

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM TRATAMENTO DE EFLUENTES – RENASCIMENTO DA TECNOLOGIA DE FILTROS PERCOLADORES

André G. Gomes⁽¹⁾

Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade Católica Portuguesa, Portugal, 2003, e Especialista em Gestão e Tratamento de Resíduos Industriais pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2005. Atualmente, Gerente Regional de Vendas WWP para a América do Sul na empresa GEA Sistemas de Resfriamento Ltda. (GEA Group), Indaiatuba-SP, Brasil.

Christian-Dominik Henrich

Graduado em Engenharia pela Bingen University, Alemanha, 2006, Mestrado pela Clemson University, EUA, 2008, e Doutorado pela Clemson University, EUA, 2010. Atualmente, Gerente de Projetos WWP na empresa GEA 2H Water Technologies GmbH (GEA Group), Wetztingen, Alemanha.

Endereço⁽¹⁾: Condomínio Empresarial Alpha Park, Pav. 10, Estrada Municipal, 691 - Bairro Sapezal - Indaiatuba - SP - CEP: 13337-200 - Brasil - Tel: +55 (19) 3936-1522 - Fax: +55 (19) 3936-1171 - e-mail: andre.gomes@gea.com

RESUMO

A nova geração de sistemas de filtros percoladores é avaliada como um meio energeticamente eficiente para tratar águas residuais, quer para uso posterior como para descarga final. Dependendo do tipo de aplicação, uma estação com filtros percoladores pode ser desenhada para gerar qualidades de efluentes apropriadas para diferentes fins, tais como fertilização, irrigação ou abastecimento de água para tratamento posterior, uso industrial ou descarga final. Então, a remoção de carbono, nitrificação ou desnitrificação podem ser obtidas de forma selecionada, enquanto se conserva o consumo de energia e se reciclam nutrientes valiosos. Será fornecida uma breve visão do *state of the art* no desenho e operação de filtros percoladores, com uma avaliação das possibilidades atuais e vantagens da utilização de filtros percoladores. O consumo de energia elétrica investigado em 3 estações de tratamento com filtros percoladores foi de 0,057 kWh/m³ ou 0,175 kWh/kg-COD para a Estação de Tratamento de Esgotos Batumi tskali, na Geórgia, 0,12 kWh/m³ ou 0,22 kWh/kg-COD para a Estação de Tratamento de Esgotos Manágua, na Nicarágua, e de 0,11 kWh/m³ ou 0,16 kWh/kg-COD na Estação de Tratamento de Esgotos Walvis Bay, na Namíbia. Finalmente, é sugerida uma configuração sustentável de filtros percoladores visando diversos fins de reuso em um âmbito de afluentes de variação sazonal e de características desejadas para os efluentes.

PALAVRAS-CHAVE: filtros percoladores, eficiência energética, nova geração de filtros

INTRODUÇÃO

O tratamento ineficiente de águas residuais é um dos maiores inimigos de um abastecimento de água seguro e sustentável por todo o mundo. A seguir à utilização prudente e frugal dos recursos de água existentes, é importante o tratamento das águas residuais visando a reutilização futura. Infelizmente, todos os efeitos alusivos ao incremento da capacidade de abastecimento de água através da recarga de águas subterrâneas, ou pelo aumento em águas superficiais, devem ser ponderados contra o custo de capital, custo de necessidades de energia e outros custos variáveis de instalações de tratamento de águas residuais. Com o aumento constante dos custos por unidade de energia, é da maior importância que o tratamento futuro de águas residuais para reuso esteja preparado para ser energeticamente eficiente. Especialmente em países recentemente industrializados, os principais itens a considerar em processos e sistemas de tratamento de efluentes são a fiabilidade e a simplicidade. Operações unitárias de baixa manutenção são importantes para assegurar um tratamento contínuo das águas residuais afluentes (SPERLING, 1996).

Até à década de 1980, os filtros percoladores tinham sido promovidos nos países ocidentais como processos energeticamente eficientes na utilização de sistemas microbiológicos para tratar águas residuais. Aí, a única necessidade energética era a elevação da água por bombeamento para que fosse distribuída no topo do filtro. Construindo a estação de tratamento em uma encosta, os custos de bombeamento podiam ser ainda mais reduzidos já que a água podia ser alimentada por gravidade. A água então “percola” através de um leito

filtrante de mídia adequada onde o biofilme que se desenvolve aderido purifica a água. A maior diferença com, por exemplo, um sistema de lodos ativados, é que a necessidade de oxigênio é normalmente satisfeita apenas por ventilação natural, sem qualquer necessidade de aeração por equipamentos avançados e de elevado consumo energético. No entanto, fatores como a demanda crescente na qualidade dos efluentes e problemas de processo tais como a colmatação do leito filtrante em filtros percoladores convencionais com recheio à base de pedra britada, para além de um baixo entendimento das características da remoção de nutrientes, aliado a uma modelação deficitária dos processos que realmente ocorrem no interior de filtros percoladores, levaram ao declínio na sua utilização (PARKER, 1999).

Em conjunto com enchimentos plásticos recentemente desenvolvidos e o aumento da importância da sustentabilidade, o filtro percolador está a renascer. Especialmente em combinação com outras operações unitárias, tais como pré-tratamentos anaeróbios e desenhos otimizados dos processos, esta nova geração de sistemas de filtros percoladores é capaz de tratar águas residuais até padrões muito elevados, enquanto oferecem uma baixa necessidade de consumo energético e um alto nível de simplicidade e robustez. É por estas razões que novos projetos de filtros percoladores são implementados por todo o mundo, enquanto muitos deles recebem fundos de instituições internacionais, tais como o Banco Mundial e outros, com foco no desenvolvimento sustentável.

Quando se tratam águas residuais com o intuito da sua reutilização para diversas finalidades, o objetivo nem sempre é tratar a água residual até aos níveis mais baixos possíveis. A forma mais económica será tratar a água exatamente até ao nível de qualidade que é requerida para o seu objeto de reuso (Tabela 1).

Tabela 1: Limites de descarga para água de reuso em vários países, com indicação dos critérios quanto a DBO, CQO, NH₄ e NO₃ para uma seleção de aplicações.

	DBO	CQO	NH ₄	NO ₃
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Jordan ¹				
Descarga em corpo receptor	60	150	15	45
Recarga de águas subterrâneas	15	50	5	30
Vegetais cozinhados; parques infantis	30	100		30
Agricultura	300	500		45
Bosques e áreas verdes	200	500		45
EPA ²				
Reuso urbano (acesso público não restrito)	10			
Reuso urbano (acesso público restrito)	30			
Cultivo para alimentação	10			
Cultivo para outros fins	30			
WHO ³				
Irrigação de cultivos capazes de ingestão crua; campos de esportes; parques públicos	20			
Irrigação de cultivos de cereais; cultivos industriais; pastio; e bosques	240			
Kuwait				
Água de reuso	20	100	15	
Oman				
Vegetais capazes de ingestão crua	15	150	5	50
Vegetais para serem cozinhados	20	200	10	50
Dubai ⁴				
Irrigação não restrita	5	150	5	50
Irrigação restrita	20	200	10	50

¹(JS: 893/2002) ²(EPA, 2012) ³(WHO, 2006) ⁴(Dubai Municipality, 2011)

A Nova Geração de Filtros Percoladores (N-FP) combinada com o desenho e operação inteligentes de estações de tratamento de águas residuais permite uma altíssima flexibilidade. A N-FP inclui a capacidade de tratar águas até uma qualidade do efluente final comparável a processos de Lodos Ativados (LA) e Lodos Ativados com Remoção Biológica de Nutrientes (LA-RBN). Além disso, os filtros percoladores oferecem a possibilidade de se produzir uma variedade de efluentes tratados que vai de encontro às necessidades locais específicas durante variações sazonais, a custos operacionais e de manutenção muito reduzidos. Uma comparação mais detalhada entre os processos LA e LA-RBN versus o sistema N-FP é fornecida por LEMPert (2013).

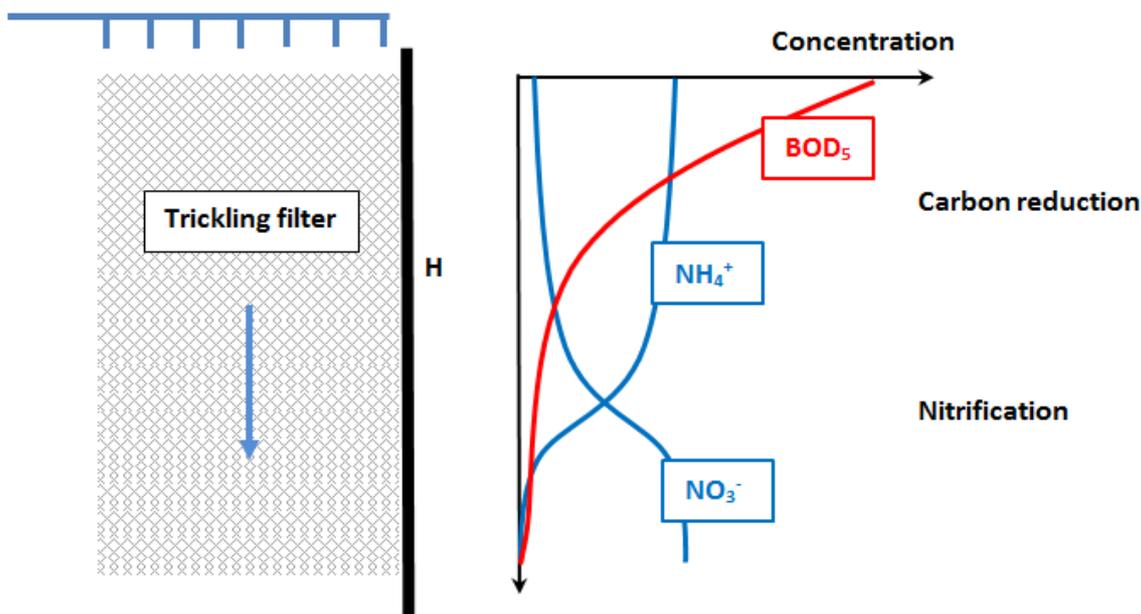
OBJETIVO

• PROCESSO DO FILTRO PERCOLADOR

Um filtro percolador é um sistema de tratamento por crescimento e adesão de biofilme em um meio de suporte (vulgo meio filtrante, recheio, enchimento, etc.), onde a água residual a tratar “percola” através do recheio, sobre o qual o biofilme se desenvolve. A água residual é distribuída sobre o topo do filtro através dos braços de um distribuidor rotativo, que podem ser movidos quer hidraulicamente como através de motor elétrico. O oxigênio é fornecido ao sistema por aberturas para ventilação no fundo do filtro, através das quais o ar flui livremente. O enchimento é colocado sobre uma subestrutura, normalmente constituída por vigas paralelas, dispostas sobre pilares de concreto (existem várias opções possíveis).

Nos filtros percoladores, as bactérias heterotróficas e autotróficas são limitadas principalmente pelo espaço, assumindo que o oxigênio é fornecimento em excesso através da ventilação. Na parte superior de um filtro percolador, as bactérias heterotróficas utilizam a DBO como substrato. As nitrificantes não podem competir devido ao seu crescimento lento e taxas metabólicas inferiores. Com o aumento da profundidade, medida desde o topo do enchimento, as concentrações de DBO diminuem até um nível em que o crescimento da biomassa heterotrófica é suficientemente reduzido que permite então o crescimento das nitrificantes (vide Figura 1). Esta ocorrência tem sido descrita em muitas publicações disponíveis (EVANS et al., 2004; PARKER & RICHARDS, 1986; PEARCE & JARVIS, 2011). Foi já reportado que a nitrificação é iniciada quando a concentração de DBO solúvel é inferior a 20 mg/L (PARKER & RICHARDS, 1986). A carga de DBO afluente e a altura de desenho do filtro determinam então o nível de nitrificação que pode ser esperado.

Figura 2: Profundidade de um filtro percolador versus remoção de DBO e NH_4 (GUJER, 1999).



• TIPOS DE ENCHIMENTOS EM FILTROS PERCOLADORES

Um componente muito importante de um filtro percolador é o suporte do biofilme. O material do meio de suporte ideal possui uma elevada área superficial, grande durabilidade, e tem um elevado índice de vazios, ou porosidade, para evitar colmatção e assegurar a circulação e fornecimento de oxigênio (DAIGGER & BOLTZ, 2011). Existem muitos tipos de materiais que podem ser utilizados como meios de suporte em filtros percoladores. Os mais comuns são a pedra, plásticos estruturados em configuração cruzada ou vertical, e enchimentos randômicos. Um grande número de estudos tem demonstrado a superioridade do enchimento estruturado cruzado em comparação com o enchimento estruturado vertical, enchimentos randômicos e recheios à base de pedra ou brita (SARNER, 1978; PARKER & MERRILL, 1984; BOLLER & GUJER, 1986; RICHARDS AND REINHARDT, 1986), mas os enchimentos estruturados verticais ainda têm vantagens para aplicações industriais e de desbaste, operando com cargas orgânicas superiores a 2-2,5 kg/m³. A Tabela 2 indica as características de uma seleção de meios de suporte disponíveis para filtros percoladores.

Tabela 2: Uma seleção de meios de suporte para filtros percoladores.

Tipo de enchimento		Área superficial específica (m ² /m ³)	Índice de vazios (%)
Pedra, Brita, Escórias ou Lava¹		~ 40-80	50-60
Enchimento estruturado de fluxo cruzado em Polipropileno²		100 to 240	>97
Enchimento estruturado de fluxo vertical em Polipropileno²		125	>97

¹(DAIGGER & BOLTZ, 2011), ²Fabricante: GEA 2H; BIOdek

MATERIAIS E MÉTODOS

• CONFIGURAÇÕES DE SISTEMAS DA NOVA GERAÇÃO DE FILTROS PERCOLADORES

Os filtros percoladores podem ser usados para a remoção de carbono, nitrificação ou desnitrificação (ATV-DVWK-A 281). A nitrificação pode ser realizada quer no mesmo filtro percolador onde ocorre a remoção de carbono, como em um tratamento terciário em um filtro em separado. Dependendo da configuração das linhas do processo e do enchimento e suas dimensões, diferentes objetivos de tratamento podem ser alcançados. São indicados na Tabela 3, objetivos do tratamento, desenho de processo e consumo de energia aproximado.

Tabela 2: Uma seleção de meios de suporte para filtros percoladores.

	Objetivo do tratamento	Desenho de processo	Requisitos aproximados de consumo de energia*
A	Desbaste de DBO, DBO <40-100mg/L	Filtro percolador de Alta Taxa Desenho por taxa aplicada (>1,5 Kg/m³.day)	<0,15 kWh/m ³
B	Remoção total de DBO, DBO <10-20 mg/L	Desenho de Filtro baseada em Equação (Velz)	<0,15 kWh/m ³
C	Nitrificação parcial, NH4 <15	Desenho de Filtro baseada em Equação (Velz + Gujer/Boller)	<0,15 kWh/m ³
D	Nitrificação total, NH4 <1-2	Desenho de Filtro baseada em Equação (Velz + Gujer/Boller)	<0,2 kWh/m ³ (estágio único) <0,3 kWh/m ³ (estágio duplo)
E	Desnitrificação parcial, 50-80% NT removido	Desenho de Filtro baseada em Equação (Velz + Gujer/Boller), balanço mássico para o tratamento anóxico	<0,3 kWh/m ³
F	Desnitrificação total, >90% NT removido	Desenho de Filtro baseada em Equação (Velz + Gujer/Boller), balanço mássico para o tratamento anóxico e outro tratamento posterior (tipo OR, filtro de areia, etc.)	<0,4 kWh/m ³

*A, B e C implicam consumos de energia idênticos, uma vez que apenas os diâmetros dos filtros são aumentados para reduzir a taxa aplicada necessária de modo a obter uma maior qualidade no tratamento. Uma taxa de recirculação adequada para diluir águas afluentes com elevadas cargas é considerada. D, E e F incluem necessidades de bombeamento adicionais para o processo e não são requeridas para diluição.

- **Em referência à Tabela 3 com processos de A a F:**

Processos A e B: a remoção de DBO pode ser obtida utilizando filtros percoladores de forma individual (ou vários em paralelo), com enchimento adequado para a redução da DBO (Figura 2). O crescimento heterotrófico produz uma grande quantidade de biomassa. Na nova geração de filtros percoladores (N-FP), são utilizados os enchimentos estruturados com canais largos do tipo cruzado para evitar a colmatação. Normalmente estes filtros percoladores são dimensionados de modo a que o volume não seja suficiente para permitir a nitrificação. Com esta configuração, os valores de DBO no efluente podem atingir valores abaixo de 25 mg/L DBO (Processo B). Para a remoção parcial de DBO, o desenho do filtro tem que considerar a limitação pelo oxigênio e também o peso devido ao excesso de produção de lodos heterotróficos. Devem ser consideradas cargas máximas de 2,5 a 3 kgDBO/m³.d, enchimentos estruturados de elevada resistência com canais verticais, e lavagens frequentes (Processo A).

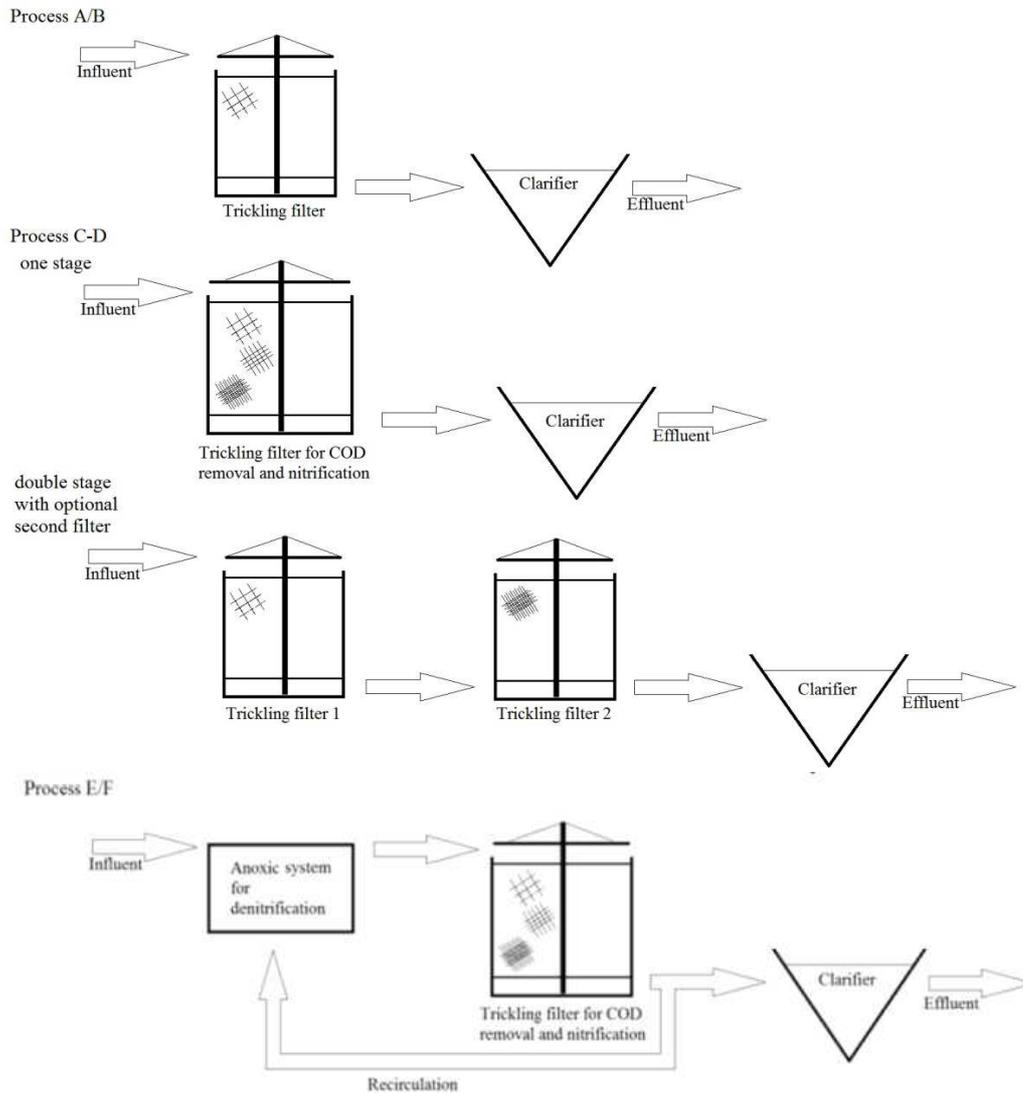
Processos C e D: em filtros percoladores em série, o filtro percolador principal para remoção de DBO (normalmente o primeiro) deve ser desenhado para atingir uma concentração de DBO < 25 mg/L (Figura 2). Então, o filtro percolador secundário pode ser desenhado utilizando-se um enchimento com canais menores para que possua maior área superficial específica e conseqüentemente maior capacidade de nitrificação. Aqui, o potencial de colmatação é mínimo, uma vez que a geração de biomassa pela nitrificação é baixa. Este processo tem sido investigado em muitas publicações (BOLLER & GUJER, 1985, MULLER et al., 2006, HU et al., 2003). Os filtros percoladores em série permitem que a nitrificação ocorra em separado (nitrificação terciária). Filtros percoladores terciários pode ser também adicionados a sistemas existentes de Lodos Ativados (LA) para que se obtenha nitrificação a baixo custo (HU et al., 2003, MULLER et al., 2006).

A nova geração de filtros percoladores permite o desenho com diferentes tipos de enchimentos estruturados, distribuídos em camadas de resistência adequada para a produção esperada de biomassa, desde canais amplos, cruzados ou verticais, até reduzidos canais cruzados, mas com elevadas áreas superficiais.

Enchimentos estruturados de canais amplos podem ser colocados nas camadas do topo, para o crescimento heterotrófico, e os enchimentos estruturados com canais de menor diâmetro nas camadas inferiores, para o crescimento autotrófico (Figura 2). Esta configuração reduz os custos de bombeamento, uma vez que a água não terá que ser bombeada duas vezes; em vez disso, o diâmetro do primeiro filtro percolador é aumentado para permitir a nitrificação.

Processos E e F: a combinação de filtros percoladores para a remoção de DBO e nitrificação com um sistema anóxico permite a desnitrificação integrada (Figura 2). Estes sistemas anóxicos podem ser Lodos Ativados (VESTNER, 2003) ou tecnologias de biofilme fixo, assim como sistemas de filtro percolador selados (DORIAS, 1996). Enquanto as soluções A a D são bem conhecidas, o nível de remoção de nitrogênio total (NT) nas soluções E e F terá um maior grau de complexidade e custos de instalação e operação. O nível de desnitrificação é determinado através da quantidade de nitrato em recirculação. Desenhos especiais desta versão podem atingir valores de NT no efluente inferiores a 10 mg/L.

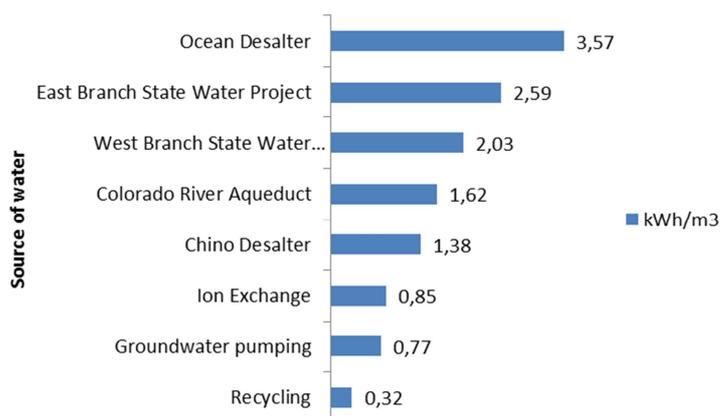
Figura 2: Configurações de filtros percoladores, desde filtros individuais para aplicações de desbaste de DBO até configurações com recirculação para câmara anóxica para desnitrificação. Os processos A e B são para remoção de DBO, os processos C e D são para a remoção de DBO e para nitrificação, os processos E e F são para desnitrificação integrada.



- **CONSUMO DE ENERGIA PARA O REUSO DA ÁGUA**

O reuso da água é uma opção para diminuir a necessidade de energia elétrica no abastecimento de água. A água pode ser produzida através de diversos processos, como indicado na figura 3. Fontes de água podem ser as águas subterrâneas, dessalinização de água dos oceanos, e outras. A energia necessária por m^3 varia de 0,77 kWh/ m^3 , quando bombeada desde poços ou rios, até 3,57 kWh/ m^3 , quando produzida por dessalinização. A água necessária para fins agrícolas ou outros teria que ser obtida pelo mesmo modo se não reutilizada após tratamento.

Figura 3: Consumo de energia elétrica para a produção de água potável através de vários processos.



Fonte: California's Water – Energy Relationship 2005 California Energy Commission, California, USA

Quando observado um consumo de energia necessário para a produção de água de até 3,57 kWh/m³, a opção de reutilizar a água tratada a baixo custo torna-se mais importante e muito relevante. Reutilizar a água efluente de sistemas de lodos ativados pode ser conseguido ao custo de 0,4 kWh/m³ e superior, mas muito inferior comparado com a dessalinização. Quando observadas estações de filtros percoladores, o custo pode ser reduzido ainda mais, para valores abaixo de 0,2 kWh/m³, para um tratamento equivalente. O maior requisito de energia elétrica para a operação de filtros percoladores é a energia para bombear a água até ao topo do enchimento e a recirculação. A energia para aeração normalmente não é requerida, uma vez que a maioria dos filtros percoladores opera com ventilação natural. Se a localização da estação de tratamento possui uma geografia favorável e condições de temperatura favoráveis, é possível operar um filtro percolador para a remoção de carbono e nitrificação praticamente sem consumo de energia elétrica.

Foi investigado o consumo de energia elétrica de 3 estações de tratamento de águas residuais atualmente em operação, em termos do uso de energia por m³ e por kg-DQO tratado. Estas estações são parceiras em um projeto de pesquisa atualmente em curso pelo Ministério da Educação e Pesquisa da Alemanha. O projeto é chamado de EXPOVAL e o objetivo é a validação dos procedimentos de desenho de estações de tratamento de efluentes em países de clima quente e frio. Um dos autores do presente trabalho, em conjunto com outros, faz parte do subgrupo designado para validar o desenho de filtros percoladores nesse projeto.

A primeira estação de tratamento está localizada em Walvis Bay, Namíbia. Nessa estação, dois dos três filtros percoladores tiveram o recheio à base de pedra removido, tendo sido instalado enchimento estruturado cruzado. Para o balanço de energia, foi investigado um filtro com 45 m de diâmetro e 3 metros em profundidade. Ao filtro é alimentada uma carga de 5500 m³/d com DQO de 950 mg/L, que é tratada até 240 mg/L. A amônia é reduzida de 51 mg/L para 4 mg/L (nitrificação > 90%). Os custos para bombear a água até aos distribuidores é de 624 kWh/d, implicando 0,16 kWh/kg-DQO ou 0,11 kWh/m³ de água tratada (incluindo a nitrificação). Isto exclui a energia necessária para os tratamentos prévios e posteriores aos filtros.

A segunda estação de tratamento investigada foi a Batumi tskali, na Geórgia. Esta estação está desenhada para tratar as águas residuais de uma população equivalente de 200.000 habitantes. A estação está equipada com gradeamento padrão e lagoas anaeróbias. As lagoas são seguidas por 4 filtros percoladores de 28 metros de diâmetro e 5 metros de profundidade, preenchidos com enchimento estruturado. Os requisitos em termos de energia para o bombeamento da água até aos distribuidores rotativos dos filtros percoladores são em média 3.750 kWh/d para bombear 65.800 m³/d. A água é tratada de 197 mg/L de DQO e 9,9 mg/L de NH₄-N até <33 mg/L DQO e <0,5 mg/L NH₄-N. Isto implica um consumo energético de 0,35 kWh/kg-DQO ou 0,057 kWh/m³ (com nitrificação >95%). No cálculo não se inclui o consumo de energia elétrica para o pré-tratamento mas é incluída uma vantagem hidráulica na elevação desde o pré-tratamento anaeróbio até ao sistema de filtros percoladores. Adicionalmente, a água residual é formada pelos esgotos combinados com águas pluviais (aproximadamente cerca de 50% de águas pluviais).

A terceira estação de tratamento de esgoto está localizada em Manágua, Nicarágua. Esta estação está temporariamente tratando uma vazão média de 100.000 m³ por dia. Inclui pré-tratamento com gradeamento padrão, remoção de sólidos e sedimentação primária. Em seguida à sedimentação primária existem 6 filtros percoladores com um diâmetro de 35 m e uma profundidade de 5,1 m cada, preenchidos com enchimento estruturado do tipo cruzado. Os filtros percoladores estão desenhados apenas para a remoção de DBO; no entanto, ocorre nitrificação parcial. O valor da DQO filtrada no efluente dos filtros percoladores é inferior a 50

mg/L, e a DBO alimentada é de aproximadamente 600 mg/L. A estação reportou um consumo energético de 0,12 kWh/m³ de água tratada. Este valor é para o tratamento completo. Os resultados das 3 estações de tratamento estão sumariados na Tabela 4.

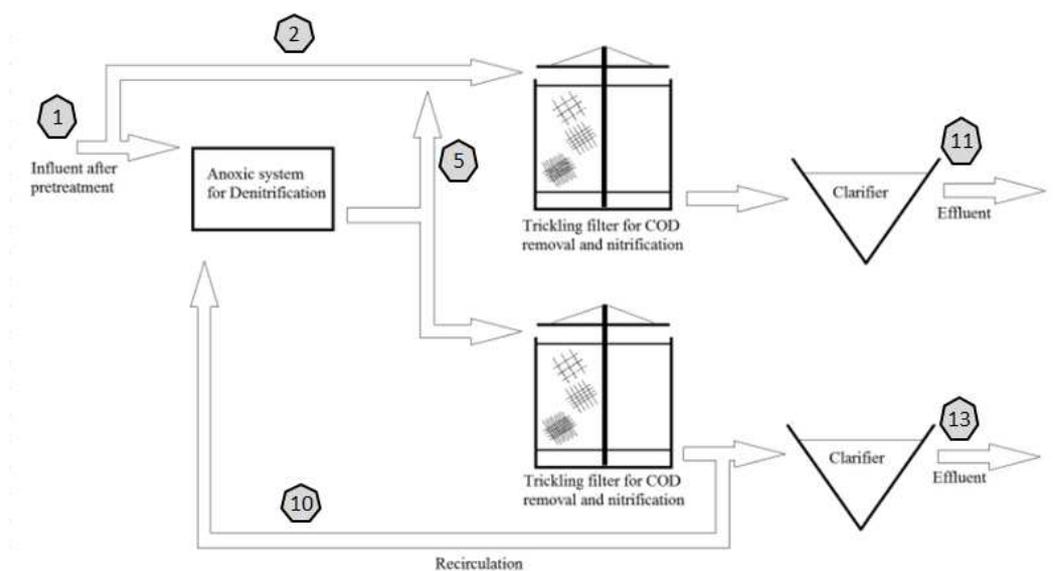
Tabela 4: Consumo de energia elétrica de sistemas de filtros percoladores em grande escala, operando em Batumi, Manágua e Walvis Bay.

Estação / Fonte	Remoção de DQO		Remoção de DQO + nitrificação		Observações
	kWh/m ³	kWh/kg-DQO	kWh/m ³	kWh/kg-DQO	
Estação de Tratamento de Esgoto Batumi tskali			0,057 sem elevação: (0,114)	0,35 sem águas pluviais: (0,175)	Elevada fração de águas pluviais ~50%, Elevação pré-tratamento ~50% Valores para Estação completa. Nitrificação completa.
Estação de Tratamento de Esgoto Manágua	0,121	0,22			Valores para Estação completa. Nitrificação parcial.
Estação de Tratamento de Esgoto Walvis Bay			0,11	0,16	Valores para tratamento secundário, excluindo pré e pós-tratamento. Nitrificação completa. Águas com fração de origem industrial.

• **CONFIGURAÇÃO PROPOSTA PARA O FILTRO PERCOLADOR**

Os processos de A a F discutidos na Tabela 3 oferecem grandes possibilidades de se desenharem processos de filtros percoladores adequados para diferentes objetivos de reuso, conforme sejam necessários ao nível local. Para uma maior flexibilidade no tratamento de águas residuais para reuso, é sugerida uma configuração para a geração de filtros percoladores, de modo a permitir um maior grau de flexibilidade (Figura 4). A configuração inclui tratamento anóxico, e uma série de filtros percoladores e decantadores secundários. O objetivo é produzir diferentes qualidades de efluentes, e ao mesmo tempo preservar nutrientes quando são necessários, ou removê-los quando requerido. Além disso, esta configuração pode ser adaptada para operar conforme diferentes condições sazonais, sempre que necessário.

Figura 1: Configuração proposta para um sistema de filtros percoladores multi efluentes, incluindo pré-tratamento, tanque anóxico, filtro percolador 1 e 2 (remoção de DBO e nitrificação), dois decantadores secundários, (possível nitrificação terciária ou remoção de fósforo) e pós-tratamento.



1: Alimentação após pré-tratamento; 2: By-pass para o Filtro 1; 5: Vazão mista para Filtro 1; 10: Recirculação desde o Filtro 2; 11: Efluente do Filtro 1 após Sedimentação (para pós-tratamento); 13: Efluente do Filtro 2 (para pós-tratamento).

Os sistemas de filtros percoladores podem ser desenhados para oferecer a maior flexibilidade possível quando combinados com um tratamento anóxico. O processo proposto consiste em uma unidade anóxica desenhada para permitir desnitrificação superior a 90%, dois filtros percoladores em paralelo, um desenhado para atingir 50% de nitrificação operando individualmente, e outro para atingir 100% de nitrificação operando individualmente (que é o caso que se apresenta como exemplo), além de dois decantadores secundários (com sedimentação intermediária opcional). Os filtros são constituídos por enchimento estruturado à base de chapas especialmente corrugadas, com canais cuja abertura vai sendo reduzida desde o topo até ao fundo do filtro, para otimização da área superficial do enchimento e para evitar colmatação. Fazendo referência à Figura 4, na câmara anóxica o afluente bruto pode ser combinado com uma vazão de recirculação rica em nitrato para permitir a desnitrificação. Parte do afluente bruto pode ser desviado da câmara anóxica e ser alimentado ao Filtro 1 com maior carga de DBO de modo a produzir um efluente não nitrificado, se necessário. O outro circuito iria através do segundo filtro percolador, que fará a nitrificação completa. Porque a água que sai da unidade anóxica terá uma DBO baixa devido à desnitrificação, isso permitirá a nitrificação no filtro seguinte (por simplicidade, assumindo condições anóxicas ótimas). Esta configuração produz dois efluentes, um onde apenas a DBO foi removida, e outro que estaria totalmente nitrificado e desnitrificado, dependendo da taxa de recirculação. As vazões podem ser alteradas em conformidade com as variações sazonais de vazões e com as características requeridas do efluente final (podem ser necessários procedimentos de lavagem, pequenas adaptações operacionais ou aeração otimizada na câmara anóxica, mas não foram considerados aqui).

Quando operações unitárias individuais são desenhadas para lidar com um intervalo de cargas hidráulicas, a biologia dentro de um filtro percolador irá variar com a diminuição da carga de DBO, desde não-nitrificantes ou parcialmente nitrificantes até nitrificação total. O pré-tratamento (gradeamento, etc.) e o pós-tratamento (desinfecção, etc.) deverá ser desenhado normalmente.

MATERIAIS E MÉTODOS

A modelação foi realizada utilizando conceitos gerais de balanço mássico para o cálculo de vazões. Para o cálculo do desempenho dos filtros percoladores foram usadas a equação de Velz e as equações de Gujer e Boller. O cálculo da desnitrificação foi simplificado para mostrar o conceito. A influência dos decantadores secundários não foi considerada (portanto, foi investigada a DBO solúvel).

Para o desenho de filtros percoladores é usada a equação de Velz, para a modelação da remoção da DBO. Com o coeficiente de correção de temperatura, a equação é agora conhecida como a equação modificada de Velz (WEF, 2000).

$$\frac{S_e}{S_{in}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{k_{20} \cdot A_s \cdot D \cdot \theta^{T-20}}{q_A^n}\right)} \quad \text{equação (1)}$$

S_e = concentração de DBO solúvel no efluente do filtro percolador [mg/l]

S_{in} = concentração de DBO solúvel no afluente ao filtro percolador [mg/l]

k_{20} = coeficiente de taxa de reação a 20 °C [(l/ m²s)ⁿ]

A_s = área específica do enchimento [m²/m³]

D = profundidade do enchimento [m]

θ = fator de correção de temperatura (tipicamente 1.035)

T = temperatura da água a tratar (aqui, 20°C) [°C]

q_A = carga hidráulica (incluindo recirculação) [l/ m²s]

n = expoente de vazão (tipicamente 0.5)

A nitrificação é calculada usando o modelo desenvolvido por Gujer e Boller (1986) baseado em princípios de balanço de massa.

$$\frac{D \cdot A_s \cdot j_{N,max}(T)}{q_A} = S_{N,i} - S_{N,e} + N \cdot \ln\left(\frac{S_{N,i}}{S_{N,e}}\right) \quad \text{equação (2)}$$

A_s = área superficial específica do enchimento [m²/ m³]

$j_{N,max}$ = taxa máxima de nitrificação (aqui, 1,46 a 20°C) [g N / (m²·d)]
 k = fator empírico descrevendo a diminuição da taxa de nitrificação com D (aqui, 0,11) [m⁻¹]
 q_A = carga hidráulica do filtro percolador [m³ / (m²·d)]
 N = parâmetro de saturação para a limitação de substrato (aqui, 1) [g N/ m³]
 SN_i = concentração afluyente de íon amônio, incluindo recirculação [mg/l]
 SN_e = concentração efluente do íon amônio [mg/l]

Além disso, foram feitas as seguintes considerações como simplificação: não foram ponderados os sólidos; não ocorre desnitrificação simultânea; a água afluyente foi gradeada ou sedimentada; apenas DBO, NH₄, NO₃ e NT foram considerados, N orgânico, nitrito e outros são ignorados; 2 mg/L de DBO removido por cada 1 mg/L de NO₃ reduzido; a alteração das cargas aplicadas nos filtros percoladores poderá requerer procedimentos de lavagem ou alteração de SK. Outros parâmetros do modelo foram definidos conforme Tabela 5, em baixo.

Tabela 5: Características do afluyente e de desenho de filtros percoladores usados para modelação.

Parâmetro		Unidade	Valor
Afluyente			
	Vazão (=100%)	l/s	300
	s-DBO	mg/L	140
	NH₄	mg/L	30
	NO₃	mg/L	0
	NT	mg/L	30
	Temperatura	°C	20
Desenho dos Filtros Percoladores			
Filtro Percolador Um			
	Diâmetro	m	25
	Profundidade	m	4
	Volume	m³	1960
	Tipo de mídia	Cruzado	Tipo BIOdek KFP627
	Área superficial	m²	125m²/m³
Filtro Percolador Dois			
	Diâmetro	m	40
	Profundidade	m	4
	Volume	m³	5027
	Tipo de mídia	Cruzado	Tipo BIOdek KFP619
	Área superficial	m²	150m²/m³

RESULTADOS

(Todas as vazões referem-se à Figura 4) Para a configuração proposta, quando se faz variar o “efluente 5” de 0% a 40%, o “efluente 13” reduz-se de 210 L/s a 90 L/s, e o “efluente 11” sobe de 90 a 210 L/s respetivamente (todos os efluentes estão baseados em 100% de vazão afluyente). Quando é alterada a taxa de recirculação de 0% a 200%, e o “efluente 5” de 0% a 40%, o a DBO no “efluente 13” pode ser fixada de 7,3 mg/L a 1,9 mg/L e para o “efluente 11”, de 20,1 mg/L a 38,8 mg/L respetivamente (Figura 5).

Uma variedade similar pode ser criada para a remoção de nitrogênio. Por exemplo, quando se observa as espécies de nitrogênio para taxas de recirculação de 0% a 200% nas duas linhas de efluentes, pode ser visto que a amônia no “efluente 13” pode ser fixada de 25 mg/L a 6,1 mg/L, enquanto também se reduz o NT de 30 mg/L para 6,9 mg/L com o aumento da recirculação. No “efluente 11” é prevista apenas uma pequena remoção de nitrogênio e, portanto, a água do “efluente 11” poderá ser adequada para irrigação. A água do “efluente 13” pode ser lançada em um lago (Figura 6).

Figura 5: Concentração de DBO e vazão do “efluente 11” e “efluente 13” com variação do “efluente 5” e da recirculação “efluente 10”.

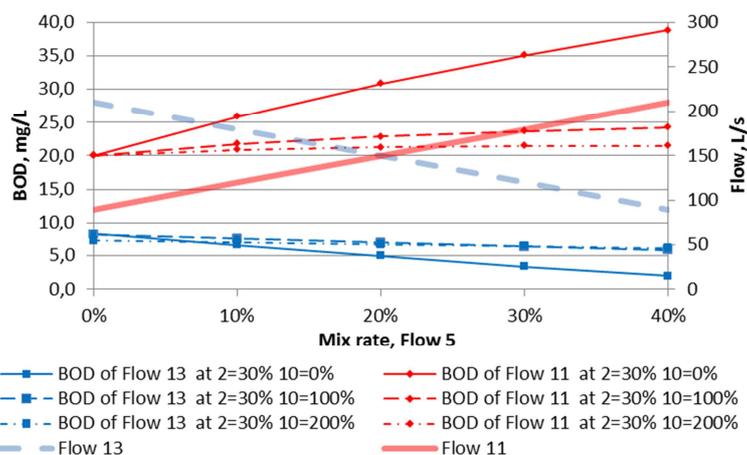
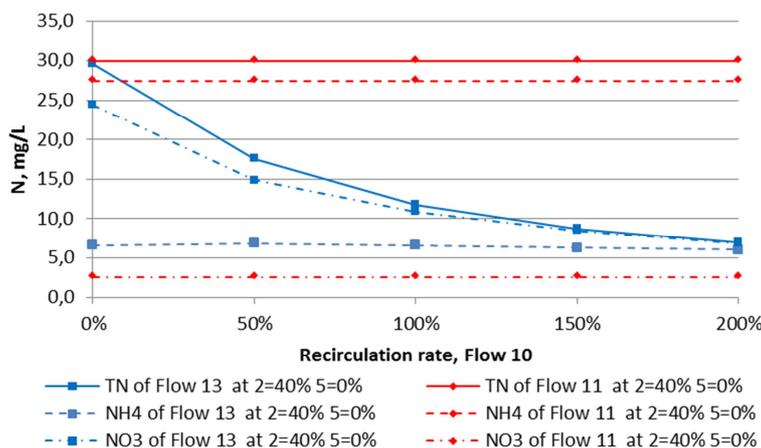


Figura 6: Espécies de Nitrogênio para o “efluente 11” e “efluente 13” para diferentes taxas de recirculação, “vazão 2” de 40%, “vazão 5” a 0%.



A remoção de NT (Nitrogênio Total) pode ser ajustada em +-5 mg/L através da fixação da “vazão 2” em um valor entre 30% e 50%. O processo proposto permite, por exemplo, fornecer uma quantidade de água maior com nutrientes como suplemento de fertilizantes durante períodos de baixa precipitação ou mesmo seca. Durante os períodos de maior precipitação, a maior parte da água pode tratada por completo (remoção total de nitrogênio), adequada para recarregar águas subterrâneas ou para descarga em corpos receptores. Na Tabela 6 estes dois casos são comparados.

Tabela 6: Modelação da configuração proposta para os filtro percolador para duas condições de água de reuso: 1) para remoção de DBO, nitrificação e desnitrificação; 2) apenas para remoção de DBO.

	Vazão:	Afluente	“vazão 11”	“vazão 13”	“vazão 11”	“vazão 13”
			Condição 1:		Condição 2	
“vazão 2”	%		15%	15%	80%	80%
“vazão 5”	%		0%	0%	0%	0%
“vazão 10”	%		300%	300%	0%	0%
Vazão	L/s	300	45.0	255.0	240.0	60.0
s-DBO	mg/L	140	9.0	8.7	42.6	0.7
NH ₄	mg/L	30	3.8	5.2	27.9	0.0
NO ₃	mg/L	0	26.2	5.5	2.1	28.6

NT	mg/L	30	30.0	10.6	30.0	28.6
s-DBO	kg/dia	42000	404	2220	10222	44
NH ₄	kg/dia	9000	170	1314	6692	0
NO ₃	kg/dia	0	1180	1399	508	1714
NT	kg/dia	9000	1350	2713	7200	1714
			Condição 1:		Condição 2	
Consumo energético	kWh/m ³			0.19		0.09
Consumo energético	kWh/kg-DQO			0.33		0.10

Na Condição 1, a “vazão 2” levará 15% do volume do afluente e 300% do efluente nitrificado é recirculado através do tanque anóxico. É produzida uma vazão de efluente totalmente nitrificado de 255 L/s com uma concentração de NT é <10 mg/L. Neste caso, a remoção de DBO é superior a 95% e a remoção de NT no total é maior do que 55% (excluindo a desnitrificação simultânea e o consumo de biomassa N). Pela redução da recirculação (“vazão 10”), pode ser fixada uma remoção de NT menor. A água com baixo conteúdo em NT pode ser usada para recarga de águas superficiais ou outros fins adequados.

Na Condição 2, a taxa de recirculação é de 0% enquanto a “vazão 2” é constituída por 80% do afluente. Aqui, são produzidos 240 L/s de água com uma concentração de DBO de 42 mg/L, que pode ser usada para irrigação durante períodos de crescimento, ou outros fins adequados.

CONCLUSÃO

- 1) Existe a necessidade de que o tratamento de efluentes para reuso seja flexível, simples, de baixa manutenção e de baixo consumo energético. Existe também a necessidade de que os sistemas de tratamento sejam flexíveis o bastante para que possam reagir frente a necessidades de reuso variáveis durante mudanças sazonais.
- 2) A nova geração de sistemas de filtros percoladores pode ser desenhada de encontro a múltiplos objetivos de tratamento e qualidades de efluentes, comparavelmente a sistemas de Lodos Ativados (LA) ou de Lodos Ativados com Remoção Biológica de Nutrientes (LA-RBN). Além disso, os sistemas de filtros percoladores oferecem configurações flexíveis para que possam ser completados posteriormente com capacidades de nitrificação e desnitrificação.
- 3) A nova geração de sistemas de filtros percoladores, preenchidos com enchimento estruturado moderno de Polipropileno, oferecem várias vantagens comparativamente aos velhos filtros preenchidos com pedra britada. As principais vantagens são o desempenho superior devido às elevadas áreas superficiais, potencial reduzido de colmatação, estrutura superficial definida, tipos de enchimentos que permitem grande flexibilidade operacional para utilização em diferentes aplicações.
- 4) Foi modelada uma configuração de filtros percoladores flexível incluindo pré-tratamento anóxico, filtros percoladores e sedimentação. Este sistema pode produzir um efluente com concentrações de DBO <5 mg/L, de amônia <2 mg/L e de NT <10 mg/L, ao mesmo tempo que um efluente sem remoção de nitrogênio e com DBO de por exemplo 40 mg/L. Esta configuração não requer múltiplas linhas de tratamento para obter múltiplos efluentes, mas apenas a capacidade para um direcionamento flexível de vazões. Esta configuração pode reagir a variações sazonais pelo ajuste das vazões no seio da configuração, se necessário.
- 5) A produção de água por poupar até 3,5 kWh/m³ quando produzida por dessalinização. Quando águas subterrâneas estão disponíveis, podem ser necessários 0,77 kWh/m³ para bombeamento. Quando se reutiliza água desde processos de Lodos Ativados, a água pode ser tornada disponível por >0,4 kWh/m³, dependendo da idade do lodo. Quando se reutilizam águas tratadas pela nova geração de sistemas de filtros percoladores, são requeridos apenas 0,1 a 0,2 kWh/m³.
- 6) O consumo de energia elétrica investigado em três estações de tratamento de esgotos com um único estágio de filtros percoladores foi de 0,057 kWh/m³ ou 0,175 kWh/kg-DQO (excluindo águas pluviais) para a ETE de Batumi tskali, na Geórgia, 0,12 kWh/m³ ou 0,22 kWh/kg-DQO para a ETE de Manágua, na Nicarágua, e 0,11 kWh/m³ ou 0,16 kWh/kg-DQO na ETE Walvis Bay, na Namíbia.

RECOMENDAÇÕES

A Água é essencial para todas as formas de vida. A poluição da água ocorre pode ocorrer de diversas maneiras, normalmente relacionadas com o consumo humano e industrial, gerando águas com vários compostos e em concentrações distintas, a que chamamos de esgotos, efluentes, águas residuais, etc. O ciclo da água abrange todos os estados (líquido, sólido e gasoso), e a sua depuração ocorre naturalmente nos corpos de água, através de processos vários, físicos, químicos e biológicos. No entanto, a sociedade moderna e o atual estilo de vida implicam colossais demandas de água potável, muitas vezes desaproveitada, para variadíssimos objetivos. Toda a água captada, para fins quer domésticos como industriais (incluindo agricultura, rega, etc.), a cada segundo que passa, será invariavelmente poluída tendo sido ou não corretamente utilizada, e devido às desmedidas vazões geradas diariamente, é imperativo tratar esses efluentes previamente à descarga em corpos receptores, de modo a permitir que tais corpos receptores (rios, lagos, etc.) permitam a constante captação de água para consumo diverso. É um ciclo, mas principalmente um equilíbrio, complexo e sensível, e que se agrava e desequilibra quando os efluentes descarregados possuem ainda determinados poluentes, ou determinadas cargas, que o corpo receptor não tem capacidade de depurar de forma natural.

Reduzir o consumo de água é tão essencial como tratar corretamente a água consumida. A redução do consumo de água, para além de exigir mudanças nos atuais hábitos do quotidiano, é também conseguida pela reutilização para vários fins, desde que tratada de forma adequada e por um custo viável, de modo a que a sua reutilização resulte em vantagens para indústrias, municípios, etc. Sim, é possível e é feito em todo o mundo.

Desde há várias décadas que por todo o mundo questões relacionadas ao tratamento de efluentes são temas em pauta, razão de diversos estudos e ensaios, investigação e desenvolvimento de novos produtos e processos de tratamento. No Brasil, gigantescos investimentos em novas estações de tratamento de efluentes e na reforma, ampliação e readequação de estações existentes, têm sido planejados e executados nos últimos anos. Os investimentos continuarão sendo realizados visando a universalização da coleta e tratamento dos efluentes a nível nacional, um tema não passível de discussão, mas de absoluta necessidade.

No entanto, se a universalização da coleta exige imensos investimentos ao nível de infraestruturas relacionadas com redes de saneamento, dada a extensão, morfologia e demografia do País, já a universalização do tratamento de efluentes carece não só de enormes investimentos materiais, mas também, do conhecimento profundo nas mais modernas técnicas e processos de tratamento, capazes de gerar efluentes que não sobrecarreguem e até inviabilizem a capacidade de autodepuração dos corpos receptores que, afinal, são também a fonte de água para consumo.

Diversas tecnologias têm sido implantadas no Brasil visando o tratamento de efluentes, domésticos e industriais. O objetivo fundamental do tratamento de efluentes é a remoção da carga poluidora presente na água, mensurável através de diversos parâmetros que para todos devem ser cada vez mais familiares: DQO, DBO, SST, NH₃, NO₃, etc. Infelizmente, nem sempre as estações de tratamento de efluentes cumprem com o requerido, por diversos motivos. E nem sempre o desenho e dimensionamento de unidades e sistemas de tratamento que compõem uma estação de tratamento de efluentes possuem a flexibilidade requerida para que possam cumprir com os limites de descarga, por vezes nem no tratamento de vazões e cargas inferiores às de projeto. Urge repensar a forma de desenho e dimensionamento das unidades de tratamento. Urge repensar a flexibilidade que tais unidades e sistemas de tratamento precisam ter, de modo a enfrentar situações, sazonais ou outras, em que os valores dos parâmetros de desenho são excedidos, salvaguardando o equilíbrio nos corpos receptores, de vital importância para a obtenção de água.

Em virtude dos resultados que se têm verificado em sistemas de filtros percoladores com enchimento estruturado em diversas Estações de Tratamento de Efluentes em operação por todo o mundo, resultados esses dos quais foram selecionadas três ETEs para o presente trabalho, e considerando a vantagem real destes sistemas comparativamente com sistemas de LA e LA-RBN em termos de custos (instalação e operação) e flexibilidade no tratamento de efluentes visando o reuso em diversas aplicações, urge aprofundar o estudo sobre a ampliação da utilização de sistemas de filtros percoladores, nomeadamente da nova geração de filtros percoladores, cujos resultados são previsíveis e altamente confiáveis, no tratamento de efluentes domésticos e industriais.

AGRADECIMENTOS

Lisa Magnusson, pelo apoio e pelo fornecimento de valiosas informações que fazem parte deste trabalho.

Marika Gvianidze, LTD Batumi tskali na Estação de Tratamento de Efluentes em Batumi, Geórgia, pela disponibilização de dados da ETE Batumi tskali e pelo apoio.

Dr. G. G. Lempert, especialista de processos na Aqua Services Engineering LTD na Namíbia, pelo apoio constant e pelo fornecimento de dados da ETE Walvis Bay, na Namíbia.

Mr. Javier Enrique Nunez Cano, Diretor da ETE em Manágua, Nicarágua, pelo fornecimento de dados da ETE Manágua e apoio.

Ministério Federal da Alemanha para Educação e Pesquisa (German Federal Ministry for Education and Research - BMBF), pelo financiamento parcial.

REFERÊNCIAS

- ATV-DVWK, 2001, *Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 281, Bemessung von Tropfkörpern und Rotationstauchkörpern (Design of trickling filters and rotating biological contactors)*, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., GFA, Hennef, Alemanha
- Boller M., Gujer W. 1986 Nitrification in tertiary trickling filters followed by deep-bed filters. *Water Research*, 20 (11) 1363-1373
- California Energy Commission (CEC) 2005 *California's Water – Energy Relationship*, Integrated Energy Policy Report Proceeding, California, EUA
- Daigger G. T., Boltz J. P. 2011 Trickling filter and trickling filter-suspended growth process design and operation: A state-of-the-art review. *Water Environment Research*, 83 (5), 388-404
- Dorias B. 1996 *Stickstoffelimination mit Tropfkörpern (Nitrogen elimination with trickling filters)* PhD thesis, Institute for Sanitary Engineering, Water Quality and Solid Waste Management, University of Stuttgart, Stuttgart, Alemanha
- Electric Power Research Institute (EPRI) 2002 *Water and Sustainability: U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - The Next Half Century*, technical report, California, EUA
- Evans E. A., Ellis T. G., Gullicks H. Ringelestein J. 2004 Trickling filter nitrification performance characteristics and potential of a full-scale municipal wastewater treatment facility. *Journal of Environmental Engineering*, 130 (11), 1280–1288
- EXPOVAL 2010 *Leitfaden zur Abwassertechnologie in anderen Ländern (Guidelines for wastewater technology in other countries)*, Report for Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bochum, Alemanha
- Government Dubai/Dubai Municipality/Environmental Control Section (ECS) Environment department 2011 *Environmental regulations for the reuse of treated wastewater for irrigation & thermal treated sludge for agricultural purposes*, Dubai, EAU
- Gujer W. 1999 *Siedlungswasserwirtschaft (Wastewater science)*, Springer, Berlin, Alemanha
- Gujer W., Boller M. 1986 Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. *Water Research*, 20 (11), 1353-1362
- Hu Z., Sötemann S., Moodley R., Wentzel M. C., Ekama G. A. 2003 Experimental investigation of the external nitrification biological nutrient removal activated sludge (ENBNRAS) system. *Biotechnology and Bioengineering*, 83 (3), 260–273
- Lempert G. G. 2013 “Does Biological Nutrient Removal Activated Sludge Constitute Most Appropriate Technology When Considering Wastewater Reuse?”, *IWA Water reuse conference*, Namíbia, em preparação.
- Muller A. W., Wentzel M.C., Saayman G. B., Esterhuysen C. M., Prinsloo J. P., Snyman J. S., Ekama G. A. 2006 Two-year operating experience of full-scale external nitrification BNR activated sludge. *Proc., 9th Bienn. WISA Conference and Exhibition*, 21–25 May, Durban, África do Sul.
- Parker D. S. 1999 Trickling filter mythology. *Journal of Environmental Engineering*, 125 (7), 618–625
- Parker D. S., Merrill D. T. 1984 *Effect of plastic media configuration on trickling filter performance*. *Water Pollution Control Federation*, 56 (8), 955-961
- Pearce P., Jarvis S. 2011 Operational experiences with structured plastic media filters: 10 years on. *Water and Environment Journal*, 25, 200–207
- Plappally A. K., Lienhard V J. H. 2012 Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4818–4848

- Pressinotti F. C. 2010 *Anpassung der Tropfkörpertechnologie an heiße Klimazonen (Adaptation of trickling filter technology to hot climates)*, PhD thesis, Institute for sanitary engineering, water quality and solid waste management, University of Stuttgart, Stuttgart, Alemanha
- Richards T., Reinhart D. 1986 Evaluation of plastic media in trickling filters. *Water Pollution Control Federation*, 58 (7), 774-783
- Sarner E. 1978 *Plastic-packed trickling filters-A study of high-rate plastic-packed trickling filters in a post-precipitation system* Bulletin series VA No 21, Lund, Suécia
- Sperling v. M. 1996 Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water Science Technology*, 33 (3), 59-72
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) 2012 *Guidelines for water reuse*, Washington DC, EUA
- Velz C.J. 1948 A basic law for the performance of biological filters. *Sewage Works Journal*, 20 (4), 607-617
- Vestner, R. J., 2003, *Leistung und CSB-Bemessung der vorgeschalteten Denitrifikation unter erhöhter Sauerstofflimitierung für Tropfkörper-Anlagen (Nitrogen elimination with trickling filters)*, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Heft 86, Oldenbourg Verlag München, Alemanha
- Water Environment Federation (WEF) 2000 *Aerobic Fixed-Growth Reactors*, Virginia, EUA
- World Health Organization (WHO) 2006 *A compendium of standards for wastewater reuse in the eastern Mediterranean region*, Cairo, Egito