



I-066 - PROPOSTA DE GRÁFICO DE CONTROLE COM LIMITES FLUTUANTES COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NO CONTROLE E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DA ETA

Marcelo Dalcul Depexe⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Santa Maria, Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atua na área de Desenvolvimento Operacional da SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná.

Francisco José Azevedo Freire

Técnico em edificações pela Escola Técnica Federal da Paraíba, graduado em matemática pela Universidade Estadual de Maringá e Pós-graduado em Saneamento pelo ISAE/FGV, em Curitiba. Trabalha na Sanepar há 18 anos, tendo atuado nas unidades de obra e manutenção de redes. Atualmente desenvolve atividade na área industrial, com planejamento e controle de produção.

Ettiana Fadul Vianna

Acadêmica de Engenharia de Produção pela Universidade Estadual de Maringá, Estagiária da área de Engenharia da Sanepar.

Endereço⁽¹⁾: Rua Eng. Antônio Batista Ribas, 151- Tarumã. CEP 82.800-130 - Curitiba – PR Tel: (41) 3330-7218
- e-mail: mdepexe@sanepar.com.br

RESUMO

A redução de perdas de água em sistemas de abastecimento passa pela melhoria da eficiência operacional dos processos. É necessária, assim, a aplicação de ferramentas e métodos mais eficazes para o monitoramento e controle operacional. O objetivo do presente trabalho é apresentar uma proposta de gráfico de controle com limites flutuantes, para aplicação no controle e programação da produção de uma estação de tratamento de água. Assim, procura-se contornar o efeito não-aleatório provocado pela formação de ciclos, tanto das horas ao longo do dia quanto dos dias ao longo das semanas, o que inviabiliza a aplicação direta do Controle Estatístico de Processos (CEP) para o controle horário da produção. A utilização do controle horário proposto possibilita a rápida tomada de decisão em relação à produção e uma aplicação mais eficaz dos conceitos relativos ao CEP. Deste modo, evita-se a produção acima da demanda, com conseqüente redução do volume de perdas de água, bem como a redução do consumo de energia elétrica e de produtos químicos utilizados no tratamento da água.

PALAVRAS-CHAVE: CEP, gráfico de controle, produção.

INTRODUÇÃO

Atualmente existe uma constante busca por uma maior eficiência operacional por parte das empresas de saneamento, com o objetivo de reduzir as perdas de água, preservar os recursos hídricos e garantir o abastecimento público. Conforme Moraes e Almeida (2002), a ampliação dos sistemas de abastecimento de água para o aumento da oferta é questionável, devido às implicações financeiras, sócio-econômicas e ambientais. Em muitos casos, a redução de perdas tida como uma alternativa mais econômica e racional do que construção de novos sistemas.

Para se obter uma melhor eficiência operacional, existe a necessidade de melhores controles dos processos. Entende-se por processo “qualquer conjunto de condições, ou causas que, agindo juntas, geram um dado resultado” (PALADINI, 1990, p. 128), ou seja, processo é um grupo de atividades inter-relacionadas e caracterizadas por um conjunto de entradas específicas, com tarefas que agregam valor e que produzem um conjunto de resultados específicos.

A área industrial dispõe de diversas técnicas e ferramentas para a otimização de processos, com vários enfoques diferentes. Salienta-se neste campo algumas ferramentas utilizadas para a melhoria da qualidade dos processos, com o gráfico de pareto, o diagrama de causa e efeito, a matriz GUT e o Controle Estatístico de Processos (CEP).

O CEP tem sido utilizado em diversas áreas, para o controle dos mais variados produtos e processos, conforme Stoumbos *et al.* (2000). Além da vasta aplicação na área industrial, existem aplicações na área de saneamento, por exemplo, na análise de parâmetros da qualidade da água (NETZEL, 2000), (MITSAKOS e PSARAKIS, 2005), (SMETI, KORONAKIS e GOLFINOPOULOS, 2007), (SMETI *et al.*, 2007) e na análise de parâmetros da qualidade do esgoto tratado (AIZENCHTADT, INGMAN e FRIEDLER, 2008). Além disso, os gráficos de controle também são aplicados na análise de variáveis operacionais, como a vazão mínima noturna (KUOKAWA e BORNIA, 2002), o volume, nível e pressão (NALESSO e OLIVEIRA, 2007) e o volume consumido pelos clientes (SANTOS, 2007).

Segundo Montgomery e Runger (2003), é possível que durante a análise de um gráfico de controle se identifique padrões sistemáticos ou não-aleatórios. Para se identificar as causas desses comportamentos do processo requer experiência e conhecimento do processo, ou seja, não basta o conhecimento dos princípios estatísticos, mas é necessário ter bom conhecimento sobre o processo analisado.

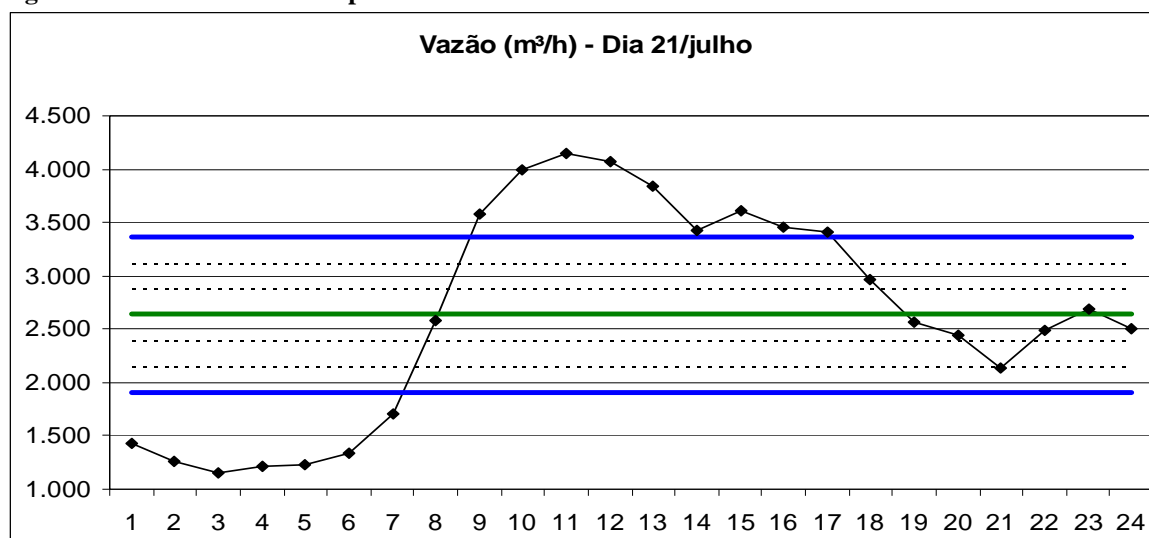
É conhecida a influência que fatores como a temperatura, umidade e precipitação exercem sobre o consumo de água da população. Desta forma, o volume de água a ser tratado e distribuído diariamente deve atender a esta demanda, que possui características sazonais. Além dos fatores meteorológicos, fatores como o dia da semana, feriados, férias e horário devem ser considerados para se realizar uma previsão de consumo (SANTOS, PEREIRA FILHO e GINEZ, 2007; FALKENBERG, 2005; ZHOU *et al.*, 2002). Outros fatores também podem influenciar a variação do consumo ao longo do tempo, como aspectos sócio-econômicos relacionados a atividades industriais e de outras instituições, conforme Zhou *et al.* (2000).

Devido a esta característica sazonal da demanda, é possível a formação de ciclos nos gráficos de controle de volume produzido, distribuído e micromedido ao longo do ano. Tal fenômeno também pode ser observado em valores diários, devido a sazonalidade semanal provocada pelos fatores já mencionados. Ocorre, desta maneira, uma flutuação da média ao longo do tempo, de modo que os dados não sejam independentes entre si entre amostras consecutivas.

Desta forma, esses dados não são totalmente aleatórios, uma vez que existe a influência de um fator intrínseco ao processo que causa a flutuação da média dos dados (DEPEXE e SACHET, 2007). Este fenômeno é denominado autocorrelação e é objeto de estudo de diversos pesquisadores, como por exemplo, Alwan (1992), Boyles (2000), Lobato, Nankervis e Savin (2002), Russo (2002), Jiang (2004), Jarrett e Pan (2007).

A flutuação da média é muito mais evidente ao se analisar um gráfico de vazão horária da produção de uma estação de tratamento de água, por exemplo. O regime de produção depende da demanda de água pela população, que é variável ao longo do dia, como se observa na Figura 1. Assim, a formação de ciclos inviabiliza a utilização de gráficos de controle usuais para um período de 24 horas.

Figura 1 Gráfico de Controle para vazão horária

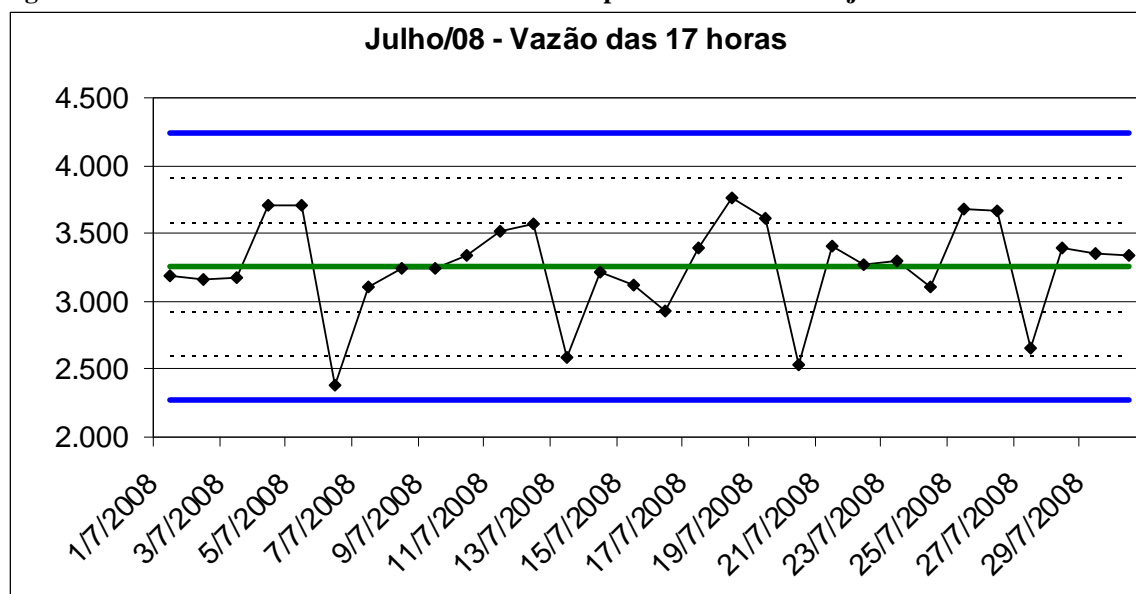




A formação de ciclos indica que a variável analisada não é aleatória, ou seja, existe uma interdependência dos dados. No entanto, de acordo com Oakland (2003), o pressuposto básico para a utilização do Controle Estatístico de Processos é que os dados sejam independentes entre si e normalmente distribuídas. Portanto, a formação de ciclos pode prejudicar a análise dos gráficos de controle. Mesmo que os dados não sigam uma distribuição normal, os gráficos de controle podem ser utilizados adequadamente. Entretanto, a violação da hipótese de independência das observações reduz a aplicabilidade dos gráficos convencionais (COSTA, EPPRECHT e CARPINETTI, 2005).

Uma vez que a curva de vazão é parecida para todos os dias, uma alternativa para solucionar este problema é a elaboração de um gráfico de controle para cada hora do dia. A Figura 2 apresenta um gráfico de controle da vazão das 17 horas para todos os dias do mês de julho de 2008.

Figura 2 Gráfico de Controle de vazão das 17 horas para todos os dias de julho/08



Pode-se observar que, mesmo considerando apenas um determinado horário, ainda existe uma variação cíclica da vazão, de acordo com o dia da semana. No exemplo da Figura 2, há pontos próximos ao Limite Inferior de Controle a cada sete dias, que correspondem aos domingos, que é o dia de menor consumo na cidade analisada. Além disso, existe o inconveniente de ter-se que trabalhar com 24 gráficos diferentes todos os dias. Como este gráfico apresenta apenas as vazões para um determinado horário em vários dias consecutivos, se perde a referência do comportamento total do processo de um determinado dia.

Para resolver este problema, propõe-se a utilização de um gráfico de controle com limites flutuantes, de modo a acompanhar a variação da média ao longo das horas, para cada dia da semana. Assim, procura-se contornar o efeito não-aleatório provocado pela formação de ciclos, tanto das horas ao longo do dia quanto dos dias ao longo das semanas.

MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta do presente trabalho é calcular os limites de controle para cada hora do dia, a partir de dados históricos separados por dia da semana e assim elaborar um gráfico para controle diário da vazão. Deste modo, é como se fossem elaborados 24 gráficos de controle para cada dia e depois estes gráficos fossem sobrepostos para a análise horária.

Os limites de controle são determinados conforme a formulação do gráfico de controle de valor individual e amplitude móvel, expressas na equação 1 (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).



$$\begin{aligned}LSC_x &= \bar{x} + E_2 \cdot \bar{R}m \\LM_x &= \bar{x} \\LIC_x &= \bar{x} - E_2 \cdot \bar{R}m\end{aligned}\quad \text{Equação (1)}$$

LSC = Limite Superior de Controle

LM = Linha Média

LIC = Limite Inferior de Controle

\bar{x} = média das observações

$\bar{R}m$ = amplitude móvel média

$E_2 = 2,66$

A série histórica utilizada para o cálculo dos limites de controle é composta pelos dados de um ano (últimas 52 semanas), agrupados por dia da semana e por hora. Desta forma, foram calculados os limites para 168 gráficos de controle. Assim, a linha média é uma estimativa da curva de demanda, que é utilizada na programação e controle da produção diária.

A programação da produção é baseada nas curvas de demanda levantadas com base no histórico. Cabe salientar que, para a estação de tratamento de água, a demanda é igual ao volume total de água distribuído para o sistema, que corresponde ao volume consumido pelos clientes e pelo volume de perdas reais (vazamentos e extravasamentos). Caso se mantenha sempre a mesma rotina de produção, inevitavelmente se incorrerá em um maior volume de perdas, pois o consumo dos clientes é variável de acordo com o horário e dia da semana.

O método proposto foi aplicado na estação de tratamento de água da cidade de Maringá-PR, que produz uma média mensal de 2,2 milhões de metros cúbicos de água tratada, para o abastecimento de uma população aproximadamente 330 mil habitantes.

RESULTADOS

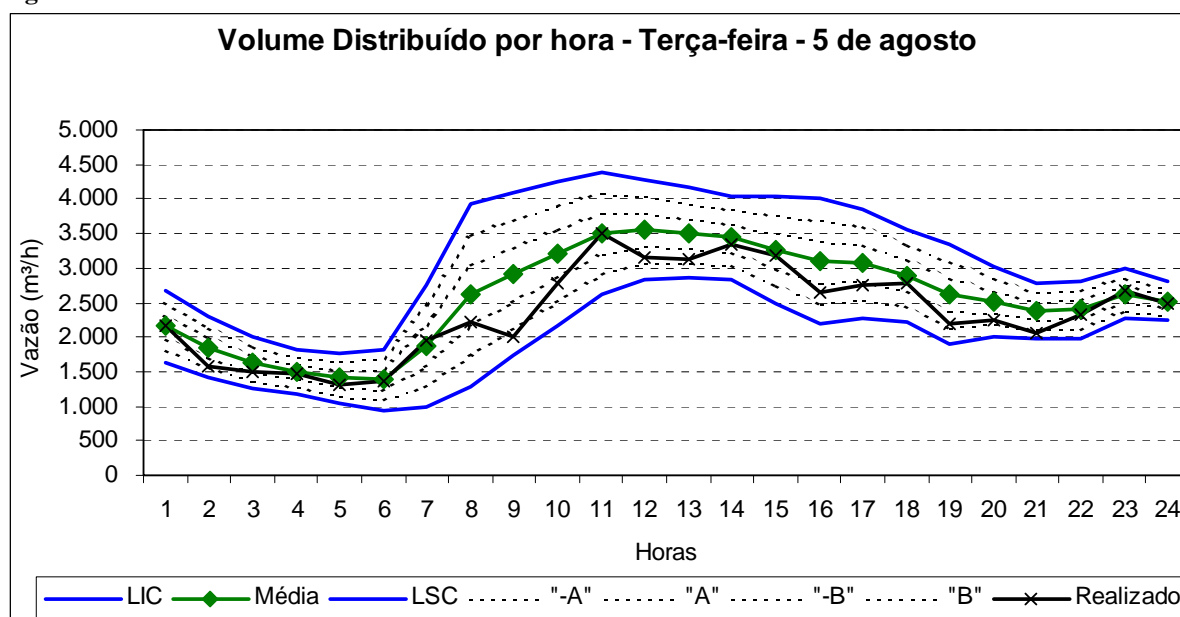
A Figura 3 demonstra um exemplo de gráfico de controle com limites flutuantes para o dia 5 de agosto. A linha média é a representação da estimativa da curva de demanda. Existe uma programação da produção a ser seguida, com horários para acionamento de bombas e acompanhamento do nível do reservatório, de modo que a curva projetada seja realizada.

Paralelamente à elaboração do gráfico de controle, com a previsão da vazão horária, existe uma simulação do comportamento do nível do reservatório ao longo do dia. Esta previsão é baseada no nível ao final do dia anterior, na previsão da vazão de adução (que depende do número de bombas em funcionamento), na curva de demanda estimada (linha média) e no volume previsto para lavagem de filtros e decantadores.

Assim, o acompanhamento do nível do reservatório funciona como uma medida em tempo real da demanda, o que fornece subsídios para a tomada de decisões quanto à programação realizada. Caso a demanda real seja menor que a prevista, a tendência é que os pontos fiquem abaixo da linha média e que o nível do reservatório permaneça acima do previsto. Neste caso, o operador pode tomar a decisão de desligar um conjunto moto-bomba mais cedo e evitar o desperdício de água.

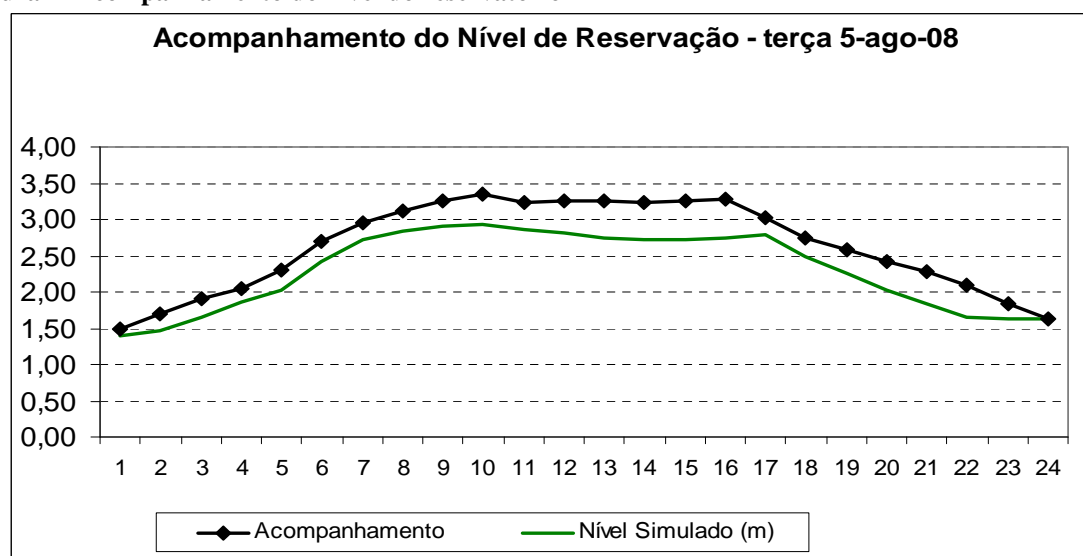


Figura 3 Gráfico de controle com limites flutuantes



No exemplo da Figura 3 a vazão manteve-se próxima da estimada até as 7 horas, aproximando-se do limite inferior de controle às 9 horas. Isso ocorreu devido à ação do operador, que decidiu desligar uma das bombas da 7h até às 9h35min, uma vez que o nível do reservatório estava acima do previsto, conforme a Figura 4. Neste dia houve queda na temperatura e chuva moderadas, o que levou à redução da demanda em relação à média histórica. Deste modo, a produção dentro dos parâmetros programados resultou em excesso de água, verificado pelo aumento além do previsto do nível do reservatório.

Figura 4 Acompanhamento do nível do reservatório



Além de desligar uma bomba por aproximadamente 1,5 hora durante o período da manhã, o operador também antecipou para as 16h o desligamento de outra bomba, que estava programado para as 17h. Desta forma, se reduziu a vazão de produção e o consumo de energia elétrica, sem prejuízo ao abastecimento da cidade. Como o nível do reservatório estava acima do previsto às 22h, não houve a necessidade de acionar outras duas bombas, conforme estava previsto. Ao final das 24 horas, o nível do reservatório estava apenas 2 cm abaixo do previsto na simulação. Portanto, a intervenção do operador ao desligar algumas bombas ao longo do dia possibilitou uma resposta em tempo real à demanda, evitando a produção em excesso, que inevitavelmente aumentaria o volume perdas.



CONCLUSÕES

A utilização do controle horário proposto possibilita a rápida tomada de decisão em relação à produção, com o objetivo de produzir apenas o volume que é necessário. Uma vez que a curva da linha média é projetada com base no histórico das vazões horárias, qualquer variação na demanda pode ser rapidamente detectada. O gráfico proposto possibilitou uma melhor aplicação do Controle Estatístico de Processos no acompanhamento da produção da ETA. Deste modo, evita-se a produção acima da demanda, com conseqüente redução do volume de perdas de água, bem como a redução do consumo de energia elétrica e de produtos químicos utilizados no tratamento da água.

O monitoramento do nível do reservatório, associado à demanda horária, possibilitou derrubar a tese de se produzir o máximo possível para manter o reservatório sempre cheio. Pode-se verificar uma mudança cultural entre os funcionários da ETA, que estavam habituados a produzir sempre com a vazão máxima para manter o nível do reservatório o mais elevado possível. A partir dos levantamentos do nível e da realização da programação da produção, foi possível explorar melhor o volume de reservação, da mesma forma como uma indústria utiliza um estoque de produtos acabados para compensar as variações da demanda.

Deste modo, é imprescindível o acompanhamento do nível do reservatório como medida para o comportamento da demanda, bem como a oscilação do nível é fundamental para a otimização do processo. Assim, tal prática se assemelha ao que é pregado pela filosofia da produção enxuta (*lean production*), adotada por empresas em todo o mundo, onde só produz conforme a demanda, ou seja, a denominada produção puxada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIZENCHTADT, Elena; INGMAN, Dov; FRIEDLER, Eran. Quality control of wastewater treatment: A new approach. *European Journal of Operational Research*, v. 189, n. 2, p. 445-458, 2008.
2. ALWAN, L.C. Effects of autocorrelation on control chart performance. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, v. 21, n. 4, p. 1025-1049, 1992.
3. BOYLES, Russell A. Phase I: Analysis for autocorrelated processes. *Journal of Quality Technology*, v. 32, n. 4, p. 395-409, 2000.
4. COSTA, Antonio Fernando Branco; EPPRECHT, Eugenio Kahn; CARPINETTI, Luiz Cesar Ribeiro. Controle estatístico de qualidade. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2005.
5. DEPEXE, Marcelo Dalcui; SACHET, Marlene Alves de Campos. Considerações sobre a utilização do controle estatístico de processos em empresas de saneamento e o efeito da autocorrelação. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2007. Anais. Belo Horizonte-MG, 2007. 15 p.
6. FALKENBERG, Alex Vieira. Previsão de consumo urbano de água em curto prazo. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
7. JARRETT, Jeffrey E.; PAN, Xia. The quality control chart for monitoring multivariate autocorrelated processes. *Computational Statistics & Data Analysis*, v. 51, n. 8, p. 3862-3870, 2007.
8. JIANG, Wei. Multivariate control charts for monitoring autocorrelated processes. *Journal of Quality Technology*, v. 36, n. 4, p. 367-379, 2004.
9. KUROKAWA, E.; BORNIA, Antonio Cezar. Uma proposta para utilização do controle estatístico do processo (CEP) através da carta X como uma ferramenta gerencial para a avaliação da vazão mínima noturna de um setor. In: PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERAÇÃO DE REDES DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, 2002, João Pessoa. v. 1.
10. LOBATO, I.N.; NANKERVIS, John C.; SAVIN, N.E. Testing for zero autocorrelation in the presence of statistical dependence. *Econometric Theory*, v. 18, n. 3, p. 730-743, 2002.
11. MITSAKOS, John; PSARAKIS, Stelios. On some applications of SPC techniques on water data. In: THE 7th HELLENIC EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER MATHEMATICS & ITS APPLICATIONS - HERCMA 2005 Conference Proceedings, Athens, Greece, 2005. 8 p.
12. MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Applied statistics and probability for engineers. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003. 706 p.
13. MORAIS, Danielle Costa; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Avaliação multicritério para adequação de sistemas de redução de perdas de água. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXII, 2002, Curitiba. Anais... Curitiba-PR, 2002. 8 p.



14. NALESSO, Mauro Tadeu Rezende; OLIVEIRA, Anderson Roberto de. Sistema de controle e análise de medições. In: XVIII ENCONTRO TÉCNICO AESABESP. 2007. Anais. São Paulo-SP, 2007. 8p.
15. NETZEL, Herivelton. Ganhos com a utilização de controle estatístico de processo (CEP) em estação de tratamento de água (ETA). Sanare – Revista Técnica da Sanepar. v.14, n.14, p. 95-104, 2000.
16. OAKLAND, John S. Statistical Process Control. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
17. PALADINI, E.P. Controle de Qualidade: uma abordagem abrangente. São Paulo: Atlas, 1990.
18. RUSSO, Suzana Leitão. Gráficos de controle para variáveis não-conformes autocorrelacionadas. 2002. 166p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
19. SANTOS, Cláudia Cristina dos; PEREIRA FILHO, Augusto José; GINEZ, Wagner Garcia. Características sazonais do consumo de água na região metropolitana de São Paulo e os impactos de variáveis ambientais. In: XVIII ENCONTRO TÉCNICO AESABESP. 2007. Anais. São Paulo-SP, 2007. 7p.
20. SANTOS, Mauro Antonio dos. A importância do uso das ferramentas da estatística no processo de medição do consumo de água. Estudo de caso: “queda do volume micro medido no Jd. Guerreiro - setor 711 do município de Cotia - SP”. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2007. Anais. Belo Horizonte-MG, 2007. 8p.
21. SMETI, Eleni M.; KORONAKIS, Demetrios E.; GOLFINOPOULOS, Spyridon K. Control charts for the toxicity of finished water-Modeling the structure of toxicity. Water Research, v. 41, n. 12, p. 2679-2689, 2007.
22. SMETI, E.M.; THANASOULIAS, N.C.; KOUSOURIS, L.P.; TZOUMERKAS, P.C. An approach for the application of statistical process control techniques for quality improvement of treated water. Desalination, v. 213, n. 1-3, p. 273-281, 2007.
23. STOUMBOS, Zachary; REYNOLDS JR, Marion R.; RYAN, Thomas P.; WOODALL, William H. The state of statistical process control as we proceed into the 21st century. Journal of the American Statistical Association, v. 95, n. 451, p. 992-998, 2000.
24. ZHOU, S.L.; McMAHON, T.A.; WALTON, A.; LEWIS, J. Forecasting daily urban water demand: a case study of Melbourne. Journal of Hydrology, v. 236, n. 3, p.153-164, 2000.
25. ZHOU, S.L.; McMAHON, T.A.; WALTON, A.; LEWIS, J. Forecasting operational demand for an urban water supply zone. Journal of Hydrology, v. 259, n. 1, p.189-202, 2002.