

AVALIAÇÃO HIDRODINÂMICA DE UM TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO (TEVAP) EM ESCALA DE BANCADA SUBMETIDO A VARIAÇÃO DA VAZÃO

Kaio Gustavo Gomes (USP/EESC) E-mail: kaiogomes@usp.br

Guilherme Araujo Vuitik (UEPG) E-mail: gavuitik@uepg.br

Maria Magdalena Ribas Döll (UEPG) E-mail: mmrdoll@uepg.br

Resumo: O tanque de evapotranspiração (TEvap) é um sistema alternativo às fossas sépticas para o tratamento descentralizado de esgoto doméstico. A avaliação hidrodinâmica visa entender melhor o comportamento do sistema em relação ao fluxo, fornecendo informações importantes sobre as propriedades físicas envolvidas na dinâmica de líquidos no sistema. Esse trabalho teve como objetivo analisar o comportamento hidrodinâmico de um sistema TEvap em escala de bancada frente a variação da vazão. Foi utilizado um modelo em escala de bancada, com dimensões de 0,15 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,25 m de altura, contendo um volume útil de 10,74 litros. Foi observado que o sistema apresentou um desempenho mais satisfatório com a vazão menor, enquanto o aumento da vazão tendeu a resultar em um maior índice de mistura e dispersão dentro do sistema.

Palavras-chave: TEvap, hidrodinâmica, eficiência hidráulica.

HYDRODYNAMIC EVALUATION OF A BENCH-SCALE EVAPOTRANSPIRATION TANK (TEVAP) UNDER FLOW RATE VARIATION

Abstract: The Evapotranspiration Tank (TEvap) is an alternative system to septic tanks for the decentralized treatment of domestic sewage. Hydrodynamic assessment aims to better understand the system's behavior concerning flow, providing valuable insights into the physical properties involved in the liquid dynamics within the system. This study aimed to analyze the hydrodynamic behavior of a TEvap system on a bench scale in response to flow rate variation. A bench-scale model was used, with dimensions of 0.15 meters wide, 0.50 meters long, and 0.25 meters high, containing a useful volume of 10.74 liters. It was observed that the system presented a more satisfactory performance with the lower flow rate, while increasing the flow rate tended to result in a higher mixing and dispersion rate within the system.

Keywords: TEvap, hydrodynamics, hydraulic efficiency.

1. Introdução

O Tanque de Evapotranspiração (TEvap) é um sistema utilizado para tratamento de águas residuárias domésticas de forma descentralizada, podendo ser uma solução unifamiliar ou ainda utilizada para casos de hotéis ou restaurante, sendo nesse caso uma alternativa interessante devido ao potencial de ser além de um sistema de tratamento de água residuária um objeto de harmonia paisagística (Pamploma; Venturi, 2004).

Esse sistema foi primeiramente apresentado no Brasil por Pamploma e Venturi (2004) contudo ao longo do tempo vem sendo objeto de estudo, passando por alterações que visam melhorar o comportamento e desempenho do sistema.

Na Figura 1 é mostrado um esquema do funcionamento do TEvap, onde o material afluyente entra no sistema pela câmara anaeróbia, onde ocorre a digestão anaeróbia da matéria orgânica que entrou, em seguida o material é direcionado a camada de RCD que envolve a câmara anaeróbia e por meio ascensional passa pelas camadas de brita areia e

no solo por onde é filtrada e finalmente a água e compostos presentes nesse meio podem ser absorvidos pelas plantas ou evaporados (Galbiati, 2009; Gomes; Vuitik; Ribas Döll, 2023; Rocha, 2020).

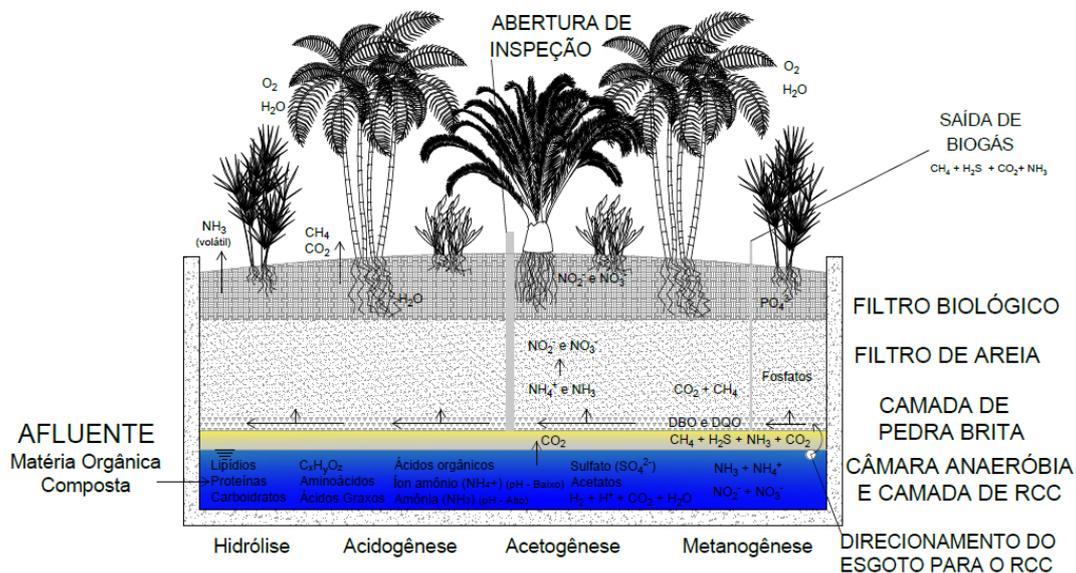


Figura 1 – Esquema do funcionamento do TEvap
 Fonte: Gomes e Ribas Doll (2022)

O dimensionamento de um sistema é uns dos principais pilares para garantir o bom desenvolvimento e operação do mesmo, no caso do TEvap, Galbiati (2009), foi a primeira autora que deu mais ênfase para esse quesito, estabelecendo uma metodologia que vem servindo de embasamento para vários trabalhos nos últimos anos.

Outro trabalho que se destaca Rocha (2020) destaca a importância do controle dos métodos construtivos do sistema que igualmente desempenham um papel muito importante para garantir o bom desenvolvimento do sistema.

Paulo e colaboradores (2013) destacam a importância de estudos mais aprofundados considerando maiores tempos de amostragem para um melhor entendimento da eficiência de evapotranspiração, formação de lodo e também da geração de metano, para permitir uma avaliação mais eficiente do sistema.

A avaliação hidrodinâmica de um sistema envolve muitos passos importantes, de modo que a delimitação de aspectos metodológicos do ensaio a ser realizado são importantes para alcançar resultados efetivos que representem o sistema de forma confiável (Ferreira Filho, 2021).

O ensaio hidrodinâmico pode ser realizado em um sistema com a injeção de um traçador na entrada do sistema, e acompanhamento da concentração desse material na saída, de forma que a curva de concentração, pelo tempo, na saída do sistema pode ser analisada matematicamente a fim de se obter dados como tempo de detenção hidráulica (TDH) e índice de dispersão no sistema (Levenspiel, 2000).

Desse modo a avaliação hidrodinâmica, é outro pilar muito importante na operação de um sistema como o TEvap, pois é necessário que a montagem do sistema, garanta com que o dimensionamento do mesmo o represente a prática de forma confiável, e assim preserve-se a eficiência projetada para o sistema.

O presente trabalho teve como objetivo investigar a hidrodinâmica do tanque de

evapotranspiração em diferentes vazões, analisando o impacto do aumento de vazão no TDH, na eficiência hidráulica, na dispersão, longitudinal e no volume morto do sistema.

2. Metodologia

O trabalho consiste na análise da eficiência hidrodinâmica de um sistema de Tanque de Evapotranspiração em escala de bancada. Nos próximos tópicos será descrito primeiramente o aparato experimental, objeto de estudo desse artigo; o procedimento experimental, no qual foi baseado o ensaio; em seguida o material traçador usado no ensaio hidrodinâmico; e por fim será descrito as análises matemáticas realizadas para interpretação e análise dos dados obtidos durante o ensaio.

2.1 Aparato experimental

O aparato experimental, que visa simular um Tevap, foi montado utilizando uma caixa de vidro com paredes de espessura de 4 mm e formato retangular. O sistema representa em escala de laboratório reduzida em 6,8 vezes da escala real para um habitante e tem dimensões externas de 0,15 m de largura, 0,50 m de comprimento e 0,25 m de altura.

A caixa foi preenchida com camadas características do TEvap, sendo alocadas em ordem ascendente (Figura 2): resíduos de construção e demolição (RCD), com 7,3 cm e 2,9 Litros de volume útil, brita, geomembrana (para evitar a descaracterização das camadas pelo arraste do fluxo), areia e solo.

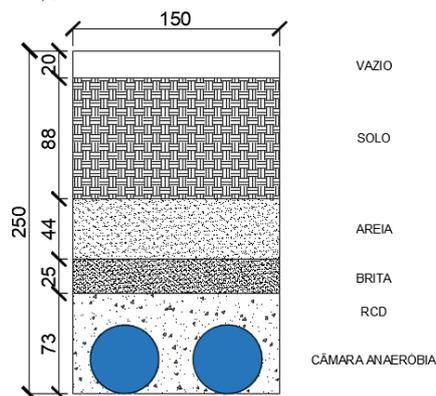


Figura 2 – Camadas que compuseram o aparato experimental

As características de altura e volume das camadas do aparato experimental são apresentadas na Tabela 1, onde o volume total, é o volume tridimensional da camada, sem considerar os espaços ocupados pelos materiais que compõem as respectivas camadas e o volume útil, considera o volume da camada que poderá ser ocupado pelo meio líquido.

Tabela 1 - Caracterização do aparato experimental

Camada	Altura (cm)	Volume total (cm ³)	Volume útil (L)
Câmara anaeróbia	5,0	1.920,30	1,41
RCD	7,3	3.291,46	2,59
Brita	2,5	1.784,85	0,66
Areia	4,4	3.141,34	1,51
Solo	8,8	6.282,67	3,07
Vazio	2,0	1.500,00	1,50
<i>Total</i>	25	17.920,62	10,74

2.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental do ensaio seguiu o proposto por Levenspiel (2000). O ensaio realizado foi do tipo degrau, nesse ensaio um material traçador é introduzido no sistema e é analisado a sua concentração no ponto de saída do sistema no decorrer do tempo.

Dessa forma, nesse ensaio, do tipo degrau, o material traçador é injetado no sistema de forma contínua, esse tipo de ensaio tem a vantagem de diminuir os efeitos de adsorção do material no meio suporte bem como o efeito de advecção e contraveção que podem acontecer no ensaio tipo pulso, quando o traçador é injetado no sistema na forma de um pulso (Levenspiel, 2000).

O experimento teve como objetivo analisar a hidrodinâmica do sistema em diferentes vazões, dessa forma o procedimento experimental do ensaio de hidrodinâmica foi realizado em quatro diferentes vazões que foram selecionadas tendo como embasamento a proposta de funcionamento do sistema que foi apresentado no trabalho de Gomes e Ribas Doll (2022). As quatro condições de ensaios são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições operacionais do experimento

Condição	Vazão (ml/min)	TDH teórico (min)
1	15	560,98
2	20	420,74
3	40	210,37
4	80	105,18

Antes de iniciar o procedimento experimental, realizou-se um período de limpeza do sistema, injetando, na mesma, água destilada e acompanhado a condutividade elétrica (CE) na saída do sistema. No começo observou-se um valor de CE consideravelmente alto e com o decorrer das semanas foi possível observar a sua diminuição, até a estabilização num valor médio de $12 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, durante um período de 5 dias. Entre as etapas operacionais foi realizado o mesmo procedimento de limpeza, visando evitar a contaminação de uma fase sobre a fase seguinte.

Para cada condição as amostras foram retiradas da saída do sistema em um intervalo de 30 min. Foi analisado a CE usando um condutivímetro da marca *MS Tecno* e modelo *mCA 150*, que realizava as medidas em $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C , o aparelho era calibrado diariamente.

2.3 Material traçador

Foi utilizado como material traçador o cloreto de sódio, para tal foi construído uma curva de concentração do material como base na CE da solução, a curva de concentração, foi feita usando uma faixa de concentração de 0 a $0,5 \text{ gL}^{-1}$, obtendo valores de condutividade de acordo com a Figura 3, onde também é mostrado a equação de concentração de NaCl na água pela CE.

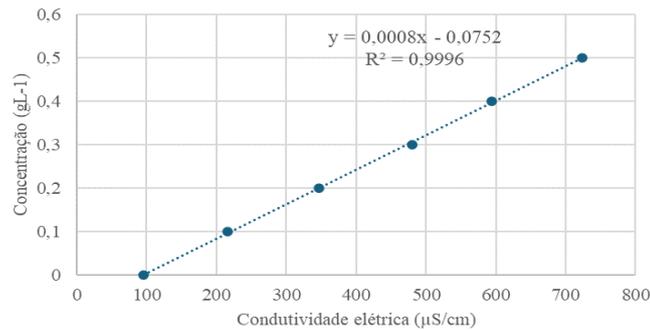


Figura 3 - Curva de concentração de NaCl pela condutividade elétrica

Para a execução do experimento foi utilizado a concentração de 0,2 g/l, buscando obter resultados que pudessem ser interpolados na curva, com mais precisão.

2.4 Análise matemática dos dados

Para a análise matemática dos resultados foi seguido o proposto por Vuitik (2017), onde primeiramente foi feita uma normalização da curva de concentração pelo tempo, com um ajuste do tipo Boltzmann, e com a vazão de alimentação foi calculado a curva E, que pode ser utilizada para obter-se o tempo de detenção e a variação da curva E, que indica a dispersão da distribuição. Em seguida foram usados três métricas principais para a avaliação da hidrodinâmica, sendo elas:

- A dispersão longitudinal, para então classificar a dispersão do fluido no sistema, podendo ser de baixa, moderada ou alta dispersão (Levenspiel, 2000).
- Análise da eficiência hidráulica (λ), onde N é o número de reatores de mistura perfeita em série, o TDH_m é o tempo de detenção hidráulica médio (obtido no ensaio) e TDH_t e o tempo de detenção teórico (Godinho *et al.*, 2018).
- Análise de volume morto do reator (V_m), sendo que para calcular o volume ativo (V_a) foi considerado o volume total (V_t), TDH médio (TDH_m) e o TDH teórico (TDH_t) (Godinho *et al.*, 2018).

Na Tabela 3 é apresentados as fórmulas matemáticas usadas para cada variável de destaque analisada.

Tabela 3 – Variáveis estudadas

Fórmula matemática	Variável de destaque
$\sigma_{\theta}^2 = 2 \frac{D}{uL}$	Dispersão longitudinal (PD)
$\sigma_{\theta}^2 = 2 \frac{D}{uL} + 8 \left(\frac{D}{uL} \right)^2$	Dispersão longitudinal (GD)
$\lambda = \frac{TDH_m}{TDH_t} \left(1 - \frac{1}{N} \right)$	Eficiência hidráulica
$V_a = V_t \frac{TDH_m}{TDH_t}$	Volume ativo
$V_m = V_t - V_a$	Volume morto

Finalmente foram calculados os coeficientes de correlação de Person obtidos relacionado a variação das métricas citadas com a variação do TDH real observado para cada condição, para assim poder indicar em qual das condições o sistema apresentou a melhor condição hidrodinâmica de operação.

3. Resultados

Na Tabela 4 é apresentado primeiramente os valores de TDH teórico, que considera o volume útil teórico do sistema e a vazão de operação, e em seguida o TDH real, obtido pelo ensaio, observando que para os dois primeiros ensaios, os valores reais são maiores que o teórico enquanto nos dois últimos cenários ocorre o contrário. Na mesma tabela ainda é apresentado os valores de dispersão longitudinal, tanto para pequena dispersão (PD) quando para grande dispersão (GD) e por fim o número de reatores de mistura perfeita e series (N).

Tabela 4 – Resultados de TDH, dispersão e número de reatores de mistura perfeita em serie encontrados nos ensaios

Vazão (ml/min)	TDH teórico (min)	TDH real (min)	D/uL		N
			PD	GD	
15	560,98	942,25	0,03581	0,03177	13,96
20	420,74	610,14	0,45958	0,23628	1,088
40	265,75	126,71	0,49557	0,24852	1,009
80	132,88	78,03	0,21291	0,13740	2,348

Já na Tabela 5 é apresentado os dados de eficiência hidráulica, variável que indica o desenvolvimento do reator, fazendo uma análise do sistema que relaciona a razão entre o TDH teórico e TDH médio com o numero N. Além disso também é apresentado o volume ativo e morto encontrado para cada cenário, valores que tendem a mostrar o volume real do reator que pode ser considerado como ativo e útil para o sistema.

Tabela 5 – Resultados de eficiência hidráulica e volumes ativo e morto encontrados nos ensaios

Vazão (ml/min)	Eficiência hidráulica	Volume ativo (mL)	Volume morto (mL)
15	1,559	14.133,76	-5719,06
20	0,117	12.202,70	-3788,00
40	0,004	4.012,14	4402,56
80	0,337	4.941,21	3473,49

Já na Tabela 6 é mostrado os valores do coeficiente de correlação de Person obtidos relacionado a variação das variáveis com a variação do TDH real observado para cada condição. Sendo assim possível analisar se o aumento da vazão, e por consequencia diminuição do TDH teve correlação com a variação dos parametros analisados.

Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Person obtido entre a variável e a variação do TDH real

Variável	Coefficiente de correlação de Person
PD	0,504
GD	0,568
N	0,779
Eficiência hidráulica	0,768
Volume ativo	0,976
Volume morto	0,976

4. Análise dos resultados

Destaca-se que na literatura foi encontrado apenas um trabalho que se propôs a analisar a hidrodinâmica de um sistema TEvap, o trabalho de Silva (2019) contudo destaca-se que nesse trabalho o autor manteve a vazão fixa, alternado as alturas das camadas granulares do seu modelo.

O modelo de Silva (2019) apresentou volume cerca de 37,2 vezes maior do que o analisado nesse estudo, contudo é importante ressaltar que a vazão equivalente do sistema usado pelo autor foi próxima da menor vazão usada nesse trabalho, assim destaca-se que os resultados encontrados pelo autor refletem uma situação que pode ser comparada a situação estudada nesse trabalho com a menor vazão.

Os valores de dispersão longitudinal encontrados em todas as situações indicam uma grande dispersão, desse modo indica que a difusão nesse caso pode prejudicar a distribuição do líquido no sistema, por consequência tendo uma mistura menos uniforme. Tal resultado pode ser explicado pela composição física do sistema, uma vez que o sistema possui camadas granulares, essas podem prejudicar a mistura do líquido.

Porém destaca que a situação que se mostrou mais eficiente nesse quesito foi com a menor vazão indicando que com o aumento da vazão a dispersão do líquido pode ser prejudicada, e em vazões menores o efeito das camadas granulares pode ser suavizado.

O número N relaciona o comportamento do sistema com o número de sistema em reatores de mistura perfeita (CSTR) que seriam equivalentes ao mesmo, como indica Levenspiel (2000) quando esse valor é maior que 30 o sistema já poderia ser considerado com um comportamento mais próximo do reator pistonado (PFR). Para esse trabalho em ambos os casos foram encontrados valores mais baixos para o número N, indicado que o TEvap vai ter uma tendência maior de se comportar como um reator de mistura perfeita, o que pode ser explicado por sua composição de camada de materiais granulares que tende a promover uma mistura entre os fluxos ascensionais do sistema

A eficiência hidráulica (λ) por sua vez, teve comportamento bem diferentes nas situações analisadas. Persson e colaboradores (1999) criaram uma classificação considerando o valor da λ , sendo que para valores menores que 0,5 o sistema seria classificado com baixa eficiência e com valores acima de 0,75 o sistema teria boa eficiência, e ainda para valores intermediários o sistema teria eficiência satisfatória.

Nas situações analisadas todos os cenários indicaram uma baixa eficiência, com exceção da situação de menor vazão que apresentou valor maior do que 1. Aliado a análise da eficiência hidráulica é necessário destacar os valores de volumes mortos encontrados em cada cenário, onde nos dois primeiros cenários foi encontrado valores de volume morto negativos, isso se dá uma vez que os valores de TDH real encontrados foram maiores do que os valores teóricos, tal resultado permite uma desconfiança em cima dos valores encontrados, pois o mais comum é a ocorrência do efeito contrário.

Porém tal situação pode ser explicada pela composição da camada de solo do sistema, o solo usado no sistema tem granulometria consideravelmente mais fina e por tanto possui uma capacidade iônica (Ernani, 2008) considerável que pode ter interferido no experimento, uma vez que o traçado usado (NaCl) se dissocia no meio e pode ter ficado aderido as menores partículas do solo (argila).

A análise do coeficiente de Person mostrou que para as variáveis de dispersão longitudinal não houve grande correlação com o aumento do TDH como ilustrado na

Figura 4, contudo para os valores de volume morto houve uma relação considerável, indicando que com a diminuição do valor de TDH foi observado um aumento no valor do volume morto.

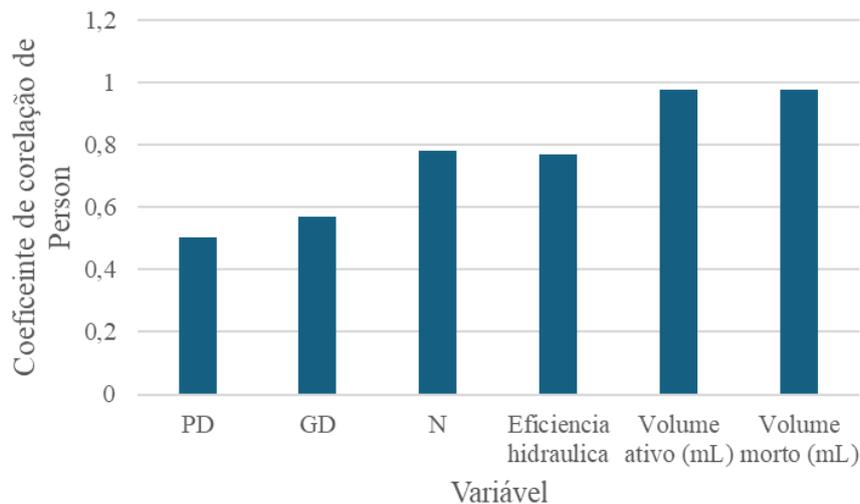


Figura 4– Análise do coeficiente de Person para cada variável analisada

Para o número N e a eficiência hidráulica percebeu-se uma correlação considerável, contudo não tanto quando no caso do volume morto, desse modo observou-se que com a diminuição do TDH ocorreu uma diminuição no valor de eficiência e no valor do número N.

É importante destacar que o presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da variação da vazão, porém a variação de outros fatores pode ter influências positivas no sistema, por exemplo com a diminuição das alturas das camadas de materiais granulares poderia levar uma melhor condição de mistura do líquido.

Além disso ressalta-se que os resultados aqui trazem uma perspectiva do comportamento global do sistema, uma vez que o sistema é composto por várias camadas analisar o comportamento hidrodinâmico da câmara anaeróbia, por exemplo, poderia ser interessante, uma vez que com a sua composição tubular é de se esperar que nessa etapa do sistema o comportamento seja similar ao de um reator PFR, diferente do encontrado para o sistema como um todo.

Desse modo destaca-se que melhorias no comportamento do sistema poderiam ser alcançados por mudanças na conformidade do sistema, além disso a avaliação da hidrodinâmica do sistema em estágios intermediários poderia levar um melhor entendimento de onde o sistema tende a apresentar comportamento mais deficitário podendo levar a estudos de adaptações do sistema em pontos mais específicos.

5. Conclusões

Desse modo destaca-se que o sistema apresentou melhor comportamento hidrodinâmico com a menor vazão, uma vez que os valores de dispersão indicaram uma tendência de mistura melhor do que os outros cenários.

Observou-se que com o aumento da vazão o sistema tendeu a apresentar volume morto maior e a apresentar um escoamento mais turbulento, indicando que em vazões mais

elevadas é possível que o sistema tenha um comportamento hidrodinâmico pior.

O traçador utilizado pode ter influenciado os resultados, uma vez que o mesmo pode ter sido adsorvido pela camada de solo, visto que o solo utilizado apresentou granulometria fina, apresentando características de um solo mais argiloso e portando possivelmente com maior capacidade iônica.

Destaca-se pôr fim a importância de maiores esclarecimentos quanto ao comportamento do sistema operando com o tratamento biológico propriamente dito, ou seja, para ter conclusões mais assertivas acerca de qual a melhor vazão de funcionamento do sistema é importante analisar como o mesmo se comportar para o tratamento de efluentes domésticos nas respectivas vazões analisadas.

Referências

ERNANI, Paulo Roberto. **Química Do Solo E Disponibilidade De Nutrientes**. [S. l.]: Paulo Roberto Ernani, 2008.

FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. **Princípios, Fundamentos e Processos em Engenharia Ambiental**. Santana de Parnaíba, SP: SGuerra Design Ltda, 2021.

GALBIATI, Adriana Farina. **TRATAMENTO DOMICILIAR DE ÁGUAS NEGRAS ATRAVÉS DE TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO**. 2009. 52 f. Mestrado - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, 2009.

GODINHO, Jayson Pereira *et al.* Comportamento dinâmico e hidrodinâmico de reator tipo UASB submetido à variação de carga hidráulica. **Revista DAE**, [s. l.], v. 66, n. 209, p. 84–98, 2018.

GOMES, Kaio Gustavo; RIBAS DOLL, Maria Madalena. **Startup de um tratamento de águas cinzas domésticas com detergente biodegradável por tanque de evapotranspiração em escala piloto**. Ponta Grossa: [s. n.], 2022.

GOMES, Kaio Gustavo; VUITIK, Guilherme Araújo; RIBAS DÖLL, Maria Magdalena. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **PROJETO, HIDRODINÂMICA E DESEMPENHO DE UM TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DE ÁGUAS CINZAS DOMÉSTICAS**, [s. l.], n. 32, p. 10, 2023.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo: Bluncher, 2000. v. 1

PAMPLOMA, S; VENTURI, M. Permacultura Brasil. **Esgoto à flor da terra: Soluções ecológicas**, [s. l.], v. 16, n. 5, p. 18–19, 2004.

PAULO, Paula L. *et al.* Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 50, p. 95–100, 2013.

PERSSON, J.; SOMES, N. L. G.; WONG, T. H. F. Hydraulics Efficiency of Constructed Wetlands and Ponds. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 291–300, 1999.

ROCHA, Gabriel. **TANQUE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DOMÉSTICO EM ZONAS RURAIS**. 2020. 97 f. Mestrado - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2020.

SILVA, ANDRÉ PHELPE RODRIGUES DA. **Uso de traçadores para avaliação da hidrodinâmica de um tanque de evapotranspiração - TEvap**. 2019. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG, 2019.

VUITIK, Guilherme Araújo. **EFETOS DA RECIRCULAÇÃO EM REATORES ANAERÓBIOS COMPARTIMENTADOS**. 2017. 130 f. Doutorado - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS, São Carlos, 2017.