

Propuesta metodológica para monitorizar variables operativas, aplicada a sistemas de depuración natural de aguas residuales, como herramienta de aprendizaje en el campo de la ingeniería.

Melania L. Rodríguez-Pérez*^{1a}, Carlos A. Mendieta-Pino^a, Federico León-Zerpa, Tania del Pino García-Ramírez^a, Saulo Brito-Espino^a, Alejandro Ramos-Martín^a,
Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Natural (iUNAT) Edificio Polivalente I, Parque Científico Tecnológico;
35017 Tafira Baja, Las Palmas de Gran Canaria, Islas Canarias, España

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para mejorar el funcionamiento de sistemas de depuración natural aplicados a explotaciones ganaderas. Para ello, se propone un Sistema Integrado y Resiliente para el monitoreo y medición de variables operativas empleando tecnología de bajo coste y hardware de código abierto, así como la aplicación de las estrategias del Internet de las Cosas para compartir y analizar la información recogida en la nube. Se propone como herramienta de aprendizaje para los estudiantes de ingeniería en el campo de la depuración de aguas residuales y de la mitigación del cambio climático a partir de pruebas de laboratorio, diseño y creación de prototipos fomentando el aprendizaje activo como estrategia educativa.

Palabras clave: Aprendizaje; Nuevas Tecnologías; TAC; IoT; Cambio climático;

1. INTRODUCCIÓN

El exceso de purines sin tratamiento adecuado puede causar contaminación de: (i) aguas superficiales y subterráneas debido a la presencia de nutrientes como nitrógeno y fósforo en altas concentraciones; ii) la atmósfera, debido a la cantidad significativa de emisiones de gases de efecto invernadero, incluido el metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), y óxido nitroso (N₂O); iii) la tierra, ya que las altas concentraciones de elementos como metales pesados, antibióticos y nitratos pueden tener efectos perjudiciales sobre las propiedades de la tierra, exponiendo el suelo a un riesgo de contaminación y reduciendo los rendimientos de los cultivos¹⁻³. Según se ha informado en diferentes estudios, una forma de tratar dichos residuos es emplear un Sistema de Depuración Natural (SDN) de aguas residuales en la propia explotación ganadera, ya sea mediante la digestión anaeróbica o el uso de humedales y lagunas artificiales⁴⁻⁶. Sin embargo, los estudios indican que estos sistemas generalmente operan en condiciones que no son óptimas, principalmente debido a la falta de datos en línea de los parámetros de operación, lo que se traduce en un menor rendimiento⁷⁻⁹. Dado que gran parte del territorio de Gran Canaria pertenece a espacios protegidos, aproximadamente el 42% se encuentra bajo una de las categorías de protección de la Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos, se puede considerar que la isla es vulnerable a la contaminación debido a la mala gestión de los purines.

El objetivo de este estudio es proponer una metodología para mejorar la operación de los SDN aplicada a pequeñas y medianas explotaciones ganaderas, en sistemas insulares y aislados como Canarias. Dicha metodología se basa en el diseño e implementación de un Sistema Integrado y Resiliente (IRS) para monitorear y medir variables operativas a través de tecnología de bajo coste y hardware abierto (sensores, registradores de datos, sistemas de control, etc.), y la aplicación de estrategias de Internet de las Cosas (IoT) para compartir y analizar la información recopilada, sirviendo como herramienta de mitigación del cambio climático. A la vez que se desarrolla como herramienta de aprendizaje para las/os estudiantes con la que se pretende reforzar los conceptos estudiados en las sesiones teóricas, pero con equipos de laboratorio en los que podrán realizar observaciones reales de los fenómenos o conceptos. Por lo que, este tipo de tecnología puede tener un gran potencial en el proceso educativo, usando estas tecnologías para el aprendizaje y el conocimiento (TAC). Su uso en investigación y docencia puede permitir el desarrollo de nuevos proyectos y ayudar a los estudiantes de ingeniería en su aprendizaje.

¹ *melania.rodriguez103@alu.ulpgc.es; teléfono +34 619 66 12 23

Este proyecto pretende ser una guía para el aprendizaje mediante herramientas TIC, utilizando el uso de diversas tecnologías para la adquisición de conocimientos. Se busca desarrollar competencias como la resolución de problemas, la toma de decisiones, el ingenio, o el razonamiento crítico en el campo de la depuración de aguas residuales y la mitigación del cambio climático. Además, se pretende que el alumnado obtenga conocimientos en materias básicas y tecnológicas, siendo capaz de aprender nuevos métodos y teorías adaptándose a diferentes situaciones. Se pretende también incrementar las habilidades del estudiante en el manejo de equipos como resultado de su utilización en los laboratorios de la escuela, así como el trabajo en equipo y colaborativo.

2. PROPUESTA METODOLÓGICA.

La metodología propuesta servirá también para que los estudiantes de ingeniería entiendan el funcionamiento de los SDN, así como los parámetros de diseño y operación que se ven implicados en el proceso. El aprendizaje de estas estrategias podría lograrse utilizando esta metodología como proyecto para los estudiantes siendo ellos quienes la desarrollen y complementen a partir de Trabajos Fin de Título (TFT) tanto de grado como de máster. Esta propuesta educativa se basa en estudios teóricos psicológicos publicados en diferentes artículos ¹⁰⁻¹² que enfatizan que los estudiantes pueden reforzar su aprendizaje a través de un entorno de enseñanza adecuado, así como a través del diseño, programación y uso de los equipos.

Los avances en instrumentación permiten monitorizar en tiempo real los parámetros críticos en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Tales instrumentos sirven para proporcionar advertencias si se producen perturbaciones que puedan perjudicar el proceso, disminuyendo así el rendimiento. Hay tres elementos básicos en cualquier sistema de control: sensores, controlador y software de comunicación. Para mejorar la operación de los SDN, se propone utilizar sensores de bajo coste implementados con tecnología Arduino e Internet de las Cosas (Figura 1). El objetivo es proporcionar una herramienta económica y fácil de usar para el control y mejora del proceso de tratamiento de purines, sirviendo de ejemplo didáctico para los alumnos de ingeniería. Se trabajará con herramientas de código abierto facilitando su difusión, de esta forma los resultados obtenidos pueden ser compartidos con otras universidades o centros de estudio superior, así como al público en general facilitando también su adaptación a otras aplicaciones. Este proyecto implica el área de algunas de las asignaturas de titulaciones de grado y máster que se imparten en la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Este proyecto se puede dividir en varias fases o etapas:

- Estudio del sistema que implementa el fenómeno de estudio,
- Elección de los sensores y actuadores necesarios para implementar en el sistema.
- Sistema de adquisición de datos y control digital (microcontroladores Arduino, Raspberry Pi, pc, apps, red wifi, tecnología del IoT, etc.)
- Elección de interfaz digital para visualizar los datos obtenidos (ordenador, tablets, smartphone, redes sociales, servidor propio, etc.)
- Análisis de los datos mediante herramientas de cálculo numérico, estadístico y gráfico (RStudio, Matlab, Scilab, etc...)
- Decisiones para tomar según los datos obtenidos (añadir otros sensores, actuadores y/o alarmas para mejorar el sistema)

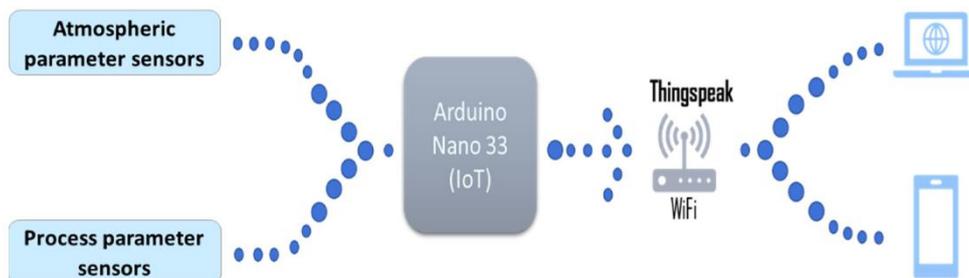


Figura 1. Diagrama general del sistema propuesto.

2.2.1. Sistema.

En este proyecto el sistema que se propone parametrizar es un sistema de depuración natural para el tratamiento de aguas residuales procedentes de afluentes de origen ganadero. Para el diseño y correcto funcionamiento de los SDN hay que tener en cuenta varios parámetros que resultan fundamentales para el proceso de la depuración de las aguas residuales. Algunos de los parámetros de operación y diseño más relevantes son: el tiempo de retención hidráulico (TRH), el pH, el oxígeno disuelto, la cantidad de sólidos en suspensión (SS), el tipo de materia de orgánica a tratar, la relación C/N¹³⁻¹⁵. Otros parámetros, como los ambientales también tienen un efecto directo sobre el funcionamiento de los SDN, tales como la temperatura ambiente, la radiación, la humedad relativa, la velocidad del viento o las precipitaciones¹⁶⁻¹⁸. A cada grupo de estudiantes se le asignará un sistema formado por diferentes componentes: humedales, lagunas o biodigestores teniendo todas características operativas diversas.

2.2.1. Sensores.

Es importante monitorear parámetros como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación o la velocidad del viento incidente en el área. Es interesante también controlar parámetros de funcionamiento como el pH, la temperatura del medio acuoso, el oxígeno disuelto, la conductividad, las concentraciones de gas (CO₂, CH₄, H₂), presiones, o potencial redox. En la Figura 2 se presentan los sensores propuestos para realizar este sistema. Se propondrán mejoras o adaptaciones, por parte de los estudiantes, para realizar otras experiencias asociadas con el fenómeno de estudio (Aprendizaje basado en proyectos de mejora o modificación).



Figura 2. Ejemplo de sensores para medir variables atmosféricas y operativas

2.2.2. Sistema de control y circuito

Arduino es una plataforma electrónica que permite la construcción de instrumentos científicos, utilizando hardware y software de código abierto, reduciendo así el coste de la investigación. Ha sido utilizado eficientemente para monitorear y controlar equipos experimentales en procesos de automatización por parte de la comunidad científica. Implementándose cada vez más su uso como método de aprendizaje en la docencia (Aprendizaje basado en proyectos)¹⁹⁻²¹

Hay que señalar que las explotaciones ganaderas pueden estar ubicadas en lugares de difícil acceso a la red eléctrica o a las conexiones de área local (Ethernet, Wi-Fi, etc.). Por lo tanto, se debe idear una forma eficiente y económica de mantener la comunicación con el sistema establecido. Por ello, se propone utilizar el microcontrolador Arduino Nano 33 IoT, es elegido por su bajo coste y la idoneidad de contar con un módulo Wi-Fi integrado para la comunicación con el servidor, lo que simplifica la instalación. La comunicación entre el microcontrolador y los sensores se puede realizar mediante diferentes protocolos (I2C, SPI, UART, etc.), las/os estudiantes podrán experimentar con los diferentes tipos de protocolos, comparando y verificando cuál sería el óptimo según el tipo de sensor aplicado.

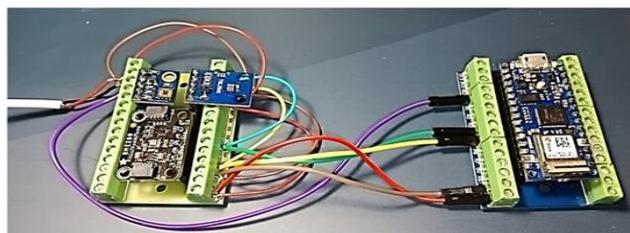


Figura 3. Montaje del circuito.

2.2.3. Sistema de comunicación.

Una vez que el sistema está en funcionamiento tomando datos de los diferentes parámetros, necesitamos poder acceder a dicha información. El módulo de comunicación utilizado ofrece la posibilidad de enviar los datos a una plataforma web donde pueden ser analizados en tiempo real. Para ello el alumnado elegirá una plataforma de datos de código abierto para IoT, que permita la agregación, visualización y análisis de flujos de datos en línea en la nube algunas de ellas pueden ser ThingSpeak o Blink entre las muchas opciones que se encuentran disponibles. Estas aplicaciones, permiten al usuario actuar automáticamente sobre los datos y comunicarse a través de servicios de terceros como Twilio, Twitter, Gmail, dependiendo de la aplicación escogida. Por ejemplo en la aplicación ThingSpeak, el canal tendrá una dirección de identificación única utilizada para comunicarse con él. En esta etapa, el alumnado, tendrá que definir las variables que van a monitorizarse y crear el código para conectar el microcontrolador a la nube compilando el código en la plataforma Arduino IDE. En la Figura 4 se expone un ejemplo del diagrama de flujo creado para tomar las medidas y enviar los datos al servidor de red. Probablemente se dé el caso de llegar a múltiples soluciones para los diferentes equipos de trabajo ya que se trata de tecnología de software libre, lo que da libertad a las/os estudiantes para desarrollar sus propios códigos. De esta forma pueden mejorar su conocimiento de los conceptos ya que podrán utilizar todo lo aprendido para mejorar los equipos y modificarlos, mediante el desarrollo de su creatividad y colaboración entre compañeras/os, promoviendo el autoaprendizaje y reforzando la competencia de aprender a aprender.

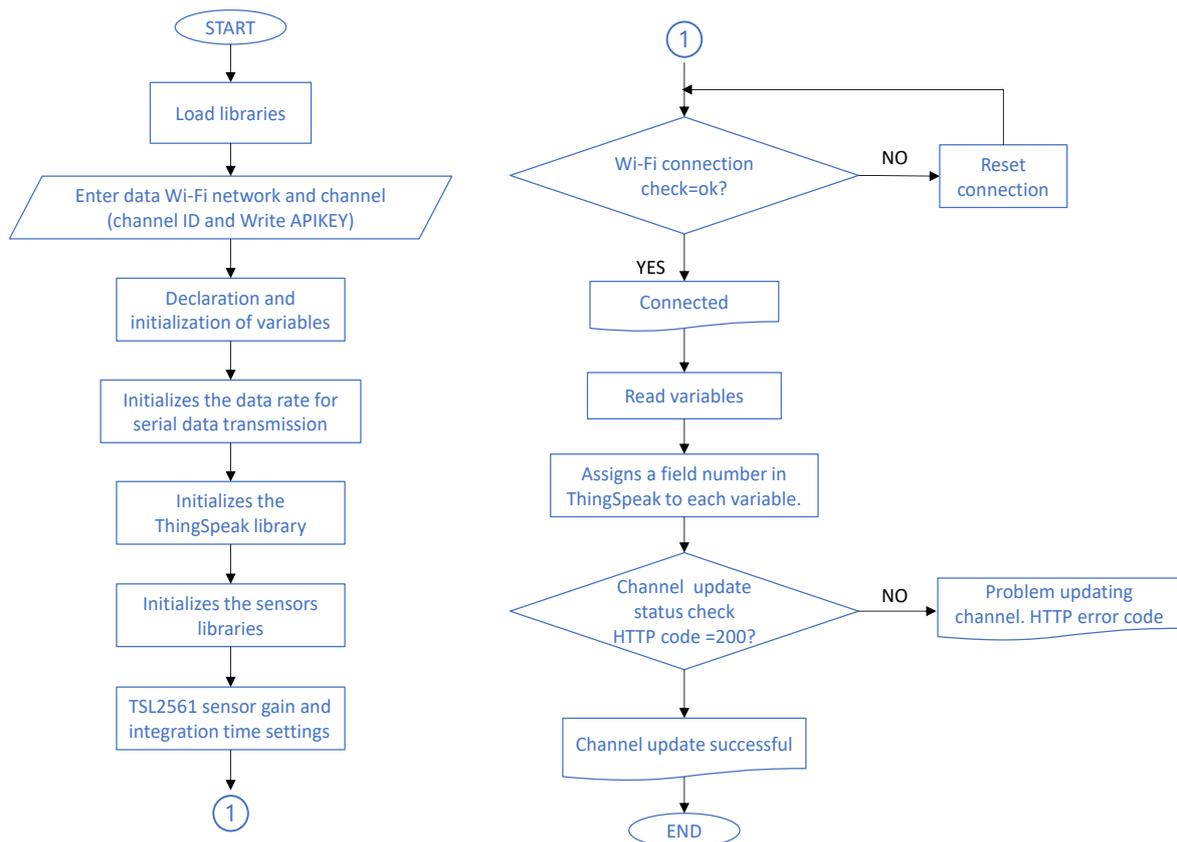


Figura 4. Diagrama de flujo del programa

En la siguiente etapa, el alumnado analizará los resultados obtenidos mediante herramientas de cálculo numérico y estadístico, obteniendo las conclusiones pertinentes. A raíz de estos resultados deberán decidir si es necesario monitorizar más parámetros o utilizar alarmas para avisar de determinados cambios en la condiciones operativas como puede ser aumento o reducción de temperatura, pH, componentes inhibidores..., así como agregar actuadores al sistema que permita estabilizar las condiciones de operación del sistema.

3. RESULTADOS PREVISTOS.

La combinación de la tecnología Arduino con el IoT es una opción real para la supervisión, control y adquisición de datos no solo para los sistemas de depuración natural, sino para cualquier sistema, dada la simplicidad de programación y el bajo precio de los componentes por lo que puede ser utilizada como herramienta de aprendizaje para el alumnado de ingeniería. Además, ayudará a consolidar a las/os estudiantes los contenidos de las materias relacionadas con la tecnología y la electrónica, mejorando la competencia de aprender a aprender. Como resultado del desarrollo de este proyecto se espera fomentar:

- La capacidad de resolución de problemas de forma autónoma, mediante el razonamiento crítico, la creatividad, así como la capacidad de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el ámbito tecnológico y de la depuración de aguas residuales.
- Competencias y capacidades del equipo docente en el diseño de estrategias de aprendizaje activo apoyándose en los laboratorios y en el equipo tecnológico disponible, utilizando las TICs, en titulaciones grados y másteres del campo de la ingeniería.
- La competencia del diseño, desarrollo, análisis y mejora de sistemas electrónicos enfocados en la monitorización de diferentes tipos de variables y señales (analógicas, digitales, continuas, etc.). Fomentando también la capacidad de tomar decisiones según los resultados obtenidos preparando a las/-os estudiantes para el ámbito laboral.

Resultados similares han sido alcanzados por otros autores ²²⁻²⁵.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de este proyecto y así como el uso de la tecnología propuesta en investigación y docencia puede permitir el desarrollo de nuevos proyectos de investigación así como ayudar a los estudiantes de ingeniería en su aprendizaje. Por lo que, a través de este sistema, es posible introducir a los estudiantes de ingeniería el funcionamiento de esta tecnología utilizada normalmente como una herramienta muy potente, en diferentes campos, como el control de la huella de carbono, por ejemplo en el sector de las aguas residuales, y en consecuencia para la mitigación del cambio climático. El sistema proporciona una base sólida para futuros trabajos de expansión en la misma categoría. La implementación de este tipo de enseñanza hace que se promueva entre el alumnado pensamiento crítico, computacional, y científico, fomentando la competencia de Aprender a Aprender. Además, aporta valor a los futuros ingenieros al enfrentarlos a buscar soluciones a problemas reales que pueden encontrarse en su carrera profesional, fomentando la capacidad reaccionar y buscar alternativas ante resultados inesperados. Se promueve el trabajo en equipo, al trabajar en grupos heterogéneos y multidisciplinares donde cada alumna/o aportará sus conocimientos, habilidades y recursos propios. Por otro lado, gracias a su fácil implementación favorece la cooperación entre diferentes entidades, como otras universidades, grupos de investigación o empresas privadas.

Financiación: Este proyecto ha sido cofinanciado por la Cooperación Interreg V-A España-Portugal. Programa MAC (Madeira-Azores-Canarias) Proyecto MITIMAC MAC2/1.1a/263.

Este proyecto ha sido financiado en parte por los fondos europeos Next Generation EU (NGEU) bajo el “Real Decreto 641/2021, de 27 de julio, por el que se regula la concesión directa de subvenciones a universidades públicas españolas para la modernización y digitalización del sistema universitario español en el marco del plan de recuperación, transformación y resiliencia (UNIDIGITAL) - Proyectos de Innovación Educativa para la Formación Interdisciplinar (PIEFI) - Línea 3. Contenidos y programas de formación” en el seno del Proyecto de Innovación Educativa “Laboratorios como entornos de trabajo para el aprendizaje activo y colaborativo mediante el diseño, desarrollo, construcción, utilización y el rediseño de equipos y dispositivos para su aplicación en las prácticas” (PIE 2022-60)”.

5. REFERENCIAS

- [1] Mantovi, P., Bonazzi, G., Maestri, E. & Marmiroli, N. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. *Plant and Soil* **250**, 249–257 (2003).
- [2] Ciec ko, Z.,  o nowski, A. & Mierzejewska, A. Impact of Foliar Nitrogen and Magnesium Fertilization on Concentration of Chlorophyll in Potato Leaves. *Ecological Chemistry and Engineering. A* **Vol. 19**, 525–535 (2012).
- [3] Loyon, L. Overview of manure treatment in France. *Waste Management* **61**, 516–520 (2017).
- [4] Varma, V. S. *et al.* Dairy and swine manure management – Challenges and perspectives for sustainable treatment technology. *Science of The Total Environment* **778**, 146319 (2021).
- [5] Mendieta-pino, C. A., Garcia-ramirez, T., Ramos-martin, A. & Perez-Baez, S. O. Experience of Application of Natural Treatment Systems for Wastewater (NTSW) in Livestock Farms in Canary Islands. (2022).
- [6] Mendieta-Pino, C. A., P erez-B aez, S. O., Ramos-Mart ın, A., Le on-Zerpa, F. & Brito-Espino, S. Natural treatment system for wastewater (NTSW) in a livestock farm, with five years of pilot plant management and monitoring. *Chemosphere* **285**, 131529 (2021).
- [7] Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J. & Jones, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology* **99**, 7928–7940 (2008).
- [8] Madsen, M., Holm-Nielsen, J. B. & Esbensen, K. H. Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 15 3141–3155 (2011).
- [9] Angelidaki, I. & Ellegaard, L. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and future trends. *Applied Biochemistry and Biotechnology - Part A Enzyme Engineering and Biotechnology* **109**, 95–105 (2003).
- [10] Mahmood, S. *et al.* Raspberry PI and role of IoT in Education. *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City, ICBDS 2019* (2019) doi:10.1109/ICBDSC.2019.8645598.
- [11] Ramlowat, D. D. & Pattanayak, B. K. Exploring the internet of things (IoT) in education: A review. *Advances in Intelligent Systems and Computing* **863**, 245–255 (2019).
- [12] Al-Emran, M., Malik, S. I. & Al-Kabi, M. N. A Survey of Internet of Things (IoT) in Education: Opportunities and Challenges. *Studies in Computational Intelligence* **846**, 197–209 (2020).
- [13] Ni, J., Ji, J., Li, Y. Y. & Kubota, K. Microbial characteristics in anaerobic membrane bioreactor treating domestic sewage: Effects of HRT and process performance. *Journal of Environmental Sciences* **111**, 392–399 (2022).
- [14] Di Capua, F. *et al.* High-solid anaerobic digestion of sewage sludge: challenges and opportunities. *Applied Energy* **278**, 115608 (2020).
- [15] S. Pandia *et al.*, “Effect of fermentation time of mixture of solid and liquid wastes from tapioca industry to percentage reduction of TSS (Total Suspended Solids),” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **309**(1), 012086, IOP Publishing (2018) [doi:10.1088/1757-899X/309/1/012086].
- [16] N. Oliver Rajadel, “Estudio de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial del Tancat de la Pipa como instrumentos para la restauraci n ambiental del lago de l’Albufera de Val ncia.,” Universidad Polit cnica de Valencia (2017).
- [17] M. E. Verbyla, M. von Sperling, and Y. Maiga, “Waste Stabilization Ponds,” *Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project)*, J. R. Mihelcic and M. E. Verbyla, Eds., Michigan State University (2019) [doi:10.14321/WATERPATHOGENS.65].

- [18] H. Huryna, J. Brom, and J. Pokorny, "The importance of wetlands in the energy balance of an agricultural landscape," *Wetlands Ecology and Management* **22**(4), 363–381, Kluwer Academic Publishers (2014) [doi:10.1007/S11273-013-9334-2/FIGURES/8].
- [19] S. Brito-Espino et al., "Proposal of a Laboratory-Scale Anaerobic Biodigester for Introducing the Monitoring and Sensing Techniques, as a Potential Learning Tool in the Fields of Carbon Foot-Print Reduction and Climate Change Mitigation," *Water* 2021, Vol. 13, Page 2409 **13**(17), 2409, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (2021) [doi:10.3390/W13172409].
- [20] N. R. Moparathi, C. Mukesh, and P. Vidya Sagar, "Water Quality Monitoring System Using IOT," in 2018 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), pp. 1–5, IEEE (2018) [doi:10.1109/AEEICB.2018.8480963].
- [21] I. A. Daniyan et al., "Development and Optimization of a Smart System for the Production of Biogas using Poultry and Pig Dung," *Procedia Manufacturing* **35**, 1190–1195, Elsevier (2019) [doi:10.1016/J.PROMFG.2019.06.076].
- [22] I. A. Cruz et al., "A new approach using an open-source low cost system for monitoring and controlling biogas production from dairy wastewater," *Journal of Cleaner Production* **241**, 118284, Elsevier (2019) [doi:10.1016/j.jclepro.2019.118284].
- [23] S. Yang et al., "Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas," *Renewable Energy* **138**, 224–229, Pergamon (2019) [doi:10.1016/J.RENENE.2019.01.083].
- [24] X. Wu et al., "Study on an Online Detection Method for Ground Water Quality and Instrument Design," *Sensors* 2019, Vol. 19, Page 2153 **19**(9), 2153, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (2019) [doi:10.3390/S19092153].
- [25] J. Martin et al., "Diseño experimental de bajo coste para aprender parámetros energéticos de supercondensadores," pp. 11–18 (2016).