

## II-412 – AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS POR REATOR *UASB* SEGUIDO DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS SUBMERSAS

### **Mauro Roberto Felizatto<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico – UFU (1985), Mestre (2000) e Doutor (2017) em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB). Analista de Sistema de Saneamento III (Engenheiro Sênior) da Gerência de Recursos Hídricos e Segurança de Barragens da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

### **Marco Antonio de Almeida de Souza**

Engenheiro Químico – UFPR (1971), Mestre em Hidráulica e Saneamento – USP-EESC (1975) e PhD em Engenharia Ambiental – Universidade de Birmigham/Inglaterra (1992). Atualmente Professor voluntário, pesquisador colaborador e orientador credenciado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH). Consultor independente.

### **Felipe Coelho Nery**

Estagiário de Engenharia na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Gama da CAESB, Graduando em Engenharia Civil da Universidade do Distrito Federal (UDF).

### **Allan Saliba Rodrigues (*in memoriam*)**

Estagiário de Engenharia na ETE Gama da CAESB, Graduando em Engenharia de Energia da UnB (campus Gama-FGA).

### **Klaus Dieter Neder**

Engenheiro Civil – UnB (1978) e Especialista em Engenharia Sanitária – Universidade de Aachen/Alemanha (1987). Atualmente Analista de Sistema de Saneamento III (Engenheiro Sênior) da Assessoria de Projetos Especiais (Assessor) da CAESB.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** SAM (Setor de Administração Municipal), CAESB ETA BRASÍLIA/R1, Brasília, Distrito Federal. CEP: 70.620-000, e-mail: [maurofelizatto@caesb.df.gov.br](mailto:maurofelizatto@caesb.df.gov.br)

### **RESUMO**

Entre 2% e 3% do consumo de energia do mundo são usados nos Sistemas de Abastecimento de Água e de Esgotamento Sanitário. O custo de energia elétrica é ranqueado sempre como sendo um dos dois primeiros itens de maior importância nos custos do tratamento de esgotos. No Brasil já existe uma visão que considera o saneamento básico e a eletricidade como serviços de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro e que o setor de saneamento tem participação significativa no consumo global de energia elétrica do país. Dos diversos processos de tratamento de esgotos sanitários, a Filtração por Membranas Submersas, em particular a microfiltração de efluente de reator *UASB*, com a finalidade de produzir permeado de qualidade para reúso de água em irrigação, tem-se destacado potencialmente como uma das alternativas aos processos clássicos de separação, uma vez que oferece vantagens no que se refere à *pegada ecológica* e facilidades de *scale-up*. O uso de indicadores para gerenciar e avaliar a qualidade da prestação de serviços é uma estratégia de gestão que pode contribuir para melhorar o desempenho financeiro das organizações, sendo privadas ou públicas. Os indicadores relativos ao consumo de energia elétrica são considerados *chaves* para a avaliação do tratamento de esgotos no critério da eficiência do uso de recursos, objetivando a sustentabilidade ambiental do negócio. Neste sentido, esta pesquisa tem a finalidade de relatar os dados levantados do consumo de energia elétrica de uma planta-piloto de filtração por membranas submersas de efluente de reator *UASB* por meio de quatro indicadores do desempenho do consumo de energia elétrica, e comparar com valores de referência das Estações da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, das Estações do projeto europeu ENERWATER e dos valores teóricos encontrados na literatura. O trabalho conclui que os indicadores do desempenho do consumo de energia elétrica levantados nesta operação de longa duração para o processo de tratamento com reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas foram os mais elevados de todos os dados analisados, com os seguintes resultados: 2,37 kWh/m<sup>3</sup>, 6,55 kWh/kg DBO removida, 4,12 kWh/kg DQO removida e 26,78 kWh/habitante/ano.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microfiltração, consumo de energia, reator *UASB*, tratamento de esgotos.

## INTRODUÇÃO

Entre dois e três por cento do consumo de energia do mundo são usados nos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) e Sistemas de Esgotamentos Sanitários (SES). Até mesmo em países desenvolvidos os SAAs e SESs apresentam a energia como sendo o segundo maior custo depois da folha salarial dos trabalhadores (James *et al.*, 2002).

A energia representa o maior custo possível de controle dos SAAs e SESs. Nos Estados Unidos (EUA), a maioria das instalações foi projetada e construída quando o item energia não era uma grande preocupação na gestão de custos, quando era comum o uso de grandes bombas, motores e outros equipamentos, quase sempre operando 24 horas por dia. Com isto, os SAAs e SESs podem ser um dos maiores usuários individuais de energia em uma comunidade americana, na ordem de 30 a 60%. Nos EUA, em uma pesquisa da Associação Nacional de Agências de Água Limpa (NACWA), o consumo de energia numa estação de tratamento de esgotos sanitários (ETE), para o processo de lodo ativado convencional, é distribuído da seguinte forma: 38% no bombeamento, 26% para aeração, 25% para o reúso de água e 11% para outros fins (Spellman, 2013).

No Brasil já existe uma visão que considera o saneamento básico e a eletricidade como serviços de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro e que o setor de saneamento tem participação significativa no consumo global de energia elétrica do país, representando 2,37% – 10.340 Gigas Wh/ano (GWh/ano), sendo 2,20% nos SAAs e 0,17% nos SEEs (Ministério das Cidades, 2007).

Programas de abrangência nacional têm sido desenvolvidos, como o Programa Nacional de conservação de Energia Elétrica – PROCEL, existente desde 1985. O PROCEL, inicialmente voltado para a racionalização do consumo de energia elétrica e o combate ao desperdício em edificações, evoluiu para o setor de saneamento (Bahia, 2004).

Como decorrência, foi criado o PROCEL SANEAR, com ênfase nos SAAs públicos, sendo que este programa tem contribuindo de forma exitosa para a redução de gastos públicos nos sistemas de abastecimento de água, existindo importantes exemplos de economia, racionalização de energia, e eficiência nesses sistemas (Jordão, 2008).

Nos diversos processos de tratamento de esgotos sanitários, a filtração por membranas submersas (FMS), em particular a microfiltração de efluente de reator *UASB* com a finalidade de produzir permeado de qualidade para reúso de água em irrigação tem-se destacado potencialmente como uma das alternativas aos processos clássicos de separação, uma vez que oferece vantagens no que se refere à *pegada ecológica* e facilidades de *scale-up*. Metcalf & Eddy (2016) vislumbra a combinação *UASB* – Separação por Membranas como processo alternativo para tratamento de efluentes em oportunidades futuras, principalmente com interesse na coleta e refinamento do biogás com intenção de recuperação de recurso energético. Porém, o assunto ainda é pouco estudado e com poucos relatos em pesquisas acadêmicas (An *et al.*, 2009; Wen *et al.*, 1999).

O uso de indicadores para gerenciar e avaliar a qualidade da prestação de serviços é uma estratégia de gestão que pode contribuir para melhorar o desempenho financeiro das organizações, sendo privadas ou públicas (Andersson, 2009; Al Baz *et al.*, 2008; Sousa *et al.*, 2012). Na área de saneamento básico e evidentemente após a promulgação e vigência da Política Nacional de Saneamento Básico (Governo do Brasil, 2007), esse assunto tornou-se altamente relevante. A regulação do serviço de saneamento básico no Brasil, que passa a ser função das agências reguladoras, recém-criadas, estabelece no artigo 23 da Lei Federal nº 11.445/2007 (Governo do Brasil, 2007) que: “A entidade reguladora editará normas relativas às dimensões técnica, econômica e social de prestação dos serviços, que abrangerão, pelo menos, os seguintes aspectos: I - padrões e indicadores de qualidade da prestação dos serviços;...”.

Os indicadores relativos ao consumo de energia elétrica são considerados *chaves* para a avaliação de ETes no critério da eficiência do uso de recursos objetivando a sustentabilidade ambiental do negócio. Outro aspecto importante a ser levado em consideração é como o consumo de energia em ETE é reportado. Alguns exemplos incluem o consumo de energia: unitário ou por unidade de volume de esgotos tratados, por população equivalente, por carga orgânica poluidora removida ou por carga específica removida (hormônios, nutrientes, organismos patogênicos, etc.).

O primeiro passo para a otimização do consumo de energia elétrica é saber exatamente como, quando, onde, e o que se consome. Medir e controlar o consumo de energia, sem dúvida, é o princípio para melhorar a eficiência energética dos SESs. Neste sentido, o presente trabalho tem a finalidade de relatar o consumo de energia elétrica de uma planta-piloto de filtração por membranas submersas de efluente de reator *UASB* e comparar, por meio de indicadores de desempenho do consumo de energia, com as ETEs da CAESB, ETEs do projeto europeu ENERWATER e valores de referências teóricos encontrados na literatura.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1 mostra-se o fluxograma de processo do sistema piloto *UASB/FMS* utilizado, apresenta-se a instrumentação da planta-piloto e os pontos de coletas de amostras que foram utilizados para o monitoramento da qualidade. O efluente do reator tipo *UASB*, depois de recalçado, passa pelo peneiramento fino, onde é filtrado através de telas metálicas com abertura de 0,5 mm em um filtro em “Y”. A planta-piloto de filtração direta por membranas submersas (FMS) tem capacidade de produção de permeado de projeto de 60 l/h, ou 4 habitantes equivalentes.

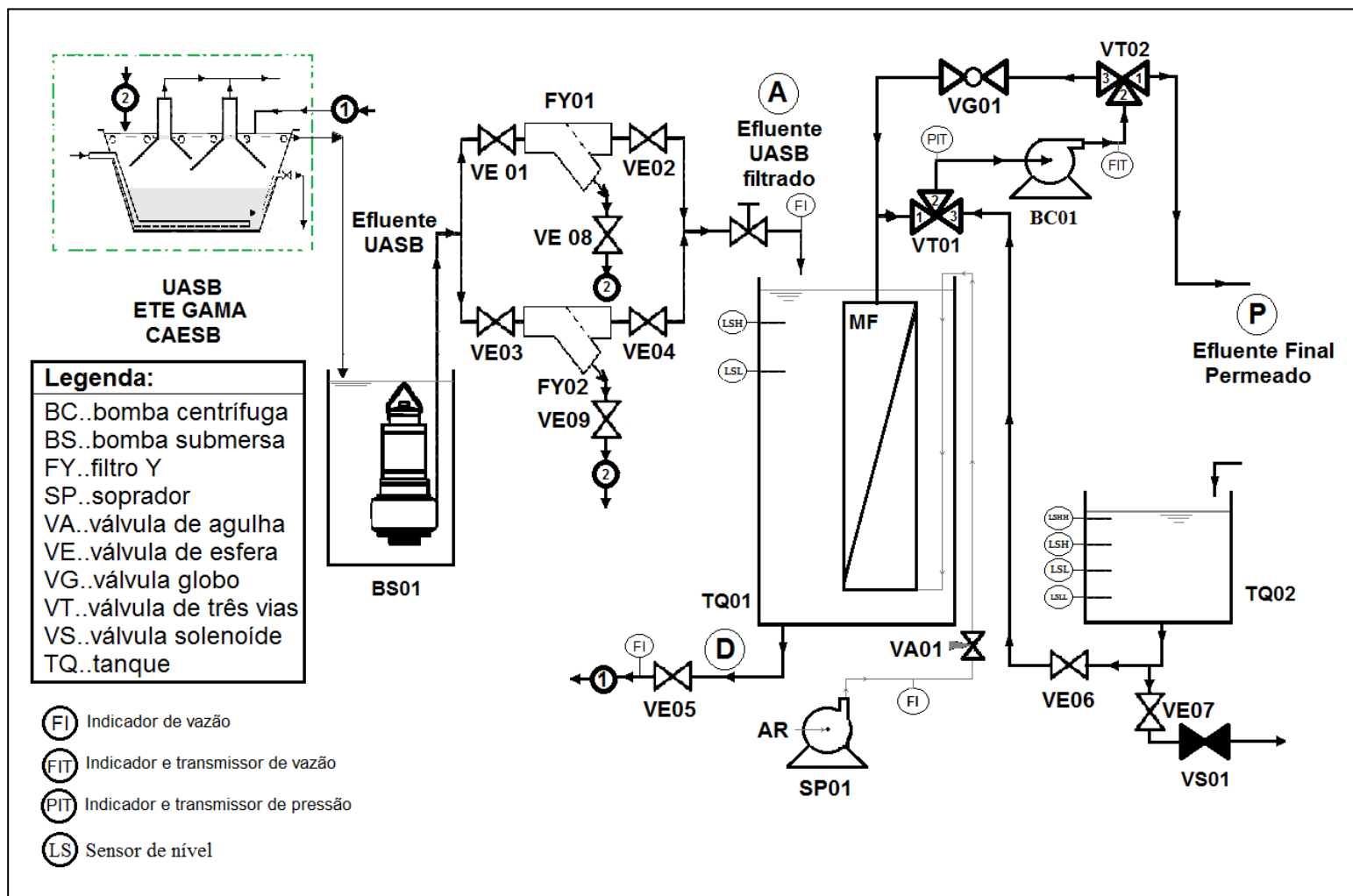
Como pode ser observado no fluxograma da Figura 1, a instalação piloto é composta pelos seguintes elementos principais: 1. Tanque onde está instalado o módulo de membranas (TQ01), com volume de 30 l; 2. Chaves de níveis do TQ01 (LSH e LSL); 3. Módulo de membranas com 6 m<sup>2</sup>; 4. Bomba de sucção do permeado e de retrolavagem dotada de dispositivo eletrônico para controle de rotação do motor (BC01); 5. Medição de vazão das correntes do processo (FIT); 6. Medição de pressão (PIT); 7. Soprador de ar com controle e medição de vazão (SP01); 8. Válvulas solenoides de três vias (duas – VT01 e VT02), com acionamento elétrico, controladoras de fluxo que permitem alteração automática das operações de filtração e retrolavagem do módulo de membranas submersas; 9. Válvula solenoide de duas vias com acionamento elétrico para controle de fluxo (VS01); 10. Tanque de limpeza, onde é armazenado o permeado (TQ02), com volume de 10 l e 11. Chaves de níveis do TQ02 (LSLL, LSL, LSH e LSHH).

Na fase de treinamento de operação da FMS, foi verificado que: (i) o medidor de vazão, FIT da Figura 1, instalado na planta-piloto apresentava variações nas medições na operação filtração, (ii) os valores de vazões medidos e mostrados na tela do supervisor quando confrontados com a medição direta apresentavam erros acima de 40% e (iii) o fundo de escala do medidor é sempre de 3,2 l/min. Portanto, optou-se por efetuar as medidas de vazões neste projeto de pesquisa por meio da medição direta ou também conhecida como “corta-fluxo” ou volumétrica.

A medição direta consiste na determinação do tempo necessário para encher um determinado recipiente de volume conhecido ou previamente aferido. Este método é aplicável a pequenas vazões -  $Q \leq 10$  l/s (Porto, 2006). Com isto adquiriram-se recipientes de plástico rígidos e transparentes que foram aferidos por meio do uso de proveta graduada, com os seguintes volumes 10 l, 7 l, 3 l e 2 l. Os três últimos recipientes tinham marcações de litro em litro. Para executar a medição direta, foram adquiridos cronômetros com as funções cronógrafo e *timer*.

Para a medição de energia elétrica, foi instalado o medidor eletrônico de energia elétrica, ativa e reativa, polifásico e unidirecional, modelo E650 8602-B da marca LANDIS+GYR com classes de exatidão B. Segundo o fabricante, as características metrológicas do medidor são: (i) tensões nominais de 120 V e 240 V; (ii) corrente nominal de 15 A; (iii) corrente máxima de 120 A; (iv) frequência nominal de 60 Hz; (v) número de elementos de 2 e 3; (vi) número de fios: de 3 e 4; (vii) número de fases de 2 e 3; (viii) constante de calibração de 4,0 Wh/pulso e 4,0 varh/pulso; (ix) constante eletrônica de 2,0 Wh/pulso e 2,0 varh/pulso. O medidor possui transmissão de dados acumulados via infravermelho por cabo USB e programa de computador para tratamento dos dados adquiridos. O medidor já instalado e a planta-piloto são ilustrados na fotografia da Figura 2.

A planta-piloto FMS foi instalada nas dependências da ETE Gama, esta unidade de tratamento está localizada no km 20 da rodovia DF 290 (16<sup>o</sup>01,493’ Sul e 48<sup>o</sup>05,815’ Este) e os dados do consumo de energia, vazão de permeado e desempenho operacional foram levantados durante 61 (sessenta e um) dias de operação consecutivas, em dois períodos do ano de 2016: de 28/03 a 13/05 e de 22/08 a 20/10.



**Figura 1** – Fluxograma da Planta-piloto FMS – PTARH-UnB/CAESB

Legenda dos Pontos de coleta de amostras: A...Alimentação ao TQ01 (Efluente UASB filtrado), P...Permeado ou Efluente Final e D...Descarte do TQ01.



**Figura 2** – Planta-piloto FMS PTARH-UnB/CAESB instalada no interior da Casa de Química da ETE Gama. Detalhe do Medidor de energia elétrica instalado na lateral do console do quadro elétrico já existente.

No Distrito Federal, o indicador kWh/m<sup>3</sup>, o mesmo adotado pelo Sistema Nacional de Informação de Saneamento - SNIS (Ministério das Cidades, 2007), foi o proposto para a ADASA (Agência Reguladora de Águas, Energia do DF) para a gestão em elevatórias (águas brutas e tratadas e esgotos brutos e tratados), estações de tratamento de água e de esgotos sanitários (UFMG, 2012).

A CAESB sempre adotou este mesmo indicador para gestão do consumo de energia elétrica em suas unidades de bombeamento e depuradoras (água e esgotos).

Proposta mais elaborada tem sido divulgada, como são as variáveis e os indicadores de desempenho chaves reportado pelo projeto ENERWATER (2014), iniciativa pertencente ao Programa de Pesquisa e Inovação “Horizonte 2020” da Comunidade Europeia, onde o desempenho do consumo de energia é relacionado com o tipo de tratamento efetuado pela ETE, no caso, classificando os estágios ou o tratamento em preliminar, primário, secundário ou terciário-avançado, se inclui também a fase sólida (tratamento de lodos).

ENERWATER (2014) ainda subclassifica as estações de tratamento pela qualidade do levantamento dos dados: (i) Platina: monitoramento da qualidade da água mais que duas vezes por mês, amostras simples e composta e medição de vazão em linha (*on line*); (ii) Ouro: no mínimo mensal a amostragem, simples ou composta, e medição de vazão em linha (através de medidores registradores); (iii) Prata: amostragem menor que 12 por ano, ou seja, menos que 1 por mês, e medição de vazão esporádica e (iv) Bronze: valores referenciais da literatura ou banco de dados de medições anteriores para os valores da qualidade da água e assume-se que a vazão tratada é a preconizada no projeto.

Este projeto europeu aprofunda-se ainda mais destacando outros estágios envolvidos no tratamento, como sendo: (i) tratamento do centrado ou líquido sobrenadante da unidade de desaguamento, (ii) desodorização e (iii) o uso em serviços auxiliares (oficinas de manutenção, iluminação interna e externa, computadores, chuveiros dos banheiros, etc.).

A Tabela 2 apresenta as variáveis e os indicadores de desempenho chaves do consumo de energia classificados pelo tipo ou estágio do tratamento.

**Tabela 2** – Classificação das Variáveis e Indicadores de Desempenho Chaves do Consumo e Produção de Energia por tipo de Tratamento de Esgotos Sanitários (ENERWATER, 2014).

Estágio do tratamento	Variável (is) <i>Chaves</i>	Indicadores de Desempenho <i>Chaves</i>
Preliminar	Vazão Tratada	kWh/m <sup>3</sup>
Primário	Carga de: Sólidos Suspensos Totais (SST) e Fósforo quimicamente (P <sub>quím.</sub> ) removidos.	kWh/(kg SST removido) e kWh/(kg P <sub>quím.</sub> removido)
Secundário	Carga de: Matéria Orgânica (DQO), Nitrogênio amoniacal (NH <sub>4</sub> ), Nitrogênio Total (NT), Fósforo biológico (P <sub>biol.</sub> ) e quimicamente (P <sub>quím.</sub> ) removidos.	kWh/(kg DQO removido), kWh/(kg NH <sub>4</sub> removido), kWh/(kg NT removido), kWh/(kg P <sub>biol.</sub> removido) e kWh/(kg P <sub>quím.</sub> removido)
Terciário e Avançado	Carga de: Sólidos (SST), Nitrogênio amoniacal (NH <sub>4</sub> ), Nitrogênio Total (NT), Fósforo total (P <sub>T</sub> ), Patogênicos (unidades logarítmicas) e Hormônios (Estradiol) removidos.	kWh/(kg SST removido), kWh/(kg NH <sub>4</sub> removido), kWh/(kg NT removido), kWh/(kg P <sub>T</sub> removido), kWh/(unid. logs. removidas) e kWh/(Estradiol removido)
Tratamento de Lodos	Energia consumida por Carga de Sólidos Totais processados (ST) e Energia produzida por carga de: Lodos processados (em volume ou massa) e carga de Sólidos Totais Voláteis (STV) removidos.	kWh/(kg ST removido), kWh produzido/(tonelada de lodos), kWh produzido/(m <sup>3</sup> de lodos) e kWh produzido/(kg STV removido)
Tratamento do Líquido Drenado (centrado).	Carga de: Nitrogênio Total (NT) e Fósforo total (P <sub>T</sub> ) removidos.	kWh/(kg NT removido) e kWh/(kg P <sub>T</sub> removido)
Desodorização	Carga de: Compostos Orgânicos Voláteis (COV), Compostos Inorgânicos Voláteis (CIV) e Compostos Voláteis do Enxofre (CVE) removidos.	kWh/(kg COV removido), kWh/(kg CIV removido) e kWh/(kg CVE removido)
Serviços Auxiliares	Por área da planta ou por número de trabalhadores das unidades de tratamento.	kWh/m <sup>2</sup> e kWh/trabalhador

O projeto ENERWATER disponibiliza no seu sítio ([www.enerwater.eu](http://www.enerwater.eu)) uma planilha eletrônica com dados de 3.217 plantas da Alemanha, Canadá, China, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos, Itália, Japão, Noruega, Suécia, e Reino Unido. Os dados desta planilha, depois de trabalhados, foram usados como referencial para comparação com os indicadores de desempenho do consumo de energia elétrica do tratamento reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas, tema desta pesquisa.

Outro indicador de desempenho do consumo de energia elétrica é o consumo *per capita*, kWh/(habitante.ano) ou kWh/hab.ano. Ressalta-se que este indicador (kWh/hab.ano) pode ser usado para avaliar o consumo de energia consumido em todos os equipamentos da ETE ou só os do sistema de aeração, que, como já observado anteriormente, é o maior consumo de energia elétrica de uma estação de tratamento de esgotos sanitários. Exemplificando, na CAESB, nas ETEs Brasília Sul e Brasília Norte o consumo de energia elétrica registrado para os sopradores (aeração por ar difuso) corresponde a 50% e de 80% para as ETEs Gama e Melchior da energia total consumida nas plantas de tratamento (CAESB, 2015).

A Tabela 3 apresenta a relação entre o indicador de desempenho kWh/hab.ano para o consumo de energia, principalmente destacando a aeração, em diferentes processos biológicos de tratamento, com seus respectivos valores de idade de lodo, onde houver descarte.

Observa-se nitidamente que os processos de lodos ativados, muito embora mais eficientes e os mais empregados, apresentam maior consumo de energia, e que algumas variantes deste processo podem vir a consumir até o dobro de energia, principalmente a do tipo aeração prolongada, quando comparado com o kWh/hab.ano do convencional. Outras observações importantes indicadas na Tabela 3 são: (i) processos mais

simples, embora menos eficientes na remoção, como a filtração biológica, podem tornar-se competitivos no momento de decisão, pela elevada redução comparativa do consumo de energia; e (ii) combinações de práticas mais recentes de processos, como o reator *UASB* seguido de Lodo Ativado Convencional, se tornam atraentes quando focados na questão energética, não apenas pela redução do consumo, mas pela possibilidade da geração de energia através do gás metano ( $\text{CH}_4$ ) produzido no reator *UASB* (Jordão, 2008).

**Tabela 3** – Indicador do Consumo *per capita* de Energia Elétrica na Aeração para diferentes tipos de processos de tratamento de esgotos em ETEs (Jordão, 2008).

Processo	Idade do Lodo (dias)	Energia para Aeração (kWh/habitante.ano)
Lodo ativado convencional	< 3	10 a 15
Lodo ativado convencional	4 a 7	18 a 22
Lodo ativado com nitrificação	10 a 14	25 a 35
Lodo ativado por aeração prolongada	18 a 30	33 a 37
Filtro biológico de alta taxa	–	–
Lagoa aerada de mistura completa	–	20 a 24
Lagoas de estabilização	–	–
<i>UASB</i> + Lodo ativado convencional	~ 7	~ 15

O Processo de Separação por Membranas (PSM) no tratamento de esgotos sanitários ainda é pouco utilizado, principalmente em escala real, com poucos trabalhos publicados no assunto, e, com isso, são raros os dados de consumo de energia elétrica descritos para essas operações.

Para a presente pesquisa foram encontrados valores de referência, somente para o indicador kWh/m<sup>3</sup>. Estes indicadores encontrados para diversos autores e diferentes aplicações estão descritos na Tabela 4.

**Tabela 4** – Indicador de desempenho do consumo de energia elétrica (kWh/m<sup>3</sup>) para diferentes tipos de aplicação do PSM em tratamento de água e esgotos sanitários.

Autor	Aplicação	kWh/m <sup>3</sup>
Chang <i>et. al.</i> (2008)	Microfiltração	0,26
Cheryan (1998)	Microfiltração	3,10
Metcalf & Eddy (2007)	Microfiltração	0,40
Metcalf & Eddy (2016)	Microfiltração	0,20-0,30
	Osmose Inversa	0,65
Plappaly e Lienhard (2012)	Osmose Inversa	4,40
	Biorreator com Membranas (BRM)	1,50
	Microfiltração	0,11

Os valores dos indicadores apresentados na Tabela 4 são diferentes e pouco convergentes para o mesmo uso do PSM em tratamento de água e esgotos sanitários. Ressalta-se que os dados de Cheryan (1998) e Plappaly e Lienhard (2012) são de levantamentos de aplicações em escala real. Os valores especificados para a Microfiltração serão utilizados como referências comparativas para este trabalho de pesquisa.

Neste estudo, os indicadores de desempenho do consumo de energia elétrica escolhidos e considerados para análise comparativa do tratamento de esgotos sanitários por reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas (*UASB/FSM*) escolhidos foram: kWh/m<sup>3</sup>, kWh/kg de DBO removida, kWh/kg de DQO removida e kWh/hab.ano. As informações comparativas para todos os quatro indicadores foram as elaboradas a partir da base de dados das ETEs da CAESB e das ETEs do programa europeu ENERWATER. Para comparação da aplicação do PSM em microfiltração foram utilizados os valores do indicador kWh/m<sup>3</sup> demonstrados na Tabela 4.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados levantados para cálculo dos indicadores de desempenho de consumo de energia, após 61 dias de operação contínua (16 semanas), do processo combinado reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas tratando esgotos sanitários estão dispostos na Tabela 5.

**Tabela 5** – Resultados levantados para o processo de tratamento de esgotos sanitários *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas (61 dias de operação consecutivas).

Variável Analisada	Valor
Consumo de Energia Elétrica (W)	32.962
Volume de Permeado (ℓ)	13.904
DBO Média Afluente (mg/ℓ)	415
DBO Média Efluente (mg/ℓ)	53
DQO Média Afluente (mg/ℓ)	686
DQO Média Efluente (mg/ℓ)	110

A partir dos dados primários levantados e dispostos na Tabela 5, calcularam-se os quatro diferentes Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica (kWh/m<sup>3</sup>, kWh/kg de DBO removida, kWh/kg de DQO removida e kWh/habitante.ano) para o presente estudo. Estes resultados estão demonstrados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica (IDCEEs) levantados na pesquisa da operação de longa duração (61 dias) para o processo de tratamento configurado por reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas.

IDCEEs	Valor
kWh/m <sup>3</sup>	2,37
kWh/kg de DBO removida	6,55
kWh/kg de DQO removida	4,12
kWh/habitante.ano	26,78

A CAESB é um dos maiores clientes da concessionária de distribuição de energia elétrica do Distrito Federal (CEB), e, somente no ano de 2015, gastou cerca de R\$ 113 milhões, consumindo o equivalente a 283 GWh, sendo que 99% foram utilizados no SAA (78%) e no SES (21%).

Um dado importante é que no SAA do DF consumiu-se 88% da energia elétrica em bombeamento de águas brutas e tratadas (elevatórias) e 12% no tratamento de água, enquanto no SES, o inverso, o consumo de 88% foi no tratamento de esgotos sanitários e o restante dos 12% em estações elevatórias de esgotos bruto e tratado (CAESB, 2015).

A CAESB opera atualmente 16 ETEs com diversos processos de tratamento e diferentes vazões tratadas de esgotos sanitários, variando de 3 a 1.092 ℓ/s. A Tabela 7 apresenta as características das ETEs da CAESB, apresentando o ano de início de operação, a descrição sucinta do sistema de tratamento, o corpo receptor, a vazão média tratada e a projetada e a população equivalente para cada uma das estações de tratamento.

Para o presente estudo, a ETE Torto, a menor estação do DF, não foi considerada, pois a mesma não se utiliza de nenhuma forma de energia elétrica para sua operação.

Os dados anuais de desempenho operacional e consumo de energia de todas as 15 ETEs analisadas para comparação com os resultados gerados pela planta-piloto de filtração por membranas submersas do efluente do reator *UASB* foram os arquivados no banco de dados da Superintendência de Operação e Tratamento de Esgotos (POE) da CAESB, dos anos de 2009 a 2015.



**Tabela 7** – Características das Estações de Tratamento de Esgotos do Distrito Federal (CAESB, 2015).

ETE	Ano Início de Operação	Descrição do Sistema	Corpo Receptor	Vazão (ℓ/s)		População Equivalente
				Média	Projeto	
Sobradinho <sup>a</sup>	1967	LAC + Trat. Químico	Ribeirão Sobradinho	98	56	40.000
Brazlândia	1983	LAn + LF	Rio Verde (Goiás)	41	87	29.600
Brasília Sul <sup>a</sup>	1962	RBN + POLIMENTO FINAL	Lago Paranoá	1.092	1.500	460.000
Brasília Norte <sup>a</sup>	1969	RBN + POLIMENTO FINAL	Lago Paranoá	479	920	250.000
Torto	1994	UASB + INFIL+ CLORAÇÃO	Infiltração no solo	3	6	2.500
Samambaia <sup>a</sup>	1996	UASB / LF + LAT + LP + POLIMENTO FINAL	Rio Melchior	260	284	180.000
Paranoá	1997	UASB + LAT + ES	Rio Paranoá	63	112	60.000
Riacho Fundo <sup>a</sup>	1997	LODO ATIVADO + RBNB	Riacho Fundo/Rio Paranoá	48	94	43.000
Alagado <sup>a</sup>	1998	UASB + LAT + ES + POLIMENTO FINAL	Rio Alagado	76	154	84.852
Planaltina	1998	UASB / LF+ LM	Ribeirão Mestre D'Armas	98	255	138.000
Recanto das Emas <sup>a</sup>	1998	UASB + LAMC + LAF	Cor. Vargem da Benção	137	246	125.500
São Sebastião	1998	UASB + ES + LM	Ribeirão Santo Antônio da Papuda	121	226	77.717
Vale do Amanhecer	1998	UASB + LAF + LM	Rio São Bartolomeu	14	35	15.000
Santa Maria <sup>a</sup>	2000	UASB + LAT + ES + POLIMENTO FINAL	Ribeirão Alagado	42	154	84.852
Gama <sup>a</sup>	2003	UASB + RBN	Ribeirão Ponte Alta	197	328	182.630
Melchior <sup>a</sup>	2004	UASB + UNITANK®	Rio Melchior	885	1.469	896.799

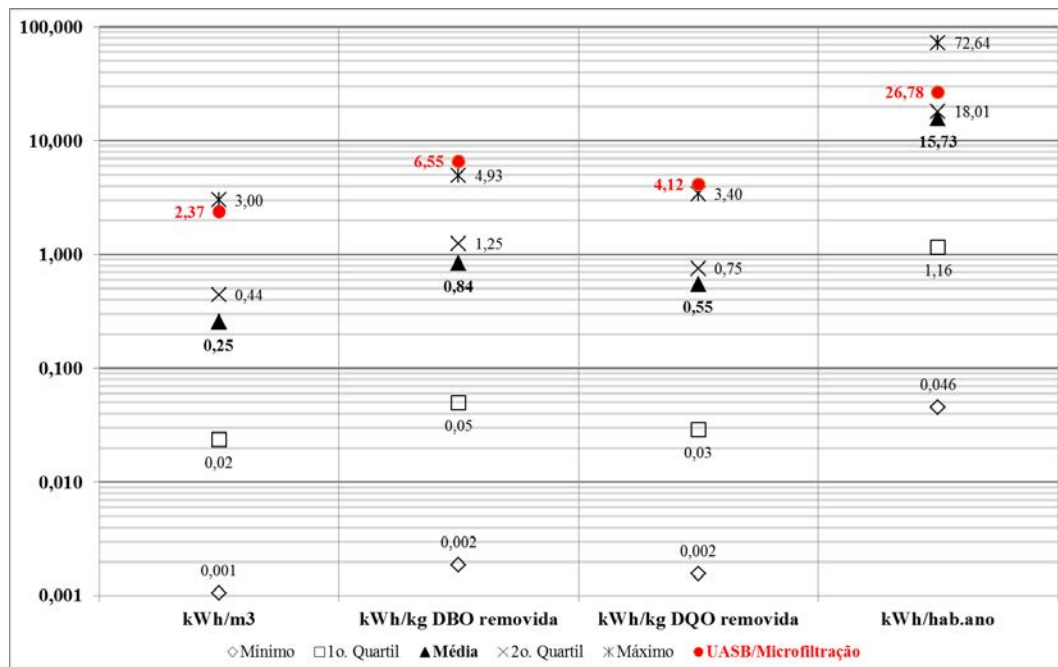
Legenda:...a – Estações de tratamento de esgotos sanitários com remoção de nutrientes (P<sub>T</sub> e/ou NT); LAC – Lodo ativado convencional, LAn – Lagoa Anaeróbia, LF – Lagoa Facultativa, RBN – Remoção biológica de nutrientes, UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, LAT – Lagoa de Alta Taxa, INFIL – Infiltração em areia, ES – Escoamento Superficial, RBNB – RBN por Bateladas, LP – Lagoa de Polimento, LM – Lagoa de Maturação, LAMC – Lagoa de Mistura Completa, LAF – Lagoa Aerada Facultativa, UNITANK® – Sistema de fluxo alternativo.

Fundamentado no histórico de 2009 a 2015 dos dados secundários e anuais de desempenho operacional e consumo de energia das 15 ETEs da CAESB computaram-se os quatros diferentes Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica (kWh/m<sup>3</sup>, kWh/kg DBO removida, kWh/kg DQO removida e kWh/habitante.ano). Os parâmetros estatísticos desta computação estão apresentados na Tabela 8, com valores de: (i) mínimo, (ii) 1º Quartil (percentil 25%), (iii) média (percentil 50%), (iv) 3º Quartil (percentil 75%) e (v) máximo.

**Tabela 8 – IDCEEs levantados da série histórica (2009 a 2015) das 15 ETEs da CAESB.**

Parâmetros	kWh/m <sup>3</sup>	kWh/kg DBO rem.	kWh/kg DQO rem.	kWh/hab.ano
Mínimo	0,001	0,002	0,002	0,046
1º Quartil (25%)	0,02	0,05	0,03	1,16
Média (50%)	0,25	0,84	0,55	15,73
3º Quartil (75%)	0,44	1,25	0,75	18,01
Máximo	3,00	4,93	3,40	72,64

No gráfico de pontos da Figura 3, ilustram-se as medidas estatísticas obtidas para os IDCEs do histórico (2009-2015) dos dados secundários e anuais de desempenho operacional e de consumo de energia das 15 ETEs da CAESB, com realce nos valores médios de todos indicadores representados pelo marcador triangular todo preenchido pela cor negra. Apresenta-se também ilustrado no gráfico os resultados alcançados para os mesmos indicadores pesquisados no tratamento de esgotos sanitários por reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas, destacado pelo marcador circular preenchido na cor vermelha. Observa-se que os valores obtidos nesta pesquisa para os indicadores de consumo são superiores às médias e aos valores máximos dos resultados das 15 ETEs divulgados pela CAESB, exceto os indicadores kWh/m<sup>3</sup> e kWh/hab.ano, que apresentaram valores entre o 3º Quartil (75%) e os máximos das referências. Dessa maneira, a filtração por membranas submersas, pelos resultados desta pesquisa, acusa um consumo de energia elétrica bem superior ao das ETEs da CAESB, para os dados do histórico de 2009 a 2015.



**Figura 3 – Gráfico de pontos representando as medidas estatísticas dos Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica obtidos da série histórica (2009 a 2015) das 15 ETEs da CAESB (em evidência os valores médios com marcador preenchido de cor negra) e os valores investigados e levantados pelo presente estudo do processo de tratamento de esgotos por reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas (em destaque preenchido com cor vermelha).**

Com os dados secundários das informações contidas na planilha eletrônica denominada “ENERWATER Benchmarking Database”, possível de ser baixada no sítio [www.enerwater.eu](http://www.enerwater.eu), calcularam-se os quatros diferentes Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica (kWh/m<sup>3</sup>, kWh/kg de DBO removida, kWh/kg de DQO removida e kWh/habitante/ano) para as plantas de tratamento de esgotos que fazem parte da base de dados de referência do projeto ENERWATER, constituídos da seguinte maneira: 214 unidades de depuração informantes para o indicador kWh/m<sup>3</sup>, 94 delas para o indicador kWh/kg de DBO removida, 172 para kWh/kg de DQO removida e 177 para kWh/habitante.ano. As medidas estatísticas obtidas estão apresentadas na Tabela 9, com valores de: (i) mínimo, (ii) 1º Quartil (percentil 25%), (iii) média (percentil 50%), (iv) 3º Quartil (percentil 75%) e (v) máximo.

**Tabela 9 – IDCEEs levantados do projeto ENERWATER (2014).**

Estatísticas	kWh/m <sup>3</sup>	kWh/kg DBO rem.	kWh/kg DQO rem.	kWh/hab.ano
Mínimo	0,06	0,11	0,05	3,00
1o. Quartil (25%)	0,36	1,64	0,75	33,00
Média (50%)	0,89	3,61	1,79	71,76
3o. Quartil (75%)	1,11	4,46	2,27	90,00
Máximo	5,77	27,54	10,56	372,00

O gráfico de pontos da Figura 4 ilustra as medidas estatísticas obtidas para os quatros diferentes Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica (kWh/m<sup>3</sup>, kWh/kg de DBO removida, kWh/kg de DQO removida e kWh/habitante/ano) para as plantas de tratamento de esgotos que fazem parte da base de dados de referência do projeto ENERWATER, está realçado os valores médios de todos indicadores representados pelo marcador triangular todo preenchido pela cor negra, apresenta-se também ilustrado no gráfico os resultados alcançados para os mesmos indicadores pesquisados no tratamento de esgotos sanitários por reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas, destacado pelo marcador circular preenchido na cor vermelha.

Novamente, neste comparativo é evidente que os valores obtidos neste trabalho para os indicadores de consumo são superiores as médias e aos 75% (3º Quartil) dos valores de referência, exceto o kWh/hab.ano, que apresentou o valor inferior a 25% dos resultados esperados (1º Quartil) das ETES da base do projeto ENERWATER.

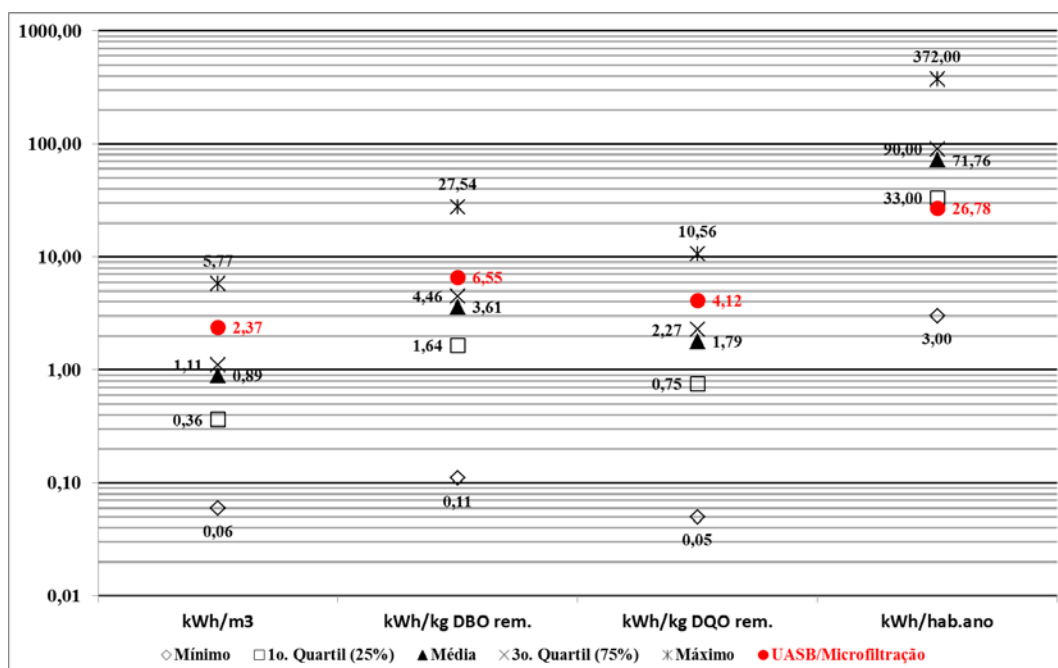
Dessa maneira a filtração por membranas submersas, pelos resultados desta pesquisa, demonstra um consumo de energia elétrica bem superior as ETES da base do projeto europeu ENERWATER, exceção ao indicador de desempenho *per capita* (kWh/m<sup>3</sup>).

Outro detalhe importante é que os resultados superiores da pesquisa estão mais próximos ao 3º quartil (75%) diferente da comparação anterior, com os dados da CAESB, onde os mesmos estão mais próximos aos extremos (máximos).

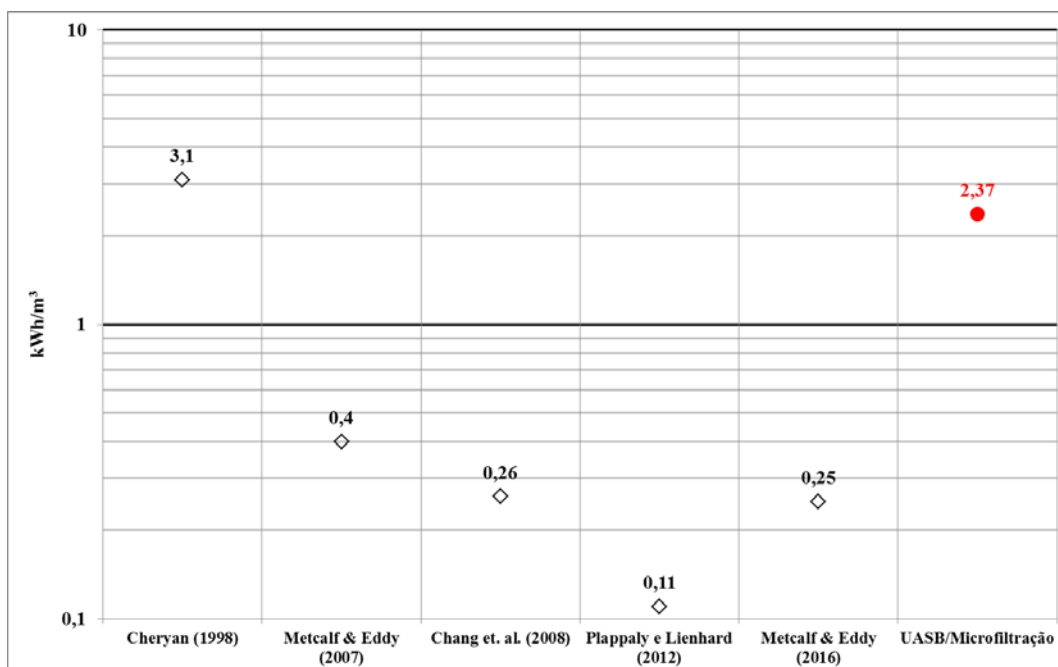
No gráfico de pontos da Figura 5, esboçam-se os Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica (kWh/m<sup>3</sup>) por autores descritos na Tabela 4 para a Microfiltração no tratamento de água e de esgoto e o valor atingido na presente pesquisa do processo de tratamento de esgotos sanitários por reator *UASB* seguido de Filtração por Membranas Submersas, cujo valor está realçado com o marcador circular vermelho.

No gráfico da Figura 5 constata-se que o indicador kWh/m<sup>3</sup> desta pesquisa é superior à maioria dos valores de referência, exceto na confrontação com o reportado pelo clássico livro de 1998 do Professor Cheryan, *The Microfiltration and Ultrafiltration Handbook*. Nota-se que a maioria dos valores de literatura encontrados para o indicador de desempenho do consumo de energia elétrica unitário é inferior a 1,00 kWh/m<sup>3</sup>.

Em comparações feitas como as deste trabalho outro aspecto relevante é o fator de escala, ou seja, o consumo de energia depende diretamente da vazão tratada, de maneira que à medida em que a vazão aumenta, o consumo tende a estabilizar. O indicador de desempenho *per capita*, kWh/m<sup>3</sup>, tende a ser menor nas estações de grande porte, ocorrendo a estabilização deste indicador a partir do valor de vazão tratada de 100.000 m<sup>3</sup>/d (1.160 l/s) (Metcalf & Eddy, 2016).



**Figura 4** – Gráfico de pontos representando os parâmetros estatísticos dos Indicadores de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica sondados na base de dados do projeto ENERWATER e os valores investigados e obtidos da presente pesquisa para o processo de tratamento de esgotos por reator UASB seguido de Filtração por Membranas Submersas (em destaque com cor vermelha).



**Figura 5** – Gráfico de pontos representando os valores do Indicador de Desempenho do Consumo de Energia Elétrica unitário (kWh/m<sup>3</sup>) para diferentes autores e o valor alcançado pelo presente trabalho para o processo de tratamento de esgotos por reator UASB seguido de Filtração por Membranas Submersas (em destaque marcador circular com preenchimento na cor vermelha).

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÃO

Os indicadores de desempenho do consumo de energia elétrica são *chaves* para avaliação da eficiência energética de ETEs, principalmente por que podem reportar o consumo de energia elétrica em relação ao volume de esgotos tratados, ou à população equivalente, ou à carga orgânica poluidora ou a outras cargas específicas removidas, com isto tornando prática e eficiente a aplicação de estudos comparativos entre diferentes processos de tratamento de esgotos.

Os resultados alcançados e apresentados dos indicadores de desempenho do consumo de energia elétrica desta experiência de operação de 61 dias consecutivos do processo de tratamento de esgotos sanitários por reator UASB seguido de Filtração por Membranas Submersas foram os maiores quando comparados com todas as referências propostas e analisadas.

Os resultados dos indicadores de desempenho do consumo de energia elétrica obtidos para o presente experimento e considerados neste estudo comparativo como os superiores, foram: 2,37 kWh/m<sup>3</sup>, 6,55 kWh/kg de DBO removida, 4,12 kWh/kg de DQO removida e 26,78 kWh/habitante/ano.

Recomenda-se para estudos futuros o desenvolvimento de um protocolo de comparação entre ETEs, como sugerido por Metcalf & Eddy (2016) e reportado por AWWARF (2014), que foi desenvolvido pela agência ambiental americana de meio-ambiente (USEPA, 2013; USEPA, 2014) inspirado na iniciativa conhecida - ENERGY STAR<sup>®</sup>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. An, Y. Y.; Yang, F.; Buccioli, B.; Wong, F. **Municipal Wastewater Treatment Using a UASB Coupled with Cross-Flow Membrane Filtration**. Journal of Environmental Engineering (ASCE), 135, 2, 86-91 p., 2009.
2. Andersson, L. G. **Energy Savings at Wastewater Treatment Plants**. Commission of the European Communities. Brussels, Luxembourg, 76 pp., 1980.
3. AWWARF. **Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities**. AWWA Research Foundation, Denver, CO, USA, 196 pp., 2007.
4. Al Baz, I.; Otterpohl, R.; Wendland, C. (Editors). **Efficient Management of Wastewater – Its Treatment and Reuse in Water-Scarce Countries**. Springer-Verlag, Berlin, Alemanha, 310 pp., 2008.
5. CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal). **Relatório Anual sobre Consumo de Energia Elétrica na CAESB (documento interno)**. 50 pp., 2015.
6. Chang, Y.; Reardon, D. J.; Kwan, P.; Boyd, G.; Brant, J.; Raknes, K. L.; Furukawa, D. **Evaluation of Dynamic Energy Consumption of Advanced Water and Wastewater Treatment Technologies**. AWWA Research Foundation, USA, 262 pp., 2008.
7. Cheryan, M. **The Microfiltration and Ultrafiltration Handbook – Second Edition**. Technomic Publishing, Pennsylvania, USA, 536 pp., 1998.
8. Bahia, S. R. (coordenador). **Eficiência Energética nos Sistemas de Saneamento (Guia Técnico)**. IBAM (Instituto Brasileiro de Administração Municipal) e Eletrobrás – PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), 76 pp., 2004.
9. Governo do Brasil. **Lei 11.445/2007 - Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis n<sup>os</sup> 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei n<sup>o</sup> 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 de janeiro de 2007, 18 pp., 2007.
10. James, K.; Campbell, S. e Godlove, C. E. **Água e Energia – Aproveitando as oportunidades de água e energia não exploradas nos sistemas de água municipais**. Alliance – Aliança para conservação de Energia, USAID, Washington-DC, EUA, 159 pp., 2002.
11. Jordão, E. P. **Eficiência Energética em Tratamento de Esgotos**. Revista DAE edição de Maio, 15-19 p., 2008.
12. Metcalf & Eddy. **Water Reuse Issues, Technologies and Applications**. McGraw-Hill Companies, New York, USA, 1503 pp., 2007
13. Metcalf & Eddy. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5<sup>a</sup> Edição (em português). McGraw-Hill Educação, Porto Alegre, RS, Brasil, 1980 pp., 2016.

14. Ministério das Cidades – **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Serviço Nacional de Informação de Saneamento – SNIS, 2007.
15. Plappally, J. H.; Lienhard, V. **Energy requirements for water production, treatment, endues, reclamation and disposal**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 4818–4848 p., 2012.
16. Porto, R. M. **Hidráulica Básica – Quarta Edição**. Editora USP Projeto REENGE, São Paulo, Brasil, 519 pp., 2006.
17. Spellman, F. R. **Water & Wastewater Infrastructure – Energy Efficiency and Sustainability**. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 466 pp., 2013.
18. Sousa, P. F. B.; Peter, M. G. A.; Pinto, D. S.; Negreiros, J. M.; Campos, F. M. **Relação entre indicadores operacionais e financeiros: estudo das companhias estaduais de saneamento básico no Brasil**. XIX Congresso Brasileiro de Custos, 16 pp., 2012.
19. UFMG. **Relatório de Proposição dos Indicadores de Desempenho (Produto 4) – Convênio ADASA-UFMG para Desenvolvimento de Metodologia para a Avaliação de Desempenho de Estações de Tratamento de Água e de Esgotos no Distrito Federal**. Escola de Engenharia – Departamentos de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) e de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos (DEHRH), 133 pp., 2012.
20. USEPA. **Energy Efficiency in Water and Wastewater Facilities – A Guide to Developing and Implementing Greenhouse Gas Reduction Programs**, 56 pp., 2013.
21. USEPA. **ENERGY STAR® Score for Wastewater Treatment Plants in the United States Portfolio Manager® Technical Reference**, 9 pp., 2014.
22. Wen, C.; Huang, X.; Qian, Y. **Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration**. Process Biochemistry, 35, 335-340 p., 1999.