

XI-090 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL

Renan Barroso Soares⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Mestre em Engenharia Química pela UFRRJ. Doutorando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Ricardo Franci Gonçalves⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com especialização em Engenharia de Saúde Pública na ENSP – FIOCRUZ. DEA Sciences Et Techniques de L'environnement - Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées. Doutor em Engenharia do Tratamento de Águas no Institut National Des Sciences Appliquées Toulouse. Pós Doutor na Universidade Técnica de Berlim. Professor Titular do Departamento de Engenharia Ambiental da UFES.

Endereço⁽¹⁾: Av. Fernando Ferrari, 514 - Goiabeiras - Vitória – ES - CEP: 29075-910 - Brasil - Tel: +55 (27) 3335-2648 - e-mail: franci@npd.ufes.br

RESUMO

Os processos tradicionais, adotados nos sistemas de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, consomem grande quantidade de energia e geram impactos ambientais relevantes, visto que o uso de energia é considerado uma das maiores fontes antropogênicas de gases do efeito estufa. O setor consome 7% de toda a energia produzida no mundo, elevando os custos das operações que, muitas vezes, não podem ser integralmente repassados aos usuários, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil. As empresas concessionárias dos serviços de água e esgoto gastaram 2,94 bilhões de reais com energia elétrica em 2010 [1]. A projeção mundial de aumento nos preços de energia elétrica agrava ainda mais a situação, motivando um mapeamento da eficiência energética do setor, a fim de identificar pontos de melhoria. Vários artigos sobre o tema já foram publicados, porém informações para o Brasil são escassas. Este trabalho apresenta uma revisão sobre o consumo de energia em cada etapa do setor de água e esgoto, incluindo o cenário brasileiro. As opções tecnológicas são determinantes para a eficiência energética, o que impõe considerar os processos mais eficientes nos projetos das futuras instalações, que reverterão o grande déficit de saneamento no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Esgoto, água, energia, consumo, Brasil.

INTRODUÇÃO

A indústria da água é um grande consumidor de energia, desde a fase da construção das instalações até a desmobilização final dos equipamentos. Segundo KANG e CHAE (2013), tipicamente, o uso de energia representa de 5 a 30% dos custos de operação das estações no mundo. A eletricidade é a forma de energia predominante e é usada para alimentar bombas, válvulas, compressores e outros equipamentos. No passado, devido ao custo relativamente baixo e estável dos combustíveis fósseis e da eletricidade, o gerenciamento da energia no setor de água e esgoto não era priorizado, mas, com o aumento nos custos de energia, as incertezas sobre os combustíveis fósseis e a maior atenção em relação ao aquecimento global, isso vem mudando. Por exemplo, tornar uma ETE autossustentável em energia pode melhorar, de maneira significativa, sua rentabilidade e ainda diminuir a emissão de gases do efeito estufa. Contudo, ainda é difícil demonstrar quantitativamente esses benefícios e maiores estudos são necessários para superar as barreiras políticas, comportamentais, financeiras e técnicas. O consumo de energia no setor parece estar sub pesquisado no Brasil e necessita de mais exploração. Existe uma falta de conhecimento, não estando claro como o consumo de energia varia em diferentes processos e países. A maioria das revisões na literatura sobre o tema é específica para determinadas regiões ou etapas do processo, principalmente a etapa de tratamento de esgoto, como fez LONGO *et al.* (2016). Recentemente, alguns autores fizeram uma abordagem global, envolvendo todas as etapas, como WAKEEL *et al.* (2016), contudo informações do cenário brasileiro não foram computadas. Somente alguns artigos foram publicados com relação ao Brasil, como o trabalho de VILANOVA e BALESTIERI (2015), porém a análise dos autores se restringiu às ETAs. Estudos sobre as relações indissociáveis entre a água, a energia e os alimentos (Conceito NEXUS) encontram-se em curso em vários

países, dado que estes são os três pilares da sustentabilidade dos ambientes construídos. Do entendimento destas relações, e do emprego de novos conceitos e técnicas nos sistemas de engenharia, depende a sustentabilidade das cidades no futuro. Este trabalho apresenta uma revisão na literatura sobre o consumo de energia em cada etapa do setor de água e esgoto, incluindo o cenário brasileiro.

OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho teve o objetivo de revisar o consumo de energia nos sistemas coletivos de abastecimento de água e de esgotamento sanitário, desde a captação de água bruta até a disposição final do esgoto tratado, compilando informações sobre o estado da arte e adicionando dados sobre o cenário brasileiro.

METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada foi revisar a literatura, através de buscas no site *www.sciencedirect.com*, usando como palavras-chave *wastewater*, *water*, *energy*, *consumption* e *Brazil*. Os artigos mais recentes foram selecionados e, para garantir a credibilidade das informações, apenas publicações em revistas com classificação A1 ou A2, na área de engenharias I, pela plataforma QUALIS CAPES, foram usadas nesta revisão, sendo os demais desconsiderados. Devido à escassez de artigos encontrados referentes ao Brasil, sites do governo, tal como o Ministério das Cidades, foram analisados, extraindo-se informações de relatórios técnicos relevantes.

RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 1 traz o consumo de eletricidade no ciclo urbano da água, tal como é encontrado na maioria dos países, podendo-se perceber uma média de 1kWh/m^3 de água que entra na cidade na forma de água potável e sai como esgoto tratado. A Figura 2 apresenta o consumo usual por etapas, notando-se maiores valores na rede de distribuição do sistema de abastecimento e nas estações de tratamento dos sistemas de esgotamento sanitário. Este consumo de energia pode ser bem maior, a depender das tecnologias empregadas, como no caso da osmose reversa para a dessalinização de água para abastecimento ou no caso dos processos de tratamento de esgoto com membranas filtrantes (MBR e similares). A análise aqui realizada não considera o consumo de energia na fase de construção dos sistemas. Poucos pesquisadores se dedicaram a estudar este tipo de consumo, devido à falta de dados disponíveis e a sua reduzida magnitude frente à fase de operação do sistema, que representa 70% do consumo total [2] ou até mesmo 94% [3].

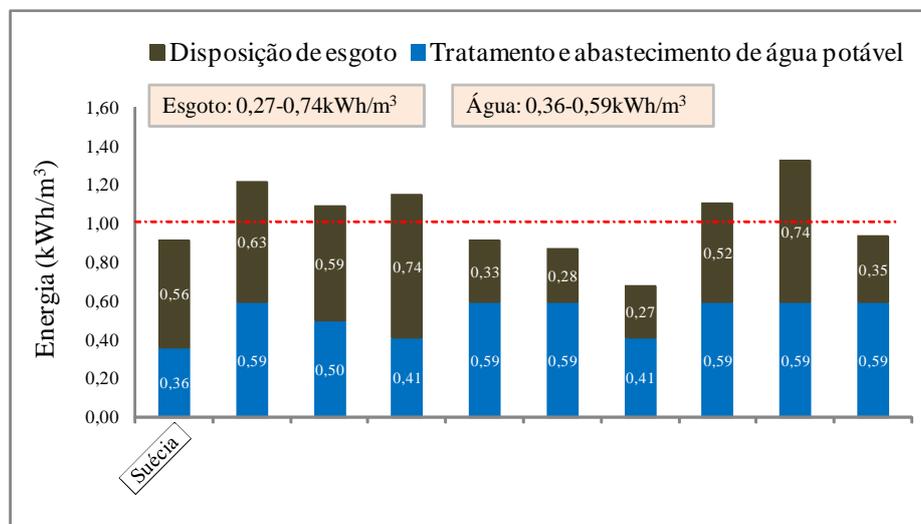


Figura 1: Consumo de eletricidade no ciclo urbano da água

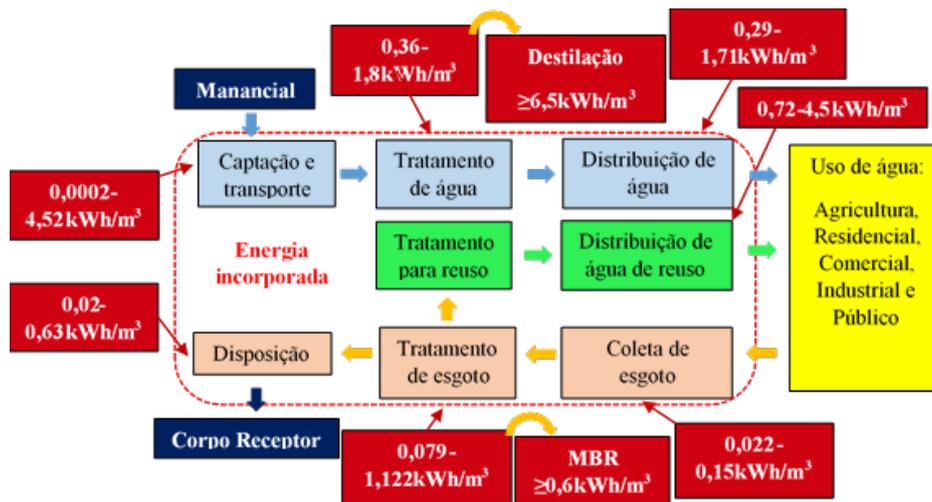


Figura 2: Consumo de eletricidade nas etapas no ciclo urbano da água (Fonte: adaptado de [1], [2], [3], [4], [5], [6], [9], [16], [17] e [19]).

A energia gasta na captação de água bruta subterrânea pode ser estimada em $0,0027\text{kWh/m}^3$ de água elevada em um metro. Na captação em superfície, o consumo pode ser desprezado se a ETA estiver próxima ao manancial. No geral, a captação superficial varia de $0,0002$ a $1,74\text{kWh/m}^3$ e a subterrânea de $0,37$ a $1,44\text{kWh/m}^3$ [3]. No Brasil, 47% da vazão de captação de água são na superfície, 39% são subterrâneas e 14% são mistos, com consumo de energia entre $0,25$ e $4,5\text{kWh/m}^3$ [4].

O uso de eletricidade na ETA é afetado, principalmente, pela qualidade da água bruta e pela tecnologia empregada, sendo o processo de destilação o maior consumidor, com demanda entre $6,5$ e $25,5\text{kWh/m}^3$ [3]. No Brasil, 10 bilhões de metros cúbicos de água por ano são tratados, consumindo 8,59 bilhões de kWh [5]. O estado de degradação dos corpos de água no país tem contribuído muito para aumentar a complexidade dos sistemas de tratamento e, conseqüentemente, para o consumo de energia decorrente.

Na distribuição de água tratada, quanto maior a distância, o volume perdido no trajeto e a demanda, maior será o consumo de energia [3]. Na Grã-Bretanha, devido às tubulações do século XIX ainda estarem em uso, pode-se perder até 70% da água. No Brasil, segundo o SNIS o percentual de perdas físicas é de 28,2%, o que corresponde a uma perda per capita de 61,6 L/dia. Em termos de energia, isso significa uma perda de $0,25\text{kWh/m}^3$ ou 0,27% do total de energia consumida no país. A redução na perda de água na distribuição é uma das maneiras mais eficientes de poupar energia, com economias de 25 a 50% [4]. A média de perda em muitos países fica entre 17 e 20% [3]. VILANOVA e BALESTIERI (2015) investigaram o uso de energia no abastecimento (captação, tratamento e distribuição) de água no Brasil. O custo com eletricidade representou 16,8% dos custos operacionais e o consumo nas ETAs respondeu por 1,9% do consumo total do país. A média de uso foi de $0,862\text{kWh/m}^3$, cerca do dobro da média mundial. Os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), de 2014, mostram uma piora no índice de perda, subindo para 37%.

O consumo de energia no uso final da água é bem maior do que no abastecimento, devido ao grande aquecimento da água. Este gasto depende de fatores comportamentais e a mudança nos hábitos poderia reduzir em, pelo menos, 50% o consumo [3]. No Brasil, o consumo per capita era de 139L/dia em 2012, o que representava 23,5% da água usada no país. O restante foi usado na irrigação (53,5%), indústrias (16,6%) e consumo animal (6,4%) [4]. Nos dados de 2014 do SNIS, o consumo per capita subiu para 154L/dia, o que é uma tendência comum aos países em desenvolvimento [5]. Um relatório detalhado, feito por KENWAY (2012) na Austrália, mostrou como o gerenciamento de água influencia no consumo de eletricidade. Entre 2006 e 2007, a energia associada ao uso de água contabilizou 6811GWh para cada um milhão de pessoas. Isso representou 9% da energia usada e 8% das emissões de gases do efeito estufa do país. Deste total de emissões, atribuído ao consumo de energia no uso da água, as residências contribuíram com 45%, enquanto que a indústria e comércio somaram 41%. O restante foi associado ao uso de energia nos serviços de distribuição de água e gerenciamento de esgoto (10%) e à perda de recursos, tal como fósforo e potássio (4%). A energia

indireta foi nove vezes maior do que a energia diretamente usada nas instalações. Consequentemente, o uso final da água é a etapa dominante, quando se avalia o consumo de energia no ciclo da água nas cidades.

O consumo de energia, na coleta e no bombeamento de esgoto para a ETE, depende da topografia da região, densidade demográfica, distância até a ETE e estrutura do sistema de esgoto da cidade. SINGH e KANSAL (2016) estimaram o consumo médio na Índia em 45,3% do total consumido na ETE. Consumos entre 0,022 e 0,042kWh/m³ são típicos no mundo, representando de 5 a 18% do total usado nas ETEs [6]. O Brasil possui uma rede coletora com 157 mil quilômetros de comprimento, atendendo apenas 49% da população [5].

A demanda de energia no tratamento de esgoto dependerá da vazão, qualidade do efluente e tipos de processos adotados [7]. No Brasil, o volume anual de esgoto tratado é de 2,6 bilhões de metros cúbicos (81% do esgoto coletado), consumindo 802 milhões de kWh no ano, ou 0,24kWh/m³ [5]. Esse valor é baixo, devido às muitas ETEs no país a base de lagoas de estabilização ou reatores UASBs, que consomem pouca energia elétrica. Na Alemanha e na Itália, cerca de 1% do consumo de energia do país está nas ETEs, sendo uma boa estimativa para os países da Europa [6]. WANG *et al.* (2016) citaram 0,6% para os Estados Unidos e LI *et al.* (2016a) relataram de 0,21 a 0,49% para a China. No geral, o tratamento requer entre 0,3 e 0,6kWh/m³ [8], representando de 15 a 40% do custo de operação da ETE, atrás apenas da mão de obra [9].

LONGO *et al.* (2016) apresentaram uma revisão da literatura sobre o consumo de energia em ETEs na América do Norte, Ásia e Europa. O processo de aeração no tratamento secundário consome a maior parte da energia, entre 45 e 75% do consumo total. WAKEEL *et al.* (2016) reportaram o consumo de energia em ETEs de diferentes países com consumo médio de 0,38 a 1,12kWh/m³, dominado pela aeração. LI *et al.* (2016a) estudaram nove ETEs na China e observaram que 60% do gasto energético está no tratamento secundário e que o consumo é muito menor do que nos países desenvolvidos, justificado pela qualidade inferior do efluente tratado e pela modernidade das ETEs na China, construídas nos últimos 10 anos. SINGH e KANSAL (2016) analisaram o consumo de energia em ETEs da Índia, sendo 65,5% elétrica e 27,8% associada aos materiais usados no processo. CATARINO e HENRIQUES (2016) avaliaram 14 ETE em Portugal e notaram que a aeração consome 53% da energia, com um acréscimo de 30 a 50% nas plantas com uma etapa adicional de remoção de nutrientes. O consumo de energia é menor na medida em que o nível de tratamento exigido é menos rigoroso. No Brasil, por exemplo, a remoção de fósforo não é obrigatória na maioria dos casos, o que significa que o consumo de eletricidade será menor do que nos países onde o tratamento terciário com remoção de fósforo é exigido pela legislação. Países com padrões de qualidade mais rigorosos e/ou com limitação de área, podem usar sistemas mais eficientes e de menor área construída, tal como membranas, ainda que paguem o preço do maior consumo de energia. Conforme GIKAS (2016), 20% da energia nas ETEs é consumida em processos auxiliares, como estações de bombeamento e iluminação, sendo 0,52kWh/m³ a energia usada somente no tratamento (55% devido à aeração). O autor criou uma ETE piloto, com máxima remoção de DQO em processos físicos e mínimo uso de processos aeróbios. Segundo o autor, apenas otimizar os processos tradicionais não é suficiente para diminuir o alto consumo de energia nas ETEs, já que um esforço organizado na Suíça só conseguiu economizar 12%. Sistemas automatizados de controle de aeração têm diminuído o consumo de energia nas ETEs, e várias outras sugestões de economia são citadas por CATARINO e HENRIQUES (2016), ainda que representem pequenas contribuições.

A disposição do efluente final consome pouca energia. Com a escassez de água, vários países estão reutilizando este efluente. Em média, o reuso de água consome entre 0,18 e 0,63kWh/m³ (tratamento sem distribuição) [3]. Para produzir água de reuso há diferentes tecnologias com diferentes consumos de energia.

O gerenciamento do lodo produzido na ETEs pode consumir de 0,074 e 0,15kWh/m³ [6]. No Brasil, estima-se que foram produzidos entre 150 e 220 mil toneladas de lodo seco em 2010 [10]. Em média, 30% dos custos na ETE são atribuídos ao tratamento do lodo [8]. Todavia, alguns autores afirmam que o lodo tem potencial para tornar a ETE autossuficiente em energia, já que seu poder calorífico é de 12 a 20MJ/kg, próximo do carvão (14,6 - 26,7MJ/kg) [11]. Independentemente da escala, cada ETE pode melhorar sua eficiência energética, podendo-se obter uma economia de 20 a 40% e, em alguns casos, de até 75% [12].

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 1 traz o consumo de energia elétrica nos sistemas de água e esgoto, sendo o tratamento de esgoto disposto na Tabela 2. Pode-se perceber a grande variedade na demanda de energia, principalmente devido aos diferentes padrões de qualidade para o efluente tratado e a tecnologia utilizada. Nos diferentes níveis de tratamento, observam-se diferentes consumos, com um comportamento típico: quanto mais rigoroso é o nível de tratamento, maior o consumo de energia. O maior gasto no abastecimento de água no Brasil está relacionado aos enormes índices de perdas. Na escala das edificações, devido ao aquecimento da água durante o seu uso, o consumo de energia é muito maior do que nas outras etapas do ciclo. Reduzir as perdas e estimular o uso consciente da água pode reduzir significativamente a demanda por energia, além de diminuir o volume de esgoto gerado, porém, o consumo per capta e os índices de perdas estão aumentando no país.

Tabela 1: Consumo de Energia nas Etapas do Setor de Água e Esgoto.

Etapa do processo	País	Consumo (kWh/m ³)	Descrição	Referência
Captação e transporte	Média mundial	0,0002 - 1,74	Superfície	[3]
		0,36 - 0,47	Subterrânea	
	Espanha	4,07	Superfície	
	Austrália	3,3	Superfície	
	Brasil	0,25 - 4,5	Misto	
Tratamento de água por dessalinização	Média mundial	0,36 - 0,47	Osmose reversa	[3]
		0,92	Nano filtração	
		0,5 - 1,7	Eletrodialise	
		1,1 - 1,8	Fotólise solar	
		6,5 - 25,5	Destilação	
		2,4 - 8,5	Média geral	
Distribuição	Alemanha	1,71	-	[3]
	China	0,29	-	
	Índia	0,3	-	
	Canadá	0,68	-	
	Brasil	0,862	Misto	
Abastecimento (captação, tratamento convencional e distribuição)	Média mundial	0,37	Água superficial	[4]
	Média mundial	0,48	Água subterrânea	
	Brasil	0,73	-	
Uso final	Austrália	50	Aquecimento	[3]
Coleta de esgoto	Índia	0,07 - 0,11	-	[2]
	Média mundial	0,022 - 0,042	-	[6]
Gerenciamento de lodo	Média mundial	0,074 - 0,15	-	
Disposição final do efluente e reuso	Austrália	0,02	Disposição final	[3]
	Média mundial	0,18 - 0,63		
	Israel	0,72	Reuso	
	Singapura	0,93		
	Austrália	2,5 - 4,5	Reuso em zona dispersa	

A maior parte dos estudos está nas ETEs, devido ao maior consumo de energia, principalmente nos processos aeróbios. No Brasil, o clima tropical permite o uso dos sistemas anaeróbios, que consomem menos energia e ainda produzem biogás. Os reatores UASB são a tecnologia predominante hoje em dia no país [13], mas a maioria do biogás produzido é queimada, sem aproveitamento energético. Para reverter esse quadro, está em andamento o projeto PROBIOGÁS, com o objetivo de ampliar o uso do biogás no Brasil. As principais barreiras para investir no biogás são: incerteza sobre o custo/benefício do projeto; poucos projetos de referência no país; dificuldade de acesso a informações técnicas, comerciais e legais; inexistência de políticas específicas. Todas estas dificuldades podem ser superadas com apoio político [14], que poderia transformar as ETEs em unidades geradoras de energia, atraindo investimentos que melhorariam os índices de saneamento no país. Um novo tipo de ETE, capaz de produzir água de reuso para fins não potáveis, de permitir a reciclagem de nutrientes, e de produzir energia na forma de biocombustíveis, por exemplo, está sendo desenvolvido através de uma parceria entre a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), a empresa FLUIR Engenharia e a Concessionária de Saneamento do Estado do Espírito Santo (CESAN). Trata-se de um esforço no sentido de buscar soluções para diversos problemas enfrentados, atualmente, pelas empresas concessionárias de saneamento, tal como escassez de água, incompatibilidade da qualidade do efluente de algumas ETE com os padrões legais, sobretudo no que tange os nutrientes nitrogênio e fósforo, complexidade e alto custo de gerenciamento de sólidos e gases produzidos e elevado consumo de energia. O sistema proposto é composto pela associação em série de uma etapa de tratamento preliminar, reator UASB, lagoa de alta taxa e separação sólido-líquido, para coleta e reciclagem de microalgas, que são introduzidas no reator UASB para maximizar a

produção de biogás, em um processo de co-digestão. AZEREDO (2015) avaliou a disponibilidade energética deste sistema, que revelou um potencial de produção de energia de 1,75Kwh/m³, 13 vezes maior que a demanda requerida para o seu funcionamento. Além disso, o uso de energia contribui com 57% das emissões gasosas responsáveis pelo aquecimento global e apenas 0,3% da água no planeta pode ser usada para consumo [15], motivando melhorias no gerenciamento desses recursos e a implantação desses novos sistemas de tratamento de esgoto.

Tabela 2: Consumo de Energia no Tratamento de Esgoto.

Local	Capacidade	Processo	Consumo (kWh/m ³)	Referência
Média mundial			0,38 - 1,122	[3]
Média mundial		Lodo ativado convencionada (LA)	0,3 - 0,65	[9]
África do sul		Lagoas de estabilização	0,079 - 0,28	[16]
África do sul		Filtro de espessamento	0,19 - 0,41	[16]
África do sul		Lodo ativado	0,33 - 0,61	[16]
África do sul		Vala de aeração	0,48 - 1,03	[16]
Índia		LA	0,26	[2]
Coréia do sul			0,243	[17]
Alemanha			0,4 - 0,43	[16]
China			0,12 - 0,38kWh/t	[18]
China		Anóxico-anaeróbio-óxido	0,254 - 0,31	[16]
China	2 milhões m ³ /dia	Anóxico-anaeróbio-óxido	0,13	[16]
China		Membrana	0,6	[19]
China		Anóxico-anaeróbio-óxido	0,45	[19]
China		Filtro húmico	0,25	[19]
China		Valo de oxidação	0,4 - 0,5	[19]
China	45m ³ /dia	Filtro húmico	0,15	[16]
Grécia	380m ³ /dia	ETE piloto de Gikas	0,087	[9]
Brasil			0,24	[5]
Brasil		LA	0,57	[1]
Estados unidos	10 ⁴ - 10 ⁶ m ³ /dia		0,52 - 0,55	[16]
Estados unidos		LA Com desinfecção por cloro	0,287	[16]
Estados unidos		LA Com desinfecção por UV	1,12	[16]

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou uma revisão na literatura sobre o consumo de energia elétrica no abastecimento de água e de esgotamento sanitário. De forma geral, o trabalho buscou fornecer uma maneira de olhar a influência do gerenciamento da água nas cidades, no uso de eletricidade. O consumo típico global está em torno de 1kWh/m³ e precisa ser reduzido, visto os impactos ambientais e custos associados. Nos países em desenvolvimento, onde grande parte da população ainda é carente e não pode pagar por altas tarifas de água e esgoto, o modelo atual se torna deficitário. Adotar um gerenciamento energético eficiente, no entanto, poderia deixá-lo economicamente atrativo. No Brasil, os reatores UASB podem gerar energia através do biogás produzido, se houver uma integração nas políticas de água e energia, de modo a superar as barreiras atuais. O país também poderá reduzir de forma significativa o consumo de energia, quando melhorias forem implementadas no sistema de distribuição de água tratada, de maneira a reduzir o alto índice de perda de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- VIEIRA, A. S., GHISI, E. *Water-energy nexus in low-income houses in Brazil: the influence of integrated on-site water and sewage management strategies on the energy consumption of water and sewerage services. Journal of Cleaner Production*, v.133, p. 145-162, 2016.
- SINGH, P., KANSAL, A. *Energy and GHG accounting for wastewater infrastructure. Resources, Conservation and Recycling*, in press, 2016.
- WAKEEL, M., CHEN, B., HAYAT, T., ALSAEDI, A., AHMAD, B. *Energy consumption for water use cycles in different countries: A review. Applied Energy*, v.178, p. 868-885, 2016.
- VILANOVA, M. R. N., BALESTIERI, J. A. P. *Exploring the water-energy nexus in Brazil: The electricity use for water supply. Energy*, v.85, p. 415-432, 2015.
- SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2014, 2016.

6. LONGO, S., D'ANTONI, B. M., BONGARDS, M., CHAPARRO, A., CRONRATH, A., FATONE, F., LEMA, J. M., IGLESIAS, M. M., SOARES, A., HOSPIDO, A. *Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. Applied Energy*, v.179, p. 1251-1268, 2016.
7. METCALF & EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Editora AMGH, 5ª Edição, 2013. Tradução Ivanildo Hespanhol e Jose Calos Mierzwa, 2016.
8. SHEN, Y., LINVILLE, J. L., DEMIRTAS, M. U., MINTZ, M. M., SNYDER, S. W. *An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, p.346-362, 2015.
9. GIKAS, P. *Towards energy positive wastewater treatment plants. Journal of Environmental Management*, in press, 2016.
10. PEDROZA, M. M., VIEIRA, G. E. G., SOUSA, J. F., PICKLER, A. C., LEAL, E. R. M., MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v. 11, p. 89-118, 2010.
11. ZABANIOTOU, A. A., SAMOLADA, M. C. *Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. Waste Management*, v. 34, p. 411-420, 2014.
12. CATARINO, J., HENRIQUES, J. *Sustainable value e An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. Journal of Cleaner Production*, in press, 2016.
13. PROBIOGAS. Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás, Brasília, 2016.
14. PROBIOGAS. Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil, Brasília, 2016b.
15. FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. Editora Assessoria de Comunicação e Educação em Saúde, 4ª edição revisada, 2006.
16. WANG, H., YANG, Y., KELLER, A. A., LI, X., FENG, S., DONG, Y., LI, F. *Comparative analysis of energy intensity and carbon emissions in wastewater treatment in USA, Germany, China and South Africa. Applied Energy*, in press, 2016.
17. KANG, J., CHAE, K. J. *Estimating the energy independence of a municipal wastewater treatment plant incorporating green energy resources. Energy Conversion and Management*, v.75, p. 664-672, 2013.
18. LI, W., LI, L., QIU, G. *Energy consumption and economic cost of typical wastewater treatment systems in Shenzhen, China. Journal of Cleaner Production*, in press, 2016(b).
19. LI, F., CHIRAMBA, T., XU, J., KELLER, A., WANG, H., DONG, Y., GU, Y. *Quantification of the water, energy and carbon footprints of wastewater treatment plants in China considering a water-energy nexus perspective. Ecological Indicators*, v.60, p. 402-409, 2016(a).
20. AZEREDO, L. Z. Potencial energético da co-digestão da biomassa de microalgas no tratamento de esgoto sanitário em reatores UASB. Vitória, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFES.
21. KENWAY, S. The water-energy nexus and urban metabolism – connections in cities. *Urban Water Security Alliance Report*, n 100, p. 1-61, 2012.