$$S_i = \sum_{i=1}^i (X_i - \mu_0), \quad (1)$$

onde X_i é a medida (observação obtida) da i -ésima amostra de tamanho $n = 1$ e μ_0 é o valor alvo. A média permanecerá ajustada no alvo enquanto os desvios positivos forem compensados pelos negativos oscilando de forma aleatória em torno do zero, mas se houver uma alteração desta média, aumentando ou diminuindo, S_i crescerá ou diminuirá indefinidamente (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2004).

Como a Equação 1 é sensível a qualquer desvio do valor alvo, então uma “tolerância” com pequenas alterações é formalizada explicitamente nas equações do CUSUM com o valor de referência K (SAMOHYL, 2009). Deste modo, o CUSUM funciona acumulando desvios de μ_0 que estão acima e abaixo do alvo, com uma estatística C^+ e C^- chamadas de CUSUMs unilaterais, superior e inferior. Estas estatísticas são calculadas da seguinte forma:

$$C_i^+ = \max[0, X_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+]; \quad (2)$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - K) - X_i + C_{i-1}^-], \quad (3)$$

onde $C_0^+ = C_0^- = 0$. O valor de referência K é escolhido entre o valor-alvo μ_0 e o valor da média fora de controle μ_1 que estamos interessados em detectar rapidamente. Desta forma, se a mudança é expressa em unidades de desvio padrão como $\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma$, então K é a metade da magnitude da mudança dada por

$$K = \frac{\Delta}{2} = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} = \frac{\delta}{2} \sigma. \quad (4)$$

Se C_i^+ ou C_i^- ultrapassar o intervalo de decisão H , o processo será considerado fora de controle estatístico. Para um melhor desempenho do gráfico de soma acumulada, recomenda-se que seja utilizado um valor de K igual a 0,5 vezes o valor do desvio padrão (σ) e o H como quatro ou cinco vezes o valor do desvio padrão (σ). Isto se justifica, pois se utilizarmos esses respectivos valores, o CUSUM apresentará boas propriedades do ARL contra uma mudança de cerca de 1σ na média do processo (MONTGOMERY, 2004)

2.2 EWMA (GRÁFICO DE MÉDIA MÓVEL EXPONENCIALMENTE PONDERADA)

O desempenho do gráfico de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (EWMA) é muito parecido com o CUSUM, e também é recomendado para observações individuais. Uma das principais diferenças entre eles é que o primeiro é mais fácil de estabelecer e operar e outra é que o EWMA “fornece peso” maior para informações mais atualizadas e peso menor para informações mais antigas (MONTGOMERY, 2004). O gráfico de controle EWMA é construído pela plotagem de z_i versus o número de amostras i (ou tempo), com z_i definido por

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}, \quad (5)$$

onde X_i é o valor observado mais recentemente, λ é o parâmetro que pondera a combinação, $0 < \lambda < 1$. Quanto menor for o λ mais fácil será para detectar pequenas mudanças no processo, usualmente é utilizado $\lambda = 0,05$, $\lambda = 0,1$ ou $\lambda = 0,2$.

O valor inicial é o valor alvo do processo, com $Z_0 = \mu_0$. Supondo que as observações X_i são variáveis aleatórias independentes com variância σ^2 , então a variância de Z_i é dada por

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma^2 \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) \left(1 - (1 - \lambda)^{2i} \right) \quad (6)$$

Para o cálculo do limites de controle são usadas as seguintes equações:

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2 - \lambda} \left(1 - (1 - \lambda)^{2i} \right)}; \quad (7)$$

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

$$\text{Linha central} = \mu_0 \quad (9)$$

onde L é a amplitude dos limites de controle. Para o parâmetro L é freqüente ser usado igual aos limites 3σ (três sigmas usuais) (MONTGOMERY, 2004)

3. AUTOCORRELAÇÃO E NORMALIDADE

Para ser possível a utilização de qualquer tipo de gráfico de controle duas suposições devem ser validadas. A primeira suposição é a da independência das amostras, ou seja, as amostras não devem apresentar nenhum tipo de correlação. A segunda é a de que os dados sejam normalmente distribuídos (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2004; MONTGOMERY, 2004; SAMOHYL, 2009).

A suposição mais importante aos gráficos de controle é a independência das observações, pois mesmo que a suposição de normalidade seja violada em grau moderado esses gráficos ainda funcionam razoavelmente, ao contrario de quando o fundamento de independência das amostras é quebrado. Quando os valores da característica da qualidade possuem algum grau de autocorrelação, mesmo que pequeno, a probabilidade de uma observação cair fora do limites de controle, com o processo sob controle, aumenta e compromete a credibilidade desta ferramenta, pela ocorrência elevada de alarmes falsos (MONTGOMERY, 2004).

Atualmente as empresas dificilmente verificam estas suposições antes de implantar o CEP, elas utilizam os gráficos de controle estatístico muitas vezes de forma errônea, não aproveitando os benefícios que essa ferramenta pode trazer. Vale ressaltar que em medições

cujas observações são feitas em um curto espaço de tempo e com elevado grau de automação as chances desses valores serem autocorrelacionados multiplicam-se, ratificando a importância da análise da distribuição das amostras e sua independência.

Duas abordagens são aplicadas no sentido de tratar a autocorrelação dos dados. Na primeira abordagem são usados os dados originais, mas devem-se ajustar os limites de controle para absorver a autocorrelação, é o chamado alargamento dos limites. A segunda defende uma abordagem de plotagem dos resíduos de um modelo de série temporal no gráfico de controle padrão (MONTGOMERY, 2004). Esse modelo será usado neste trabalho.

Uma série temporal é uma realização particular de um processo estocástico gerado pela passagem sucessiva de um processo ruído branco em uma sequência de dois filtros lineares, um estável e outro instável. Quando se tem uma série não-estacionária é necessário torná-la, para isto, uma das formas é utilizar o método da diferenciação discreta (RUSSO; CAMARGO; FILHO, 2007).

Um modelo de série temporal pode ser escrito da seguinte forma:

$$x_t = \xi + \Phi x_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (10)$$

Onde ξ e Φ e $(-1 < \Phi < 1)$ são constantes desconhecidas e ε_t são independentes e normalmente distribuídos e com média zero e desvio padrão σ . Este modelo é chamado de modelo autorregressivo de primeira ordem. Ao adotar-se $\hat{\Phi}$ como uma estimativa de Φ obtida através da análise de dados amostrais extraídos do processo e \hat{x}_t o valor ajustado de x_t , os resíduos e_t do processo são expressos por :

$$e_t = x_t - \hat{x}_t. \quad (11)$$

O modelo será adequado se os resíduos são aproximadamente normais e independentes com média zero e variância constante. Assim, podem ser aplicados os gráficos de controle convencionais à sequência de resíduos. (MONTGOMERY, 2004).

4. METODOLOGIA

Este trabalho configura-se numa pesquisa aplicada, pois gera conhecimentos para aplicação prática e direcionados à solução de problemas específicos. A abordagem é quantitativa, visto que para alcançar os objetivos propostos são analisados os resultados obtidos. Todo tratamento estatístico dos dados é realizado com ambiente GNU R (R Core Development Team, 2010) com auxílio dos pacotes *qcc* - Quality Control Charts (SCRUCCA, 2004), para construção dos gráficos de controle, e *forecast* (HYNDMANN, 2011) para estimação do modelo ARIMA. O pacote *forecast* dispõe de procedimentos automáticos de escolha de um modelo, de acordo com o menor AIC (*Akaike Information Criteria*) encontrado.

Na Figura 1 é demonstrado um fluxograma com os passos que foram utilizados para a aplicação do controle estatístico nos dados de turbidez.

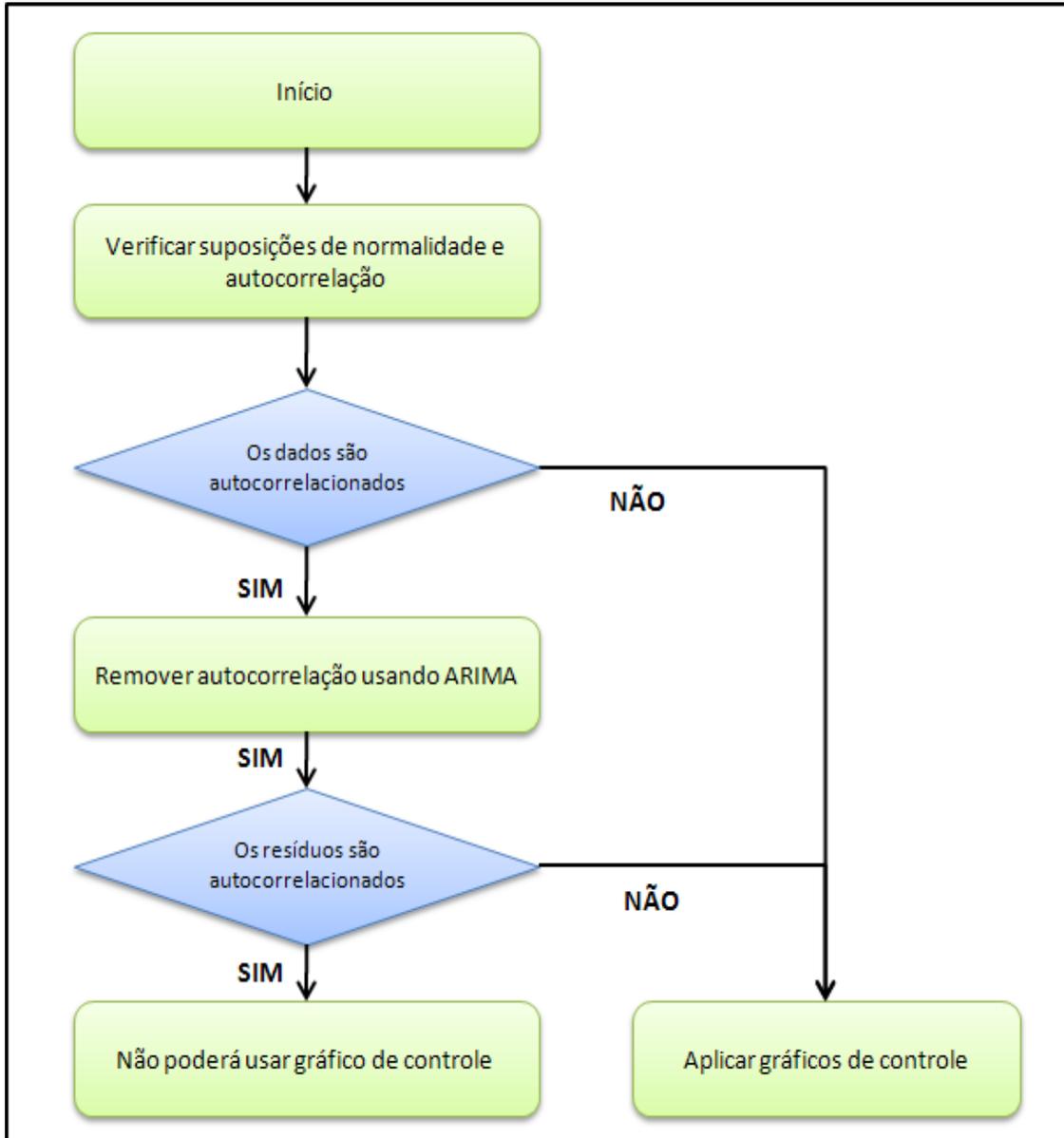


Figura 1: Fluxograma com os passos que foram utilizados para a aplicação do controle estatístico nos dados de turbidez

5. DESCRIÇÃO DA EMPRESA E DOS DADOS ANALISADOS

A empresa estudada se localiza em Joinville, e tem como objetivo principal o tratamento e a distribuição de água potável, além da coleta e tratamento de esgotos. Atualmente, o abastecimento de água é realizado por duas unidades de tratamento, com capacidade nominal de tratamento de 2.050 l/s. Esta unidade é responsável por 70% do abastecimento de água de Joinville. Os dados de turbidez analisados neste trabalho foram retirados da ETA Cubatão com capacidade de 1.500 l/s.

Turbidez é o estado em que a água se encontra, causado pela presença de partículas em suspensão, ou seja, sólidos suspensos, finamente divididos ou em estado coloidal, e de organismos microscópicos. A turbidez de causa natural não traz inconvenientes sanitários diretos. Porém, é esteticamente desagradável na água potável, e os sólidos em suspensão

podem servir de abrigo para microrganismos patogênicos. Entretanto, a turbidez de origem antropogênica pode estar associada a compostos tóxicos e organismos patogênicos causando problemas mais sérios (VON SPERLING,1996). Diariamente a cada meia hora é retirado uma amostra de água para verificar nível de flúor, cloro, turbidez, entre outras variáveis. Os dados analisados (Fase 1) correspondem a 37 observações, foram coletados no dia 01/01/2009 e estão apresentados na Tabela 1.

Hora	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00
Valor	0,47	0,5	0,46	0,51	0,55	0,46	0,48	0,47
Hora	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00
Valor	0,48	0,44	0,43	0,44	0,53	0,62	0,59	0,55
Hora	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00
Valor	0,51	0,55	0,51	0,48	0,38	0,37	0,35	0,33
Hora	17:30	18:00	18:30	19:00	19:30	20:00	20:30	21:00
Valor	0,3	0,34	0,33	0,35	0,35	0,32	0,3	0,27
Hora	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30			
Valor	0,26	0,29	0,28	0,28	0,3			

Fonte: Águas de Joinville

Tabela 1- Turbidez da Água

Esses dados serão utilizados para a definição dos limites de decisão utilizados nos gráficos de controle. O limite máximo de turbidez para qualquer amostra pontual, definido pela legislação (BRASIL, 2004) na saída da Estação de Tratamento de Água é de 1 UT (unidades de Turbidez).

6. RESULTADOS E ANÁLISE

Na Figura 2 está o gráfico da série temporal dos dados e os gráficos das funções de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial amostral (PACF). Verifica-se que os dados são autocorrelacionados, não atendendo a suposição de independência das amostras. Podemos utilizar varias formas de verificar a normalidade dos dados. Neste trabalho foi aplicado o teste Jarque-Bera e os dados podem ser considerados normais ao nível de 5% (p-valor = 0,3053).

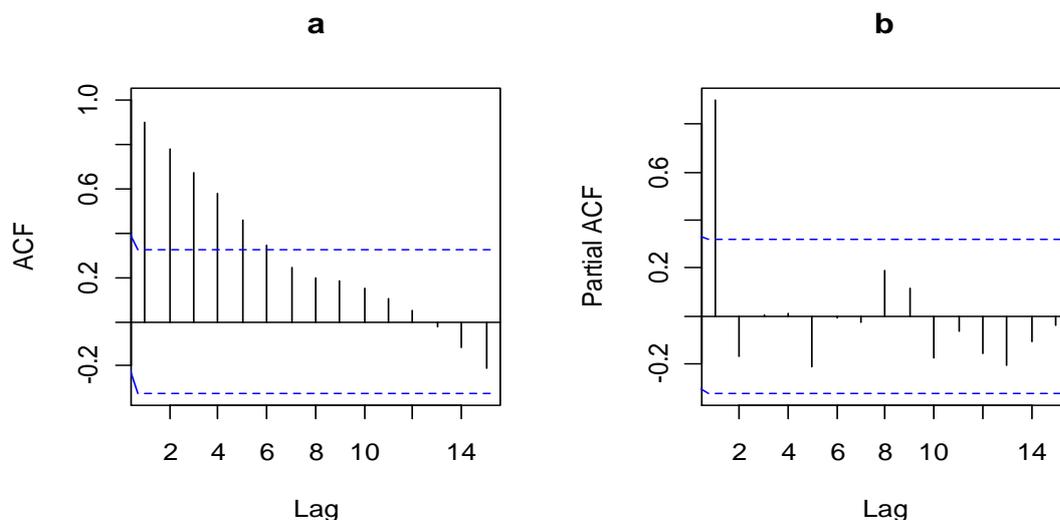


Figura 2: Gráficos da função de autocorrelação (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) dos dados de turbidez.

Aos dados originais foram aplicados gráficos de controle para medidas individuais X de Shewhart (Figura 3), CUSUM (Figura 4a) e EWMA (Figura 4b), sem considerar a autocorrelação. Podem ser visualizados nas Figuras 3, 4a e 4b, pontos além dos limites de controle. Neste trabalho o valor alvo deve estar de acordo com a legislação vigente. Para todos os gráficos o ARL_0 é 370. Os gráficos tipos Shewhart serão convencionais, com limites 3σ . O gráfico CUSUM tem limite de decisão igual a $h = 4,8$ (para manter o ARL_0 próximo de 370) e $K = 0,5$. O gráfico EWMA tem $\lambda = 0,2$ e $L = 3,0$.

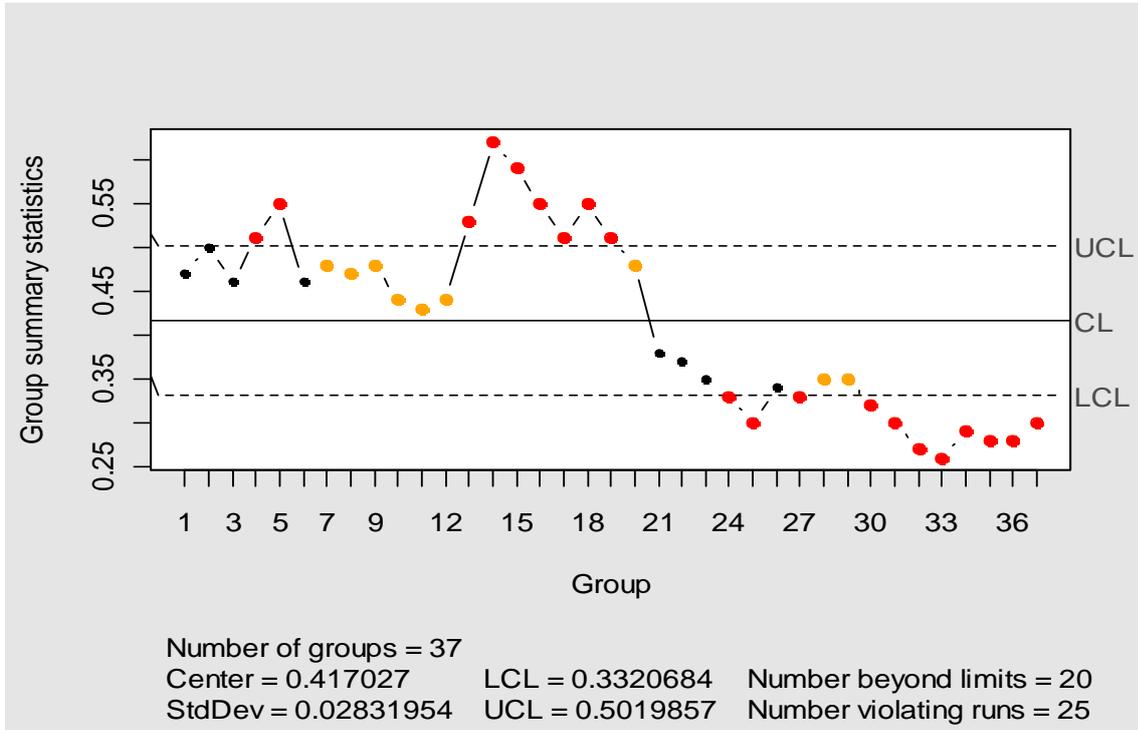


Figura 3: Gráfico \bar{X} de Shewhart para Observações Individuais

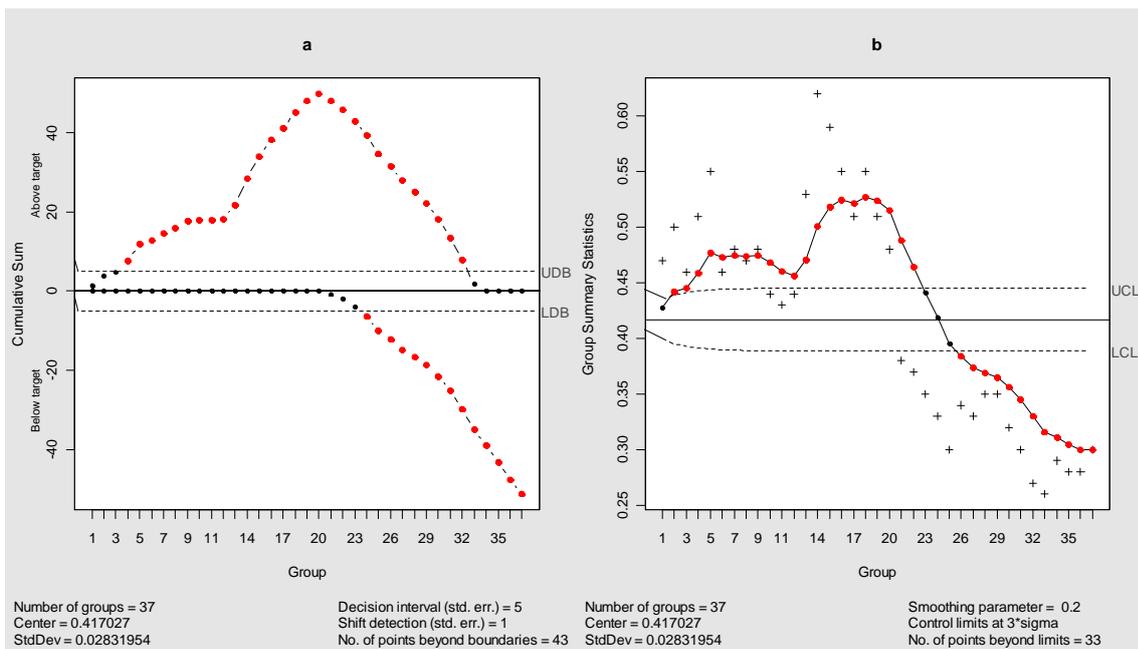


Figura 4: Gráfico CUSUM (a) e EWMA (b) aplicado aos dados observados.

Ajustou-se um modelo ARIMA (0,1,0), com um erro padrão estimado de 0,001642 e percentual médio absoluto (MAPE) de 7,28%. O modelo mostrou-se adequado, pois os resíduos apresentam uma distribuição próxima à distribuição normal (p-valor =0,156) e não eram autocorrelacionados. Com isso pode-se continuar o desenvolvimento do controle estatístico de processo, para o monitoramento da variável, sem que os resultados sejam alterados pela quebra das suposições iniciais.

Assim, na Figura 5 encontra-se um gráfico do tipo Shewhart, na Figura 6a. um gráfico CUSUM e na Figura 6b. um gráfico EWMA. Estes gráficos foram aplicados aos resíduos do modelo. Além dos dados para calibração (Fase I) foram incluídas algumas amostras subsequentes para monitoramento.

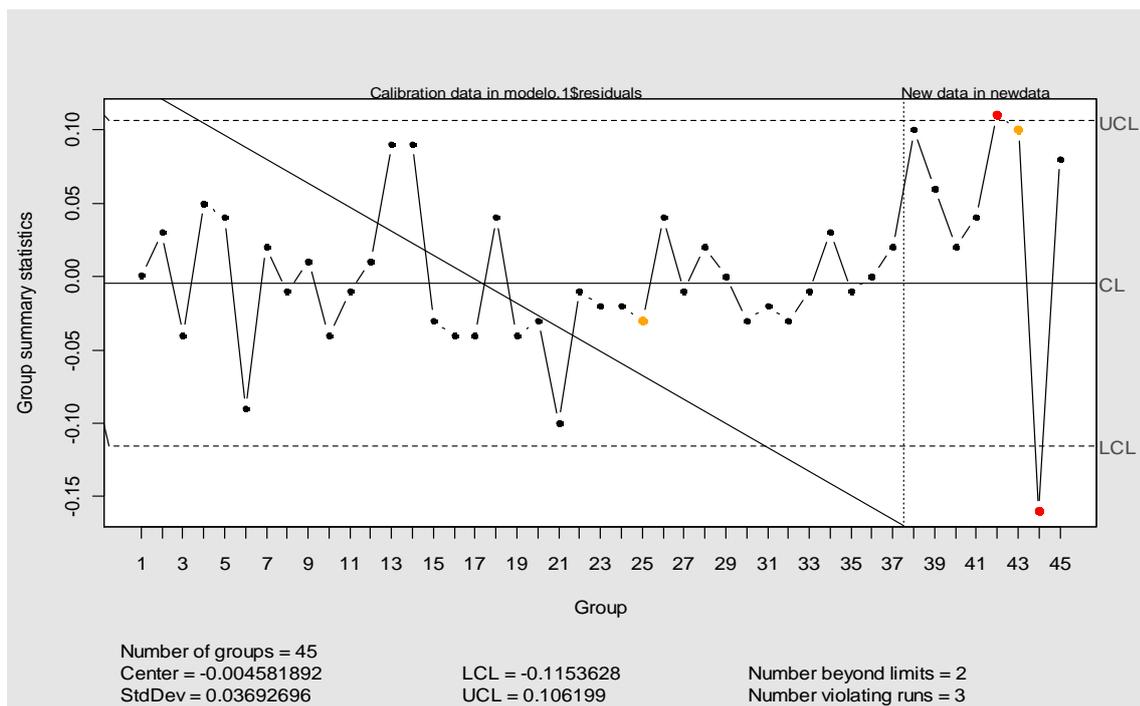


Figura 5: Gráfico \bar{X} de Shewhart para Observações Individuais aplicado aos resíduos do modelo

Para as amostras de no. 1 a 37, correspondente a Fase I (Figura 5) pode-se verificar, que processo está completamente sobre controle estatístico, diferentemente do primeiro caso quando foi plotado o gráfico sem levar em conta a autocorrelação (Figura 3). A mesma situação ocorre para os gráficos CUSUM (Figuras 4a e 5a) e EWMA (Figura 4b e 5b).

Assim, com o processo controlado, os limites de controle gerado pelo processo podem ser utilizados para o monitoramento dos dados seguintes. Assim, nesta fase posterior, pode-se observar que há indícios de que o processo está fora de controle estatístico, embora atenda os parâmetros da legislação. O gráfico tipo Shewhart e o gráfico EWMA sinalizam na amostra de número 42 (Figuras 5 e 7) e o gráfico CUSUM na 41ª amostra (Figura 6). Neste caso, o gráfico CUSUM sinalizou antes e indica desde a 37ª amostra uma tendência de aumento na média. O gráfico EWMA (Figura 7), apesar de sinalizar uma amostra após, também evidencia essa tendência de aumento. No gráfico tipo Shewhart (Figura 5) não mostra esta tendência de aumento. As regras suplementares (MONTGOMERY, 2004) podem auxiliar neste sentido, mas como implicam no aumento do número de alarmes falsos, não foram aplicadas neste trabalho.

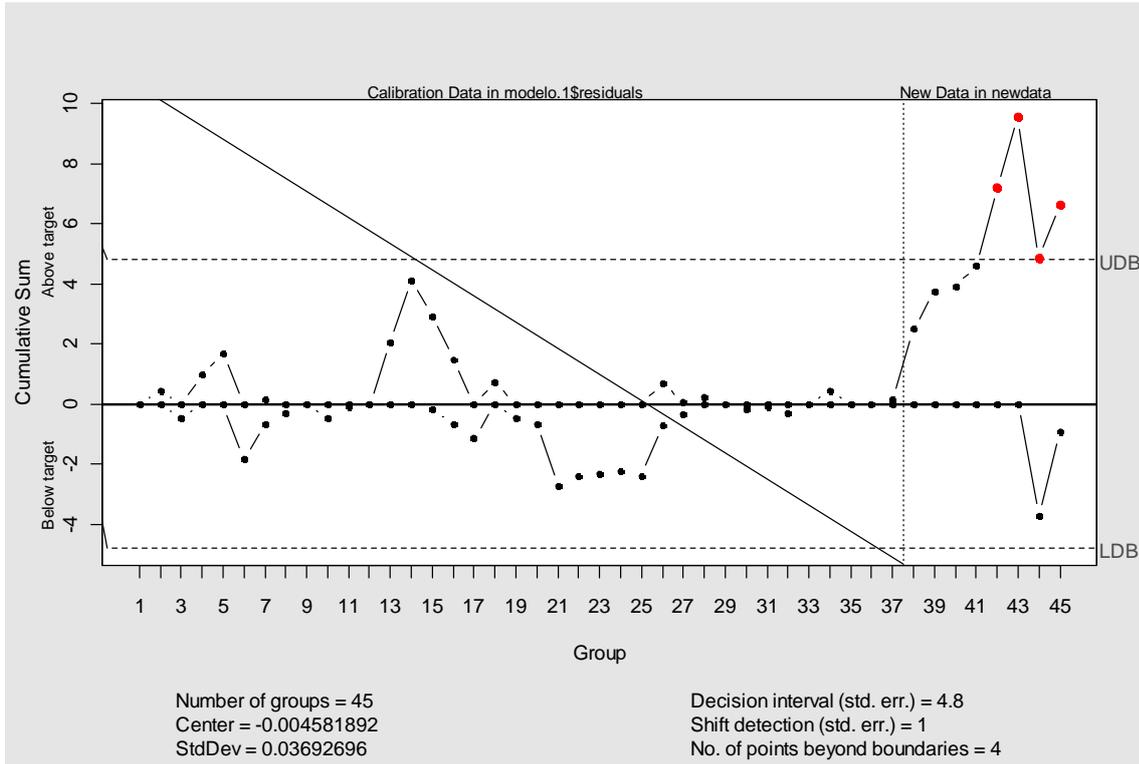


Figura 6: Gráfico CUSUM aplicado aos resíduos do modelo

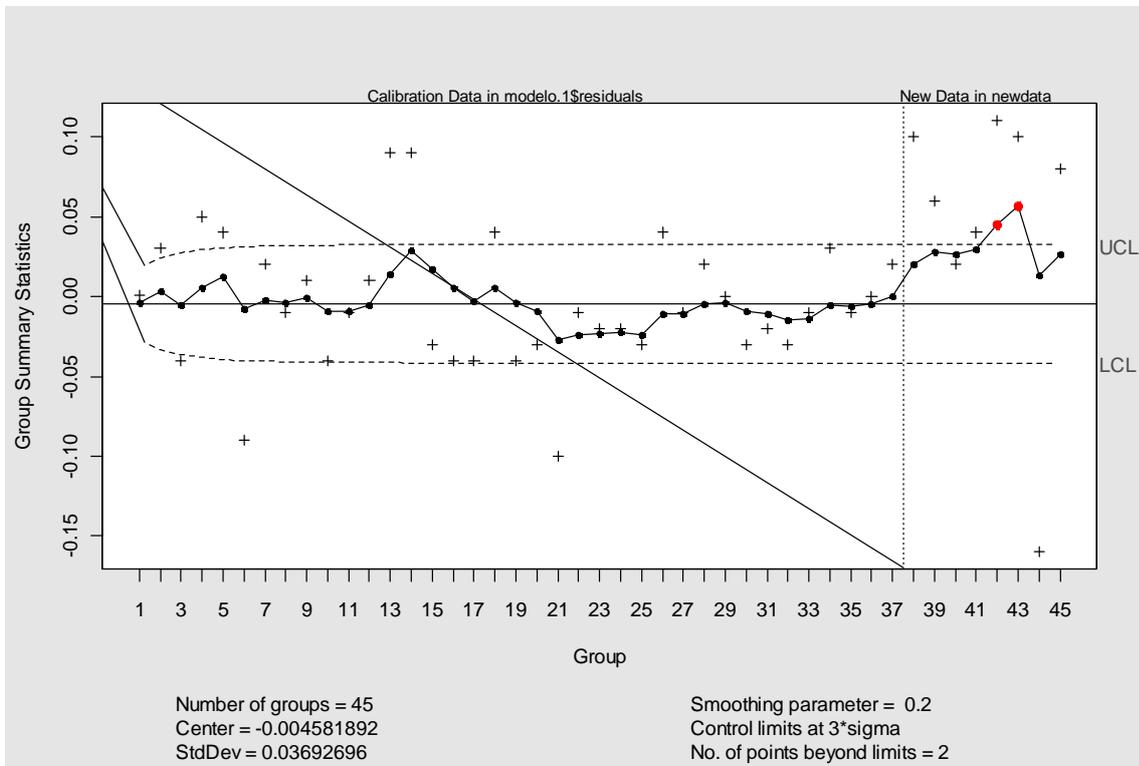


Figura 7: Gráfico EWMA aplicado aos resíduos

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram comparados gráficos como o X para medidas individuais de Shewhart, o de soma acumulada (CUSUM) e o de média móvel exponencialmente ponderada (EWMA). Assim mediante a comparação dos mesmos, pode-se recomendar um método para monitorar a variável turbidez em uma estação de tratamento. Tanto os gráficos CUSUM como EWMA tem como pontos positivos detectar mais rapidamente pequenos desvios e dão informações sobre a tendência do processo, sendo indicados para o monitoramento deste processo. O gráfico EWMA ainda tem uma vantagem adicional: a de ser robusto à hipótese de normalidade. Neste trabalho é enfatizado também, a importância da verificação das suposições de normalidade e independência das amostras, antes da utilização destes gráficos de controle. Demonstrou-se, a partir de gráficos, que ao aplicarmos gráficos de controle diretamente aos dados autocorrelacionados, implica num número maior de alarmes falsos, ratificando a suposição de que gráficos de controle não funcionam bem com esse tipo de problema.

Para tratar a autocorrelação foi aplicado um modelo ARIMA e posteriormente gráficos de controle aos resíduos do modelo. A metodologia utilizada permitiu definir algumas considerações importantes, tais como uma proposta de monitoramento do nível de turbidez da água através do Controle Estatístico de Processo. Além disso, comparou-se a sensibilidade existente entre os gráficos de controle de Shewhart, CUSUM e EWMA na detecção de pequenas mudanças na turbidez da água e verificando se realmente estão dentro das especificações impostas pela norma.

Para a continuidade dos trabalhos sugere-se realizar um acompanhamento estatístico durante um período completo, com auxílio de um diário de bordo para facilitar a identificação das causas dos pontos fora de controle.

É importante salientar que a utilização de métodos de previsão, como, ARIMA, aplicação de gráficos de controle estatístico aos resíduos, são sofisticados, e, portanto, podem ser de difícil interpretação, necessitando de pessoas especializadas para tal fim. Para empresas que estejam iniciando esses trabalhos aconselha-se também a análise da utilização de outras técnicas para tratar a autocorrelação, como limites de controle alargados ou diminuir a frequência de retirada de amostras.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. C. *Gráficos de Controle CUSUM: um enfoque dinâmico para a análise estatística de processos*. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

ALVES, C. C.; SAMOHYL, R. W. . *O monitoramento de processos industriais via gráficos de controle CUSUM*. Revista UNIVILLE, v. 10, p. 72-80, 2005.

BRASIL. **Ministério da Saúde**. Secretaria de Vigilância em Saúde, Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria no. 518/2004 do Ministério da Saúde. Disponível em: <http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518_2004.pdf> Acesso em: 20/08/2010.

CAMPOS, V. F. *TQC: Controle da qualidade total – no estilo japonês*. 2.ed. Fundacao Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG. Rio de Janeiro: Ed. Bloch, 1999.

CARVALHO, M.M. *Gestão da Qualidade. Teoria e Casos*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2005. v. 1. 357 p.

COSTA, A. F. B. C.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. *Controle estatístico de qualidade*. 2. ed. Sao Paulo: Editora Atlas, 2004.

HYNDMANN, R. J.; KHANDAKAR, Y. *Automatic time series forecasting: The forecast package for R.* Journal of Statistical Software, v.27, n.3, p.1-22, 2008.

HYNDMANN, R. J. *forecast: forecasting functions for time series.* R package version 2.16, 2011. URL: <http://CRAN.R-project.org/package=forecast>

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao controle estatístico da qualidade.* Sao Paulo: Editora LTC, 2004.

MORAIS, M.C. E PACHECO, A. *Combined CUSUM-Shewhart schemes for binomial data.* Economic Quality Control 41, v.21, p. 43-57, 2006

PAGE, E.S. *Continuous Inspection Scheme*”, Biometrics, vol.41, p.100-115, 1954.

R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing.* R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <http://www.r-project.org>, 2009

RODRIGUES, M. V. C.. *Ações para a qualidade: gestão estratégica e integrada para a melhoria dos processos na busca da qualidade e competitividade.* 3ª Ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2010.

RUSSO, S. L.; CAMARGO, M. E.; FILHO, W. P.. *Previsão de Vendas através da Metodologia de Box & Jenkins: Um Estudo de Caso.* In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007, Foz do Iguaçu. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu: ABEPRO, 2007. v. p. 1-9.

SAMOHYL, R. W. . *Controle Estatístico de Qualidade.* 1. ed. São Paulo: Elsevier Campus, 2009. v. 1. 275 p.

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

VON SPERLING, M. *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.* 2. ed. Minas Gerais, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade federal de Minas Gerais. 1996. 243p.