

Análisis Hidrodinámico de un Reactor Anaerobio Empleando Trazadores

Dra. Alejandra Velasco Pérez ^a, Dr. José Guadalupe Vian Pérez ^{a,b}, Dr.
Héctor Fernando Puebla Núñez ^c



Acerca de los autores

^a Académico-Investigador de la Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Región Córdoba-Orizaba, Veracruz.

^b Académico-Investigador de la Universidad Politécnica de Huatusco, Veracruz.

^c Académico-Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Azcapotzalco, Ciudad de México.

Resumen

Este trabajo describe una técnica empleada para analizar la hidrodinámica en reactores anaerobios, misma que implica la inyección de una sustancia (trazador) para determinar el tiempo promedio que las partículas de fluido permanecen dentro de los sistemas. Con esta información, es posible inferir el patrón de flujo y detectar sus anomalías, como zonas estancadas y cortocircuitos. Para demostrar su importancia, se



presenta un estudio en el que se observó una variación en el patrón de flujo como consecuencia de la variación de la velocidad ascensional de operación de un reactor anaerobio de flujo ascendente con lecho de lodos. El reactor operó a tres velocidades ascensionales: 0.5, 1.0 y 1.5 m/s, y al final se obtuvo un patrón de flujo con menor volumen en zonas estancadas con una velocidad de 1.5 m/h.

Palabras clave: Hidrodinámica; Trazadores; Reactor Anaerobio.

Abstract

This work describes a technique used to analyze the hydrodynamics in anaerobic reactors. The technique involves the injection of a substance (tracer) to determine the average time particles of fluid remain within the systems. With this information, it is possible to infer the flow pattern and detect its anomalies, such as stagnant zones and short circuits. To demonstrate its importance, a study is presented in which a variation in the flow pattern was observed as a consequence of varying the upflow velocity in an upflow anaerobic sludge blanket reactor. The reactor was operated at three upflow velocities: 0.5, 1.0, and 1.5 m/s. A flow pattern with a lower volume of stagnant zones was obtained at a velocity of 1.5 m/s.

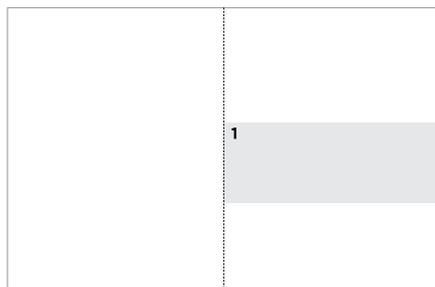
Keywords: Hydrodynamics; Tracers; Anaerobic Reactor.

Introducción

Al diseñar reactores, se busca generar la mayor cantidad de producto en el menor tiempo posible. Sin embargo, en la práctica, es frecuente que surjan problemas operacionales referentes al flujo de materiales dentro de los reactores, como la formación de zonas estancadas, vías preferentes de transporte o patrones de mezcla no deseados. Esto impacta de manera negativa en la eficiencia de los procesos, ya que se limita la utilización completa del volumen de reacción y se reduce el contacto y transporte de los reactivos.

Una estrategia para identificar la magnitud de los problemas anteriores, es el análisis hidrodinámico, el cual consiste en la caracterización del movimiento del líquido dentro de los reactores. De este modo, se pueden determinar las condiciones de operación que permitan disminuir las anomalías del flujo y aproximarlos a un patrón ideal.

En el caso de los biorreactores anaerobios, las principales causas de desviación del comportamiento ideal incluyen la concentración de sólidos, la formación de agregados microbianos, el flujo de biogás y la geometría del sistema (Chen *et al.*, 2015). No obstante, es posible minimizar su impacto ajustando los parámetros hidráulicos del sistema (Li *et al.*, 2016). Precisamente, este artículo describe un estudio realizado en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), que identificó la velocidad ascensional más adecuada para mejorar el patrón de flujo en un reactor anaerobio de flujo ascendente.



https://es.made-in-china.com/co_qiankunhb/product_Industrial-Waste-Water-Treatment-IC-Uasb-Anaerobic-Reactor-Biogas-Anaerobic-Reactor_uoonhiyguy.html

1. Identificación del patrón de flujo por medio de la distribución de tiempo de residencia

Para comprender en qué consiste el análisis hidrodinámico, se debe tener en cuenta que el tiempo de residencia hidráulica (TRH) es un parámetro de diseño que indica el tiempo que las partículas de fluido permanecen dentro de un reactor. Este parámetro se puede calcular dividiendo el volumen de reacción entre el flujo volumétrico de alimentación. Pero lo que ocurre en realidad es que no todas las partículas permanecen el mismo tiempo dentro del reactor, dando lugar a una distribución de tiempos de residencia (DTR). Al identificar el tiempo promedio (t_m) de la DTR, es posible caracterizar el patrón de flujo predominante.

Cuando el t_m de la DTR coincide con el TRH de diseño, se asume que existe un patrón de flujo ideal, ya sea de mezcla perfecta o de flujo tipo pistón. En los reactores de mezcla perfecta, las partículas de fluido se desplazan y se mezclan completamente, lo que resulta en una composición uniforme del medio. Por otro lado, en los reactores con flujo tipo pistón, las partículas se mueven uniformemente a través de la longitud del reactor, sin mezclarse con las que ingresan inmediatamente después. Sin embargo, si el t_m es diferente al TRH, entonces los reactores operan con patrones de flujo no ideales con un grado de mezcla intermedio entre los dos casos ideales (Levenspiel, 1999).

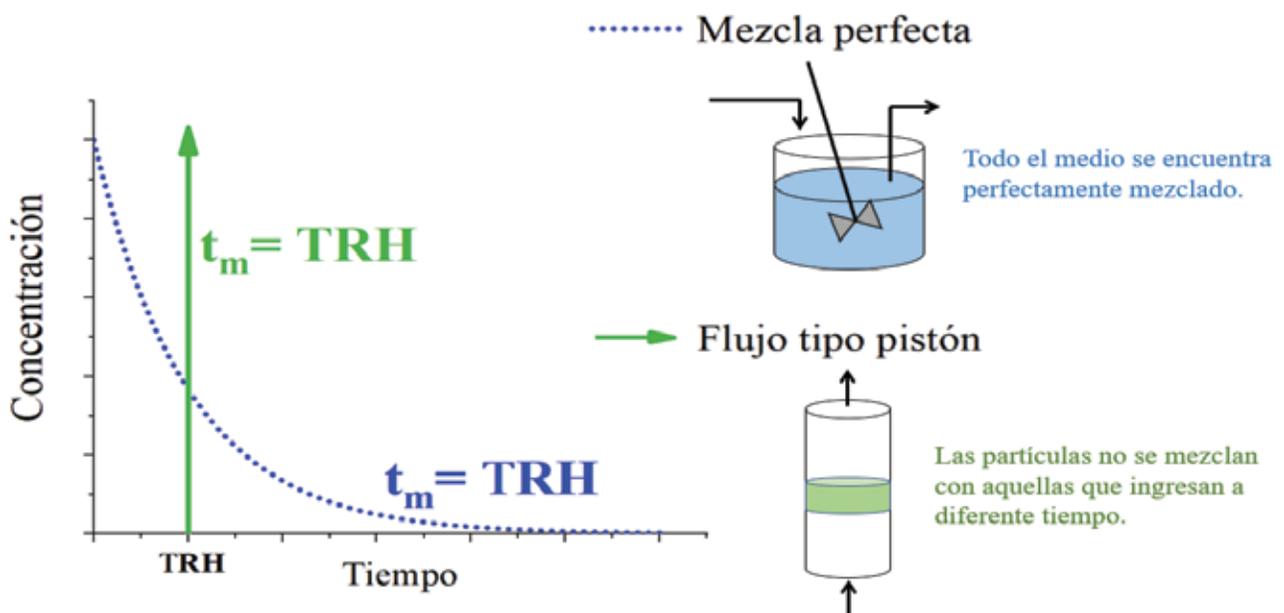
Para obtener la DTR se utilizan trazadores, que pueden ser colorantes, sales o partículas sólidas inertes, fáciles de detectar, los cuales siguen la trayectoria del líquido dentro del reactor. El procedimiento consiste en la inyección instantánea de una masa de trazador en la corriente de alimentación, monitoreando periódicamente su concentración en diferentes puntos o en la corriente de salida del reactor. En un reactor mezclado perfectamente, la concentración detectada va disminuyendo exponencialmente, hasta que alcanza un valor de cero, como se ilustra en la Figura 1. Y en reactores de flujo tipo pistón, solo se observa un pico de máxima concentración al transcurrir el TRH.

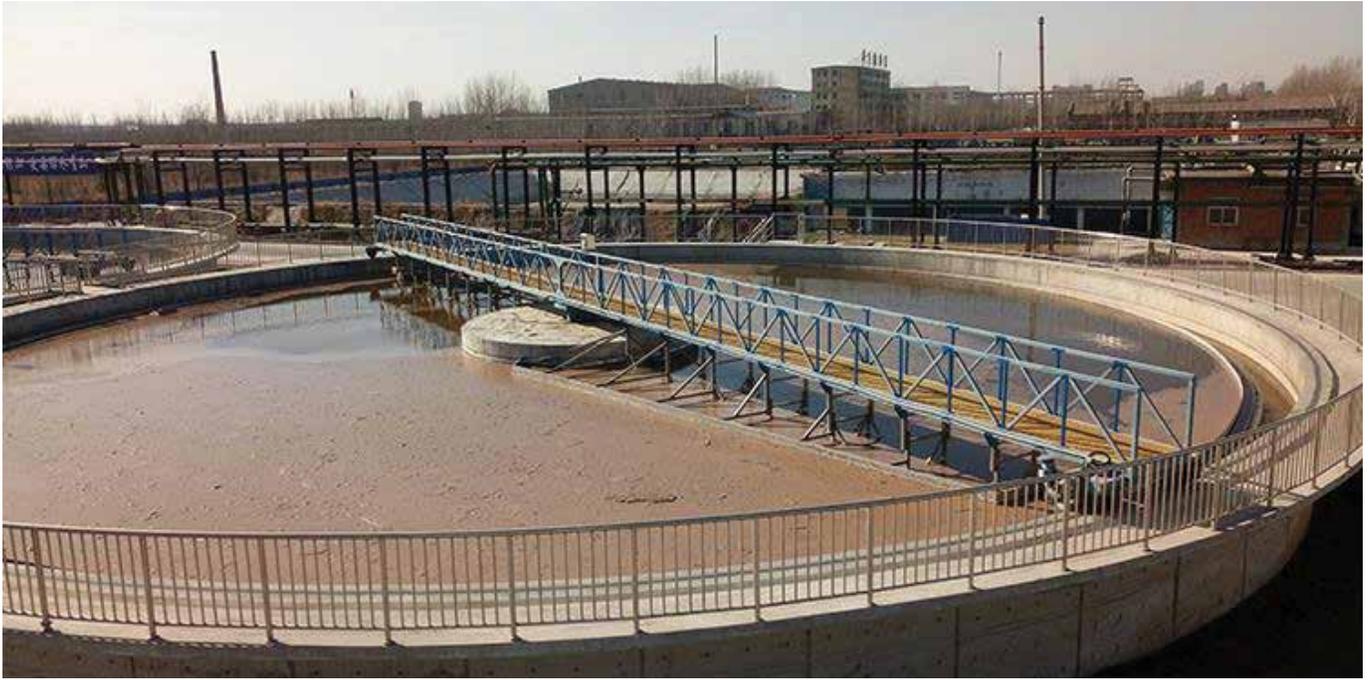


https://es.made-in-china.com/co_qiankunhb/product_Industrial-Waste-Water-Treatment-IC-Uasb-Anaerobic-Reactor-Biogas-Anaerobic-Reactor_uoonhiyguy.html

Figura 1

Figura 1. Distribución de tiempos de residencia en reactores ideales.





Con los datos experimentales de concentración contra tiempo, se calcula la función de distribución de tiempo de residencia $E(t)$, que es necesaria para determinar el tiempo promedio de residencia t_m . El cálculo se realiza de acuerdo a las ecuaciones 1 y 2; las integrales que aparecen, se resuelven numéricamente.

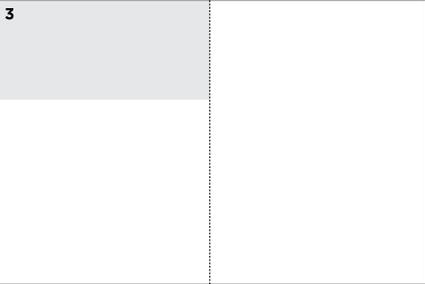
$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \dots \dots \dots \text{Ecuación 1}$$

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} \dots \dots \dots \text{Ecuación 2}$$

Cuando se comparan las DTR de diferentes sistemas o condiciones de operación, los parámetros deben modificarse, utilizando las ecuaciones 3 y 4, donde θ es el tiempo normalizado y $E(\theta)$ es la función de tiempo de residencia normalizada (Fogler, 2001).

$$\theta = \frac{t}{TRH} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3}$$

$$E(\theta) = t_m E(t) \dots \dots \dots \text{Ecuación 4}$$



https://es.made-in-china.com/co_qiankunhb/product_Industrial-Waste-Water-Treatment-IC-Uasb-Anaerobic-Reactor-Biogas-Anaerobic-Reactor_uoonhiyguy.html

2. Estudio de caso

El procedimiento descrito en la sección anterior, se empleó para caracterizar el patrón de flujo del reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos (RAFAELL), en el cual se degradan residuos de frutas y hortalizas (RFH) para generar metano. Se trata de un reactor vertical de 35 L, dividido en tres secciones, con características físicas diferentes. La primera sección, localizada en la parte baja, consiste en un lecho de lodos. La segunda es una región líquida denominada sección buffer. Y la tercera zona es una sección de estado sólido, donde se empacan los RFH con tamaño de partícula de 1 cm. El líquido es bombeado desde la parte inferior y asciende hasta la tercera sección, desde donde es recirculado hacia la primera zona (Vian *et al.*, 2020a).

La DTR se determinó en cada sección del reactor, por lo que se instalaron puertos de muestreo al final de cada una de ellas y se canceló la recirculación para evitar que el trazador ingresara nuevamente al reactor. En la Figura 2 se puede observar un esquema del RAFAELL con las modificaciones mencionadas.

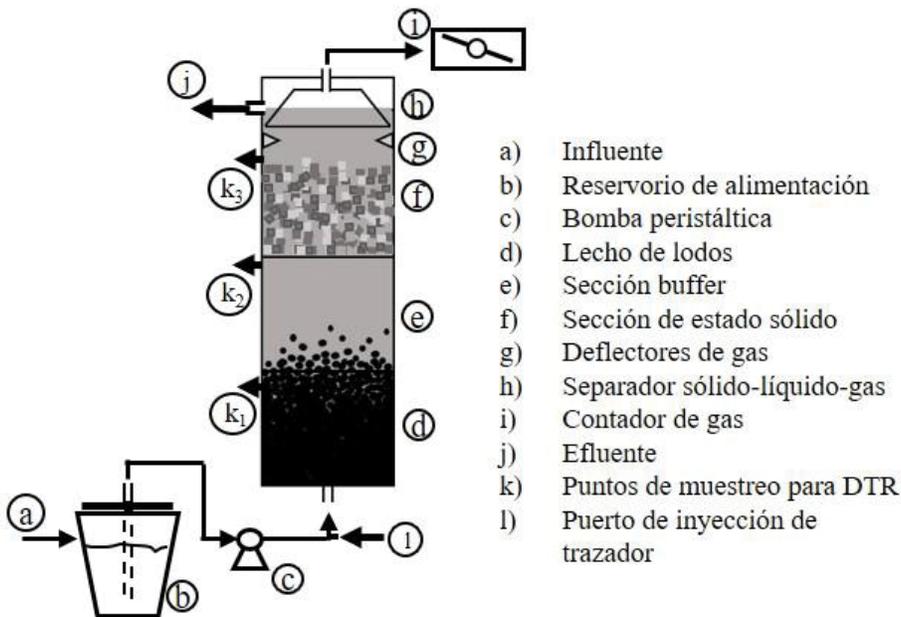


Figura 2

Esquema del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente Empacado con Lecho de Lodos. Tomado de: Vian, 2020b.

Debido a que el reactor es de flujo ascendente, se planteó la hipótesis de que la velocidad ascensional (U) del líquido, podría modificar el patrón de flujo en el reactor, por lo que se realizaron experimentos operando el reactor con velocidades ascensionales de 0.5, 1 y 1.5 m/h. Este parámetro se modificó a través del incremento del flujo volumétrico de alimentación. El trazador que se utilizó fue cloruro de litio, debido a que no se absorbe en el medio y no es tóxico para los microorganismos presentes en el sistema. En cada experimento se inyectaron 20 mL de una solución de cloruro de litio, con concentración de 600 g /L. La concentración de LiCl en los puntos de muestreo se midió mediante conductividad.

3. Interpretación de la distribución de tiempos de residencia

Las DTR se pueden analizar de dos maneras: la primera de ellas, es a través de examinar la forma de la distribución. Es frecuente observar que las distribuciones adopten la forma de campana y sus características permiten inferir las particularidades hidrodinámicas de los sistemas analizados. En este sentido, si las distribuciones son alargadas hacia la derecha, indican la existencia de zonas estancadas o de retención del trazador; sin embargo, si las campanas son estrechas, se puede interpretar que el patrón de flujo se aproxima a uno de tipo pistón. Cuando el punto más alto de la distribución se localiza en un tiempo cercano a cero, se sugiere la presencia de vías preferenciales por donde el fluido circula más rápido. Por su parte, si el pico (punto más alto de la campana) aparece después de $\theta = 1$, entonces se asume que existe algunas zonas donde se retienen las partículas. Y finalmente, se pueden identificar recirculaciones al interior del reactor, si aparece más de un pico (Martin, 2000).

Los resultados de la DTR del RAFAELL (Figura 3) demuestran que su patrón de flujo no es ideal, pero que se aproxima al flujo tipo pistón. La amplitud de las distribuciones y el tiempo en el cual aparecen los puntos más altos de las DTR, confirman la presencia de zonas estancadas y la retención del trazador. Únicamente en la DTR correspondiente a una velocidad ascensional de 1.5 m/h no hay indicios de la retención del trazador (los picos aparecen antes de $\theta = 1$). También se observó que la DTR correspondiente a esta velocidad de operación y es la de menor amplitud.

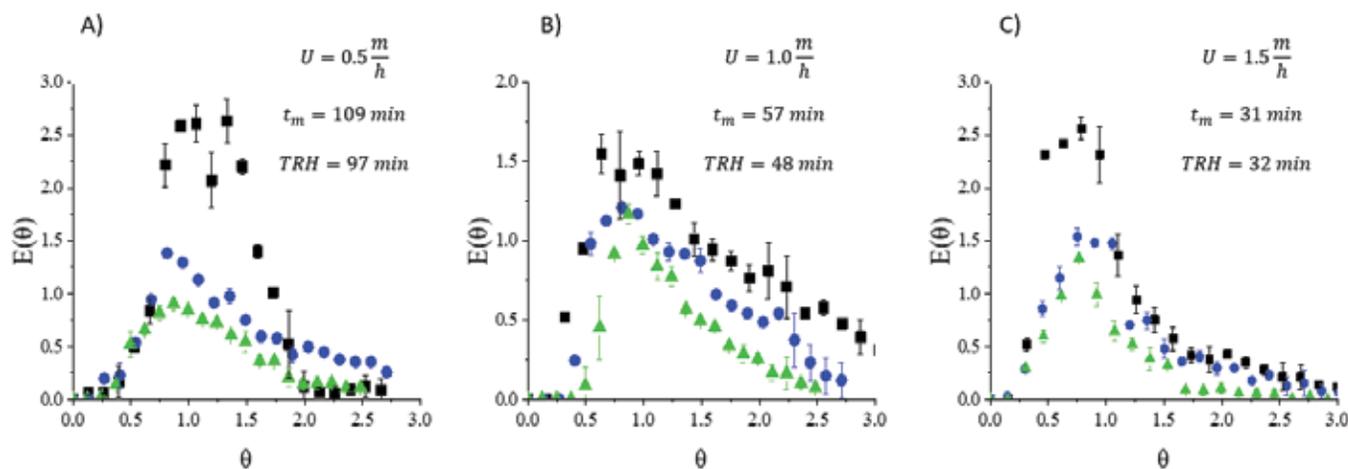


Figura 3

Distribuciones de tiempo de residencia en el lecho de lodos (■), sección buffer (●) y sección de estado sólido (▲) del RAFAELL. Modificada de: Vian *et al.*, 2020c.

La otra forma de realizar el análisis de los resultados, es a través de la comparación de t_m con el TRH. Cuanto más grande es la diferencia entre ambos parámetros, más grande es la desviación del flujo ideal. Si t_m es mayor a TRH, significa que el trazador fue retenido en el reactor; en caso contrario ($t_m < TRH$), se confirma la presencia de vías preferenciales o zonas estancadas por donde no fluye el líquido. Al analizar los datos presentados en la Figura

3, se puede notar que el nivel de desviación fue menor para los experimentos llevados a cabo a 1.5 m/h, ya que la diferencia entre t_m y TRH es de solo el 3.2%, mientras que para las otras condiciones, la diferencia fue de 12 y 19%. Por lo tanto, es preferible operar el reactor con una velocidad ascensional de 1.5 m/h.

Conclusiones

En este artículo se explicó de manera breve, cuál es la utilidad del análisis hidrodinámico en los reactores y se describió de manera general cómo realizar esos estudios a partir de la determinación de la distribución de tiempo de residencia, utilizando trazadores. Se presentó un estudio llevado a cabo en el Laboratorio de Tecnología Anaerobia del TESE, donde se estableció la velocidad ascensional útil para desarrollar el mejor patrón de flujo en un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos. Al analizar la DTR se pudo concluir que al operar el reactor con una velocidad de 1.5 m/s se obtenía un patrón de flujo cercano al flujo de pistón con menos zonas estancadas en comparación que con las velocidades de 0.5 y 1.5 m/s. Si bien la DTR no proporciona información respecto a la localización de las anomalías en el flujo, sí brinda información para inferir su existencia y magnitud relativa, lo cual permite establecer estrategias para mejorar el desempeño de los sistemas.



Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Referencias

Chen, Y., He, J., Mu, Y., Huo, Y. C., Zhang, Z., Kotsopoulos, T. A., & Zeng, R. J. (2015). "Mathematical modeling of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors: Simultaneous accounting for hydrodynamics and bio-dynamics". *Chemical Engineering Science*, 137, 677-684. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.07.016>

Fogler, H. S. (2001). *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*. 3a. edición. Prentice Hall.

Levenspiel, O. (1999). *Chemical reactor engineering*. John Wiley & Sons. Inc.

Li, S., Nan, J., & Gao, F. (2016). "Hydraulic characteristics and performance modeling of a modified anaerobic baffled reactor (MABR)". *Chemical Engineering Journal*, 284, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.129>

Martin, A. D. (2000). "Interpretation of residence time distribution data". *Chemical Engineering Science*, 55(23), 5907-5917. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00108-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00108-1)

Vian, J., Viguera-Carmona, S. E., Velasco-Pérez, A., & Puebla, H. (2020). "A Novel Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket Solid-State Reactor for the Treatment of Fruit and Vegetable Waste". *Environmental Engineering Science*, 37(5), 373-381. <https://doi.org/10.1089/ees.2019.0369>

Vian, J. (2020). Caracterización y modelado de un reactor anaerobio de flujo ascendente empacado con lecho de lodos [Tesis de Doctorado]. Universidad Autónoma Metropolitana.

Vian, J., Viguera-Carmona, S. E., Velasco-Pérez, A., Sánchez-Sánchez, K. B., & Puebla, H. (2020). "Hydrodynamics of a modified up-flow anaerobic sludge blanket reactor treating organic fraction of municipal solids waste". *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(7). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2020-0024>

Fotografías

<https://www.sewagewaters.com/wastewater-treatment-plant/rotary-decanter>