

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS A PLANTAS PRODUTORAS DE ENERGIA, ÁGUA DE REUSO E RECUPERAÇÃO DE INSUMOS

Roberta Arlêu Teixeira¹; Carolina Câmara Neto¹; Evandro Luis Eberhardt¹ & Antônio Domingues Benetti¹

Abstract: This article emphasizes the evolution of wastewater treatment plants goals from the beginning of the 20th century to the present day. New knowledge about contaminants of water resources has expanded the focus of treatment, with new processes being added to remove not only oxygen-consuming organic matter and suspended solids but also ammonia, nitrogen, phosphorus, fecal microorganisms, and even endocrine disruption substances. In the 21st century, a paradigm shift is taking place in wastewater treatment. Plants are evolving to energy producers, water reuse, and product recovering. Fifteen products have been already identified that can be recovered, including some with industrial applications. However, it is important to consider not only which types of materials can be recovered, but also whether there is a society demand for them, and if the costs are competitive. This article discusses some possibilities for energy production, nutrients recover and the reuse of water. Three examples are presented, applicable to different scales.

Resumo: Este trabalho enfatiza a evolução dos objetivos das estações de tratamento de esgotos sanitários (ETE) desde o início do século 20 até os dias atuais. Novos conhecimentos sobre a contaminação dos recursos hídricos expandiram o foco do tratamento, com novos processos sendo adicionados para remoção não somente de matéria orgânica consumidora de oxigênio e sólidos suspensos, mas também de amônia, nitrogênio, fósforo, microrganismos fecais e mesmo compostos perturbadores endócrinos. No século 21, uma mudança de paradigma está ocorrendo em relação ao tratamento de esgotos. As estações de tratamento evoluem para plantas produtores de energia, água de reuso e recuperação de insumos. Já foram identificados 15 produtos que podem ser recuperados, incluindo alguns que têm aplicações na indústria. Contudo, é importante considerar não somente quais os tipos de materiais que podem ser reaproveitados, mas também se existe demanda da sociedade por eles e se os custos envolvidos na recuperação são competitivos. Este artigo discute algumas possibilidades de reaproveitamento energético, de nutrientes e de água de reuso. Três exemplos são apresentados, aplicáveis em diferentes escalas.

Palavras-Chave – Tratamento de esgotos sanitários, reaproveitamento de nutrientes, água e energia.

1) Afiliação: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Av. Bento Gonçalves, 9500 Caixa Postal 15029, 51 33086663, benetti@iph.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Ao longo do século 20, as estações de tratamento de esgotos evoluíram com foco na remoção de contaminantes visando a prevenção da poluição em corpos hídricos. Inicialmente, os processos objetivavam a remoção da matéria orgânica carbonácea por bactérias heterotróficas e sólidos em suspensão presentes nos esgotos. Visavam manter concentrações aeróbias adequadas para a vida aquática e padrões estéticos, como a redução na emissão de gases malcheirosos. A seguir, constatou-se a necessidade da remoção da amônia presente nos esgotos, tanto por sua demanda de oxigênio como pela toxicidade aos peixes. A conversão da amônia a nitrato é feita por oxidação biológica realizada com microrganismos autotróficos. Na sequência, o aumento da eutrofização e seus impactos negativos em lagos e estuários exigiu o controle dos nutrientes limitantes, nitrogênio e fósforo. Uma das formas para a remoção de nitrogênio é através da desnitrificação biológica, na qual nitrato é reduzido a gás nitrogênio. Fósforo é removido por precipitação química ou pelo processo conhecido como remoção biológica melhorada de fósforo, que faz uso de um grupo especial de bactérias conhecidas como organismos acumuladores de fósforo. Outra necessidade foi a remoção de microrganismos fecais presentes em esgotos tratados, especialmente onde há uso de recreação no corpo receptor. Em estações de tratamento, a desinfecção é alcançada através do uso de agentes químicos, como cloro e ozônio, e físicos, por radiação ultravioleta. Alguns métodos naturais de tratamento, como lagoas de maturação e infiltração no solo, são capazes também de reduzir organismos fecais. Dependendo das exigências de qualidade dos efluentes, processos adicionais são empregados, como a adsorção em carvão ativado e ozonização para redução de microcontaminantes da água. Membranas têm sido utilizadas em conjunto com processos biológicos nos biorreatores de membranas ou usadas separadamente para tratamento avançado dos esgotos.

No século 21, uma mudança de paradigma está ocorrendo em relação ao tratamento de esgotos. As estações de tratamento evoluem para plantas produtoras de energia, água de reuso e recuperação de insumos. Este artigo discute algumas possibilidades deste enfoque, com apresentação de exemplos. É importante considerar não somente quais materiais podem ser reciclados, mas também se existe demanda da sociedade por eles e se os custos envolvidos na recuperação são competitivos.

OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de apresentar e discutir alternativas de processos para utilização de esgotos como fontes para produção de bioenergia, para recuperação dos nutrientes nitrogênio e fósforo, para formação de biosólidos e de reaproveitamento de outros materiais, além de água para reuso.

METODOLOGIA

O Quadro 1 apresenta os recursos que podem, potencialmente, ser obtidos em esgotos. A partir deste quadro, foram selecionados três exemplos de aproveitamentos distintos. O primeiro exemplo apresenta uma sequência de processos em estação de tratamento de esgotos que produz eletricidade e calor, reaproveita nutrientes e utiliza a água tratada. O segundo caso mostra a recuperação de nitrogênio e fósforo presente na urina para produzir um fertilizante comercial. O terceiro caso descreve o enfoque dado pela Organização Mundial da Saúde para reuso de esgotos como água de irrigação.

Quadro 1: Recursos com potencial de recuperação em esgotos.

| Recursos | Recuperação potencial em esgotos |
|---------------------------------------|---|
| Água de reuso | Efluentes tratados |
| Energia | Metano por digestão anaeróbia da matéria orgânica; Energia e calor combinados; Eletricidade por co-combustão de lodos; Hidrogênio, Biocombustível; Energia térmica |
| Nitrogênio (N) | N dos esgotos tratados; N dos lodos anaeróbios; N nos sobrenadantes de digestores; N em biosólidos |
| Fósforo (P) | P em esgotos tratados; P precipitado como fosfato de amônio e magnésio (estruvita); P precipitado como fosfato de cálcio; P nos sobrenadantes dos digestores; P em biosólidos |
| Ácidos graxos voláteis (AGV) | Recuperação de acetato, propionato e butirato |
| Polihidroxialcanoatos (PHA) | Biopolíesters biodegradável - bioplásticos |
| Celulose | Celulose presente nos esgotos afluentes as ETEs |
| Substância poliméricas extracelulares | Recuperação de polímeros extracelulares; substituto de alginato como emulsificante |
| Forragem animal | Biomassa microbiana derivada de proteína de célula única. |
| Gás carbônico | Recuperado de biogás formado na digestão anaeróbia |
| Areia | Recuperação em esgotos |
| Metais | Recuperação de metais críticos em resíduos |
| Enxofre | Enxofre para produtos químicos fertilizantes e baterias de lítio-enxofre |
| Energia elétrica | Célula de combustível microbiana |
| Biosólidos | Lodos digeridos para uso como condicionador de solos |

Fonte: Kehrein *et al.*, 2020

RESULTADOS OBTIDOS

Exemplo 1: Fluxograma de processos para tratamento centralizado ou distribuído (McCarty *et al.*, 2011)

A Figura 1 apresenta uma sequência de processos que maximiza a produção de bioenergia e calor, possibilita o reuso da água com nutrientes e efluente com baixa concentração de patogênicos.

Sólidos em suspensão sedimentáveis são removidos em decantador primário. O lodo é encaminhado a um digestor anaeróbio para produção de biogás e biosólidos. O efluente primário vai ao tratamento secundário formado por um biorreator anaeróbio fluidizado de membranas. O metano formado junta-se ao do digestor de lodos. A torre de dessorção por ar objetiva remover o metano dissolvido na água e oxigená-la. O efluente final tem baixa concentração de bactérias pela retenção na membrana, além de conter nitrogênio e fósforo. O efluente pode ser usado na irrigação.

Figura 1: Fluxograma de processos para produção de energia, calor e água de reuso com nutrientes (Fonte: Baseado em McCarty *et al.*, 2011)



Exemplo 2: Tecnologia para recuperação de nutrientes na urina (Etter *et al.*, 2015)

A Figura 2 mostra uma sequência de processos para concentração de nutrientes da urina. Ela é estabilizada em um reator de nitrificação, com oxidação da amônia a nitrato. O efluente passa por um destilador, resultando na formação de uma solução concentrada de nutrientes contendo nitrogênio, fósforo e potássio, além de água destilada. São produzidos 30 litros de solução nutriente para cada 1000 litros de urina.

Exemplo 3: Uso de esgotos domésticos na irrigação: alternativas de manejo para redução de riscos associados a patógenos (WHO, 2006)

A Figura 3 apresenta opções para a redução de patógenos (vírus, bactérias e protozoários) através da combinação de medidas de resguardo para alcançar proteção à saúde de 10^{-6} DALY (Disability Adjusted Life Years - Anos de Vida Ajustados por Incapacidade). DALY mede simultaneamente os anos de vida perdidos por morte prematura e os anos de vida perdidos por incapacidade. Um DALY equivale a um ano perdido de vida saudável. O objetivo pode ser alcançado através de uma combinação de tratamento de esgotos (T), morte natural entre a colheita e o consumo (MN) e lavagem dos produtos (L). As reduções logarítmicas variam de 0 a 7, dependendo do tipo de colheita, de irrigação e de mão de obra. *Irrigação não restrita* é realizada em cultivos que não são ingeridos crus. Já a *irrigação restrita* exclui verduras que são ingeridas cruas.

Figura 2: Fluxograma de processos para concentração de nutrientes da urina (Fonte: Baseado em ETTER *et al.*, 2015)

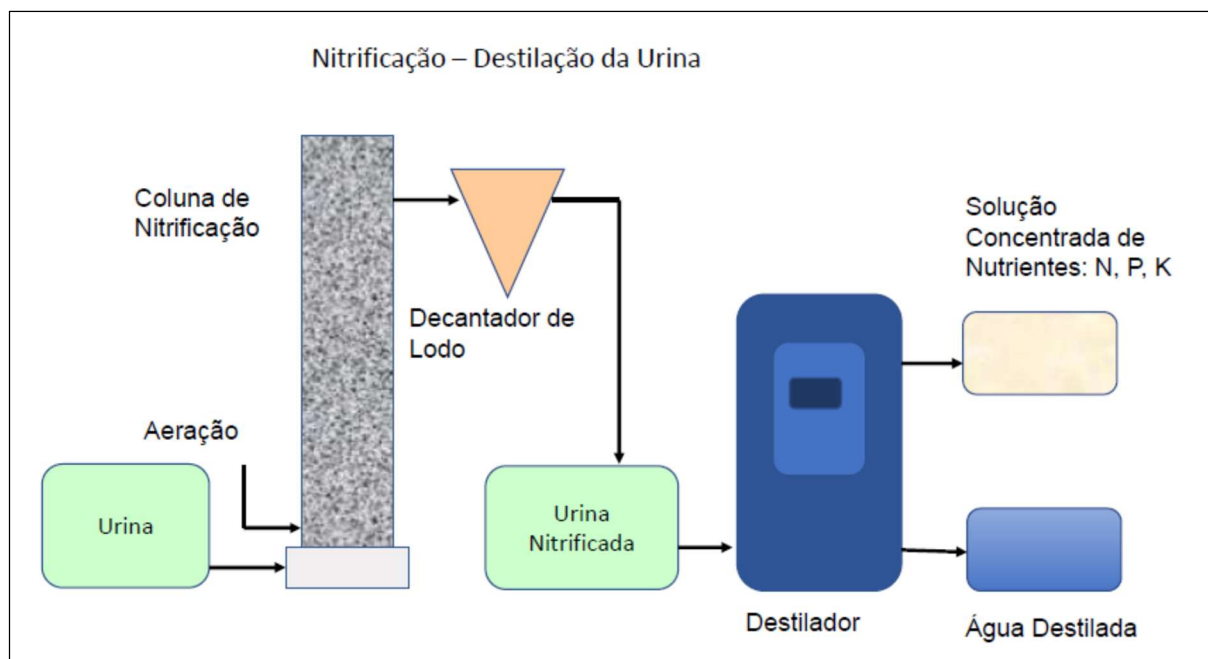
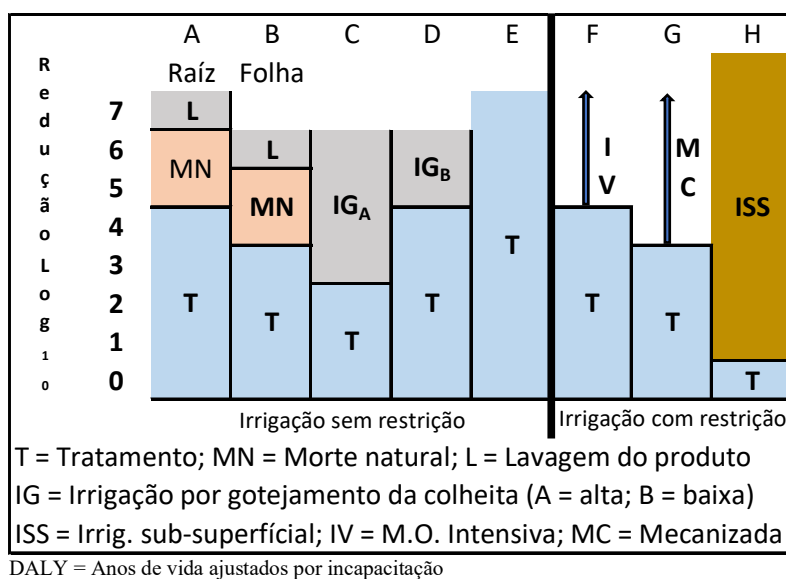


Figura 3: Redução de patógenicos por combinações de medidas de proteção à saúde correspondente a 10^{-6} DALY (WHO, 2006)



ANÁLISE DOS RESULTADOS

O fluxograma de processos da Figura 1 possibilita a cogeração de eletricidade e energia térmica usando o biogás produzido pelo metabolismo anaeróbio da matéria orgânica dos esgotos. O digestor produz biogás usando o lodo separado no decantador primário. O biorreator anaeróbio fluidizado de membranas gera mais metano, também encaminhado ao equipamento de cogeração. O biogás é separado do efluente do biorreator na torre de dessorção por ar, que também a função de oxigenar o líquido. Este tratamento tem o potencial de produzir água para irrigação uma vez que o efluente final contém nitrogênio e fósforo (que não são removidos na digestão anaeróbia), além de ter qualidade bacteriológica pela retenção dos microrganismos na membrana do biorreator. Uma limitação desta alternativa é a necessidade de recalcar o efluente de regiões mais baixas para outras mais altas, uma

vez que as ETEs são normalmente construídas em áreas mais baixas. Uma possibilidade seria fazer sistemas satélites ou descentralizados de tratamento para minimizar os custos de recalque da água tratada.

A urina contém aproximadamente 80% do nitrogênio, 50% do fósforo e 70% do potássio presente em esgotos sanitários (Larsen *et al.*, 2013). Isto motivou pesquisadores do Instituto Federal Suíço de Tecnologia e Ciência da Água (EAWAG) a desenvolver o processo mostrado na Figura 2 para produção de fertilizante a partir da urina. Desde 2018, é comercializado o fertilizante Aurin produzido a partir da urina (<https://www.eawag.ch/en/department/eng/projects/aurin-fertilisers-from-urine/>). Uma etapa de adsorção em carvão ativado pode ser adicionada para remoção de fármacos presentes na urina. O requisito essencial desta aplicação é a separação da urina, na fonte, das fezes e águas cinzas.

O caso 3 refere-se ao uso de esgotos sanitários na irrigação de culturas agrícolas. É estabelecida um objetivo de proteção à saúde de 10^{-6} anos de vida ajustados por incapacitação (DALY). As reduções de patogênicos (vírus, bactérias e protozoários) variam entre 99% e 99,99999% (reduções \log_{10} entre 2 e 7). O caso mais restritivo ocorre se o produto consumido é uma raiz. As reduções podem ser alcançadas por tratamento dos esgotos, manutenção de um período entre a colheita e o consumo (morte natural) e lavagem do produto. Os tipos de irrigação, por gotejamento ou subsuperficial, restrita ou irrestrita, e mão de obra, mecanizada ou não, também influenciam na redução requerida dos patogênicos.

CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou três casos em que recursos dos esgotos são explorados em diferentes situações. O primeiro caso pode ser aplicado em sistemas onde há rede que encaminhe os esgotos as estações de tratamento, sejam centralizadas ou descentralizadas. Nela é possível produzir eletricidade e calor em equipamento de cogeração funcionando com biogás produzido no metabolismo anaeróbio da matéria orgânica presente nos esgotos. O efluente final mantém os nutrientes nitrogênio e fósforo, além de ter baixas concentrações de bactérias. Desta forma, poderia ser usada na irrigação.

No segundo caso apresentado, a urina é separada dos demais despejos na fonte, o que possibilita maximizar a recuperação de nitrogênio e fósforo. Usando a nitrificação para estabilização da amônia e destilação, obtêm-se um concentrado rico em N, P e K. Onde houver exigências mais restritivas em relação a fármacos, uma etapa de adsorção em carvão ativado pode ser adicionada.

O terceiro caso apresentado focou na segurança com relação aos patógenos presentes em esgotos usados para irrigação de culturas. Em muitos países o uso de esgotos na irrigação é uma realidade, principalmente onde há escassez hídrica contínua ou intermitente. Para garantir a proteção à saúde de 10^{-6} DALY aos aplicadores, as famílias e às comunidades, são mostradas opções de manejo dos esgotos, como tratamento, período entre colheita e consumo, lavagem dos produtos e tipos de irrigação.

No século 21, muitos recursos presentes nos esgotos serão explorados de forma a reduzir a pressão sobre os recursos naturais de uma população que atingiu 8 bilhões de pessoas em 2022. Até o momento, a ênfase tem sido dada para o reuso do efluente tratado, o aproveitamento dos nutrientes nitrogênio e fósforo e a produção de biogás pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Mas, como mostrado no Quadro 1, outros recursos também podem ser recuperados, incluindo matéria prima para indústrias. Dependerá muito dos custos da recuperação e sua competitividade com relação as opções alternativas. Mas as tecnologias de recuperação devem continuar a ser pesquisadas, viabilizando-as como uma opção de uso no futuro.

REFERÊNCIAS

- ETTER, B. UDERT, K. M.; GOUNDEN, T. (editors) (2015) *Valorisation of urine nutrients: Promoting sanitation and nutrient recovery through urine separation*. VUNA Final Report. EAWAG: Dübendorf, Switzerland. Disponível em: https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA_Final_Report_2015.pdf#page=6.
- KEHREIN, P.; VAN LOOSDRECHT, M.; OSSEWEIJER, P.; GARFÍ, M.; DEWULF, J.; POSADA, J. (2020) “*A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies, and bottlenecks*”. *Environmental Science Water Research & Technology*, 6, 877-910. DOI: 10.1039/c9ew00905a.
- LARSEN, T. A.; UDERT, K. M.; LIENERT, J. (2013) *Source separation and decentralization for wastewater management*. London: IWA Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780401072>. Disponível como e-book em: <https://iwaponline.com/ebooks/book/616/Source-Separation-and-Decentralization-for>
- McCARTY, P. L.; BAE, J.; KIM, J. (2011) “*Domestic wastewater treatment as a net energy producer – can this be achieved?*” *Environmental Science & Technology*, 45, 7100-7106. <https://dx.doi.org/10.1021/es2014264>
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2006) *WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta, and greywater*. Vol II. Wastewater use in agriculture. Geneva: WHO, UNEP e FAO. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9241546832>