

Artigo Técnico

Tratamento de água para abastecimento humano: contribuições da metodologia Seis Sigma

*Treatment of water for human supply:
contributions of Six Sigma methodology*

**Paulo Henrique Mazieiro Pohlmann¹, Amanda Alcaide Francisco¹,
Marco Antônio Ferreira², Charbel José Chiappetta Jabbour³**

RESUMO

A metodologia Seis Sigma é uma estratégia de negócio baseada na tomada de decisão objetiva, considerando dados significativos e reais para a criação de metas viáveis, analisando a causa dos defeitos e sugerindo formas de eliminar a lacuna existente entre o desempenho de um processo e o desejado. Pela verificação da importância da integração entre o saneamento ambiental e a gestão de operações, buscou-se, por meio de uma simulação, realizar uma análise dos processos envolvidos no tratamento convencional de água sob a óptica da metodologia Seis Sigma. Considerando uma produção de 2,58 milhões de m³.mês⁻¹ e um Nível Sigma 3,0, o volume não conforme seria de 173,1 mil de m³.mês⁻¹. Se o Nível Seis Sigma de excelência fosse atingido, o volume não conforme seria de apenas 7,75 m³.mês⁻¹.

Palavras-chave: Seis Sigma; saneamento ambiental; Estação de Tratamento de Água.

ABSTRACT

The Six Sigma methodology is a business strategy based on making an objective decision, considering real and meaningful data for the creation of viable targets, analyzing the defects' cause and suggesting ways to eliminate the gap between the performance process and the desired goal. Through the verification of the importance of integration between the environmental sanitation and the management operations, it was attempted to, through a simulation, perform an analysis of the processes involved in conventional water treatment from the perspective of Six Sigma methodology. Considering a production of 2.58 million m³.month⁻¹ and a 3.0 Sigma level, the nonconforming volume would be 173.1 m³.month⁻¹. If the Six Sigma excellence level could be reached, the nonconforming volume would be 7.75 m³.month⁻¹.

Keywords: Six Sigma; environmental sanitation; Water Treatment Plant.

INTRODUÇÃO

Em meados dos anos 1980, a Motorola, multinacional americana do ramo de telecomunicações, encontrava-se em crise. As insatisfações e frustrações dos clientes cresciam como uma epidemia, motivadas principalmente por um sistema produtivo que não previa a satisfação do consumidor e pela baixa qualidade dos produtos. Nesse contexto, os elevados custos operacionais e a perda da participação no mercado frente aos produtos japoneses comprometiam a saúde financeira da empresa (LARSON, 2003).

Para findar essa problemática, foi desenvolvida, pelo engenheiro da Motorola, Bill Smith, no ano de 1986, a metodologia Seis Sigma. O Seis Sigma representa um programa de gestão da qualidade cuja finalidade é o controle das variações no processo produtivo para reduzir o número de defeitos para 3,4 por milhão de oportunidades, ou seja, 3,4 ppm. Em decorrência da análise dos processos internos da empresa, concluiu-se que grande parte do custo de fabricação estava associada às perdas e às falhas na produção, resultando em

¹Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Londrina - Londrina (PR), Brasil.

²Doutorando em Administração pela Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA-USP). Mestre em Administração pela Universidade Estadual de Londrina-Universidade Estadual de Maringá (UEL-UEM). Atualmente é Professor pela UTFPR. Pesquisador na área de Gestão Ambiental Estratégica e Operacional - Londrina (PR), Brasil.

³Livre-Docência pela USP. Pós-Doutor em Sustentabilidade pela *United Nations University*. Doutor em Engenharia de Produção pela USP. Atualmente é Professor Livre-Docente na Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP Bauru). Bolsista de Produtividade em Pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Londrina (PR), Brasil.

Endereço para correspondência: Paulo Henrique Mazieiro Pohlmann - Avenida dos Pioneiros, 3131 - Jardim Morumbi - 86036-370 - Londrina (PR), Brasil - E-mail: paulo_pohlmann@hotmail.com

Recebido: 27/07/12 - **Aceito:** 04/03/15 - **Reg. ABES:** 97976

um acréscimo no preço final dos produtos (RAISINGHANI *et al.*, 2005; PANDE *et al.*, 2001).

De acordo com Pande *et al.* (2001), ao longo da primeira década desde a implantação do Seis Sigma (1987–1997), a Motorola apresentou crescimento de cinco vezes nas vendas, elevação de 20% ao ano do lucro, economia acumulada de US\$ 14 bilhões e, por fim, aumento dos ganhos nos preços das ações a uma taxa de 21,3% ao ano. Na *AlliedSignal/Honeywell*, a implementação do programa resultou na redução dos custos de consertos de defeitos, no aumento da produtividade em 6% e do lucro em 13%, ambos em 1998. Contudo, o Seis Sigma popularizou-se apenas após os resultados positivos obtidos pela *General Electric*, que tornou a metodologia o foco central de sua estratégia de negócios em 1995. A implantação dessa metodologia tem resultado na economia de bilhões de dólares para as empresas desde o início da década de 1990 (YANG & EL-HAIK, 2008).

A metodologia Seis Sigma é amplamente discutida na literatura internacional. Inúmeros autores buscaram avaliar e compreender os conceitos, as ferramentas utilizadas e as aplicações, bem como os benefícios, as dificuldades, as limitações, os obstáculos, os fatores críticos de sucesso e as perspectivas futuras, destacando-se Kwak e Anbari (2006), Linderman *et al.* (2003), Koch *et al.* (2004), Schroeder *et al.* (2008), Brady *et al.* (2006), Raisinghani *et al.* (2005), Antony *et al.* (2007), Coronado e Antony (2002), Nonthaleerak e Hendry (2008) e Goh (2002). No que tange à gestão, ao reúso e à redução do consumo de água, poucas pesquisas foram realizadas, dentre as quais destacam-se as de Sadraoui *et al.* (2010), Tsonis *et al.* (2011) e Kaushik e Khanduja (2008, 2009). Não foram encontradas publicações relevantes da aplicação da metodologia Seis Sigma em Estações de Tratamento de Água (ETAs) nas bases de dados Scopus, *Web of Science* e outras, fato que representa uma lacuna teórica acerca da temática e cuja constatação serviu como incentivo para a verificação das possibilidades de utilização dessa estratégia de qualidade na gestão dos processos envolvidos no tratamento de água para abastecimento humano.

Promover o acesso universal à água potável é um dos maiores desafios enfrentados pela comunidade internacional no século XXI. Para superá-lo, é necessário solucionar problemas como sistemas de distribuição ineficientes, que nos países pobres apresentam baixos percentuais de atendimento à população, gestão inadequada, desperdícios e a poluição dos corpos hídricos, que limita os pontos de captação de água e dificulta o atendimento aos padrões de potabilidade pelo tratamento (UNDP, 2006). Em julho de 2010, a Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (ONU) reconheceu o direito à água e ao saneamento, considerando que estes são indispensáveis para o alcance dos demais Direitos Humanos (UNDP, 2011). A integração bem-sucedida do Seis Sigma com o setor de tratamento e abastecimento de água pode

auxiliar na solução dos problemas de gestão, na redução dos custos e no fornecimento adequado para toda a população, especialmente nos países menos desenvolvidos.

A verificação da metodologia Seis Sigma como uma ferramenta que promove a elevação da qualidade, pela redução das não conformidades nos processos produtivos, e a constatação de que o setor de tratamento de água necessita de um elevado rigor nos processos que o compõem corroboram a importância da integração entre o saneamento ambiental e a gestão de processos. Nesse sentido, buscou-se realizar proposta de adequação da metodologia Seis Sigma aos processos envolvidos no tratamento de água para abastecimento humano com base em uma simulação.

SEIS SIGMA

A metodologia Seis Sigma é uma estratégia de negócio baseada na tomada de decisão objetiva e na resolução de problemas, considerando dados significativos e reais para a criação de metas viáveis, analisando a causa dos defeitos e sugerindo formas de eliminar a lacuna existente entre o desempenho de um processo e o desempenho desejado (KUMAR *et al.*, 2008).

O Seis Sigma proporciona aos negócios as ferramentas necessárias para aumentar a capacidade de seus processos, aprimorando o desempenho e reduzindo a variabilidade (YANG & EL-HAIK, 2008). Raisinghani *et al.* (2005) afirmam que o objetivo imediato do programa é a redução de defeitos, que resulta na melhoria do processo, rendimentos mais elevados e no alcance da satisfação dos clientes, e o objetivo final é o aumento do lucro líquido. Kumi e Morrow (2006) concluíram que essa metodologia representa uma medida valiosa, pois concentra a atenção no problema, em vez de realizar suposições. Dessa maneira, o tempo e os recursos são destinados a solucionar as falhas do processo, em vez de serem utilizados aleatoriamente.

O termo Seis Sigma tem origem da terminologia estatística e significa desvio padrão. Em um processo de produção, o padrão Seis Sigma significa que a fração de defeitos produzida é de 3,4 por milhão de unidades produzidas, correspondendo a 99,9997% do total. Esse padrão é claramente um grau de extrema consistência e baixa variabilidade, e, quando alcançado, representa uma grande melhoria na qualidade (YANG & EL-HAIK, 2008). Já um processo com Nível Sigma igual a 3,0 significa, para a gestão da qualidade, que 93,3% dos produtos são conformes, representando 66.800 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO). Quanto a oportunidades de defeitos, definem-se como os tipos ou as categorias de defeitos possivelmente apresentados pelo produto ou processo (PANDE *et al.*, 2001). A Tabela 1 relaciona o rendimento do processo, as oportunidades de defeito e seus respectivos Níveis Sigma.

Quando aplicado a processos já concluídos e instalados, o Seis Sigma é desenvolvido segundo cinco fases sequenciais, o DMAIC:

1. *Define*;
2. *Mensure*;
3. *Analyze*;
4. *Improve*;
5. *Control* (PANDE *et al.*, 2001; GOLDSBY & MARTICHENKO, 2005).

Segundo Goldsby e Martichenko (2005), o DMAIC é a espinha dorsal dos esforços para melhoria baseados no Seis Sigma. Ele não determina necessariamente o final do projeto, mas fornece um roteiro para a eliminação das falhas e para a melhoria contínua.

METODOLOGIA

A metodologia empregada no estudo é bibliográfica em relação aos meios e exploratória/experimental quanto aos fins, pois, apesar de estar inserido em áreas do conhecimento amplamente pesquisadas, o tema é pouco abordado na literatura. O emprego do Seis Sigma em ETAs foi avaliado por meio de uma simulação, na qual os defeitos detectados foram distribuídos aleatoriamente. O presente estudo foi subdividido em cinco etapas sequenciais:

1. determinação de indicadores de referência para as operações unitárias que compõem o processo de tratamento de água convencional para abastecimento humano;
2. determinação das possíveis não conformidades do tratamento de água;
3. aplicação da ferramenta de gestão da qualidade matriz de verificação de oportunidades de defeitos;
4. cálculo do Nível Sigma da ETA pelo programa Seis Sigma;
5. cálculo do Nível Sigma para cada uma das operações unitárias que compõem o tratamento convencional de água para abastecimento humano.

Caracterização da Estação de Tratamento de Água

O estudo foi desenvolvido com base na análise criteriosa das etapas referentes ao tratamento convencional de água para abastecimento

Tabela 1 - Rendimento do processo, defeitos por milhão de oportunidades e Nível Sigma.

Rendimento (%)	DPMO	Nível Sigma
30,9	690.000	1
69,2	308.000	2
93,3	66.800	3
99,4	6.210	4
99,98	320	5
99,9997	3,4	6

Fonte: adaptado de Pande *et al.* (2001).
DPMO: defeitos por milhão de oportunidades.

em uma ETA de configuração semelhante àquela de propriedade da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que é uma autarquia estadual do setor de tratamento e abastecimento de água com atuação no Estado do Paraná. Vale ressaltar que os resultados apresentados nesta pesquisa são de uma simulação e, portanto, não representam o desempenho real de qualquer das ETAs sob administração da SANEPAR. Porém, a simulação pode revelar oportunidades de aplicação da metodologia e seus consequentes ganhos econômicos e/ou ambientais.

O tratamento convencional de água em ETAs é constituído basicamente das seguintes operações unitárias: coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção química e fluoretação (KAWAMURA, 2000; HELLER & PÁDUA, 2006; MACEDO, 2007; DAVIS, 2010).

Indicadores de referência

Para cada uma das etapas desenvolvidas na ETA, foram atribuídos indicadores de referência específicos, com base nos requisitos de maior influência sobre a eficiência dos processos do tratamento convencional de água. Esses indicadores servem como parâmetro para a avaliação da qualidade e determinação das falhas (não conformidades) ocorridas ao longo do tratamento.

Com base nos indicadores de referência determinados pela revisão bibliográfica, apresentados na Tabela 2, foram determinadas as principais não conformidades que possivelmente ocorrem nas ETAs. Entende-se por não conformidade qualquer falha, imperfeição ou defeito ao longo do processo produtivo, tanto no ponto de vista financeiro quanto de qualidade. As principais falhas estão ilustradas na Tabela 3.

Matriz de verificação de oportunidades de defeitos

O estudo consiste no monitoramento das falhas ocorridas nos processos que compõem a ETA do tipo convencional, com base na coleta de amostras e na aplicação da matriz de verificação de oportunidades de defeitos. É importante ressaltar que as falhas detectadas são meramente ilustrativas, não correspondendo aos resultados obtidos por análises reais. Após a distribuição dos dados na simulação, foram calculados os DPMO e o Nível Sigma do processo, para quantificar os defeitos ocorridos no tratamento.

Conforme Pande *et al.* (2001), a filosofia da metodologia Seis Sigma orienta-se na prevenção e enfoca o controle estatístico da qualidade para definir padrões de excelência operacional, buscando alcançar processos produtivos com, no máximo, 3,4 DPMO. O valor de DPMO indica essencialmente quantos defeitos surgiriam se houvesse um milhão de oportunidades totais para atributos nominais, como apresentado nas Equações 1 e 2, adaptadas de Pande *et al.* (2001).

$$OT = UC \cdot OP$$

Onde:

OT são as oportunidades totais;

UC são as unidades contadas;

OP são as oportunidades.

$$DPMO = (DTC/OT) \cdot 10^6$$

Onde:

DPMO é o número de defeitos a cada um milhão de oportunidades;

DTC são os defeitos totais contados;

OT são as oportunidades totais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Defeitos a cada um milhão de oportunidades e Nível Sigma da Estação de Tratamento de Água

Os resultados ilustrados na Tabela 4 correspondem aos defeitos detectados no monitoramento da ETA no período de 30 dias. Considerando que a coleta de amostras seja realizada 3 vezes ao dia (8, 12 e 16h) em

(1) lotes de 7 amostras, cada qual correspondente a uma das operações unitárias descritas nas Tabelas 2 e 3. Ao final de um mês de monitoramento, são consideradas 630 amostras.

Segundo Pande *et al.* (2001), o valor de DPMO calculado representa o número DPMO. O processo de tratamento de água para abastecimento humano da ETA na simulação apresentou 67.347 DPMO, que corresponde a um Nível Sigma 3,0 e a um rendimento de 93,3%.

(2) A produção mensal de água na ETA, utilizada para avaliar o volume de água conforme e não conforme a partir do rendimento dos processos da mesma, foi mensurada com base na Equação 3. Ela indica o volume de água necessário para abastecer a população do município de Londrina, considerando o consumo diário *per capita*.

$$V_p = C_s \cdot P_t \cdot t \quad (3)$$

Onde:

V_p é o volume necessário para abastecer o município de Londrina, Brasil (m^3);

C_s é o consumo diário *per capita* ($m^3 \cdot \text{habitante}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$);

P_t é a população total do município (habitantes);

t é o tempo (dias).

Tabela 2 - Indicadores de referência e fatores que influenciam na eficiência.

Operações unitárias	Indicadores de referência	Fatores que influenciam na eficiência
Coagulação	Volume de coagulante e custos operacionais	Concentração e tamanho do material particulado; pH; temperatura; tipo, dosagem e mistura do coagulante
Floculação	Tamanho e densidade dos flocos; custos operacionais	Eficiência da etapa anterior; intensidade da agitação; concentração e tamanho dos flocos
Decantação	Turbidez; cor; sólidos dissolvidos e suspensos; quantidade de lodo decantado; velocidade de sedimentação; custos operacionais	Eficiência das etapas anteriores; tamanho e densidades dos flocos; Intensidade da agitação; velocidade de sedimentação
Filtração	Turbidez; cor; sólidos suspensos e dissolvidos	Eficiência das etapas anteriores; tipo de filtro; tamanho do material a ser filtrado; método de filtração
Desinfecção	Contagem de microrganismos; quantidade de agente desinfetante utilizado	Tempo de contato com a água; método de desinfecção; características do agente desinfetante; microrganismos envolvidos
Fluoretação	Volume de agente químico e concentração de flúor na água	-
Correção química	pH; Volume ou massa de agentes químicos utilizados	Alcalinidade ou acidez da água; pH; temperatura

Fonte: Kawamura (2000), Heller e Pádua (2006), Davis (2010) e Macedo (2007).

Tabela 3 - Principais não conformidades em Estações de Tratamento de Água.

Operações unitárias	Não conformidades
Coagulação	Alto volume de coagulante, elevado custo operacional e pH inadequado
Floculação	Pequeno tamanho dos flocos, baixa densidade dos flocos, elevado custo operacional e agitação elevada
Decantação	Baixa velocidade de sedimentação, elevado tempo de sedimentação, baixo volume de lodo decantado e baixa remoção de cor e turbidez
Filtração	Baixa remoção de cor e turbidez e elevado custo operacional
Desinfecção	Elevado volume de cloro, concentração final de cloro residual*, contaminação microbiológica e elevado custo operacional
Fluoretação	Volume de produto químico, concentração de flúor na água* e elevado custo operacional
Correção de acidez	Volume inadequado de agentes químicos e elevados custos operacionais

*Acima ou abaixo das especificações.

Segundo o *United Nations Development Programme* (UNDP, 2011), o consumo doméstico de água tende a ser maior nos países com alto índice de desenvolvimento humano (IDH) e menor nos países com baixo IDH. O consumo diário *per capita* de água nos Estados Unidos da América (EUA) é de 575 L.hab⁻¹.dia⁻¹, na Itália, de 386 L.hab⁻¹.dia⁻¹, no Brasil, de 187 L.hab⁻¹.dia⁻¹, e no Kenia, de 46 L.hab⁻¹.dia⁻¹ (UNDP, 2006). No município de Londrina, o consumo diário *per capita* de água é por volta de 170 L.hab⁻¹.dia⁻¹, e nos Distritos, de 167 L.hab⁻¹.dia⁻¹ (LONDRINA, 2009). Segundo o Censo Demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população do município era de 506.701 habitantes.

A Tabela 5 relaciona as informações coletadas pelo monitoramento por meio da matriz de verificação, os resultados dos cálculos para a DPMO e o Nível Sigma do processo de tratamento de água analisado na simulação.

Seguindo as recomendações de Pande *et al.* (2001), considera-se oportunidades (OP) como sendo o maior número de defeitos ocorridos em uma amostra, obtendo-se, com isso, o maior número de defeitos possíveis, OP = 7. Como resultados, tem-se uma produção de 2,58 milhões de m³.mês⁻¹, o volume de água produzido na ETA em conformidade seria de aproximadamente 2,41 milhões de m³.mês⁻¹ e o volume não conforme seria de 173,1 mil de m³.mês⁻¹. Para atingir um Nível Seis Sigma de excelência, o tratamento de água deveria apresentar apenas 3,4 DPMO, resultando em um rendimento de

99,9997%. Nessas condições, o volume de água produzido em conformidade seria de 2,58 milhões de m³.mês⁻¹, e o volume não conforme, de apenas 7,75 m³.mês⁻¹. O alcance do Nível Seis Sigma de excelência representa uma grande melhoria na qualidade e redução dos custos do processo produtivo.

Na Tabela 6 encontram-se ilustrados os Níveis Sigma, os rendimentos e seus respectivos volumes de água não conforme. É importante ressaltar que a conformidade ou a não conformidade não estão diretamente relacionadas com os padrões de potabilidade da água tratada, apesar

Tabela 5 - Resultados do monitoramento da Estação de Tratamento de Água.

Variável	Resultados
UC	630
DTC	297
OP	7
OT	4.410
DPMO	67.347
Nível Sigma	3.0
Rendimento (%)	93,3
Produção mensal (m ³ .mês ⁻¹)	2.584.175
Volume tratado conforme (m ³ .mês ⁻¹)	2.411.035
Volume tratado não conforme (m ³ .mês ⁻¹)	173.140

UC: unidades contadas; DTC: defeitos totais contados; OP: oportunidades; OT: oportunidades totais; DPMO: defeitos por milhão de oportunidades.

Tabela 4 - Matriz de verificação mensal de oportunidade de defeitos.

Dia	Operações unitárias																				OP		
	CG			FLC				DEC				FLT		DES				FLU				CQ	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t		u	v
1	I					x			x														2
	II																						0
	III							x			x				x		x			x			5
2	I				x	x			x								x					x	5
	II											x											1
	III			x				x		x					x		x			x			6
3	I					x							x									x	3
	II	x													x								4
	III		x							x			x					x			x	x	7
30	I				x												x				x		3
	II		x			x							x		x							x	6
	III	x						x			x						x				x		5
																							0

CG: coagulação; FLC: floculação; DEC: decantação; FLT: filtração; DES: desinfecção; FLU: fluoretação; CQ: correção da química; OP: oportunidades; a: volume de coagulante; b: elevado custo operacional; c: pH inadequado; d: pequeno tamanho dos flocos; e: baixa densidade dos flocos; f: elevado custo operacional; g: agitação elevada; h: baixa velocidade de sedimentação; i: elevado tempo de sedimentação; j: baixo volume de lodo decantado; k: baixa remoção de cor e turbidez; l: baixa remoção de cor e turbidez; m: elevado custo operacional; n: elevado volume de cloro; o: concentração de cloro residual; p: contaminação microbiológica; q: elevado custo operacional; r: volume de produto químico; s: concentração de flúor na água; t: elevado custo operacional; u: volume inadequado de agentes químicos; v: elevados custos operacionais.

de que o mau funcionamento das operações unitárias que compõem o tratamento pode resultar, em casos extremos, na produção de água com qualidade abaixo daquela exigida pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde. O volume de água não conforme compreende o volume de água cujo tratamento apresentou falhas ou imperfeições, englobando desde elevados custos operacionais, elevado tempo de produção (tratamento), baixa eficiência das operações unitárias envolvidas e, principalmente, alta variabilidade.

BENEFÍCIOS, DIFICULDADES E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Este estudo representa uma legítima iniciativa para implementar o Seis Sigma como uma ferramenta na gestão operacional das ETAs. Por intermédio dele, com as experiências descritas na literatura em outros setores, foi possível verificar que os principais benefícios para a sociedade advindos da aplicação do Seis Sigma no tratamento de água em ETAs incluem:

- atendimento aos padrões de potabilidade e melhoria da qualidade da água distribuída, especialmente nas localidades nas quais a gestão das ETAs é ineficiente;
- redução dos custos operacionais e do preço da tarifa;
- redução de eventuais paralisações no abastecimento em consequência de falhas ou imperfeições no processo.

Para a administração das ETAs e para os profissionais do setor, os principais benefícios envolvem:

- melhoria na gestão das operações da ETA;
- fornecimento de uma poderosa ferramenta no controle da variabilidade e das não conformidades;
- desenvolvimento de um método sistemático para abordagem e resolução de problemas;
- redução no desperdício de recursos (tempo, agentes químicos, energia e recursos humanos);
- estabelecimento de uma metodologia rigorosa e sistemática para a coleta de dados;

- redução da variabilidade e das não conformidades;
- maior visibilidade das oportunidades de defeitos;
- aumento da confiabilidade do processo;
- melhoria contínua.

Como benefícios para o estado da arte da literatura, destacam-se:

- a primeira iniciativa para a implementação do Seis Sigma em ETAs;
- desenvolvimento de uma nova abordagem para o Seis Sigma;
- apresentação das possibilidades de aplicação da metodologia no setor de abastecimento de água para os profissionais envolvidos com a temática;
- incentivo ao desenvolvimento de novas pesquisas para avaliar as dificuldades, as limitações e os fatores críticos de sucesso;
- incentivo ao estabelecimento de parcerias entre organizações de ensino e autarquias do setor de abastecimento de água.

A principal limitação do estudo é a utilização de dados hipotéticos. A simulação, apesar de proporcionar a visualização de diversos obstáculos que serão enfrentados na implementação do Seis Sigma em ETAs, não permite a verificação empírica das dificuldades em diversas etapas, desde a seleção dos indicadores de referência até a coleta de dados e o monitoramento das operações unitárias envolvidas no tratamento. Por exemplo, alguns dos indicadores de referência exigem metodologias de quantificação complexas, muitas vezes inviáveis na rotina operacional das ETAs. A visualização da necessidade de substituição do indicador somente é possível por meio da aplicação prática das ferramentas e dos conceitos abordados neste estudo.

As experiências demonstram que muitas das empresas não foram bem-sucedidas ou não obtiveram benefícios mensuráveis após os esforços de implantação de estratégias de qualidade (KUMAR *et al.*, 2008). Nesse sentido, os benefícios e as potencialidades até aqui verificados devem ser corroborados empiricamente, aplicando a metodologia Seis Sigma no monitoramento de uma ETA real, e não exclusivamente por meio de uma simulação. Na realidade, esta é a principal perspectiva para o futuro desta pesquisa.

Inúmeros são os casos de sucesso da implementação do Seis Sigma no setor industrial, porém, diversos autores verificaram dificuldades da aplicação da metodologia em outros setores (ANTONY, 2006; CHAKRABARTY & TAN, 2007; TANER *et al.*, 2007). Portanto, são consideradas naturais todas as dificuldades e limitações encontradas da implementação da metodologia Seis Sigma no controle de qualidade em ETAs.

As principais dificuldades e limitações visualizadas por esta pesquisa incluem: estabelecimento de métodos de coleta de dados, pois alguns dos indicadores são de difícil mensuração; resistência das autarquias do setor de abastecimento de água em fornecer dados e informações acerca de seus respectivos desempenhos; ausência de estudos que

Tabela 6 - Volume não conforme em função do Nível Sigma.

Nível Sigma	Produção: 2.584.175 m ³ .mês ⁻¹		
	Rendimento (%)	Volume conforme (m ³ .mês ⁻¹)	Volume não conforme (m ³ .mês ⁻¹)
1	30,9	798.510	1.785.665
2	69,2	1.788.249	795.926
3	93,3	2.411.035	173.140
4	99,4	2.568.670	15.505
5	99,98	2.583.658	516
6	99,9997	2.584.167	7,75

evidenciem as possibilidades de adaptação do programa Seis Sigma no setor de abastecimento de água; ausência de experiências anteriores para guiar a tomada de decisão.

CONCLUSÃO

Na simulação, a ETA para abastecimento humano apresentou um Nível Sigma de 3,0, correspondente a 67.347 DPMO e um rendimento de 93,31928%. Os volumes de água tratada conforme e não conforme foram de, respectivamente, 2,58 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$ e 173,1 mil $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$. Porém, se a ETA apresentasse um Nível Sigma igual a 6,0, o seu rendimento seria de 3,0 DPMO, o volume de água conforme, de 2.58 milhões de $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$, e o volume não conforme, de 7,75 $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$.

A redução das não conformidades ao longo do processo produtivo é indispensável para o alcance do padrão de excelência Seis Sigma. Como as operações unitárias que envolvem o tratamento de água são desenvolvidas em série e seus desempenhos estão intimamente ligados à eficiência da etapa precedente, as falhas ocorridas em uma das etapas comprometem o desempenho das demais. Por exemplo, se a coagulação e a floculação têm baixa eficiência, os flocos formados podem ser pequenos e pouco densos. Flocos pouco densos apresentam baixa velocidade de sedimentação e têm sua remoção dificultada na operação

unitária decantação, comprometendo o bom desempenho dos equipamentos envolvidos na filtração.

A princípio, o programa Seis Sigma mostra-se uma importante ferramenta para a melhoria contínua e para a padronização dos processos envolvidos na ETA, promovendo a visibilidade das oportunidades de defeito e estabelecendo, por meio disso, padrões de excelência de desempenho. Recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados para a verificação prática desta simulação e solução das dificuldades encontradas. Inúmeros são os benefícios para a sociedade, para a administração das ETAs e para os profissionais envolvidos no setor, como: redução da variabilidade e das não conformidades, redução dos desperdícios com recursos, melhoria contínua, desenvolvimento de uma metodologia sistemática para a resolução de problemas e aumento da confiabilidade do processo.

A metodologia Seis Sigma é amplamente utilizada nos setores industriais tradicionais, fato que resulta em uma grande variedade de produções científicas e experiências abordando a temática. Entretanto, a aplicação desta metodologia na área ambiental é recente e pouco explorada, de modo que se verificou uma escassez de produções técnicas relacionadas à aplicação do Seis Sigma em ETAs. Nenhuma produção científica relevante foi encontrada nas bases de dados Scopus e *Web of Science*, SciELO, entre outras.

REFERÊNCIAS

- ANTONY, J. (2006) Six sigma for service processes. *Business Process Management Journal*, v. 12, n. 2, p. 234-248.
- ANTONY, J.; ANTONY, F.J.; KUMAR, M.; CHO, B.R. (2007) Six sigma in service organizations: Benefits, challenges and difficulties, common myths, empirical observations and success factors. *International Journal of Quality and Reliability Management*, v. 24, n. 3, p. 294-311.
- BRADY, J.E. & ALLEN, T.T. (2006) Six Sigma literature: a review and agenda for future research. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 22, n. 3, p. 335-367.
- CHAKRABARTY, A. & TAN, K.C. (2007) The current state of six sigma application in services. *Managing Service Quality*, v. 17, n. 2, p. 194-208.
- CORONADO, R.B. & ANTONY, F. (2002) Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organizations. *TQM Magazine*, v. 14, n. 2, p. 92-99.
- DAVIS, M.L. (2010) *Water and wastewater engineering: design principles and practice*. New York: McGraw-Hill.
- GOH, T.N. (2002) A strategic assessment of six sigma. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, n. 5, p. 403-410.
- GOLDSBY T. & MARTICHENKO, R. (2005) *Lean Six Sigma logistics: strategic development to operational success*. Florida: J. Ross Publishing.
- HELLER, L. & PÁDUA, V.L. (2006) *Abastecimento de água para consumo humano*. 1. ed. Minas Gerais: UFMG. 859 p.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2010) *Censo Demográfico*. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 set. 2011.
- KAUSHIK, P. & KHANDUJA, D. (2008) DM make up water reduction in thermal power plants using Six Sigma DMAIC methodology. *Journal of Scientific and Industrial Research*, v. 67, n. 1, p. 36-42.
- KAUSHIK, P. & KHANDUJA, D. (2009) Application of six sigma DMAIC methodology in thermal power plants: a case study. *Total Quality Management and Business Excellence*, v. 20, n. 2, p. 197-207.
- KAWAMURA, S. (2000) *Integrated design and operation of water treatment facilities*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons. 691 p.
- KOCH, P.N.; YANG, R.J.; GU, L. (2004) Design for six sigma through robust optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 26, n. 3-4, p. 235-248.

- KUMAR, M.; ANTONY, J.; MADU, C.N.; MONTGOMERY, D.C.; PARK, S.H. (2008a) Common myths of Six Sigma demystified. *International Journal of Quality and Reliability Management*, v. 25, n. 8, p. 878-895.
- KUMAR, U.D.; NOWICKI, D.; RAMÍREZ-MÁRQUEZ, J.E.; VERMA, D. (2008b) On the optimal selection of process alternatives in a Six Sigma implementation. *International Journal of Production Economics*, v. 111, n. 2, p. 456-467.
- KUMI, S. & MORROW, J. (2006) Improving self-service the six sigma way at Newcastle University Library. *Program*, v. 40, n. 2, p. 123-136.
- KWAK, Y.H. & ANBARI, F.T. (2006) Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. *Technovation*, v. 26, n. 5-6, p. 708-715.
- LARSON, A. (2003) *Demystifying Six Sigma: a company-wide approach to continuous improvement*. New York: AMACOM.
- LINDERMAN, K.; SCHROEDER, R.G.; ZAHEER, S.; CHOO, A.S. (2003) Six Sigma: a goal-theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, v. 21, n. 2, p. 193-203.
- LONDRINA. (2009) Plano Municipal de Saneamento: Relatório de Diagnóstico sobre a Situação do Saneamento. Disponível em: <www.londrina.pr.gov.br>. Acesso em: 9 abril 2012.
- MACEDO, J.A.B. (2007) *Águas & Águas*. 3. ed. Minas Gerais: CRQ - MG. 1027 p.
- NONTHALEERAK, P. & HENDRY, L. (2008) Exploring the six sigma phenomenon using multiple case study evidence. *International Journal of Operations and Production Management*, v. 28, n. 3, p. 279-303.
- PANDE, P.; NEUMAN, R.; CAVANAGH, R. (2001) *Estratégia seis sigma: como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho*. Rio de Janeiro: Qualitymark. 442 p.
- RAISINGHANI, M.S.; ETTÉ, H.; PIERCE, R.; CANNON, G.; DARIPALY, P. (2005) Six Sigma: concepts, tools and applications. *Industrial Management & Data Systems*, v. 105, n. 4, p. 491-505.
- SADRAOUI, T.; AFEF, A.; FAYA, J. (2010) Six Sigma: A new practice for reducing water consumption within Coca Cola industry. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, v. 6, n. 1-2, p. 53-76.
- SCHROEDER, R.G.; LINDERMAN, K.; LIEDTKE, C.; CHOO, A.S. (2008) Six Sigma: Definition and underlying theory. *Journal of Operations Management*, 26 (4), 536-554.
- TANER, M.T.; SEZEN, B.; ANTONY, J. (2007) An overview of six sigma applications in healthcare industry. *International Journal of Health Care Quality Assurance*, v. 20, n. 4, p. 329-340.
- TSONIS, P.N.; BESSERIS, G.J.; STERGIOU, C. (2011) Application of Six Sigma methodology in efficiency enhancement and scrap reduction in a water-bottling company. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, v. 6, n. 4, p. 301-320.
- UNDP - UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. (2006) *Human Development Report. Beyond Scarcity: Power, poverty and the global water crisis*. New York. Disponível em: <www.hdr.undp.org/en/reports>. Acesso em: 24 maio 2012.
- UNDP - UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. (2006) *Human Development Report. Sustainability and Equity: a better future for all*. New York. Disponível em: <www.hdr.undp.org/en/reports>. Acesso em: 24 maio 2012.
- YANG, K. & EL-HAIK, B. (2008) *Projeto para seis sigma: um roteiro para o desenvolvimento do produto*. São Paulo: Educator. 675 p.