



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

**PROPUESTA PARA LA MEJORA DE LA OPERACIÓN DE
SISTEMAS DE DEPURACIÓN NATURAL (SDN) DE
EXPLOTACIONES GANADERAS MEDIANTE LA
MONITORIZACIÓN DE VARIABLES DE OPERACIÓN.**

Autor

Melania Lucía Rodríguez Pérez

Tutor

Dr. Alejandro Ramos Martín

Tutor

Dr. Carlos A. Mendieta Pino

2021-2022

MÁSTER UNIVERSITARIO EN TECNOLOGÍAS Y PROCESOS INDUSTRIALES AVANZADOS

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	1
1.1. Problemática de los residuos ganaderos.....	2
1.2. Situación en Gran Canaria.	5
1.3. Monitorización y control mediante sensores.....	10
2. Objeto del TFM.	12
3. Análisis de los fenómenos, parámetros y propiedades más importantes de operación y diseño de los SDN para efluentes de explotaciones ganaderas.	13
3.1. La digestión anaeróbica.....	13
3.1.1. Etapas de la digestión anaeróbica.....	14
3.1.2. Ventajas de la digestión anaeróbica.....	15
3.2. Parámetros ambientales y operacionales.	16
3.2.1. Temperatura	16
3.2.2. Valores de pH y alcalinidad.....	18
3.2.3. Relación C/N de la materia prima.	18
3.2.4. Relación Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).	19
3.2.5. Tipo de materia prima y composición química.....	20
3.2.6. Tiempo de retención hidráulico (TRH).	21
3.2.7. Velocidad de Carga Orgánica (VCO).	22
3.2.8. Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis.	22
3.2.9. Contenido de sólidos.	24
3.3. Principios de funcionamiento de las principales técnicas de seguimiento para controlar el proceso anaerobio y/o la calidad del agua.....	25
3.3.1. Cromatografía.	25
3.3.2. Titulación.....	27
3.3.3. Espectroscopía.	28
3.3.4. Otras técnicas de monitorización.....	32
3.4. Estudios relacionados con la monitorización y control de los parámetros utilizando sensores de bajo coste y plataformas de software libre.....	36
4. Sistemas naturales de depuración de aguas residuales (SDN).	43
4.1. Humedales.....	46
4.2. Lagunas de estabilización.	48
4.3. Digestor anaerobio.	52
4.3.1. Tipos de digestores.....	53
4.3.2. Principales digestores aplicados en explotaciones ganaderas	55
5. Potencial energético de fuentes de energía renovables aplicables a los SDN.	58
5.1. Potencial solar fotovoltaico.....	58

5.2. Potencial geotérmico de baja entalpía.....	61
6. Propuesta metodológica para la mejora de la operación de los SDN.....	65
6.1. Localización y descripción de la planta piloto	66
6.2. Microcontrolador Arm Cortex-M0.	70
6.2.1. Software.....	72
6.3. Sensores.....	74
6.3.1. Variables del entorno.	74
6.3.2. Variables propias del proceso.	87
6.4. Sistema de Comunicación.....	113
6.4.1. Blynk IoT Platform	119
6.4.2. ThingSpeak.	126
6.4.3. Conexión de red.	141
6.5. Alimentación del sistema.	152
6.5.1. Elección de la batería.....	152
6.5.2. Panel solar.....	155
6.5.3. Controlador de carga.....	157
6.5.4. Caja de protección.....	158
7. Conclusiones y líneas de investigación futuras.....	159
Anexo I. Referencias.....	161
Anexo II. Códigos utilizados.....	193
• <i>Código para EZO RTD Circuit</i>	<i>193</i>
• <i>Código para EZO-pH Circuit.....</i>	<i>196</i>
• <i>Código para módulo EZO-EC.</i>	<i>199</i>
• <i>Código para EZO-ORP.</i>	<i>204</i>
• <i>Código para EZO-D.O. Circuit</i>	<i>207</i>
• <i>Código para conectar el sensor DHT11 con Blynk.....</i>	<i>214</i>
• <i>Código para conectar sensores con ThingSpeak.</i>	<i>217</i>
• <i>Código para determinar intensidad de la señal Wifi. (Arduino IDE)</i>	<i>223</i>
• <i>Código en FreeFem++ para simulación de ubicación con mejor señal Wifi.</i>	<i>226</i>
• <i>Código en FreeFem++ para simulación de terreno.....</i>	<i>228</i>
• <i>Código correlación entre humedad y temperatura realizado Matlab</i>	<i>231</i>
• <i>Código realizado en Matlab para hacer histograma de frecuencia de temperatura</i>	<i>232</i>
• <i>Código realizado en Matlab para hacer gráfica comparativa con datos de temperatura durante tres días.....</i>	<i>233</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Incidencia de gases de efecto invernadero de la fermentación entérica y el almacenamiento de estiércol por tipo de animal. Fuente: Grossi, 2019	3
Figura 2. Contaminación debida a la composición de los residuos ganaderos	4
Figura 3. Almacenamiento de purín en balsa en tanque exterior. Fuente: MAPA, 2015	5
Figura 4. Espacios Naturales Protegidos de Gran Canaria. Fuente: Cabildo de Gran Canaria	9
Figura 5. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica. Fuente: Varnero, 2011.	15
Figura 6. Relación TRH -producción de biogás. Fuente: Hilbert, 2003.	17
Figura 7. Esquema cromatógrafo de gases. Fuente: cromatografia_de_gases.pdf (csic,es)	26
Figura 8. Esquema simplificado del funcionamiento hipotético de un humedal. Fuente: Oliver, 2017	46
Figura 9. Esquema de los diferentes tipos de humedales. Fuente: Passeport et al., 2013.	47
Figura 10. Principales tipos de lagunas de estabilización. Fuente: Verbyla, M, et al., 2017.	49
Figura 11. Ciclo proceso estabilización en laguna facultativa	51
Figura 12. Diagrama de flujo biodigestor de dos etapas. Fuente: IDAE, 2011.	54
Figura 13. Digestor tipo Chino. Fuente: Barrera, 2020.	55
Figura 14. Esquema general de un digestor tipo hindú. Fuente: Barrera, 2020	56
Figura 15. Esquema general de digestor tipo salchicha. Fuente: Tecnosol	57
Figura 16. Clasificación Zonas Climáticas según Radiación Solar Global media diaria anual. Fuente: CTE, 2019	58
Figura 17. Mapa solar por provincias. Fuente: ASIF	59
Figura 18. Áreas geotérmicas en Canarias. Fuente: https://www.geoplat.org/wp-content/uploads/2016/05/mapapotencial.jpg	62
Figura 19. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica para calefactar. Fuente: Climo et al. (2014)	63
Figura 20. Transferencias de calor que intervienen en el sistema. Mallado realizado con FreeFem++	64
Figura 21. Diagrama general de propuesta metodológica	66
Figura 22. Vista aérea explotación ganadera. Fuente: Visor GrafCan	66
Figura 23. Esquema general de la planta piloto. Fuente: Mendieta, 2015	67
Figura 24. Tamiz rotativo planta piloto. Fuente: Mendieta, 2015.	68
Figura 25. Digestor de mezcla completa en la planta piloto. Fuente: Mendieta, 2015	68
Figura 26. Humedales, laguna facultativa y arqueta final de la planta piloto. Mendieta, 2015. ...	69
Figura 27. Vista general del SDN en la planta. Fuente: Mendieta, 2015.	69
Figura 28. Microcontrolador SAMD21 Cortex®-M0+ MCU ARM (Arduino Nano 33 (IoT)). Fuente: Arduino	71
Figura 29. Diagrama de pines de la placa Arduino Nano 33 (IoT). Fuente: Arduino.	72

Figura 30. Diagrama de bloques sensor BME280.	76
Figura 31. Módulo sensor BME280. Fuente: https://www.adafruit.com/product/2652	77
Figura 32. Sensor GY-ML8511 Adafruit.	79
Figura 33. Diagrama de bloques sensor ML8511.	80
Figura 34. Tensión de salida características de intensidad UV	81
Figura 35. Sensor TSL2561 Adafruit.	82
Figura 36. Diagrama de bloques sensor TSL2561. Fuente: datasheet_TSL2561	83
Figura 37. Esquema de conexión sensores de medidas atmosféricas. Fuente: Creación propia con software Fritzing.....	85
Figura 38. Sensores y microcontrolador instalados en una caja estanca de protección IP65.	86
Figura 39. Conexión de los sensores BME280, TSL2561 y ML8511 a Arduino Nano 33 (IoT).	87
Figura 40. EZO RTD Temperature. Fuente: Atlas Scientific.	88
Figura 41. Conexión con sonda.	90
Figura 42. Sonda PT-1000 compatible con módulo EZO RTD Temperature.	90
Figura 43. Conector BNC hembra.....	90
Figura 44. EZO™ Conductivity Circuit. Fuente: Atlas Scientific	91
Figura 45. Sonda K-10.....	93
Figura 46. Aislador eléctrico Basic EZO™ Inline Voltage Isolator. Fuente: Atlas Scientific.	95
Figura 47. Diagrama de bloques Basic EZO. Fuente: Atlas Scientific.	96
Figura 48. Esquema de conexión aislador eléctrico.....	97
Figura 49. EZO-pH. Fuente: Atlas Scientific.	97
Figura 50. Calibración de pH de 1, 2 y 3 puntos.....	99
Figura 51. Consumer Grade pH probe.	101
Figura 52. Lab Grade pH probe.	101
Figura 53. Industrial pH probe.....	102
Figura 54. Módulo EZO-ORP de Atlas Scientific.	102
Figura 55. módulo EZO-DO. Fuente: atlas Scientific	105
Figura 56. Sensor EZO-CO2. Fuente: atlas Scientific.	108
Figura 57. Gráfica de la estabilización de las lecturas de CO2 en función de la temperatura interna.	110
Figura 58. Esquema de conexión sensores para medir variables del sistema	112
Figura 59. Modulo MCU NINA- W102.	113
Figura 60. Pantalla configuración microprocesador aplicación Blynk.	120
Figura 61. Pantalla de elementos disponibles en la aplicación Blynk.....	121
Figura 62. Sensor DHT11. Fuente: Omniblug.	122
Figura 63. Estructura de comunicación entre el sensor y el microcontrolador. Fuente: Omniblug	122
Figura 64. Esquema conexión DHT11 a Arduino Nano 33 (IoT).....	123
Figura 65. Conexión DHT11 con Arduino nano 33 (IoT).....	123
Figura 66. Configuración de canales para los datos de temperatura y humedad.	124
Figura 67. Visualización de los datos de temperatura y humedad en forma de grafica.	125
Figura 68. Visualización de los datos de temperatura y humedad en forma de display.	125
Figura 69. Esquema de funcionamiento Thingspeak. Fuente: www.thingspeak.com	126

Figura 70. Creación de nuevo canal en ThingsSpeak.	128
Figura 71. Canal creado para almacenar las lecturas recogidas por los sensores.	129
Figura 72. Feed de las lecturas tomadas.	130
Figura 73. Visualización de datos en formato display.	131
Figura 74. Código para calcular correlación entre humedad y temperatura.	132
Figura 75. Visualización de correlación entre humedad y temperatura.	132
Figura 76. Comparación de temperatura durante 3 días.	133
Figura 77. Histograma de la variación de temperatura.	133
Figura 78. Mensaje de alerta indicando que el sistema ha dejado de recibir datos mediante Twitter.	134
Figura 79. App móvil ThingView Full.	134
Figura 80. Pantalla inicial con los diferentes canales.	135
Figura 81. Visualización de los diferentes campos.	135
Figura 82. Comparativa de humedad entre dos días diferentes.	136
Figura 83. Código para enviar datos a ThingSpeak.	140
Figura 84. Ventana para introducir credenciales y conectar con ThingSpeak.	141
Figura 85. Router MiFi del fabricante TP-Link. Fuente: https://www.amazon.es/dp/B079GZLNQ2B?tag=xtk-seleccion-21&th=1	141
Figura 86. Primera parte del código para medir intensidad de señal. Fuente: https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-33-iot/WiFi_connection	144
Figura 87. Segunda parte del código para medir intensidad de señal. Fuente: https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-33-iot/WiFi_connection	145
Figura 88. Mallado recinto planta piloto.	149
Figura 89. Batería 12 V 14 Ah. Fuente: https://www.leroymerlin.es/fp/15276163/bateria-solar-solarx-8-xunzel-12v-de-larga-duracion-sellada-sin-mantenimiento#fichaTecnica	154
Figura 90. Radiación solar incidente sobre superficie horizontal en planta piloto.	155
Figura 91. Comparativa entre radiación incidente en superficie horizontal e inclinada.	156
Figura 92. Dispositivo para control de carga XUNZEL ISCC-AU 5 80W 12v.	157
Figura 93. Cajas de protección con tapa opaca, semitransparente y transparente: Fuente: Amazon.es.	158

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentraciones N y P totales. Fuente: U. Compostela, 2011	4
Tabla 2. Número de cabezas de ganado según especie por islas de Canarias y años. Fuente: ISTAC, 2020.....	6
Tabla 3. Número de cabezas de ganado porcino por municipio y años- Fuente: ISTAC.....	7
Tabla 4. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica. Fuente: Alcayaga et al., 1999.....	17
Tabla 5. Relación C/N de los residuos porcinos, Fuente: Varnero, 2011	19
Tabla 6. Residuos orgánicos de diversos orígenes. Fuente: Varnero, 2011.....	20
Tabla 7. Rango de concentración de nutrientes. Fuente: Mendieta, 2015.	20
Tabla 8. Valores medios de composición química del purín porcino, Fuente: Varnero, 2011,	21
Tabla 9. Concentraciones de nutrientes en purín porcino, Fuente: Varnero, 2011,	21
Tabla 10. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica. Fuente: Esguerra, 1989. ¡Error! Marcador no definido.	
Tabla 11. Tiempo de retención hidráulico según zona climática. Fuente: Varnero, 2011.	22
Tabla 12. Concentración de amoníaco y su efecto en el proceso de digestión anaeróbica. Fuente: Mc Carty, 1964.	23
Tabla 13. Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico. Fuente: Hilbert, 2003.....	24
Tabla 14. Resumen general de los métodos de medición para el seguimiento de la DA. Fuente: Wu et al. (2019).....	34
Tabla 15. Comparación de los diferentes métodos de seguimiento en términos de precisión, coste y fase de desarrollo. Fuente: Wu et al. (2019).....	36
Tabla 16. Características de los diferentes métodos de tratamiento en el terreno. Fuente: Moreno, 2003.....	44
Tabla 17. Características de los diferentes métodos acuáticos. Fuente: Moreno, 2003.	45
Tabla 18. Radiación Solar Global media diaria anual. Fuente: CTE, 2019.....	59
Tabla 19. Evolución del factor de capacidad medio anual de funcionamiento de las instalaciones. Fuente: Anuario Energético de Canarias, 2019.....	60
Tabla 20. Horas equivalentes de instalaciones fotovoltaicas. Anuario Energético de Canarias, 2019.....	61
Tabla 21. Especificaciones técnicas sensor BME280. Fuente: datasheet_bme280.	75
Tabla 22. Conexión sensor BME280 en protocolo I2C.	77
Tabla 23. Conexión sensor BME280 en protocolo SPI.	78
Tabla 24. Características técnicas del sensor GY-ML8511. Fuente: datasheet_ML8511.	79
Tabla 25. Configuración pines sensor ML8511.	80
Tabla 26. Conexión sensor ML8511 con microcontrolador.	81

Tabla 27. Especificaciones técnicas sensor TSL2561.	82
Tabla 28. Configuración pines sensor TSL2561.	83
Tabla 29. Caracterización de los valores de ganancia y tiempo de integración.	84
Tabla 30. Conexión sensor TSL2561 con Arduino Nano 33 (IoT).	84
Tabla 31. Especificaciones técnicas sensor EZO RTD Temperature de Atlas Scientific. Fuente: datasheet_RTDT.	88
Tabla 32. Consumos de corriente máximos y mínimos.	89
Tabla 33. Conexión sensor EZO RTD Temperature a microcontrolador en protocolo UART.	89
Tabla 34. Conexión sensor EZO RTD Temperature a microcontrolador en protocolo I2C.	89
Tabla 35. Especificaciones técnicas EZO-EC. Fuente: Datasheet_EZO_EC.....	92
Tabla 36. Consumos de corriente máximos y mínimos.	92
Tabla 37. Tipos de sondas y características para EZO-EC.....	93
Tabla 38. Soluciones recomendadas para calibrar sensor de conductividad según modelo de sonda.	94
Tabla 39. Conexión EZO-EC en protocolo UART.....	94
Tabla 40. Conexión EZO-EC en protocolo I2C.	94
Tabla 41. Especificaciones técnicas EZO Basic Inline Voltage Isolator. Fuente: Datasheet_EZO_Basic.....	96
Tabla 42. Consumo de corriente del aislador eléctrico según tipo de circuito.	96
Tabla 43. Especificaciones técnicas EZO-pH. Fuente: Datasheet_EZO_pH.....	98
Tabla 44. Consumos de corriente EZO-pH.	98
Tabla 45. Conexión EZO-pH con microcontrolador en protocolo UART.	100
Tabla 46. Conexión EZO-pH con microcontrolador en protocolo I2C.....	100
Tabla 47. Especificaciones técnicas EZO-ORP. Fuente: datasheet_ORP.....	103
Tabla 48. Consumos módulo EZO-ORP.	103
Tabla 49. Diferentes modelos de sondas para EZO-ORP y sus especificaciones técnicas. Fuente: Atlas Scientific	104
Tabla 50. Conexión módulo EZO-ORP con microcontrolador en protocolo UART.	104
Tabla 51. Conexión módulo EZO-ORP con microcontrolador en protocolo I2C.....	105
Tabla 52. Especificaciones técnicas módulo EZO-DO.Fuente: Atlas Scientific.....	106
Tabla 53. Consumos módulo EZO-ORP.	106
Tabla 54. Diferentes modelos de sondas para EZO-DO y sus especificaciones técnicas. Fuente: Atlas Scientific.	107
Tabla 55. Especificaciones técnicas sensor EZO-CO2. Fuente: datasheet_CO2	109
Tabla 56. Tabla consumos sensor EZO-CO2	109
Tabla 57. Conexión sensor EZO-CO2 en protocolo UART.	110
Tabla 58. Conexión sensor EZO-CO2 en protocolo I2C.	111
Tabla 59. Características de corto alcance módulo NINA-W102. Fuente: datasheet_NINA	114
Tabla 60. Interfaces disponibles para módulo NINA-W102. Fuente: datasheet_NINA.....	115
Tabla 61. Condiciones de trabajo módulo NINA-W102. Fuente: datasheet_NINA	115
Tabla 62. Características y tarifas de los principales softwares de IoT.....	118
Tabla 63. Características técnicas sensor DHT11. Fuente: datasheet_DHT11.....	122

Tabla 64. Especificaciones técnicas M7200 V3. Fuente: https://www.tp-link.com/es/home-networking/mifi/m7200/#specifications	142
Tabla 65. Visualización de la intensidad de la transmisión wifi (dBm) según ubicación.	150
Tabla 66. Consumos de grupo de sensores de variables propias del proceso.....	152
Tabla 67. Consumos grupo de sensores de variables del entorno y router SIM.	153
Tabla 68. Consumo diario de los dispositivos para medir las variables del proceso.	153
Tabla 69. Consumo diario para medir variables del entorno más router.....	153
Tabla 70. Especificaciones técnicas batería 12V. Fuente: datasheet_battery.....	154
Tabla 71. Valores de la radiación solar incidente en la localización de la planta piloto. Fuente: https://visor.grafcan.es/visorweb/	155
Tabla 72. Especificaciones técnicas controlador de carga. Fuente: Datasheet_controlador	157

1. Introducción

En la actualidad, la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, así como la ingente generación de residuos procedentes tanto de fuentes naturales como antropogénicas están provocando daños que pueden llegar a ser irreversibles para el planeta, alterando así el correcto funcionamiento de los ecosistemas. El efecto invernadero o la destrucción de la capa de ozono son algunas de las consecuencias de una intensa industrialización global fundamentada principalmente en el uso de fuentes fósiles (gas, carbón, petróleo), donde las principales actividades han sido la producción de energía, el sector industrial, el transporte, el tratamiento y eliminación de residuos y las actividades agrarias (ganadería, uso de fertilizantes, cultivos) [1].

Debido a esta problemática surge la necesidad de encontrar soluciones alternativas que permitan seguir con el desarrollo y calidad de vida actual sin seguir devastando los recursos del planeta. Para ello, se están estudiando y desarrollando formas de obtener energía a través de fuentes renovables como la eólica, hidráulica, solar, o biomasa entre otras. Aunque ésta última actualmente es una de las de menor peso en el mix energético [2, 3], cada vez gana más importancia al ser más los gobiernos que incorporan una política de economía circular para cumplir con los objetivos marcados por las directrices de la Comisión Europea para 2030 y 2050 [4, 5]. Es decir, crecer económicamente sin deteriorar el medio ambiente, ni agotar los recursos naturales mediante la reutilización y maximización de éstos y la minimización del desperdicio. Además de la biomasa se pueden obtener biocombustibles como el biogás o el biodiésel.

La digestión anaerobia se presenta como una tecnología versátil que puede servir para diversos propósitos en la industria y en la sociedad. Se puede utilizar para la obtención de biogás a partir del tratamiento de aguas residuales [6], para reducir el impacto ambiental de las actividades agrícolas y al mismo tiempo mejorar la utilización de los nutrientes aplicados para el cultivo de suelos [7–9]. También es un proceso eficaz para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y los residuos orgánicos industriales [10, 11].

El biogás derivado de recursos agrícolas combinado con, por ejemplo, energía eólica y solar, puede convertirse en componentes clave, importantes en el futuro esquema de producción de energía, en distritos rurales tanto en regiones desarrolladas como en desarrollo [12].

1.1. Problemática de los residuos ganaderos

Desde hace décadas se utilizan para fertilizar las tierras de cultivo los residuos generados por la explotación ganadera, lo que resultaba beneficioso para el suelo, puesto que existía un equilibrio entre la cantidad de excretas y el suelo disponible [13]. Se pueden distinguir dos tipos de residuos: el estiércol (forma sólida) y los purines (forma líquida). El estiércol, se forma a partir de la mezcla de los excrementos de los animales junto con los componentes que conformen la cama de los animales, por ejemplo, paja. Por otro lado, el purín es la mezcla de dichos excrementos junto con el agua utilizada para la limpieza de las explotaciones [14].

En los últimos años, se ha producido un aumento de la ganadería intensiva debido principalmente al aumento mundial de consumo de carne, en decremento de las pequeñas granjas, [15] en donde se sustituye el sistema tradicional de cama vegetal por sistemas sin camas donde el ganado se mantiene en el piso, parcial o totalmente enrejado. Este sistema genera grandes cantidades de purines, formando una mezcla heterogénea de excrementos sólidos y líquidos, restos de pienso no ingeridos y agua, resultando difícil de asimilar por los terrenos de cultivo disponibles [16–18]. Este crecimiento del número de cabezas de ganado por explotación hace que los purines hayan pasado de servir como fertilizante para los terrenos a convertirse en residuos que hay que gestionar correctamente, ya que no existe tanta superficie disponible [14], [19–21].

Especialmente, los purines de origen porcino son los que más problemas presentan a la hora de gestionar correctamente dicho residuo por sus propiedades junto con los purines avícolas, como se observa en la Figura 1 [19], [22]. En general, el purín de cerdo se caracteriza por un alto grado de hidratación, alta demanda química y bioquímica de oxígeno (DQO y DBO), un alto contenido de macronutrientes fertilizantes (nitrógeno, fósforo, potasio). Además, debido a la alimentación por pienso en su composición se pueden hallar restos de hierro, zinc y cobre, resultando elementos contaminantes para el suelo [13], [18], [23], [24]. Esto es debido a que los alimentos que reciben estos animales contienen cantidades excesivas de estos elementos en comparación con sus requerimientos nutricionales, con el fin de intensificar la producción [24].

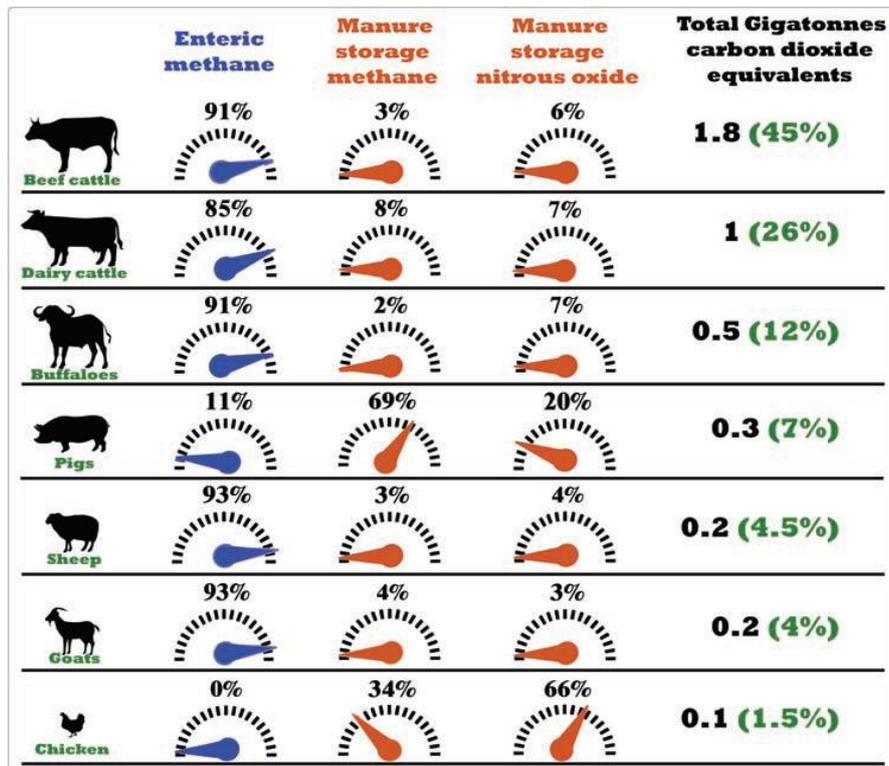


Figura 1. Incidencia de gases de efecto invernadero de la fermentación entérica y el almacenamiento de estiércol por tipo de animal. Fuente: Grossi, 2019

Según la a la Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre y el Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias, las tierras agrícolas no pueden contener más de 170 kg de nitrógeno por hectárea y año en las zonas vulnerables y los 210 kg en el resto [25, 26]. Si se producen vertidos que superen dicho valor se expone al suelo a un riesgo de contaminación por elementos biogénicos, metales pesados, productos farmacéuticos y microorganismos patógenos [21], [27–30]. Estos componentes pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas, la atmósfera debido a las emisiones de metano, además de riesgos a la salud de las personas y a la propia actividad ganadera [14], [30]. Por otro lado, los nutrientes, en especial el fósforo que se filtra en la tierra afectando a embalses y aguas subterráneas, contribuyen a la eutrofización de las aguas, provocando un desequilibrio ecológico de los sistemas acuáticos [14], [31], [32]. En la tabla, se muestran las concentraciones de fosforo y nitrógeno según el tipo de purín.

Tabla 1. Concentraciones N y P totales. Fuente: U. Compostela, 2011

Tipo	% N	% P	N/P
Purín vacuno	3,9-5,0	0,8-1,2	3,7-5,7
Purín porcino	2,7-4,5	1,6-2,2	1,5-2,4
Purín aves	4,2-18,2	0,7-3,0	2,1-9,8

El exceso de vertidos de purines en el suelo conlleva también al deterioro de las propiedades de la tierra, disminuyendo el rendimiento de los cultivos [31], contaminando las partes comestibles de las plantas con patógenos o provocando la acumulación de metales pesados en sus tejidos [23].

Este tipo de ganadería intensiva como ya se ha mencionado, aporta una importante cantidad de emisiones de efecto invernadero a la atmósfera, siendo las principales fuentes de contaminación: el metano (CH_4) producido por la acción de la fermentación entérica y el estiércol, (con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al dióxido de carbono [33]) y el óxido nitroso (N_2O), producto de la descomposición del amoníaco (NH_3) contenido en el estiércol [34], [35], (con un potencial de calentamiento global 265 veces superior al dióxido de carbono [33]). Las estimaciones de las emisiones de NH_3 procedentes de la agricultura indican que en Europa entre el 60% y el 90% proceden de la producción ganadera [36].

Según el informe GLEAM (Global Livestock Environmental Assessment Model) de FAO, el sector ganadero representa 7,1 GT $\text{CO}_2\text{-eq}$, es decir, al 14,5% de las emisiones antropogénicas globales de gases de efecto invernadero (GEI) [37]. De estas emisiones el metano (CH_4) representa cerca del 50 % del total. El óxido nitroso (N_2O) y el dióxido de carbono (CO_2) muestran un 24 y un 26 %, respectivamente [34].



Figura 2. Contaminación debida a la composición de los residuos ganaderos

Según el nuevo Sistema Integral de Gestión de Explotaciones de ganado porcino (SIGE), establecido en el Real Decreto 306/2020, de 11 de febrero, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas porcinas intensivas, y se modifica la normativa básica de ordenación de las explotaciones de ganado porcino extensivo [38], existen limitaciones espaciales y temporales en el uso del purín, por lo que se debe considerar también que los purines tienen que ser recolectados y almacenados de forma adecuada, en tanques con una capacidad suficiente para su almacenamiento hasta que sea posible su valorización agronómica o tratamiento adecuado. Además deben garantizar la estanqueidad evitando que se produzcan pérdidas por derrames o infiltraciones que contaminen el medio ambiente [35], [39], [40].



Figura 3. Almacenamiento de purín en balsa en tanque exterior. Fuente: MAPA, 2015

Por lo que, queda de manifiesto que realizar una adecuada gestión de los purines es crucial para proteger el medio ambiente. Siendo necesario conocer de la manera más precisa posible los factores más importantes del proceso de la gestión de los purines.

1.2. Situación en Gran Canaria.

La ganadería en Canarias está caracterizada por dos modelos contrapuestos, la ganadería intensiva y la tradicional. La ganadería tradicional es aquella referida a las explotaciones familiares que tienen un número limitado de animales y que en su mayoría se ubican en la zona de medianías. Por otro lado, la ganadería intensiva es aquella que tiene un gran número de cabezas de ganado, situada de manera generalizada en la costa y con un alto grado de tecnología [41].

Principalmente la ganadería en Canarias se basa en explotaciones de bovino, caprino, ovino, porcino, conejos y gallinas principalmente, según los datos extraídos del Instituto Canario de Estadísticas como se refleja en la siguiente tabla.

Tabla 2. Número de cabezas de ganado según especie por islas de Canarias y años. Fuente: ISTAC, 2020.

	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014
Bovino							
Canarias	19684	19408	19078	19417	19360	18215	16434
Lanzarote	215	156	259	275	277	206	155
Fuerteventura	208	257	369	368	244	292	194
Gran Canaria	12931	13208	12164	12005	12141	11124	9948
Tenerife	4000	3624	4297	4526	4578	4487	4078
La Gomera	41	52	42	45	43	73	51
La Palma	1335	1180	1137	1486	1419	1416	1395
El Hierro	954	931	810	712	658	617	613
Caprino							
Canarias	202887	206066	206973	207026	206166	210593	219115
Lanzarote	19595	19469	20096	17754	18075	17994	19463
Fuerteventura	72439	76581	74211	74370	76325	76429	78211
Gran Canaria	52217	51652	53385	53203	53114	55708	56456
Tenerife	31796	31305	32458	34178	32951	34083	37253
La Gomera	4092	4277	4995	5571	5294	5765	6296
La Palma	16171	17283	16825	17762	16816	17111	17666
El Hierro	6577	5499	5003	4188	3591	3503	3770
Ovino							
Canarias	40895	44405	47689	48806	48468	47960	49944
Lanzarote	3854	4616	4462	4858	4964	4783	4935
Fuerteventura	7789	8974	9532	9170	8727	8667	8825
Gran Canaria	17773	18585	20504	21172	20970	20124	21340
Tenerife	5519	5970	6728	6806	6721	6383	6695
La Gomera	661	850	1190	1188	1356	1554	1552
La Palma	1230	1223	1473	1594	1688	1561	1689
El Hierro	4069	4187	3800	4018	4042	4888	4908
Porcino							
Canarias	40986	42885	50496	47606	52732	49584	51652
Lanzarote	1460	1387	2220	2172	2753	3209	2716
Fuerteventura	7979	7489	8798	7914	11287	7233	8678
Gran Canaria	5781	7942	8995	9320	9313	9144	7692
Tenerife	21748	21919	25969	22982	25058	25527	27441
La Gomera	360	209	162	298	384	455	553
La Palma	3092	3354	3801	4434	3246	3350	3694
El Hierro	566	585	551	486	691	666	878
Conejos							
Canarias	23647	29938	30431	35614	36379	40779	41797
Lanzarote	243	344	364	323	368	372	1073
Fuerteventura	44	60	112	24	67	90	133
Gran Canaria	3294	3552	2947	2023	2152	1650	2982

Tenerife	10932	15540	14825	21570	23146	26633	26293
La Gomera	4233	4233	5308	5295	4379	5326	5321
La Palma	4193	5642	6131	5683	5717	6025	5297
El Hierro	708	567	744	696	550	683	698
Gallinas							
Canarias	3077980	2852695	3507058	2929102	3236061	3037536	2807441
Lanzarote	83869	67519	65358	62845	55089	58019	60800
Fuerteventura	17506	17411	22177	18733	19210	17056	20425
Gran Canaria	1189574	1235729	1541401	1162370	1458905	1289242	1233101
Tenerife	1742712	1488228	1831855	1633471	1660047	1629551	1454465
La Gomera	3795	5565	7954	7862	7846	7857	6009
La Palma	38592	37957	38005	43092	34691	34938	31895
El Hierro	1932	286	308	729	273	873	746

Centrando la atención en la ganadería porcina, se observa que ha tenido una evolución estable aunque, los datos muestran que en Canarias se ha producido en 2020 una disminución de la producción de un 4,4% con respecto a 2019. Siendo en la isla de Gran Canaria donde se produce la mayor reducción con un 27%.

En Gran Canaria la ganadería porcina está formada por animales híbridos de razas foráneas, además de la raza de autóctona de cochino negro, donde conviven grandes explotaciones con pequeñas ganaderías familiares. Las pequeñas explotaciones ganaderas suponen cerca del 90 %, sin embargo, el 10 % que representa a la explotaciones intensivas suponen casi el 75% del número total de animales de la isla [19], [42]. Estas granjas tienen un gran impacto de residuos, ya que representan alrededor de 1000 1500 animales en un ciclo cerrado en un año de producción. Esto equivale en términos de carga orgánica, a una población de entre 2000 y 3000 habitantes. Siendo los municipios de Agüimes y Telde donde se concentra el mayor número de animales, con más de 1500 cabezas de ganado porcino cada uno, como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 3. Número de cabezas de ganado porcino por municipio y años- Fuente: ISTAC.

	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014
Gran Canaria	5781	7942	8995	9320	9313	9144	7,692
Agate	0	5	0	15	13	5	0
Agüimes	2047	1819	2509	2624	1893	1278	479
Artenara	0	2	0	2	3	10	1
Arucas	110	139	111	203	179	190	162

Firgas	0	0	0	0	0	20	0
Gáldar	66	59	59	129	73	83	4
Ingenio	46	81	103	77	92	81	41
Mogán	223	0	63	82	60	48	0
Moya	8	3	4	2	13	7	15
Las Palmas De Gran Canaria	30	15	66	26	56	139	70
San Bartolomé De Tirajana	81	407	1147	1188	691	839	565
La Aldea De San Nicolás	23	19	56	24	91	96	11
Santa Brígida	119	1527	1476	1073	1196	1194	995
Santa Lucía De Tirajana	14	37	51	40	70	162	767
Santa María De Guía de G. C.	0	0	0	1	9	9	3
Tejeda	437	572	526	611	528	734	555
Telde	1601	2180	2343	2289	3214	3215	2767
Teror	847	844	144	639	518	499	521
Valsequillo De Gran Canaria	31	14	45	49	354	241	459
Valleseco	60	59	93	102	67	147	64
Vega De San Mateo	38	160	199	144	193	147	213

La problemática asociada a la gestión de los residuos orgánicos de origen ganadero se debe básicamente a la separación progresiva de las explotaciones ganaderas y agrícolas, de modo que la mayoría de las explotaciones no disponen de la base territorial suficiente para reutilizar sus propios residuos [19]. Puesto que en Gran Canaria gran parte de su territorio pertenece a espacios protegidos, aproximadamente un 42% se encuentra en alguna de las categorías de protección de la Red Canaria de Espacios Naturales Protegidos, Por lo que, se puede considerar que el territorio es vulnerable a la contaminación debido a una mala gestión de los purines. En la figura se puede observar el territorio insular considerado como suelo protegido [14], [43].

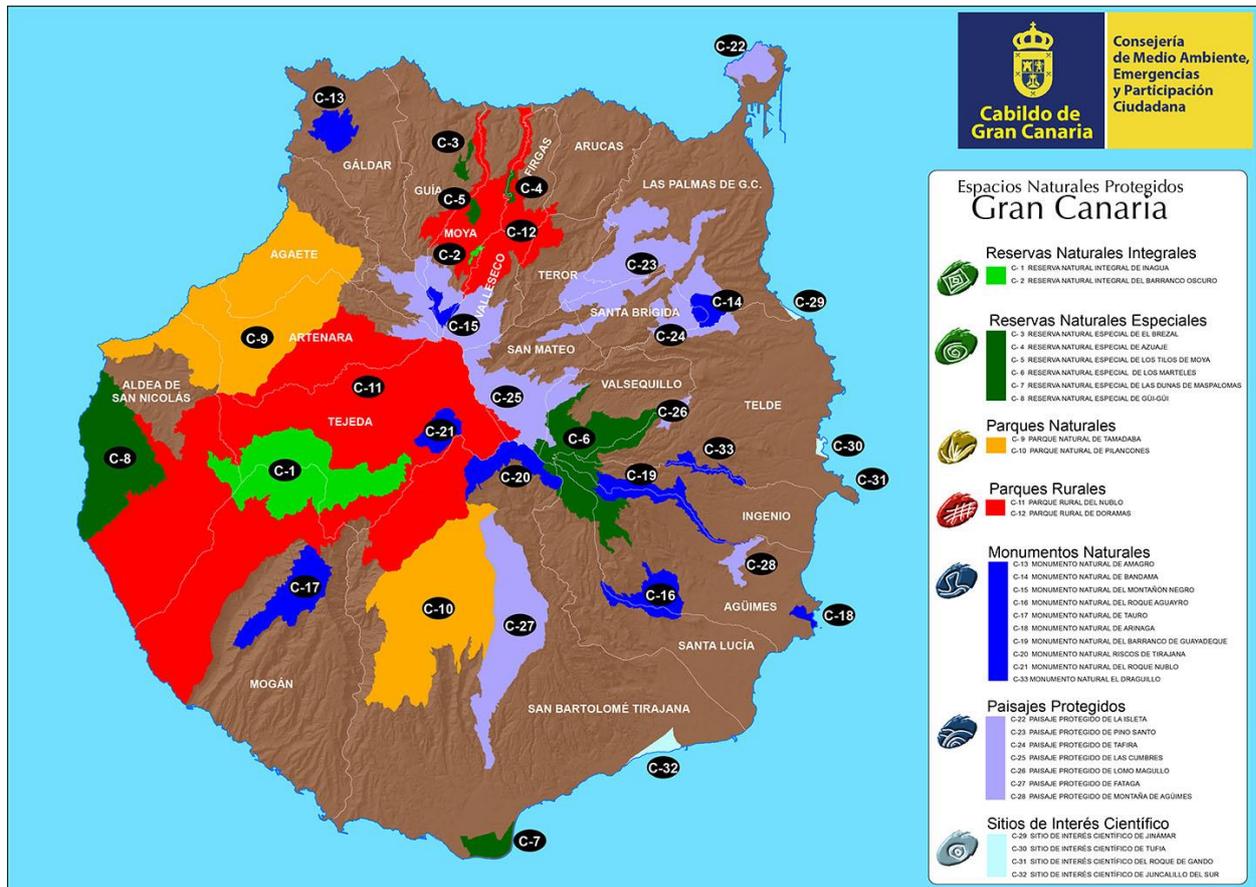


Figura 4. Espacios Naturales Protegidos de Gran Canaria. Fuente: Cabildo de Gran Canaria

Aunque las explotaciones porcinas de mayor tamaño tienen instalaciones más avanzadas que las pequeñas, tecnológicamente aún tienen que añadir mejoras, en cuanto al control y bienestar de los animales, infraestructuras y gestión de los residuos. En Gran Canaria, es habitual que las explotaciones porcinas no tengan proyectos previos del establecimiento, pudiéndose encontrar instalaciones con desequilibrados, ausencia de estudios medioambientales, ni informes de la gestión de las explotaciones ganaderas. El control informático de los animales, la producción, así como del proceso para la gestión de purines es muy escaso, teniendo sistemas de producción arcaicos [19]. La ganadería puede tener impacto en el medio ambiente, alterando el equilibrio del suelo y del agua, o afectando a la calidad del aire debido a la generación de GEIS y emisiones de polvo y olores indeseables, siendo vital la adecuada gestión de los estiércoles, resultando necesario controlar de la forma más precisa posible el proceso de gestión de los purines [44].

1.3. Monitorización y control mediante sensores.

El desarrollo en el monitoreo y control de procesos de la gestión de purines, visto desde un punto de vista tecnológico no está demasiado desarrollado. Los parámetros del proceso deberían estar disponibles en línea y no depender de la intuición o la intervención humana. Solo mediante la aplicación de la supervisión de procesos automatizada y la interpretación de datos se podría lograr un control efectivo del proceso. [45], [46]

Las plantas de tratamiento de aguas residuales mediante digestión anaerobia están asociadas con altos costes, esto se debe principalmente al diseño conservador de los reactores. La necesidad de obtener una capacidad de tratamiento mayor, con tiempos de retención más cortos o reactores más grandes, está originando que la monitorización de parámetros en línea sea cada vez un factor más relevante [47–49].

Esto sería posible gracias a la aplicación de la tecnología de sensores y el modelado de procesos adecuados a cada sistema. La monitorización y control permitiría que los biodigestores operaran más cerca de su límite de capacidad efectiva [50].

La sobrecarga orgánica involuntaria, la adición accidental de sustratos tóxicos y otras interrupciones del proceso ocurren con frecuencia. Estos problemas podrían evitarse con el uso adecuado de sensores consiguiendo un control más completo de todo el proceso anaeróbico [51].

Se ha estudiado [8] que los biodigestores basados en recursos agrícolas y ganaderos funcionan en condiciones inferiores a las óptimas debido principalmente a la falta de datos en línea adecuados. Este hecho provoca que no se obtenga todo el potencial de biogás posible. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la simplicidad técnica forzada de los digestores instalados en explotaciones agrícolas y ganaderas. Las soluciones de hardware sofisticadas deben evitarse y la robustez y la simplicidad deben ser necesariamente parte del diseño de monitorización [12].

De este modo se hace crucial desarrollar sistemas de monitoreo para tener un control sobre todo el proceso de la digestión anaerobia con el fin de aumentar el rendimiento del proceso. Teniendo en cuenta que deben ser sistemas de fácil manejo sin comprometer el potencial y la calidad de la información que muestren.

Un proceso de digestión anaerobia es un entorno químico severo, que fácilmente puede comprometer los sensores de medición. Los sensores electroquímicos pueden degradarse debido al envenenamiento de la membrana celular y están sujetos al crecimiento de biopelículas (incrustaciones). De manera similar, las interfaces ópticas para técnicas espectroscópicas requieren atención, ya que también pueden estar sujetas a ensuciamiento y erosión debido a partículas finas (arena) en el lodo que fluye por la ventana óptica [12].

Los procesos anaeróbicos están lejos de constituir sistemas homogéneos. Esto supone un problema a la hora de tomar muestras y medidas que resulten representativas para la calibración y validación de sensores. Dado que la mayoría de los parámetros de interés se disuelven en la fase líquida, la filtración se aplica a menudo para eliminar el material heterogéneo que interfiere, como las partículas de materia orgánica, paja, arena, etc.

A menudo, para los sistemas agrícolas, a través del suministro regular de estiércol fresco, se asegura que los microbios que se eliminan se reemplazan con biomasa fresca que asegura la diversidad y estabilidad microbianas. El alto contenido de sólidos de los reactores alimentados con estiércol (generalmente superior a 50 g/l) más la presencia de otras partículas, complica las mediciones espectroscópicas. Además, el agua produce una amplia absorbencia en todo el rango de interés y, por lo tanto, hace que los espectros sean difíciles de leer por lo que deben ser filtrados por un ordenador [51–53].

Hay que tener en cuenta también las ventajas que podría conllevar hacer un muestreo in situ. Los avances en el campo de la espectroscopia móvil han dado como resultado varios productos innovadores. Los analizadores infrarrojos, infrarrojos cercanos y Raman ahora están disponibles en configuraciones móviles e incluso portátiles que funcionan con baterías. Estas unidades brindan una gama completamente nueva de posibilidades para el monitoreo de procesos, reduciendo los errores o contaminación de la muestra que se puede producir por trasladarla hasta un estudio o laboratorio [54–56].

2. Objeto del TFM.

El objetivo de este proyecto es proponer una metodología para la mejora de la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales (SDN), asociadas a explotaciones ganaderas de pequeño y medio tamaño, en los sistemas insulares como los de Canarias.

La metodología estará apoyada en el diseño e implementación de un sistema instrumental de observación o estimación de las variables de operación de las plantas, así como de los recursos energéticos disponibles en la zona, contribuyendo de tal manera a la integración de energías renovables en los procesos de tratamiento del agua residual de las plantas.

Para ello se llevarán a cabo las diferentes fases:

- Análisis de los fenómenos, parámetros y propiedades más importantes de diseño de los SDN para efluentes de explotaciones ganaderas.
- Análisis de las fuentes de energía renovable adecuadas para los SDN, y de cómo integrarlas en el proceso.
- Propuesta metodológica para la mejora de la operación de los SDN, basada en la monitorización de las variables propias de los sistemas de tratamiento, y de las variables y parámetros externos relacionadas con el posible recurso energético renovable de la zona en la que esté emplazado.
 - o Diseño e implementación de sistema de adquisición de datos de operación.
 - o Diseño de sistema para la transmisión de la información mediante tecnologías inalámbricas.

3. Análisis de los fenómenos, parámetros y propiedades más importantes de operación y diseño de los SDN para efluentes de explotaciones ganaderas.

3.1. La digestión anaeróbica.

Una forma de aprovechar el recurso de la biomasa es a partir de la fermentación o digestión anaeróbica. La digestión anaeróbica es un proceso microbiológico que se realiza en ausencia de oxígeno en el que parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás [58]. Esta materia formada por sustancias sólidas orgánicas, inorgánicas y agua. Su componente inorgánico no sufre modificación alguna durante el proceso de fermentación [58, 59].

Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos en subproductos útiles. Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, en sistemas de alta carga orgánica y en mezcla completa, son el biogás y un bioabono que consiste en un efluente estabilizado [58].

En la DA más del 90% de la energía puede transformarse en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, en cambio un sistema aeróbico consume aproximadamente un 50%. Para llevar a cabo el proceso se debe tener un afluente líquido que contenga materia fermentable, y una composición y concentración relativamente estable. Se puede decir que se trata de un proceso complejo, debido al número de reacciones bioquímicas que tienen lugar y la cantidad de microorganismos involucrados en el proceso [58].

Los microorganismos que están presentes en el proceso se pueden clasificar principalmente en tres grandes grupos:

- **Bacterias acidogénicas o fermentativas:** producen ácidos en la reducción de la materia orgánica. Se desarrollan bien en ambientes anaerobios y continúan el crecimiento mientras tengan materia orgánica disponible. Mientras crecen continúan produciendo ácido en el digestor [61].
- **Bacterias acetogénicas:** producen H_2 y catalizan la oxidación de alcoholes y ácidos grasos obteniendo H_2 , CO_2 y ácidos grasos que finalmente las metanógenas ocupan para

producir metano. Es importante que estas bacterias se mantengan en medios completamente anaerobios, ya que la mínima cantidad de oxígeno las mataría.

- **Bacterias metanogénicas:** La característica que identifica a las metanógenas es su metabolismo productor de metano (CH_4). Las bacterias metanogénicas obtienen su energía mediante la producción metabólica de gas metano, utilizando sustratos como dióxido de carbono, acetato y sustratos de metilo a través de procesos de hidrólisis y acetogénesis y son esenciales en la degradación anaerobia de la materia orgánica [57, 61].

3.1.1. Etapas de la digestión anaeróbica

El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica se clasifica en cuatro fases o etapas según diferentes autores [19], [57], [58], [62], [63]:

- **Hidrólisis:**

La hidrólisis es la primera etapa en la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Durante este proceso se proporcionan sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga).

- **Acidogénesis:**

Tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en acético, fórmico, H_2 y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente). En este proceso se produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente y además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema.

- **Acetogénesis:**

Los compuestos generados en la fase anterior son transformados en compuestos más sencillos, como acetato (CH_3COO^-) e hidrógeno (H_2). En esta etapa la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa, eliminando sus propios productos de desecho de sus células. Estos compuestos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

- **Metanogénica:**

Se caracteriza por la producción de sales de ácidos orgánicos y volúmenes de gas, en una mezcla donde hay un alto porcentaje de metano, y el resto corresponde a dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir del acetato.

En la figura se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

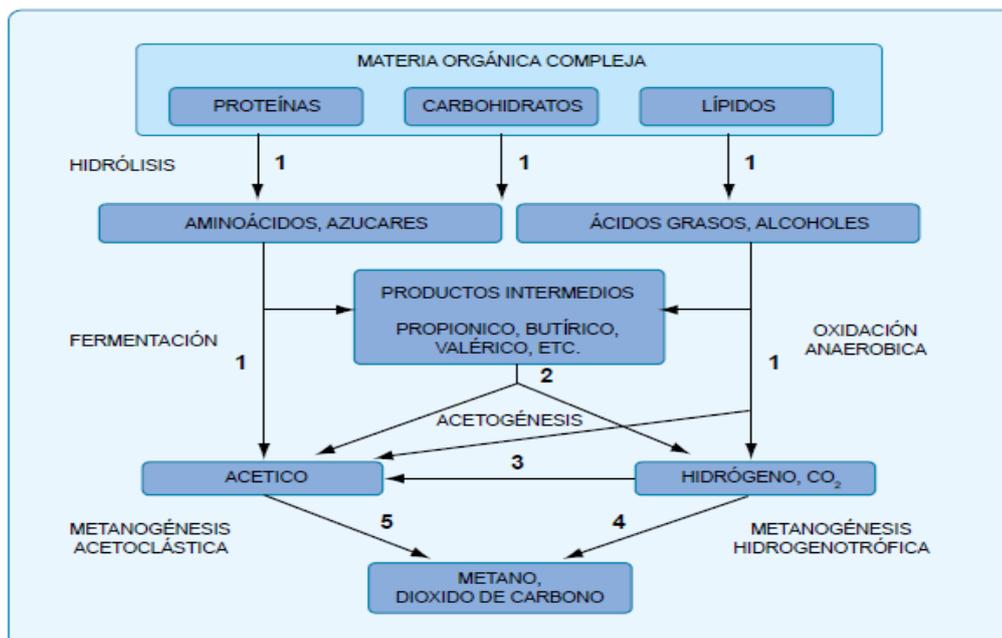


Figura 5. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica. Fuente: Varnero, 2011.

3.1.2. Ventajas de la digestión anaeróbica.

El proceso de la digestión anaeróbica presenta muchas ventajas para el tratamiento de aguas residuales. A continuación, se describen las más importantes:

- El consumo de energía es muy bajo con el tratamiento anaerobio. El proceso no tiene que ser provisto oxígeno y no es necesario un mezclado intenso [65].
- Elevados porcentajes de eliminación de materia volátil (40-60%) [66].
- Se produce una disminución importante de la relación de alcalinidad [67].
- Son sistemas que asimilan altas y bajas cargas orgánicas [65].

- Existe la posibilidad de trabajar a tiempos de retención hidráulicos muy bajos, es decir, necesitan menores volúmenes de instalación, abaratando las inversiones [65].
- El diseño y la construcción de un reactor anaerobio es simple, lo que reduce los costes.
- El proceso produce una reducción del 90% al 99% de los principales patógenos animales (estafilococos, salmonella, pseudomonas), importante desde el punto de vista sanitario [63].
- Baja generación total de sólidos biológicos. El producto final es inerte y rico en ciertos nutrientes y puede emplearse en agricultura como fertilizante [68].
- Eliminación de ácidos grasos volátiles (AGV) y otros compuestos fácilmente biodegradables [67].
- Obtención de biogás susceptible de aprovechamiento energético y económico formado principalmente por metano.
- Bajo consumo energético: la alta producción de biogás con elevado valor energético reduce significativamente los costes del tratamiento [66].
- Reducción de la emisión de gases (metano principalmente) responsables del efecto invernadero [69].

Hay que tener en cuenta varios factores para que el proceso anaeróbico se lleve a cabo con éxito. Estos parámetros ambientales pueden ser físicos, químicos y biológicos. Entre los factores más importantes a tenerse en cuenta se desarrollarán los siguientes: el tipo de sustrato (nutrientes disponibles); la temperatura del sustrato; la carga volumétrica; el tiempo de retención hidráulico; el nivel de acidez (pH); la relación Carbono/Nitrógeno; la concentración del sustrato; el agregado de inoculantes; el grado de mezclado; y la presencia de compuestos [57], [62], [63]

3.2. Parámetros ambientales y operacionales.

Parámetros como la temperatura, el pH, las concentraciones de ácidos grasos volátiles, la composición, el tipo de sustrato, o el rendimiento del biogás se utilizan generalmente como indicadores de los procesos para la obtención de biogás, como la digestión anaerobia [69, 70]. A continuación, se describen los parámetros principales.

3.2.1. Temperatura

La temperatura de operación de un biodigestor es considerada uno de los principales parámetros para tener en cuenta en el diseño de éste. Los procesos anaeróbicos son muy dependientes de

la temperatura debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. A medida que aumenta la velocidad de crecimiento de microorganismos se acelera el proceso de digestión produciendo más biogás [11, 58]. Las variaciones violentas de temperatura en el digestor pueden perjudicar el proceso.

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos, clasificándose de la siguiente manera: [72]

Tabla 4. Rangos de Temperatura y Tiempo de fermentación Anaeróbica. Fuente: Alcayaga et al., 1999

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrofílica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Termofílica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado, a pesar de que en la actualidad se está implementando cada vez más el rango termofílico, para conseguir una mayor velocidad del proceso [19], [57], [58], [62].

La temperatura está relacionada con el tiempo que debe permanecer la biomasa dentro del digestor para completar su degradación (Tiempo de Retención Hidráulico, TRH). A mayor temperatura menores tiempos de retención necesitando así un menor volumen de reactor para tratar una misma cantidad de biomasa [63].

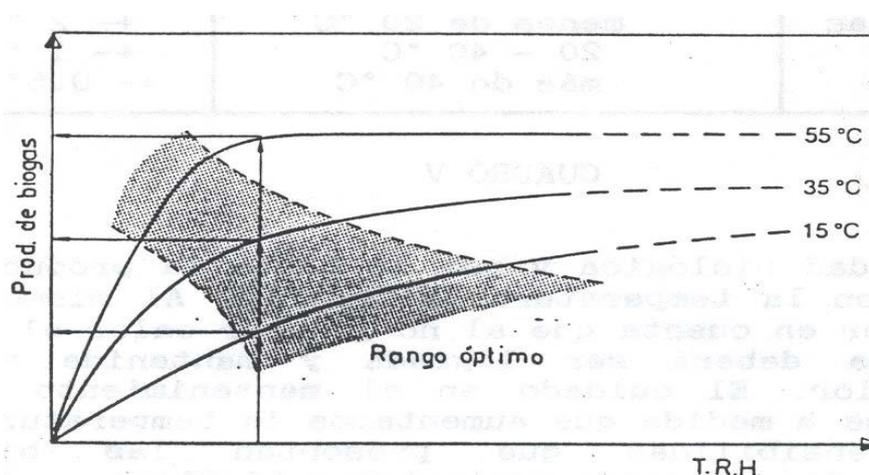


Figura 6. Relación TRH -producción de biogás. Fuente: Hilbert, 2003.

3.2.2. Valores de pH y alcalinidad.

El pH es un factor que además de determinar la producción de biogás determina también su composición. El proceso anaeróbico debe mantenerse en unos valores de pH de entre 6,0 y 8,0, siendo el pH neutro lo ideal para el desarrollo del proceso. Si el pH fuera menor de 6,0 se produciría un biogás muy pobre en metano, lo que lo haría deficiente energéticamente [11].

Los diferentes equilibrios químicos que se desarrollan en el reactor pueden verse afectados por las variaciones del pH. Si los valores de PH son demasiado bajos, por debajo de 6,0 se reducirá la actividad de las bacterias metanogénicas, produciéndose una acumulación de ácido acético y H₂, y consiguiente una acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV). Esto perjudica la formación de metano. Por el contrario, si los valores del pH son elevados se favorecerá la formación de amoníaco, siendo este en concentraciones muy altas un inhibidor del crecimiento microbiano [57], [66].

El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema. En muchos casos, para mantener un valor de pH adecuado es necesario suplementar la alcalinidad utilizando químicos como el bicarbonato de sodio[19], [57], [66].

Aunque el pH es una variable importante en todos los procesos biológicos, su valor es especialmente crítico en la digestión anaeróbica y la nitrificación, donde se liberan cantidades importantes de protones, pudiendo llevar a la acidificación y al fracaso del proceso. Por tanto, su medición y control son importantes [50].

3.2.3. Relación C/N de la materia prima.

Las bacterias metanogénicas se abastecen mayoritariamente de carbono y nitrógeno. El carbono es utilizado como fuente de energía y el nitrógeno para la creación de nuevas células. De esta forma se establece una relación entre ambos componentes (C/N) influyente sobre la producción de biogás [72].

Las bacterias consumen 30 veces más de carbono que nitrógeno, por lo suele considerarse una relación óptima de estos elementos un rango de 30:1 hasta 20:1. Sin embargo, el valor ideal es de 16:1 [59], [71].

Así que no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener una buena relación C/N.

A continuación, se pueden observar valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno del purín procedente del ganado porcino [11].

Tabla 5. Relación C/N de los residuos porcinos, Fuente: Varnero, 2011

Residuo	% C	% N	C/N
Porcino	25	1,50	16:1

3.2.4. Relación Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de un líquido, se define como la cantidad de oxígeno que los microorganismos, en especial bacterias, hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en la muestra. Se expresa en mg O₂/ l. [73]

La DBO se relaciona con la cantidad de energía oxidable en el sustrato, siendo este usado microbiológicamente por las células para sus requerimientos de energía y su posterior síntesis [66].

Por otro lado, la demanda química de oxígeno, DQO, se refiere a la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar completamente por medios químicos los compuestos orgánicos a CO₂ y H₂O [74].

La diferencia más notable es que la DBO representa la cantidad de materia orgánica biodegradable, mientras que la DQO representa ambas, tanto la materia biodegradable como la no biodegradable.

La relación DBO/DQO es utilizada para estimar la biodegradabilidad de las aguas residuales. La determinación de la DBO y la DQO permite establecer la relación existente de contaminantes [65], [74].

3.2.5. Tipo de materia prima y composición química.

La materia prima utilizada puede ser de origen vegetal (restos de cosechas), animal, agroindustrial, forestal, domestico, aguas residuales orgánicas, excrementos animales y humanos, efluentes de determinadas industrias químicas. Se muestra una colección de diferentes tipos de residuos de diversos orígenes [58].

Tabla 6. Residuos orgánicos de diversos orígenes. Fuente: Varnero, 2011.

Residuos de origen animal	estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados.
Residuos de origen vegetal	malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

La composición bioquímica de estos residuos debe permitir el desarrollo y la actividad microbiana del sistema. Además de carbono y nitrógeno el proceso microbiológico también necesita que estén presentes una mezcla de sales minerales. En la tabla se muestran los valores mínimos necesarios de los principales nutrientes y sales para que el proceso se efectúe correctamente [19, 57, 66].

Tabla 7. Rango de concentración de nutrientes. Fuente: Mendieta, 2015.

NUTRIENTE	g/kg SSV	g/kg DQO
Nitrógeno	80 – 120	55 – 85
Fósforo	10 – 25	7 – 18
Azufre	10 – 25	7 – 18
Hierro	5 – 15	4 – 11

Los componentes orgánicos de estos residuos representan aproximadamente el 50 % del peso fresco, dependiendo del contenido de agua y de las cenizas.

Los principales grupos que se distinguen son:

- Carbohidratos. Representan el 50% del total de la materia orgánica seca.
- Nitrogenados. Representan el 20%.
- Lignina. Su porcentaje puede estar entre un 10 y un 40%

- Minerales (Calcio, potasio, fósforo, azufre...). Representan entre el 1 y 10 % del peso seco

La composición química típica del purín porcino así como la concentración de nutrientes que se encuentra, se expresan en las tablas 8 y 9: [76] [77].

Tabla 8. Valores medios de composición química del purín porcino. Fuente: Varnero, 2011.

Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
11,50	10,95	32,39	21,49	23,67

Tabla 9. Concentraciones de nutrientes en purín porcino. Fuente: Varnero, 2011.

	C (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MgO (%)
Excretas	17,4-46	1,1-2,5	0,4-4,6	0,30	0,09	0,10
Excretas+ paja	20-22	0,3-0,5	0,24	0,63	0,20	-

3.2.6. Tiempo de retención hidráulico (TRH).

El tiempo de retención hidráulico en un digestor de régimen discontinuo es el tiempo que sucede entre la carga del sistema y su descarga [58]. El TRH se define como el resultado entre el volumen del digestor y el volumen de carga diaria, expresado en días. Por lo que definirá el volumen de carga diaria necesaria para alimentar al digestor existiendo la siguiente relación:

$$\frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{\text{Volumen carga diaria (m}^3\text{/días)}} = \text{Tiempo de retención (día)} \quad (1)$$

Por lo general, se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días. Además, la temperatura y el tipo de sustrato utilizado afectan directamente al TRH. En la tabla siguiente, se muestra los tiempos de retención típicos según la zona climática.

Tabla 10. Tiempo de retención hidráulico según zona climática. Fuente: Varnero, 2011.

TRH	Características
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej., Indonesia. América Central
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej., India, Filipinas. Etiopía,
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej., China, Corea. Turquía

El tiempo de retención usual en el rango mesofílico para lodos de depuradora está entre 15 y 20 días, aunque este valor depende mucho del tipo de reactor utilizado. Los tiempos de retención serán mayores en la materia prima con mayor proporción de carbono retenido. [11, 57, 62, 76].

3.2.7. Velocidad de Carga Orgánica (VCO).

La velocidad de carga orgánica es la cantidad de materia orgánica dispuesta cada día en el reactor por unidad de volumen. Tiene una relación directa con la concentración del sustrato y es inversamente proporcional al TRH, ya que a medida que se incrementa la carga disminuye el tiempo de retención [58].

El tiempo de retención, junto con la velocidad de carga orgánica son los principales parámetros para definir el volumen del digestor.

3.2.8. Tóxicos e inhibidores de la metanogénesis.

La mayor parte de los compuestos tóxicos presentes en el proceso forman parte de la materia prima que entra al digestor o pueden generarse durante la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Si sus concentraciones son demasiado elevadas pueden inhibir el crecimiento bacteriano. Los principales compuestos que pueden actuar como inhibidores en el proceso anaeróbico son los siguientes: [58]

- **Ácidos grasos volátiles (AGV)**

Son los productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio. Es uno de los parámetros que mejor puede indicar la evolución del proceso. Como se ha comentado en el apartado anterior una alta concentración de AGV en el sistema puede perjudicar el proceso prociendo una menor

cantidad de biogás. En la fermentación mesofílica se considera una concentración adecuada un valor por debajo 2000 ppm y de 3600 ppm para la termofílica [58, 76].

- **Hidrógeno.**

Éste es también un compuesto intermedio del proceso anaeróbico. Si se produce una elevada concentración puede provocar la inhibición de la acetogénesis y aumentar la concentración de AGV [11].

- **Nitrógeno amoniacal.**

El nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, sin embargo, una concentración excesiva puede perjudicar el proceso. Los niveles dentro del sistema deben mantenerse por debajo de los 2000 mg/l. En la tabla 13 se muestra cómo puede afectar la concentración de amoniaco al proceso de fermentación [59], [77].

Tabla 11. Concentración de amoniaco y su efecto en el proceso de digestión anaeróbica. Fuente: Mc Carty, 1964.

Amoniaco (mg/l)	Efectos
50 – 100	Beneficiosos
200 – 1000	Sin efectos adversos
1500 – 3000	Efectos inhibidores a niveles de pH altos
3000 o superior	Tóxico

- **Sulfatos y sulfuros.**

Una concentración elevada de sulfato puede producir la inhibición del proceso, especialmente de la metanogénesis. El sulfuro es también un inhibidor para muchos grupos bacterianos, comenzando a ser tóxica una concentración de 50 mg/l [11], [76].

- **Otros inhibidores.**

Existen otras sustancias contaminantes (metales pesados, antibióticos, detergentes) que pueden alterar incluso inhibir el proceso. En la tabla se presentan valores de concentraciones de algunos inhibidores comunes [57], [62].

Tabla 12. Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico. Fuente: Hilbert, 2003.

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5 000 ppm
NaCl	40 000 ppm
NO ₃	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN ⁻	25 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l
Mg	1000-1500 mg/l

3.2.9. Contenido de sólidos.

El porcentaje de sólidos totales (ST) es un factor importante que se debe tener en cuenta. Si aumenta demasiado la cantidad de sólidos totales la movilidad de los microorganismos metanogénicos puede verse limitada afectando al rendimiento del reactor y reduciendo la producción de biogás.

Para calcular el volumen de agua que se debe mezclar con la materia prima, es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales que se encuentra en dicha materia prima. Para el purín porcino se tiene un rango de entre 15 – 49 %. [11]

La expresión matemática para calcular el porcentaje de sólidos totales es la siguiente: [11]

$$\% S,T (carga diluida) = \frac{1 \text{ kg materia prima} * \% S,T \text{ materia prima fresca}}{1 \text{ kg materia prima fresca} + \text{agua agregada}} \quad (2)$$

3.3. Principios de funcionamiento de las principales técnicas de seguimiento para controlar el proceso anaerobio y/o la calidad del agua.

Existen diversos métodos para monitorizar las fases de la digestión anaerobia tanto líquidas como gaseosas. Algunas de ellas pueden ser la cromatografía de gases, la titulación del pH, la cromatografía líquida de alto rendimiento, o la espectroscopia de infrarrojo medio y cercano. Sin embargo, el análisis de laboratorio o el monitoreo fuera de línea de los parámetros de control a menudo se asocia con posibles errores debido a técnicas inadecuadas de muestreo y análisis, así como sesgo humano [78], [79].

3.3.1. Cromatografía.

La cromatografía es una técnica analítica utilizada para separar los componentes químicos de una mezcla de muestra y luego detectarlos para determinar su presencia o ausencia y/o en qué proporción está presente [81]. En los últimos años, han sido desarrollados métodos cromatográficos para monitorizar diversos parámetros críticos en el proceso de DA y la calidad del agua.

La técnica cromatográfica se puede utilizar para identificar y cuantificar compuestos de interés tanto en fase líquida como gaseosa. El monitoreo por cromatografía de gases se aplica comúnmente para analizar la composición de biogás por detector de conductividad (GC-TCD) y AGV individuales por detector de ionización de llama (GC-FID). Especialmente, la cromatografía de gases se emplea para detección de los AGV, ya que es un factor inhibidor clave del proceso de la DA [78], [81].

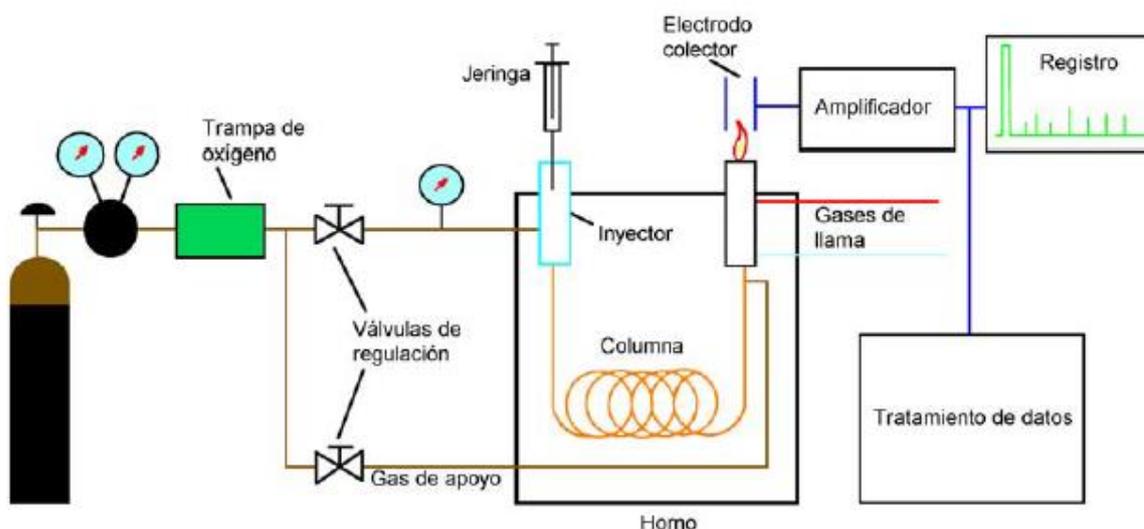


Figura 7. Esquema cromatógrafo de gases. Fuente: cromatografia_de_gases.pdf (csic.es)

En [83] utilizaron la cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) y la cromatografía líquida-espectrometría de masas de ionización química de presión atmosférica (LC-APCI-MS) para la determinación a nivel de trazas de 42 plaguicidas prioritarios y 33 contaminantes orgánicos prioritarios de la Directiva de la Unión Europea EC 76/464.

[84] han desarrollado una nueva técnica de GC que permite monitorizar los AGV en línea en purines o estiércol animal. Esta técnica de filtración in situ ha permitido realizar la microfiltración dentro de un sistema de reactor realizando un análisis automático a una frecuencia de 15 minutos. Este filtro permite el muestreo de sistemas de reactores cerrados sin bombeo y filtros a gran escala.

[85] aplicaron un método cromatográfico de espacio de cabeza (Headspace, HSGC) para medir los AGV en digestores anaeróbicos utilizando extracción en fase gaseosa a pH inferior a 2 y temperatura superior a 65 °C. Este sistema tenía la ventaja, en comparación con un sistema de líquido automatizado, de que no contiene ningún elemento de filtro, por lo que no es susceptible de ensuciamiento en muestras de estiércol o muestras con alto contenido sólido.

[86] diseñaron un método basándose en la cromatografía de gases capilar para el monitoreo y la investigación de procesos. Se realizó utilizando un módulo de muestreo automático seguido de una unidad de filtración. Las inyecciones en el cromatógrafo de gases se realizaron

automáticamente. Los autores pudieron demostrar que el sistema respondía y verificaba secuencias de sobrecarga orgánica del reactor.

También [87] propusieron la construcción, la optimización, la operación y la evaluación de un cromatógrafo de gas de muestreo de membrana capilar (CMS-GC) para la monitorización en línea de las concentraciones de trihalometano (THM) en sistemas de distribución de agua potable. Se obtuvo que dicho método ofrece ventajas para el monitoreo en línea y cumple con varios de los criterios deseables para el monitoreo en línea de las concentraciones de THM en los sistemas de distribución de agua potable.

[88] llevaron a cabo un nuevo método para la medición en línea de AGV en digestores anaerobios basado en cromatografía de gases de espacio de cabeza (HSGC). El método aplica la extracción ex situ de los AGV con volumen de espacio de cabeza variable y análisis de gases por ionización de llama. El sistema es capaz de medir componentes individuales de AGV, otra ventaja importante de este sensor es que no hay filtración, lo que hace posible su aplicación en entornos con altos niveles de sólidos.

[89] evaluaron el uso de sistemas cromatográficos de exclusión iónica para analizar el comportamiento de los componentes como, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, fosfato, silicato disuelto, sodio, amonio, potasio, magnesio e iones de calcio, en un río suburbano ubicado en Yakarta, Indonesia. El estudio proporcionó información beneficiosa para la construcción de instalaciones de tratamiento de aguas residuales en el área de estudio.

3.3.2. Titulación.

La titulación o titrimetría, es una técnica de laboratorio común de análisis químico cuantitativo utilizado para determinar la concentración desconocida de una sustancia. Siendo los métodos de Ripley (1986) y Nordmann (1977) los dos métodos de titulación más comunes y simples utilizados [90]–[92]

En cuanto a simplicidad, rapidez y eficacia en función de los costes, se puede afirmar que los métodos de titulación son superiores a los efectos de la vigilancia y el control rutinarios in situ, en comparación con otros métodos [93].

[94] presentaron una alternativa económica para la cuantificación de ácidos grasos volátiles de cadena corta basada en la titulación. Diseñaron una célula de medición que garantizaba un

funcionamiento estable a largo plazo, altos rendimientos y podía hacer frente a concentraciones de AGV muy bajas y muy altas. El método resultó efectivo para controlar el TRH en un reactor de fase ácida y para cuantificar las tasas de acidificación de los compuestos de aguas residuales en experimentos por lotes.

[95] proponen evaluar mediante la titulación de trifosfato de adenosina (ATP) por bioluminiscencia el seguimiento rápido de la calidad microbiológica del agua potable durante su distribución en la red de París.

[96] desarrollaron un procedimiento de validación aplicado en un prototipo en línea mediante la tritificación, diseñado para detectar de los AGV y de la alcalinidad (bicarbonato). El analizador ha sido desarrollado en el marco del Proyecto Europeo TELEMAC. El sensor utiliza dos métodos, ambos basados en análisis titrimétricos de dos puntos. También se midieron las relaciones alcalinidad intermedia/alcalinidad total y alcalinidad intermedia/alcalinidad parcial con el objetivo de comprobar la efectividad del sensor para el control del proceso de digestión anaeróbica.

[97] mejoraron los métodos Ripley y Nordmann siendo las ecuaciones que proponen en el estudio al menos un 85 % más precisas para la determinación de AGV totales, utilizando cultivos energéticos, purines y desperdicio de alimentos, de esta forma su aplicación es adecuada para el análisis in situ.

[98] validaron un método de titulación simplificado utilizando un experimento en un digestor de trabajo semicontinuo para tratar estiércol de pollo con varias tasas de carga orgánica. El buen ajuste de los resultados obtenidos por este método en comparación con los resultados de GC apoyó en gran medida la aplicación potencial de este método para la monitorización de AGV.

[99] Se puede decir, de las investigaciones realizadas que, los principales inconvenientes para lograr la supervisión de los procesos mediante titulación son la mejora de la precisión de las mediciones y la simplificación de la preparación de la muestra.

3.3.3. Espectroscopía.

Las técnicas de espectroscopía son métodos que usan energía radiada para analizar propiedades o características de los materiales, utilizando diferentes longitudes de ondas [100]. Es decir, los dispositivos espectroscópicos utilizan la luz en longitud de onda específica para cuantificar la

concentración de sustancias químicas en una muestra dada mediante la detección de las proporciones de luz que se absorbió, transmitió y dispersó. Es una técnica no invasiva, a diferencia de lo que ocurre con la cromatografía de gases, por lo que no se destruye la muestra. De esta forma, es posible aplicar una monitorización online con bucle de recirculación, además puede medir una gran cantidad de parámetros, ajustando la longitud de onda [78, 100].

Según el rango de la longitud de onda que se utilice se puede hablar de espectroscopía por fluorescencia, espectroscopía UV-VIS, infrarrojo medio (IR), infrarrojo cercano (NIR) o Raiman [12].

[102] demostraron el uso de la espectroscopia infrarroja para la determinación de la demanda química de la DQO, el carbono orgánico total (TOC), los AGV y la alcalinidad parcial y total en procesos anaerobios de la digestión para el tratamiento de aguas residuales industriales. Se hace una comparación de los resultados con un análisis manual fuera de línea y con un analizador de TOC industrial y un sensor titrimétrico en línea demostrando el interés del análisis espectral en el dominio infrarrojo medio para el monitoreo de procesos de digestión anaeróbica.

[103] examinaron el uso de la fluorimetría multilongitud de onda para la supervisión en línea del proceso anaerobio. Los experimentos se llevaron a cabo en un digestor anaeróbico a escala de laboratorio alimentado con aguas residuales sintéticas o agrícolas. Mediante la aplicación de métodos multivariantes se demostró que la espectroscopia de fluorescencia podía predecir los ácidos grasos volátiles, así como la demanda química de oxígeno con una precisión razonable.

[104] describen un uso a gran escala de la técnica de espectroscopía infrarroja media para probar su capacidad de supervisar continuamente y sin la intervención humana las variables de AGV, DQO, alcalinidad, sulfato, nitrógeno total, amoníaco y nitrato simultáneamente en dos corrientes de proceso. Para los AGV, DQO, sulfato, amonio y nitrógeno total se obtuvo una buena concordancia entre las mediciones en línea y manuales, Durante un período de seis meses las medidas en línea tuvieron que ser interrumpidas varias veces debido a la obstrucción ya que, la unidad de pretratamiento de la muestra no era capaz de hacer frente a altas concentraciones de sólidos todo el tiempo.

[105] simulan el monitoreo del proceso de codigestión anaeróbica en línea utilizando un nuevo sistema de sensor de infrarrojo cercano transflexivo (TENIRS). Se han obtenido buenas

validaciones de predicción de estudios de viabilidad para sólidos totales, sólidos volátiles, amonio, ácido acético y ácidos grasos volátiles totales.

[101] han llevado a cabo un estudio de NIR como herramienta para el monitoreo de procesos de digestión anaeróbica, con el objetivo de desarrollar modalidades de tecnología analítica de procesos simples y robustas para el control en línea en plantas de biogás a gran escala. La validación del conjunto de pruebas dio como resultado excelentes medidas de rendimiento y precisión para el glicerol, ácido acético, el ácido iso-butanóico y el AGV totales, demostrando que el NIR es una herramienta válida para cuantificar los parámetros claves de la digestión anaerobia.

[106] investigaron la posibilidad de utilizar espectroscopía NIR para rastrear parámetros relevantes del proceso como los AGV, ácido acético y ácido propiónico. Se integró un sensor NIR en una planta de biogás de 1 MW a gran escala y los espectros NIR del contenido del fermentador se registraron de forma semicontinua durante 500 días.

[107] evaluaron la viabilidad del monitoreo en línea espectroscópico de infrarrojo cercano para medir la calidad del sustrato con el fin de encontrar formas de un control más exacto de la alimentación de las plantas de biogás. Se diseñó, construyó y calibró un sistema de sensores NIRS para la monitorización continua de materia seca, sólidos volátiles, proteína bruta, fibra bruta y extractos libres de nitrógeno de ensilado de maíz. Se concluye que se deben desarrollar modelos globales para diversos sustratos para mejorar y permitir la implementación de esta técnica.

[108] utilizaron un analizador de procesos en línea de espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) para el monitoreo in situ de la digestión anaeróbica de cultivos energéticos y residuos de ganado. Los resultados confirmaron que la concentración total de ácidos grasos volátiles se puede visualizar mediante espectroscopía de infrarrojo cercano, confirmando el potencial para un monitoreo in situ robusto de la digestión anaeróbica mediante esta técnica.

[109] desarrollaron mediante la espectroscopía infrarroja un sistema de monitorización en línea para evaluar la concentración de los AGV en una configuración de digestión anaerobia a escala de laboratorio. Se utilizó la cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC) como análisis de referencia de las muestras. El análisis instantáneo y continuo de la concentración de los AGV hizo posible evaluar el estado actual en cada momento del proceso y ajustar la velocidad de carga orgánica en consecuencia.

[110] realizan una revisión de la literatura sobre el análisis de la calidad del agua utilizando la espectroscopia de plasma inducido por láser (LIBS). Se puede concluir que esta técnica es muy valiosa para el monitoreo de la calidad del agua. Sin embargo, debido a la inestabilidad intrínseca del líquido y las interacciones complicadas con la luz, la mayoría de los estudios todavía están limitados en la etapa de laboratorio. Además, la mayoría de los estudios existentes investigaron especies metálicas en el agua, pero no hay estudios sobre productos químicos como el nitrógeno y el fósforo, siendo estos posiblemente los contaminantes más importantes en el agua.

[111] investigaron la evolución de las propiedades espectrales durante la DA de 29 tipos de residuos sólidos biodegradables para determinar si las características espectrales podían utilizarse para evaluar la estabilización biológica durante el proceso anaerobio. Esta investigación observó que algunos indicadores espectrales distintos pueden tener una variación constante durante la digestión anaeróbica de diferentes residuos sólidos, lo que será útil para juzgar el curso de digestión. Aunque es necesario seguir investigando para establecer una relación cuantitativa entre esos indicadores de espectroscopia y los componentes bioquímicos de los desechos mezclados.

[112] presentan brevemente los fundamentos de la espectroscopía de Raman y discuten las técnicas de Raman más avanzadas y potenciales para la monitorización de la calidad del agua en línea.

[113] presentan varias técnicas de espectroscopia de Raman empleadas para la detección de la calidad del agua en función de los tipos de contaminantes: orgánicos, inorgánicos y contaminantes biológicos. Se concluye que se requieren más trabajos basados en la espectroscopia de Raman para encontrar qué tipo de técnica es el método más adecuado para la detección de varios contaminantes en un entorno acuático.

[114] utilizan la espectroscopia de infrarrojo cercano como una herramienta robusta que consume menos tiempo para predecir el contenido de residuos sólidos en carbohidratos, lípidos y nitrógeno, y la demanda química de oxígeno. Los resultados mostraron que la espectroscopia de infrarrojo cercano es una nueva forma rápida y rentable de caracterizar el contenido de desechos sólidos y mejorar su monitoreo de la digestión anaeróbica.

[115] proponen utilizar la espectroscopía por fluorescencia para medir de manera sensible, económica y en línea la calidad del agua potable suministrada a través de la red, controlando las concentraciones de la materia orgánica disuelta en el grifo de los consumidores en relación con el agua que sale de la planta. Los resultados arrojaron que la fluorescencia es un indicador sensible de los cambios en la calidad del agua en las redes de agua potable.

[116] desarrollaron un sensor de gas basado en la espectroscopía de Raman para el monitoreo de biogás en línea. Los resultados obtenidos muestran la idoneidad de la espectroscopia Raman como sensor de gas para monitorear todo el proceso de producción de biogás. Esta estrategia permitiría manipular y optimizar el proceso según el estado en cada momento, siendo de gran interés biotecnológico. Es posible que la espectroscopía de Raman sea uno de los métodos clave para el monitoreo de bioprocesos en un futuro cercano, ya que muchos de los obstáculos encontrados (por ejemplo, la interferencia de fluoróforos) se pueden superar mediante la aplicación adecuada de longitudes de onda de excitación láser y procesamiento de datos [12, 116, 117].

[119] midieron DQO, sólidos totales/sólidos volátiles, pH, conductividad, absorbancia UV-vis e intensidad de fluorescencia en un reactor continuo durante 28 días y se realizaron regresiones lineales entre los parámetros sustitutos para identificar relaciones potenciales. Los análisis de regresión arrojaron fuertes correlaciones entre la DQO y la conductividad, la intensidad de fluorescencia y la absorbancia UV-vis.

3.3.4. Otras técnicas de monitorización.

Otras técnicas que se pueden emplear para la monitorización de los parámetros claves del proceso de la DA son los sensores electroquímicos o los biosensores [12], [78], [98].

Los sensores electroquímicos se basan en el principio de voltametría y conductividad eléctrica. Un electrodo se utiliza para medir la corriente, el voltaje y la resistencia de una muestra dada. Estos valores obtenidos se utilizan para establecer una relación, de esta manera, la concentración de la muestra se puede determinar de dicha relación [99].

Las narices y lengüetas electrónicas son ampliamente utilizadas para el control en línea de las fases gaseosa y líquida del proceso anaerobio debido a su bajo coste, pequeño tamaño y consistencia [119], [120].

[122] proponen una matriz de electrodos (lenguas electrónicas) capaz de estimar las condiciones de fermentación durante la digestión anaeróbica. El modo de medición de flujo permite el control de procesos en línea, mientras que la arquitectura modular de la matriz es ventajosa para la construcción, calibración y selección de sensores convenientes.

[123] demuestran que una nariz electrónica compuesta por seis sensores de gas semiconductores de óxido metálico comerciales es una herramienta potencial que debe adaptarse para la monitorización continua en línea de los reactores anaeróbicos. Mostrando buenos resultados en la medición de CH₄, H₂S, H₂, alcoholes, alcanos, alquenos y cetonas.

Los estudios recientes han mostrado que las narices electrónicas y las lengüetas electrónicas son medios adecuados para supervisar disturbios y la inestabilidad durante la DA.

En los últimos años, los investigadores han prestado más interés a los biosensores con el fin de monitorear la DA. De esta manera, los dos biosensores bioelectroquímicos más utilizados son: las pilas de combustible microbianas (MFC) y las células de electrólisis microbiana (MEC). Este tipo de sensores han sido ampliamente aceptados como métodos alternativos con un buen potencial en el campo de monitoreo de la DA [123], [124].

[126] evaluaron la correlación entre la concentración de VFA y las respuestas de corriente/voltaje y las propiedades electroquímicas mediante el uso de la tecnología MFC. Los resultados presentados mostraron buenas correlaciones entre la concentración y la carga de las especies individuales de AGV, y también la corriente generada.

[127] desarrollaron un innovador biosensor para AGV basado en el principio de una célula de desalinización microbiana (MDC). El biosensor mostró un potencial prometedor para la medición en línea, económica y fiable de los niveles de AGV durante la DA.

[128] integraron una celda de electrólisis (EC) con un reactor de nitrificación completo como un enfoque alternativo para el monitoreo en línea del amoníaco durante la DA. La precisión del biosensor se verificó con probándolo en un digester a escala real. El biosensor mostró un gran potencial para el monitoreo de amoníaco en línea de los procesos de anaeróbicos.

Los biosensores descritos anteriormente pueden lograr una determinación altamente precisa de AGV y NH₄⁺-N durante la DA.

Sin embargo, todos estos métodos sufren de algunas desventajas con respecto a la preparación de la muestra. Se ha demostrado que la espectrometría del infrarrojo medio y del infrarrojo cercano es una alternativa real, pero requieren un sistema avanzado de muestreo automatizado, transferencia de muestras y filtrado para permitir un muestreo suficiente. También, es necesario la ultrafiltración de las muestras del reactor para producir un líquido transparente libre de partículas para la espectroscopia GC, NIR e IR [129]. Aunque, el principal problema que impide la aplicación de estos métodos es el alto coste [130].

Los sensores electroquímicos presentan problemas como la contaminación y la adsorción superficial de la materia orgánica del biorreactor, lo que puede llevar al fracaso de la monitorización del proceso [99].

En resumen, se puede decir que estos métodos suelen ser costosos, consumen mucho tiempo y comúnmente se prueban manualmente [69], [71–73]. Además, por lo general requieren equipos complejos y/o un mantenimiento meticuloso [74].

Se hace un resumen de las diferentes técnicas descritas anteriormente, con sus ventajas y desventajas.

Tabla 13. Resumen general de los métodos de medición para el seguimiento de la DA. Fuente: Wu et al. (2019).

Métodos	Sustrato	Fase gaseosa	Fase líquida	Ventajas	Desventajas
Técnicas cromatográficas	No	Sí	Sí	Alta precisión y exactitud Medición de la concentración individual de AGV	Consume mucho tiempo Requiere equipos especializados y operadores calificados
Titulación	No	No	Sí	Fácil para el monitoreo en línea Simple y rentable	Proceso complejo de pretratamiento Requiere una gran cantidad de solución química

Técnicas espectroscópicas	Sí	Sí	Sí	Adecuado para el monitoreo en línea Sensible y de alta precisión Supervisión de varios parámetros simultáneamente	Proceso complejo de modelado y calibración Equipos especializados y mantenimiento regular Necesita análisis multivariante
Sensores electroquímicos	No	Sí	Sí	Supervisión de múltiples parámetros disponible Rápido y conveniente	Fácilmente afectado por la condición ambiental
Biosensores	No	No	Sí	No hay necesidad de energía y solución química Portabilidad Alta estabilidad contra la perturbación Baja inversión	Estructura compleja Rango de detección limitado

Según los estudios analizados, se ha creado la Tabla 15 que proporciona una comparación de los diferentes métodos de monitoreo en línea disponibles, de modo que se pueda lograr una mejor comprensión desde la perspectiva de la viabilidad técnica y financiera.

Tabla 14. Comparación de los diferentes métodos de seguimiento en términos de precisión, coste y fase de desarrollo. Fuente: Wu et al. (2019).

Métodos	Precisión	Coste	Etapa de desarrollo
Técnicas cromatográficas	Alta precisión, exactitud y sensibilidad	Extremadamente caro	Comúnmente utilizado en experimentos de laboratorio
Titulación	- Alta precisión en alcalinidad - Estimación aceptable de AGV	Barato	Probado a nivel industrial
Técnicas espectroscópicas	Buena precisión	Extremadamente caro	Probado a nivel industrial pero necesita un mayor desarrollo
Sensores electroquímicos	Buena precisión y alta selectividad	Relativamente barato	Probado a escala piloto y necesita un mayor desarrollo
Biosensores	Estimación aceptable	Relativamente barato	Uso limitado en experimentos de laboratorio y aún en desarrollo

Los estudios revelan que la monitorización de los procesos es la mejor opción para lograr una mejor estabilidad del sistema y una mayor eficiencia de conversión en la digestión. Sin embargo, después de años de exploración de varios parámetros claves del proceso, ningún indicador es universalmente válido para todos los sistemas [99].

3.4. Estudios relacionados con la monitorización y control de los parámetros utilizando sensores de bajo coste y plataformas de software libre.

En los últimos años se ha incrementado el número de estudios relacionados con la monitorización y seguimiento en línea de los principales parámetros operacionales que afectan al proceso anaerobio. En ellos se busca mejorar el rendimiento de este complejo proceso a la vez que se intenta reducir los costes. Para ello, se está empleando cada vez más sensores de bajo coste controlados por plataformas de software libre.

[131] utilizaron espectroscopia UV-visible y NIR para monitorizar un reactor de lodos activados utilizando sondas de inmersión in situ conectadas a los respectivos analizadores por fibras

ópticas. Se desarrollaron modelos de calibración basados en la regresión parcial de mínimos cuadrados (PLS) para tres parámetros clave del proceso (la DQO, la concentración de nitratos y los sólidos en suspensión totales). Los resultados obtenidos demuestran que ambas técnicas son adecuadas para su consideración como métodos alternativos para el seguimiento y control de los procesos de tratamiento de aguas residuales, presentando claras ventajas en comparación con los métodos de referencia para la calificación del proceso de tratamiento de aguas residuales.

[132] desarrollaron un sistema inalámbrico de monitoreo de la calidad del agua económico mediante sensores y Arduino Mega 2560, para ayudar en las mediciones continuas de las condiciones del agua. Se midieron la temperatura, la densidad de luz, el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales, la salinidad, el oxígeno disuelto y el potencial de reducción de oxidación. Estos parámetros proporcionan información sobre el estado actual de las condiciones cambiantes del agua y ayudan a identificar las fuentes de contaminación.

[70] evaluaron cuatro procedimientos de titulación (para la determinación de los niveles de AGV de muestras de estiércol digeridas), donde se obtuvo que un procedimiento extendido de titulación de 5 puntos con corrección de pH fue el mejor para manejar las interferencias de bicarbonato, fosfato y lactato a bajas concentraciones de AGV. Por el contrario, el procedimiento de titulación más simple con solo dos puntos finales de pH mostró la mayor precisión entre todos los procedimientos de titulación a altas concentraciones de AGV.

[133] afirman que el monitoreo de la fase líquida hace posible indicar el estado del digestor mediante parámetros simples como el pH, por lo que desarrollaron un sistema que combinaba el monitoreo del pH del biogás mediante y los umbrales de control. Se obtuvo que con la variación del pH en la estrategia de control de automatización del biogás-pH podría proporcionar condiciones más beneficiosas en la etapa de metanogénesis, y en última instancia condujo a un funcionamiento más estable y un mejor rendimiento del reactor de membranas anaeróbicas, como una mayor tasa de carga orgánica, una mayor tasa de eliminación de DQO y una mayor producción de metano.

Aunque en este estudio se utilizaron controladores lógicos programables (PLC), se podría monitorizar el proceso utilizando electrónica de bajo coste y la plataforma de software libre Arduino.

[134] crean un sistema para controlar la temperatura y el pH de los principales procesos de digestión anaeróbica que ocurren en la segunda etapa del digestor. Para ello, utilizan sensores de bajo coste y un microcontrolador (Arduino Mega 2560), que procesa todas las señales recibidas de los sensores para controlar de forma óptima la digestión anaeróbica. Los resultados muestran que el modelo propuesto mejora significativamente el tiempo de procesamiento en comparación con los modelos convencionales.

[71] desarrollaron un biosensor innovador basado en una celda de electrólisis microbiana (CEM) para monitorear las concentraciones de AGV durante el proceso de DA. El objetivo del estudio era proporcionar pruebas de concepto de que el sensor bio-electrolítico puede ser una alternativa a los métodos analíticos tradicionales complejos y lentos para la detección en tiempo real de las concentraciones de AGV en el proceso anaeróbico con costes más económicos.

[135] desarrollan un sistema electrónico utilizando la plataforma Arduino conectada a un sensor de gas, para medir y mostrar la curva de producción diaria de metano en el procesamiento del sustrato. Se ha podido lograr el objetivo de garantizar el correcto funcionamiento del sistema de seguimiento y control de la producción de biogás.

[136] diseñan un sistema de monitorización de la calidad del agua mediante internet de las cosas midiendo el contenido del pH. Implementan este proyecto en los depósitos de agua municipales y en los depósito de agua potable, utilizando una placa Arduino Uno para controlar el valor de pH y el módulo GSM para la comunicación de datos.

[137] buscaron proporcionar asistencia técnica a la planta de biogás mediante la interfaz de algunos sensores como la temperatura, la humedad y el caudal conectados a un microcontrolador para que el sistema pudiera ser monitoreado de forma fácil y sistemática. El sistema se controla utilizando el microcontrolador NODE MCU (ESP8266) que se interconecta utilizando sensores como DHT11 (sensor de temperatura y humedad), sensor de caudal y módulo de comunicación GSM 900. De esta forma se demuestra que se aumenta la eficiencia y la calidad del biogás.

[138] desarrollaron un sistema económico para medir la calidad del agua, utilizando sensores para monitorizar el pH, la turbidez y la temperatura, así como un microcontrolador Arduino Uno y un módulo de comunicación GSM (Global System for Mobile). Se utiliza un panel fotovoltaico

para arrancar el sistema y la autonomía se proporciona a través de una batería de plomo-ácido. Esto permite la aplicación del sistema en áreas remotas donde la red no está disponible. El sistema también puede tener otras aplicaciones en los sistemas agrícolas, sistemas de acuicultura, sistemas domésticos y en pequeñas configuraciones industriales.

[139] desarrollaron una investigación para diseñar e implementar un sistema IoT (Internet de las Cosas) para optimizar los digestores de biogás proporcionando información precisa en tiempo real utilizando tecnologías de sensores en Ruanda (África). El sistema estuvo compuesto de dos sensores de temperatura (un sensor de temperatura ambiental que se colocó fuera del digestor de biogás para absorber los datos de temperatura actuales y un sensor de temperatura impermeable que se coloca dentro del digestor de biogás en la parte superior) conectados con el módulo Arduino Esp8266. El microcontrolador recopila los datos de los sensores y los envía mediante Wifi al centro de datos. Este sistema está destinado a integrar varios números de digestores de biogás en una sola plataforma, ayudando así a rediseñar la estructura de estos y mejorar su eficiencia mecánica y económica.

[140] desarrollan un sistema automatizado capaz de monitorizar en línea algunos indicadores del proceso de la DA en la fase líquida (pH, temperatura) y en la fase gaseosa (presión, rendimiento de metano, volumen de biogás) utilizando la plataforma Arduino y algunos componentes electrónicos de bajo coste, donde concluyeron que la construcción del aparato era factible para la obra propuesta, destacando su viabilidad económica.

[141] llevan a cabo un sistema de conversión de residuos en energía utilizando la digestión anaeróbica de mezcla de estiércol de aves de corral y cerdo para producir biogás para cocinar, generación de energía eléctrica y fertilizantes orgánicos para usos domésticos y agrícolas. La planta está diseñada con SolidWorks y se incorpora una unidad de monitorización al sistema compuesto por un microcontrolador Arduino Uno que está conectado a un sensor de presión, un sensor de pH y un sensor de temperatura para medir los parámetros del proceso. Los resultados obtenidos validan la relación directa entre la tasa de carga orgánica y la producción de biogás. También muestra la interacción entre temperatura y presión, temperatura y pH, pH y presión. El trabajo ha sido capaz de sentar las bases para estudios sobre la producción de biogás utilizando sensores y monitoreo continuo de parámetros.

[142] ha desarrollado un sistema de monitorización en tiempo real para la producción de fertilizantes orgánicos. El sistema proporciona una interfaz gráfica de usuario utilizando el programa Visual Basic para mostrar y supervisar el proceso de fermentación. La comunicación entre el software y el hardware se realiza mediante el microcontrolador Arduino Uno (ATmega328). El microcontrolador controlará los parámetros de humedad, temperatura, pH, el aireador, el calentador, el ventilador de escape y la velocidad del motor. En este sistema se emplea el sensor de temperatura y humedad (DHT-22), el sensor de gas metano (MQ4), el sensor de gas de carbono (MQ7) y el sensor de gas nitrógeno (MiCS-2714). Se demuestra que el sistema de monitoreo en tiempo real funciona bien y puede medir el objeto deseado.

[143] construyeron un dispositivo portátil y de bajo coste para medir el contenido de metano de las muestras de biogás. El componente central del dispositivo era un sensor de metano MQ-4. Este sensor, junto con los sensores de humedad, temperatura y presión, estaba interconectado con un microcontrolador Arduino Uno. Las mediciones realizadas por el sensor se compararon con el análisis realizado por un cromatógrafo de gases, mostrando un error absoluto promedio de tan solo $0,69 \pm 0,55\%$. Este dispositivo fue ensamblado por un precio de 37\$.

[144] basándose en la espectrofotometría ultravioleta proponen un método de medición remota en línea que se utiliza para medir los parámetros de calidad de las aguas subterráneas: demanda química de oxígeno (DQO), carbono orgánico total (TOC), nitrógeno nítrico (NO₃-N) y turbidez, Para ello, se utilizó un sistema de control mínimo basado en un microordenador STM32, un módulo de comunicación de puerto serie RS232 y un módulo de transmisión GPRS.

[145] proponen un sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en sensores. Los principales componentes incluyen un microcontrolador (Arduino mega) para procesar el sistema, un módulo de comunicación mediante Wi-Fi y varios sensores (pH, turbidez y temperatura) para monitorizar la calidad de agua en Bangladesh.

[146] diseñan un espectrofotómetro portátil económico para una ejecución de medición rápida y confiable. Los datos adquiridos se pueden mostrar a través de una aplicación de teléfono inteligente o una interfaz de ordenador, lo que permite a los usuarios recopilar y ver datos en línea. Los componentes principales del sistema son en el espectrómetro Hamamatsu C12880MA, un LED blanco, un microcontrolador Arduino Nano para el control y la lectura de datos, y un módulo Bluetooth para la transferencia de datos a la aplicación móvil. Se ha utilizado para medir

la composición química de diferentes de elementos. Los resultados indicaron un mejor rendimiento que los espectrofotómetros de bajo coste, siendo en promedio comparables a los espectrofotómetros más caros. [146 y 147] desarrollaron un espectrofotómetro basado en el mismo principio, controlado por un microcontrolador Arduino Uno, reduciendo significativamente sus costes y demostrando la calidad de las mediciones tomadas con dichos instrumentos. También [149] desarrollaron un espectrofotómetro UV de bajo coste para la detección de contaminantes como el mercurio, utilizando un microcontrolador ATmega 138p con una interfaz Arduino para implementar los algoritmos de control requeridos por la operación del espectrofotómetro. [55] proponen un sensor versátil y de bajo coste para la monitorización en tiempo real basado en múltiples longitudes (UV y NIR) de onda para la estimación de la concentración de biomasa microalgal en sistemas de cultivo abiertos y cerrados. El sistema propuesto es más barato de lo habitual para la cuantificación de biomasa de microalgas y compatible con el concepto de Internet de las cosas. El equipo fue capaz de proporcionar la adquisición de datos en tiempo real permitiendo la detección de anomalías que puedan ocurrir durante el cultivo reduciendo así, el riesgo de accidentes o pérdidas en los cultivos.

De esta forma queda de manifiesto el potencial que puede tener este tipo de herramientas de bajo coste para medir y monitorizar la variación de la composición de la materia prima utilizada como sustrato en el proceso de la DA, así como la concentración de sustancias inhibidoras que se pueden formar durante el proceso, mejorando así el rendimiento y la calidad del biogás.

[150] midieron el contenido de metano del biogás de un digestor en línea modificando un dispositivo de medición fuera de línea, previamente construido por los autores, utilizando un sensor de hidrocarburos (MQ-4) y un sensor de presión/ temperatura / humedad (BME-280) integrado con un Arduino Uno. Este sensor en línea modificado se programó para medir automáticamente la composición del metano mediante la introducción autorregulada de muestras de biogás y la evacuación del dispositivo.

[144 y 150], proponen un sistema que consta de varios sensores para medir diversos parámetros como el valor de pH, la turbidez en el agua, el nivel de agua en el tanque, la temperatura y la humedad de la atmósfera circundante, utilizando un microcontrolador Arduino Mega (ATmega2560). Los datos obtenidos se envían a la nube mediante el uso de la aplicación basada en IoT para monitorear la calidad del agua.

[152] presentan el desarrollo de un dispositivo de medición de la calidad del agua sencillo y de bajo costo para el monitoreo en tiempo real utilizando la tecnología de Internet de las Cosas (IoT). Fue desarrollado utilizando la plataforma de código abierto Arduino UNO y la placa NodeMCU como microcontrolador y conexión Wi-Fi, respectivamente. Se midieron los parámetros físicos (temperatura y turbidez) del agua y los datos obtenidos se pueden seguir a través del teléfono móvil utilizando la aplicación móvil Kolora. El estudio realza el potencial de ser aplicado en tiempo real para la detección temprana de la contaminación del agua. Además, debido a las restricciones de movimiento durante la pandemia de COVID-19 este tipo de herramientas resultan cada vez más necesarias.

[153] tienen como objetivo investigar la viabilidad de implementar un sistema de sensores basado en Arduino para el monitoreo de la calidad del agua. Se empleó un prototipo simple que consistía en un microcontrolador (Arduino Uno) y múltiples sensores (pH, temperatura, turbidez, sólidos totales) conectados para realizar pruebas semanales. Se encontró que el sistema funciona de manera fiable, pero depende de la asistencia humana y es propenso a la inexactitud de los datos. Sin embargo, el sistema proporciona una base sólida para futuros trabajos de expansión de la misma categoría.

4. Sistemas naturales de depuración de aguas residuales (SDN).

Se definen como aquellos procesos que dependen principalmente de sus componentes naturales (fotosíntesis, fotooxidación, asimilación de nutrientes por parte de las plantas, depredación, etc.,) para la eliminación de las sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales. Un sistema natural podría incluir típicamente bombas y tuberías para el transporte y distribución de aguas residuales, pero no dependería de fuentes de energía externas exclusivamente para mantener las principales respuestas de tratamiento [153, 154].

Los SDN, son sistemas que se caracterizan por necesitar poco personal de mantenimiento, presentan un consumo energético reducido, bajos costes de operación y mantenimiento en comparación con sistemas convencionales [156]. Sin embargo, tienen tiempos de retención superiores que los sistemas tradicionales por lo que, requieren mayor superficie de terreno disponible (entre 4 y 40 m²/habitante equivalente) lo que limita su uso a pequeños núcleos de población [155], [156].

Otro factor limitante es el tipo de vertido que se puede emplear, pues han de ser totalmente degradables. Se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales de casas descentralizadas, pequeños asentamientos, viviendas, hoteles, instalaciones recreativas, restaurantes, municipios pequeños, generalmente hasta 2000 he. No es adecuado para aguas con alta carga de grasas, aceites, derivados del petróleo, aguas de minas extremadamente ácidas o alcalinas, aguas extremadamente contaminadas con pesticidas, etc. [158].

Además, se necesita que el vertido sea tratado previamente, generalmente se utiliza algún tipo de pretratamiento mecánico, como puede ser el tamizado o la sedimentación primaria. Esto permite que se retiren los sólidos gruesos y se prevengan obstrucciones del sistema [19], [153], [156].

Se pueden diferenciar dos grandes grupos de técnicas de depuración natural: los métodos de tratamiento mediante aplicación del agua sobre el terreno, y los sistemas acuáticos. La depuración de las aguas residuales se realiza mediante la acción de la vegetación, del suelo, y de los microorganismos presentes [157].

Entre los métodos de tratamiento en el terreno se incluyen habitualmente los siguientes tipos:

- Filtro verde.
- Infiltración.
- Escorrentía superficial.
- Lechos de turba.
- Lechos de arena.

Se asemejan en que la depuración se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta - suelo - agua. En la Tabla 16 se exponen las características de cada método.

Tabla 15. Características de los diferentes métodos de tratamiento en el terreno. Fuente: Moreno, 2003.

Características	Filtro verde	Infiltración	Escorrentía superficial	Lechos de turba
Carga hidráulica (m/año)	1,7-6	6-100	7,3-56,7	--
Superficie necesaria (m²/hab.)	10-90	1-22	10-44	0,6-1
Pretratamiento necesario	Sedimentación primaria Desbaste	Sedimentación primaria Desbaste	Desbaste	Desbaste
Vegetación	Necesaria	Opcional	Necesaria	No necesaria
Profundidad hasta nivel freático (m)	0,6-0,9	3 (en casos con drenaje puede ser menor)	--	--
Pendiente	< 15% en terrenos cultivados < 40% en terrenos no cultivados	No es un factor crítico	1-8%	--
Permeabilidad del suelo	Moderadamente baja a moderadamente alta	Alta	Baja	Baja

Por otro lado, los métodos acuáticos se basan en la creación de un flujo controlado, en el que microorganismos y plantas principalmente, transforman los contaminantes. Existen tres tipos básicos:

- Lagunajes.
- Humedales.
- Cultivos acuáticos (plantas flotantes).

Estos métodos suelen diseñarse para un flujo continuo con descarga a ríos o lagos próximos. Su sistema de operación puede ser estacional o anual, en función del clima o de los objetivos de tratamiento [159].

Tabla 16. Características de los diferentes métodos acuáticos. Fuente: Moreno, 2003.

Características	Lagunajes	Humedales	Cultivos acuáticos
Carga hidráulica (m/año)	--	5,5-18	5,5-18
Superficie necesaria (m²/hab.)	6,5	--	--
Pretratamiento necesario	Desbaste	Sedimentación primaria, Desbaste	Sedimentación primaria, Desbaste
Vegetación	No necesaria	Necesaria	Necesaria
Pendiente	< 5%	< 5%	< 5%
Permeabilidad del suelo	Baja a moderada	Baja a moderada	Baja a moderada

De estos sistemas se han utilizado las lagunas y los humedales para el desarrollo del proyecto. Además, se añaden los biodigestores como extensión a los SDN nombrados.

4.1. Humedales.

Los humedales se definen como la tierra donde el nivel freático está en (o por encima) de la superficie del suelo el tiempo suficiente para mantener las condiciones saturadas del suelo y el crecimiento de la vegetación. Generalmente presentan profundidades de agua inferiores a 0,6 m. Los humedales de tratamiento son ecosistemas alimentados por energía solar. La radiación solar varía diariamente, así como sobre una base anual. Por lo tanto, los procesos de los humedales se ven impulsados a responder en estos mismos dos períodos cíclicos. La intensa radiación de verano da como resultado condiciones más cálidas y una mayor evapotranspiración. La radiación invernal es más pequeña y da como resultado temperaturas más frías con menor evapotranspiración. Otras variables meteorológicas, como la temperatura del aire, la humedad y las precipitaciones, también tienen ciclos anuales, pero con una considerable variabilidad poco determinista [159], [160].

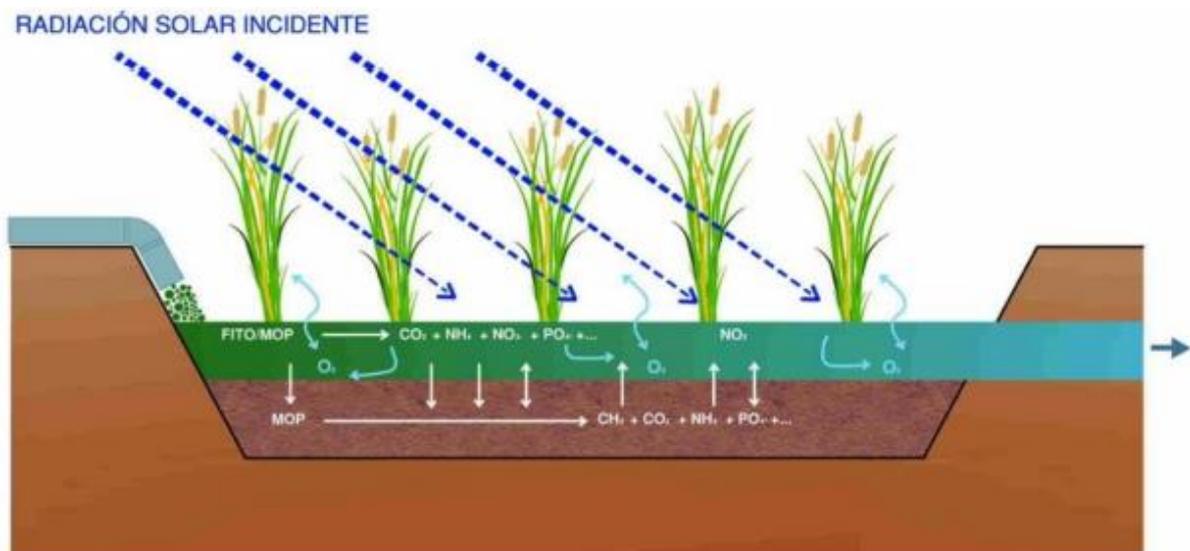


Figura 8. Esquema simplificado del funcionamiento hipotético de un humedal. Fuente: Oliver, 2017

En estos sistemas la vegetación es la que se hace cargo de facilitar un entorno adecuado para la formación de películas bacterianas. De esta forma se mejora la filtración y la adsorción de los elementos del agua residual. Además, se encarga de ceder oxígeno a la masa de agua y de restringir el crecimiento de algas al reducir la penetración de luz solar [156], [161].

Se pueden utilizar para el tratamiento de aguas residuales, terrenos pantanosos naturales o artificiales. Sin embargo, los humedales naturales presentan la dificultad de que las aguas residuales vertidas tienen que cumplir con los estándares de descarga antes de su aplicación. Por

lo que se limitan al tratamiento adicional de efluentes, como tratamientos secundarios o terciarios. Por el contrario, los humedales artificiales, al estar diseñados concretamente para el tratamiento de aguas residuales, quedan excluidos de las limitaciones de vertidos a ecosistemas naturales [158].

Los tipos básicos de sistemas de humedales artificiales se muestran en la figura.

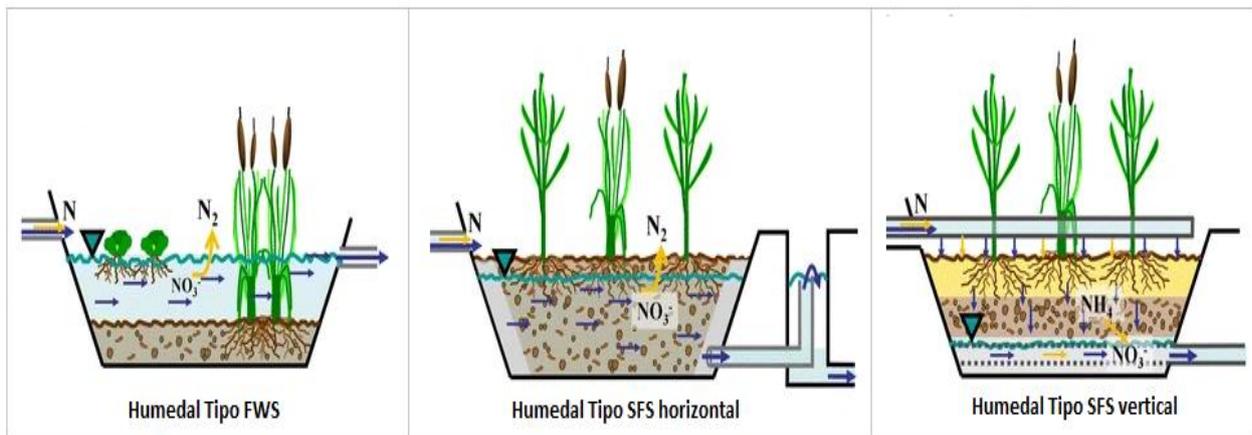


Figura 9. Esquema de los diferentes tipos de humedales. Fuente: Passeport et al., 2013.

- **Humedales de superficie de agua libre (FWS).** Se trata de balsas o canales paralelos con el fondo establecido por suelo relativamente impermeable o con una barrera superficial, plantas emergentes, y niveles de agua poco profundos (0,1 a 0,6 m). Tienen áreas de agua abierta y son similares en apariencia a las marismas naturales, Dependiendo de las regulaciones locales y las condiciones del suelo, las bermas, diques y revestimientos pueden ser utilizado para controlar el flujo y la infiltración. El agua residual es tratada mediante los procesos de sedimentación, filtración, oxidación, reducción, adsorción y precipitación través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. La aplicación más utilizada para los humedales FWS es para el tratamiento avanzado de efluentes de procesos de tratamiento secundario o terciario (por ejemplo, lagunas, filtros de goteo, sistemas de lodos activados, etc.) [157–159].
- **Humedales de flujo subsuperficial (SFS).** Consisten en canales o zanjas con fondos relativamente impermeables rellenos de cantos o arena para el crecimiento de vegetación emergente y el nivel del agua se mantiene por debajo de la parte superior del

lecho. El agua residual fluye dentro y alrededor de las raíces y rizomas de las plantas, Debido a que el agua no está expuesta durante el proceso de tratamiento, se minimiza el riesgo asociado con la exposición humana o de la vida silvestre a organismos patógenos. Se diseñan con la misión de suministrar un tratamiento secundario avanzado. Los sistemas de humedales SFS son generalmente más costosos que los humedales FWS. Dentro de los humedales de flujo subsuperficial se distinguen dos tipos: [153], [157–159].

- **De Flujo Horizontal (HSSF).** Donde el agua fluye horizontalmente desde la entrada hasta la salida del humedal. Generalmente la profundidad del agua se encuentra entre 0,30 y 0,90 m y operan de forma que siempre están inundados (agua entre 0,05 y 0,1 m por debajo de la superficie) [19].
- **De Flujo Vertical (VF).** Distribuyen agua a través de la superficie de un lecho de arena o grava (profundidad entre 0,5 - 0,8 m) plantado plantas emergentes. El agua se trata a medida que se filtra a través de la zona de las raíces de las plantas. Los humedales HSSF tienen una capacidad condicionada para oxidar el amoníaco debido a que transferencia de oxígeno que se produce es pobre. Los humedales VF se desarrollaron para proveer niveles más altos de transferencia de oxígeno, produciendo así un efluente nitrificado. Estos sistemas pueden combinarse con humedales HSSF o FWS para crear lotes de tratamiento de nitrificación-desnitrificación [158].

4.2. [Lagunas de estabilización.](#)

Las lagunas de estabilización de desechos son tecnologías de saneamiento que consisten en cuencas abiertas encerradas por terraplenes de tierra, que utilizan procesos naturales en las que las aguas residuales son tratadas por bacterias (anaeróbicas / aeróbicas) y algas [160], [161], y se encuentran entre las tecnologías de tratamiento de aguas residuales más utilizadas en todo el mundo [161–164]. Es decir, el efecto de tratamiento deseado se logra mediante procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el medio acuático en presencia de agua y biocenosis de humedales (bacterias, fitoplancton y zooplancton), vegetación y microorganismos durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas [155], [160].

Las lagunas son especialmente adecuadas para países tropicales y subtropicales, ya que la luz solar y la temperatura ambiente son factores clave en el rendimiento de sus procesos [167].

Estas lagunas se pueden utilizar para tratar una variedad de corrientes de agua y desechos, pudiendo incluir aguas residuales, contenido de pozos y/o lodos de otros procesos de tratamiento de aguas residuales. También pueden recibir aguas residuales no tratadas que han pasado por tratamiento preliminar (por ejemplo, cribado y eliminación de arena), o pueden recibir efluentes secundarios de algún otro proceso de tratamiento, como reactores anaeróbicos, lodos activados o filtros de goteo [164].

Las salidas de los estanques de estabilización incluyen el efluente tratado (líquido), lodos/sedimentos (sólidos) y biogás. El efluente líquido tratado se descarga a menudo continuamente. El lodo se acumula con el tiempo en el fondo de las lagunas debiendo ser removido cada pocos años (estanques anaeróbicos), cada década (estanques facultativos primarios), o cada pocas décadas (estanques secundarios facultativos o de maduración). Además, los lodos eliminados están contaminados con patógenos y deben gestionarse de forma segura (para evitar la exposición) o tratarse (para reducir la concentración de patógenos) [160], [165].

En función de los tipos de microorganismos las lagunas se pueden clasificar en anaerobias, facultativas y aerobias o de maduración [153], [160], [161], 163–165]. En la figura se distinguen los tres tipos de lagunas:

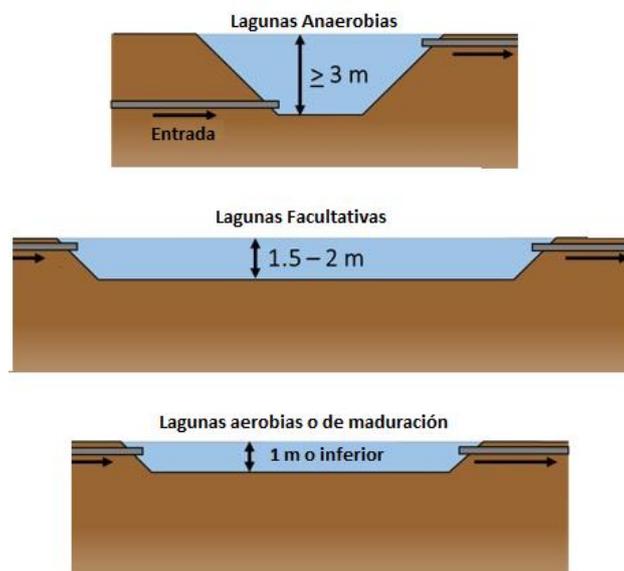


Figura 10. Principales tipos de lagunas de estabilización. Fuente: Verbyla, M, et al., 2017.

- **Lagunas anaerobias.** En este tipo de estanque se da lugar una digestión anaeróbica, se dimensionan según la carga orgánica volumétrica que tengan que tratar, generalmente el intervalo oscila entre 100 a 350 g DBO₅/m³ día, dependiendo de la temperatura de diseño. Este tipo de lagunas tienen el objetivo de lograr la precipitación de la mayor parte de los sólidos en suspensión y la eliminación de parte de la materia orgánica por medio de las bacterias presentes, pudiendo alcanzar reducciones en torno al 70% de DBO₅ y sólidos en suspensión. Debido a las altas cargas orgánicas el nivel de oxígeno disuelto es nulo o muy reducido en toda la laguna. La profundidad de este tipo de estanque está en el rango de 2 a 5 metros, siendo común estanques con profundidades de 3 o 4 metros. El periodo de retención del agua residual en laguna es relativamente corto, de 2 a 5 días. Generalmente, estas lagunas se utilizan como tratamiento primario en el proceso de depuración. Existe la posibilidad de que produzcan malos olores, si el diseño no es correcto o si el contenido en azufre (formación de sulfhídrico), del influente es superior a 100 mg/l. Se recomienda realizar la retirada de fangos cada pocos años (2-3 años) [156], [161], [163–165].
- **Lagunas facultativas.** Este tipo de laguna está dividido en tres zonas: una zona aerobia cerca de la superficie; una zona anaerobia en el fondo del estanque; una zona intermedia donde se encuentran las bacterias facultativas. En estos estanques se utiliza una carga orgánica superficial relativamente baja (80-400 kg DBO₅/ ha. día dependiendo de la temperatura de diseño). Esto es así para permitir el correcto desarrollo de una población sana de algas. La profundidad de estos estanques en el rango de 1 a 2 m, siendo 1,5 la más común. Sin embargo, la variación de temperatura en las diferentes estaciones del año puede obligar a hacer más profundos los estanques, se considera una temperatura óptima de trabajo el rango de 15 a 25 °C. Si la laguna está bien diseñada hidráulicamente, se tienen tiempos de retención hidráulicos de 7 a 23 días. La remoción de DBO₅ en estanques facultativos primarios es de alrededor del 70 % sin filtrar y más del 90 % sobre una base filtrada. Los microorganismos (bacterias, hongos y protozoos) utilizan como fuente de energía el carbono. El carbono restante junto con el fósforo y el nitrógeno lo usan para crear nuevas células. La estabilización de la materia orgánica se desarrolla con el oxígeno proveniente de la aireación producida en la superficie y con la fotosíntesis de

las algas presentes en la zona aerobia. En esta zona, las bacterias utilizan el oxígeno producido por las algas y desprenden CO_2 que, a su vez, es utilizado por éstas, cerrando así el ciclo. Los lodos deben eliminarse al menos cada 10 a 20 años para los estanques facultativos primarios, y cada pocas décadas para los estanques facultativos secundarios [154], [156], [163], [166–168].

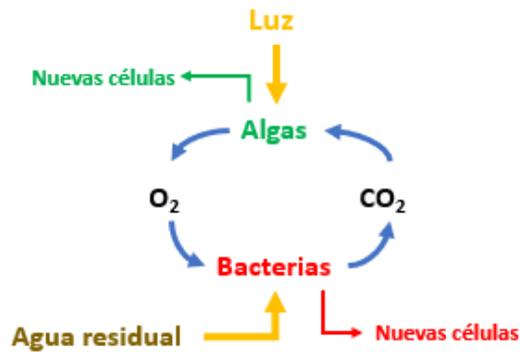


Figura 11. Ciclo proceso estabilización en laguna facultativa.

- **Lagunas aerobias o de maduración.** Los estanques de maduración reciben el efluente de lagunas anteriores, son estanques de poca profundidad, generalmente de 1 metro, ya que para profundidades menores se fomenta la proliferación de macrofitas atrayendo mosquitos. La función principal es reducir la DBO5 a los niveles mínimos y eliminar patógenos con la radiación solar ultravioleta. Debido a las menores cargas orgánicas (15-50 kg/ ha, día) que reciben los estanques de maduración, están bien oxigenados en toda su profundidad. La aireación puede ser natural, donde el oxígeno que se encuentra procede de la fotosíntesis de las algas y de la aireación superficial o puede ser que sea de aireación forzada, donde esta se produce mediante elementos mecánicos.

Los estanques de maduración tienen una capacidad significativa de remoción de nitrógeno y fósforo. La remoción total de nitrógeno en un sistema completo de lagunajes se encuentra generalmente por encima del 80 % y la remoción de amoníaco en más del 90 %, dependiendo del número de estanques de maduración incluidos en el sistema. La remoción de fósforo es algo menor (generalmente alrededor del 50 %). El tiempo de retención de una laguna de maduración así como el número de lagunas, estará fijado por el grado de depuración bacteriana que se quiere alcanzar. Para una laguna de 1 m de

profundidad se debe proporcionar un tiempo de retención de 7 a 10 días. En estanques de maduración, la acumulación de lodos es muy baja [154], [166], [169], [170].

4.3. Digestor anaerobio.

Una forma eficiente de realizar la digestión anaerobia (DA) es a través del uso de biodigestores. Los biodigestores son depósitos cerrados que están diseñados para conseguir la producción de biogás a partir de la DA. En su interior la materia orgánica (desechos agrícolas, estiércol o efluentes industriales) y el agua residual es descompuesta por la acción de bacterias presentes en los desechos tras un periodo de tiempo. De este proceso de descomposición se obtiene como resultado un abono orgánico libre de agentes patógenos y rico en compuestos químicos y gas metano. La acción de la biodigestión puede disminuir el potencial contaminante de los excrementos de origen animal y humano, disminuyendo la DQO y la DBO hasta en un 90 % dependiendo de las condiciones de diseño y operación [59], [171–173].

Este tipo de tecnología se puede desarrollar con materiales económicos siendo posible instalarla en comunidades rurales aisladas, ayudando así a desarrollar estas zonas a la vez que se intenta cumplir con los objetivos energéticos y medioambientales [178].

Un digestor debe ser hermético con el fin de evitar la entrada de aire e impedir fugas de biogás. También debe estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura, por lo que se suelen construirse enterrado total o parcialmente. Además, el contenedor primario de gas debe tener una válvula de seguridad [58].

Un digestor está compuesto principalmente por un reactor o contenedor de donde se lleva a cabo el proceso anaerobio ; un contenedor o campana de gas, los accesorios para salida de biogás, la zona de carga de materias orgánicas primas (afluente) y zona de descarga de materias orgánicas estabilizadas (efluente) [58][63].

El sustrato en muchas ocasiones debe ser tratado antes de ser introducido en el digestor, con el fin de que sea lo más homogéneo posible para obtener un mejor rendimiento y aumentar la producción de biogás, reduciendo el tiempo de residencia. Las tecnologías de pretratamiento se pueden clasificar en mecánicas, térmicas, químicas, por ultrasonidos y biológicas [179].

4.3.1. Tipos de digestores.

Los principales modelos de digestores usados para el proceso de la digestión anaerobia son los siguientes:

4.3.1.1. *Digestor de mezcla completa.*

Se trata del tipo de reactor más simple y puede ser de mezcla completa sin recirculación o con recirculación.

- Digestor de mezcla completa sin recirculación.

Se trata de un reactor en donde se mantiene una distribución uniforme de concentraciones, tanto de sustrato como de microorganismos. Para ello, se utiliza un sistema de agitación que puede ser mecánico o neumático a baja velocidad. Es el tipo de digestor más utilizado para la estabilización de lodos de aguas residuales urbanas y para tratar estiércoles y otros vertidos agrícolas o agroindustriales. La mayoría de los digestores instalados en las granjas europeas son de este tipo. Suelen estar contruidos en hormigón armado o acero y tienen un TRH de aproximadamente 10 días [19], [58], [179], [180].

- Digestor de mezcla completa con recirculación.

En este caso, al existir recirculación de la mezcla es posible conseguir TRH más bajos que en un reactor de mezcla completa sin recirculación. Este sistema solo puede ser aplicado en aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.), donde es posible llevar a cabo una separación de fases líquido-sólido [58], [179], [180].

4.3.1.2. *Digestor horizontal o de flujo pistón*

Se utilizan para tratar sustratos de mayor viscosidad y concentración de sólidos (sobre 11%), lo que los hacen adecuado para tratamiento de estiércol o en procesos de codigestión. Los modelos más comunes corresponden a reactores rectangulares, con volúmenes de hasta 1500 m³ [180].

Este tipo posee un mejor rendimiento en comparación con el de mezcla completa, también tiene mejor comportamiento a altas cargas y buen rendimiento de los procesos de nitrificación [19]

Los residuos pasan a través del digestor de manera secuencial, desde la entrada hasta la salida, desplazando la materia digerida con materia fresca. Generalmente se construyen enterrados,

poco profundos y alargados, están cubiertos con películas de plástico que sirven como depósito de biogás y como aislamiento térmico [181].

4.3.1.3. *Digestor discontinuo.*

Un reactor discontinuo o de Batch, se carga una vez hasta que se completa el proceso de digestión totalmente. Estos sistemas son más simples y requieren menos equipos que los sistemas continuos. Se utilizan para tiempos de reacción más largos, además en este tipo de digestores pueden tratarse sólidos que no han sido diluidos. En general, no son adecuados para operaciones a gran escala, donde se produce continuamente residuo [179].

4.3.1.4. *Otros sistemas.*

Los reactores anteriores pueden ser combinados para conseguir sistemas más eficientes, según el tipo de residuo a tratar.

- Sistemas de dos etapas.

Se instala un primer reactor con alto TRH (discontinuo), donde se lleva a cabo la hidrólisis, seguido de un segundo reactor de bajo TRH encargado de digerir la materia orgánica disuelta y los ácidos generados en la primera etapa. De esta forma, se puede mantener de manera sencilla la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. Ha tenido buenos resultados tratando residuos sólidos donde la hidrólisis es etapa limitante [175, 177].

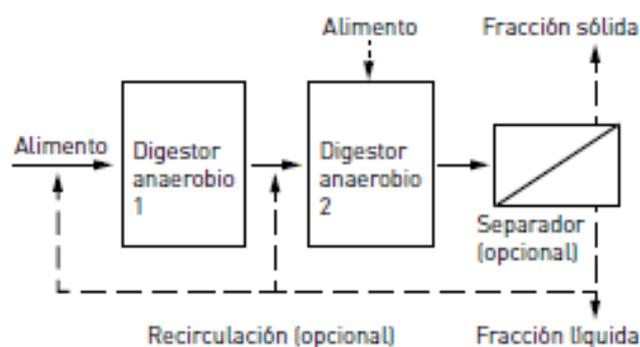


Figura 12. Diagrama de flujo biodigestor de dos etapas. Fuente: IDAE, 2011.

- Sistemas de dos fases.

En este caso se instalan dos reactores en serie, en donde se producen las fases de acidogénesis y metanogénesis, respectivamente. El objetivo de este tipo es lograr un TRH global menor al de un reactor de mezcla completa. Estos sistemas han dado buenos resultados para la digestión de residuos con alta concentración de azúcares y bajo contenido en sólidos. Sin embargo, es poco eficiente para residuos con fibras y, en general, sustratos complejos cuyo limitante es la hidrólisis [175, 177, 186].

4.3.2. Principales digestores aplicados en explotaciones ganaderas

Hay que tener en cuenta que no todos los tipos de biorreactores son adecuados para instalaciones en el medio rural. A continuación, se muestran cuáles son los más usados para este fin.

4.3.2.1. Modelo chino.

Se trata de un digestor que trabaja en régimen semicontinuo, con la campana de gas fija. El reactor se construye en forma cilíndrica con el techo y el piso en forma de domo y se encuentran completamente enterrados. El digestor se carga con la materia a través de la cubierta superior y es alimentado diariamente con los residuos que se encuentren disponibles a través del tubo de carga que llega a la parte media del digestor.

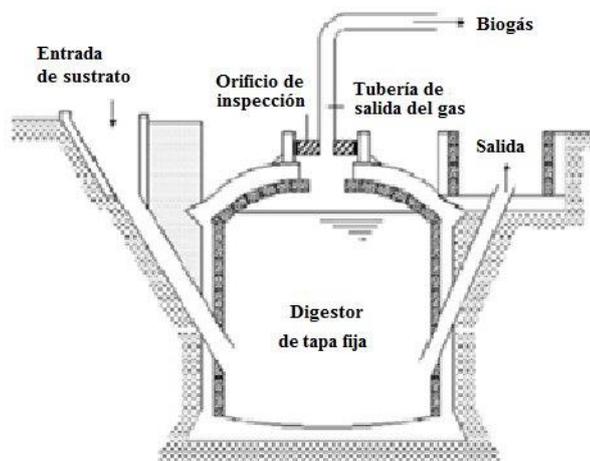


Figura 13. Digestor tipo Chino. Fuente: Barrera, 2020.

Este reactor trabaja a presión variable, de manera que el biogás se va almacenando en la campana o domo del digestor a medida que se genera. Esto produce un aumento de la presión, y el material de fermentación es desplazado hacia el tanque de compensación. El efluente se extrae de manera periódica a través del tubo de salida. Es necesario vaciar completamente el digestor una o dos veces al año, utilizando el residuo sólido generado como abono a los cultivos. El digestor chino es poco eficiente para generar biogás, sin embargo ofrece buenos resultados en la producción de bioabono. Los tiempos de retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 60 días [58], [178], [184].

4.3.2.2. Modelo Hindú.

Este tipo de digestor se construye enterrados y con forma cilíndrica. La carga del sistema se realiza por gravedad una vez al día o cada dos o tres días. Pueden producir una cantidad diaria constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. Solamente es necesario vaciar por completo la cámara si se necesita realizar alguna reparación o limpieza.

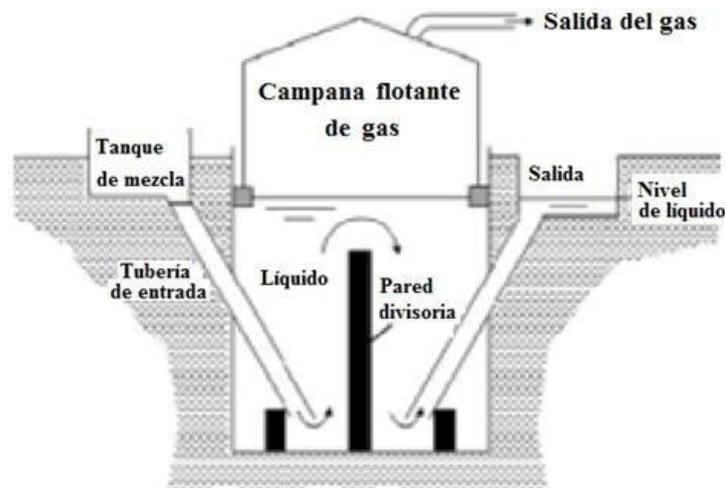


Figura 14. Esquema general de un digestor tipo hindú. Fuente: Barrera, 2020.

Sobre la cámara de digestión se encuentra flotando la campana gasométrica que suele construirse en hierro. En este caso el biogás generado se almacena a presión constante y volumen variable. La presión de salida puede incrementarse si se añaden contrapesos. La salida del efluente se efectúa por rebalse. Como materia prima suele utilizarse excretas que deben estar bien diluidas y mezcladas homogéneamente. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás [58], [76].

4.3.2.3. Biodigestor de Polietileno.

Esta fabricado con una bolsa tubular sellada herméticamente con una relación longitud-ancho de aproximadamente 5:1, en material plástico (polietileno, PVC, poliéster de alta densidad) y tuberías del mismo material [9], [185]. El gas se almacena en la parte superior ocupando aproximadamente un 25 % del volumen total.

Tiene tuberías colocadas en las paredes de la bolsa para la carga y descarga del sustrato. En el momento que el biogás ocupa todo el volumen del digestor funciona como uno de campana fija. Las principales ventajas de este tipo de biodigestor es su bajo coste, su facilidad de construcción, instalación y manejo, y su mínimo mantenimiento. La principal desventaja es que al ser de plástico es susceptible a las roturas [178], [184], [186]

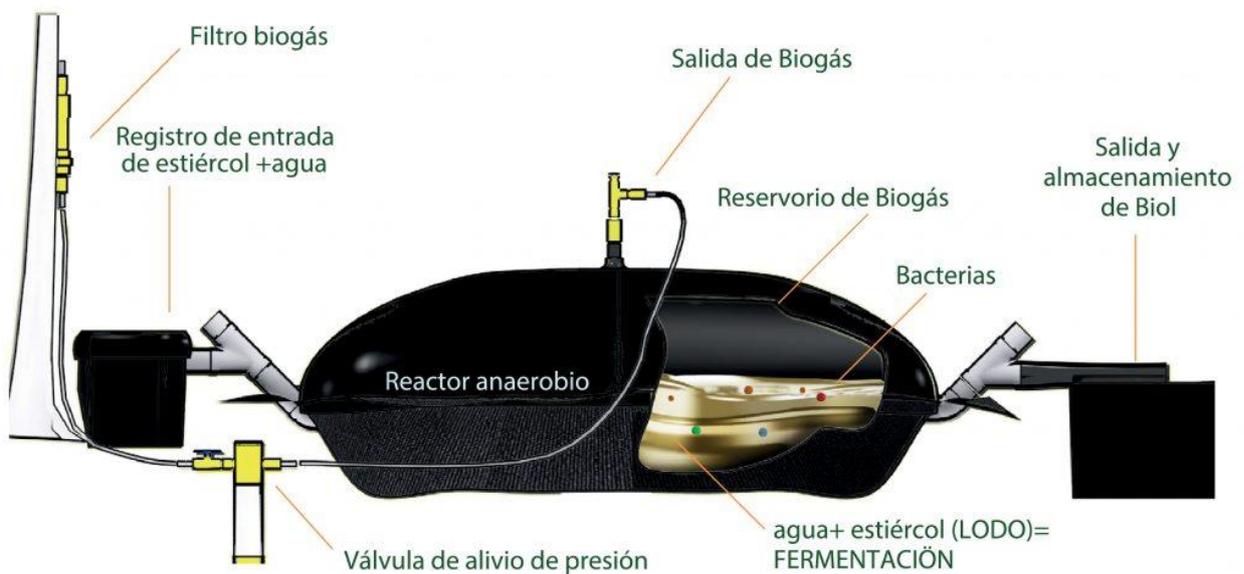


Figura 15. Esquema general de digestor tipo salchicha. Fuente: Tecnosol

5. Potencial energético de fuentes de energía renovables aplicables a los SDN.

El potencial energético se define como la cantidad total de energía presente en la naturaleza, independiente de cuál sea la fuente energética, que puede ser aprovechada mediante el uso de tecnología [118].

En Canarias existe un gran potencial de fuentes de energía renovable, en la actualidad, las más explotadas son la energía eólica, la solar fotovoltaica y la solar térmica. Otras fuentes de energía renovables menos utilizadas son la hidráulica y la biomasa.

En el presente estudio se analizará el potencial solar, así como, el potencial eólico disponible en la explotación ganadera.

5.1. Potencial solar fotovoltaico.

España se encuentra dividida en cinco zonas climáticas teniendo en cuenta la Radiación Solar Global media diaria anual sobre superficie horizontal, situándose Canarias en la zona climática con más radiación incidente anual, según la clasificación realizada por el CTE (Código Técnico de la Edificación) [187].

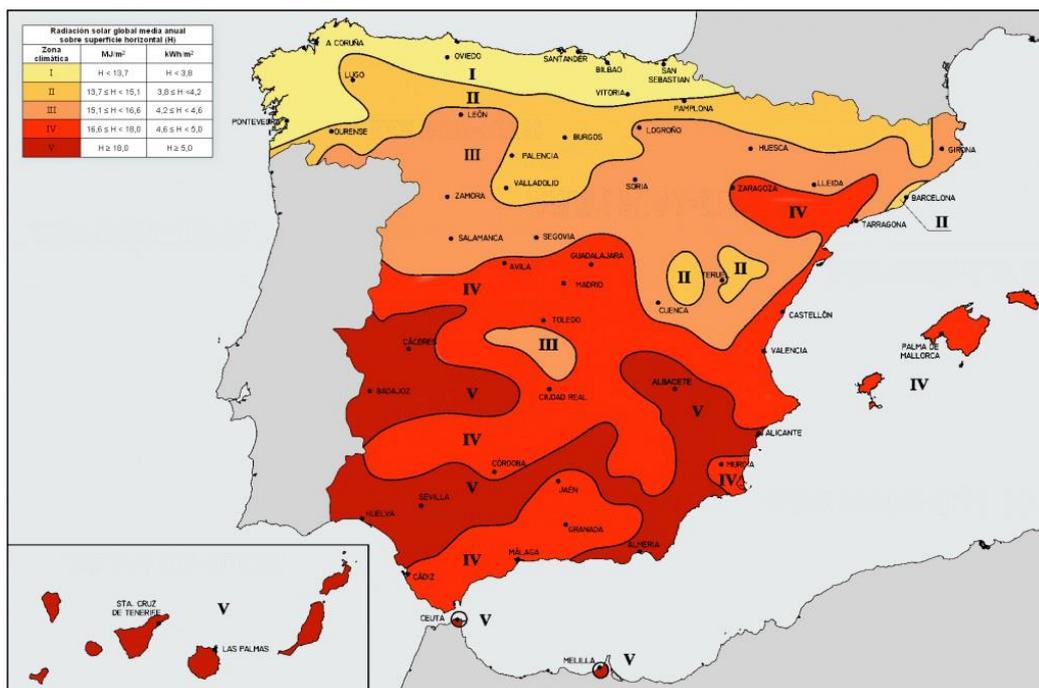


Figura 16. Clasificación Zonas Climáticas según Radiación Solar Global media diaria anual. Fuente: CTE, 2019.

En la siguiente tabla se puede exponen los valores de radiación para zona climática.

Tabla 17. Radiación Solar Global media diaria anual. Fuente: CTE, 2019.

Zona Climática	MJ/m ²	kWh/m ²
I	H < 13,7	H < 3,8
II	13,7 < H < 15,1	3,8 < H < 4,2
III	15,1 < H < 16,6	4,2 < H < 4,6
IV	16,6 < H < 18	4,6 < H < 5
V	H ≥ 18	H ≥ 5

Además, si se requiere información más precisa el CTE también ofrece tablas de los valores de radiación por provincias y localidades.

También, se tiene el siguiente mapa solar que ofrece ASIF (Asociación de la Industria Fotovoltaica), donde se tiene que la cifra superior de cada provincia es el número de kWh/m² año y la cifra inferior presenta el número de horas anuales de sol efectivo [188], [190].

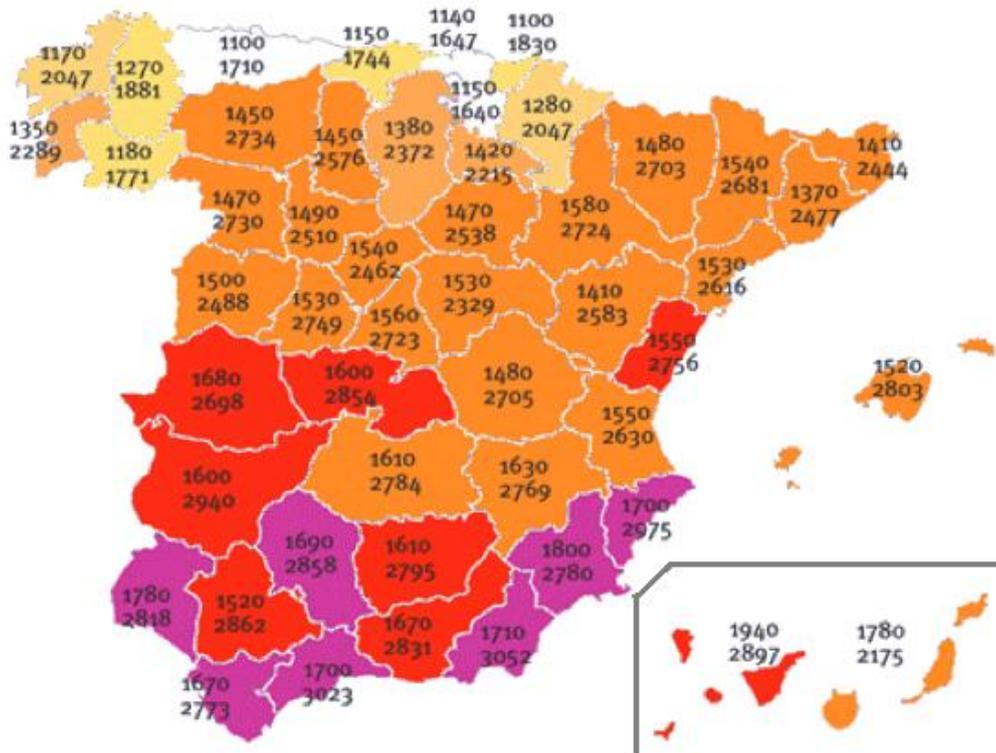


Figura 17. Mapa solar por provincias. Fuente: ASIF.

Las abundantes horas de luz del archipiélago permiten que la producción de una instalación de placas solares en Canarias sea mayor que en otras zonas.

Existen diversos indicadores para medir el rendimiento energético de una instalación, los más utilizados son el factor de capacidad (FC) y las horas equivalentes (HE): [191]

- **Factor de capacidad (FC):** El factor de capacidad o también llamado factor de carga es la relación entre la energía real producida en un período dado y el máximo hipotético posible, es decir, funcionando a tiempo completo a la potencia nominal. Los valores típicos del factor de capacidad de una instalación fotovoltaica oscilan entre el 10 y el 30%. El factor de capacidad es adimensional por lo que se suele expresar el porcentaje [192].

$$FC = \frac{E}{P_n * 8760} \quad (3)$$

E: Energía real obtenida

P_n: Potencia nominal

8760: horas de un año natural

A continuación se muestra la evolución de los factores de capacidad medios de la isla de Gran Canaria a lo largo de los últimos años [20].

Tabla 18. Evolución del factor de capacidad medio anual de funcionamiento de las instalaciones. Fuente: Anuario Energético de Canarias, 2019.

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
%FC	32,30%	35,10%	33,80%	32,60%	32,80%	30,10%	30,70%

Los factores de capacidad se han determinado como el ratio del número de horas equivalentes entre el número de horas totales de referencia (considerándose como horas totales de referencia, 4380 horas equivalentes a 12 horas diarias).

Se puede observar que el factor de capacidad de las instalaciones de fotovoltaicas que operan en Gran Canaria es superior a los valores típicos. Lo que hace de la isla un lugar idóneo para la instalación de este tipo de tecnología.

- **Horas equivalentes:** El término de horas equivalentes representa, en este caso, la energía producida durante todo el año entre la potencia total fotovoltaica instalada final de ese año. Este ratio es función del potencial fotovoltaico de la zona donde se encuentre ubicada la instalación y de la eficiencia del funcionamiento de esta. Las horas equivalentes

dan una buena referencia, sobre todo comparativa, del rendimiento de una instalación fotovoltaica [1], [188].

Tabla 19. Horas equivalentes de instalaciones fotovoltaicas. Anuario Energético de Canarias, 2019.

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Media
Horas equivalentes	1414	1536	1480	1427	1438	1320	1346	1423

En Canarias se dispone de un recurso solar que permite a las instalaciones fotovoltaicas alcanzar valores de horas de funcionamiento equivalentes superior que los registrados en la península, lo que hace que sea atractivo alimentar con este tipo de tecnología renovable las explotaciones ganaderas [193].

5.2. Potencial geotérmico de baja entalpía.

La energía geotérmica es un tipo de energía renovable que se genera dentro de la tierra y se puede utilizar directamente para calentar o transformarse en electricidad. Una ventaja de la energía geotérmica sobre algunas otras fuentes de energía renovable es que está disponible durante todo el año (mientras que la energía solar y eólica presentan una mayor variabilidad e intermitencia) y se puede encontrar en todo el mundo [194]. Según la Directiva 2009/28/CE, se define como “la energía almacenada en forma de calor bajo la superficie de la tierra sólida” [195].

A partir de la energía geotérmica se puede generar calor, frío o electricidad durante las 24 horas del día durante todo el año, a diferencia de otras fuentes de energías como la fotovoltaica o la eólica, esto la convierte en una gran alternativa para los sistemas de calefacción y refrigeración [196], [197].

El recurso geotérmico disponible se puede clasificar en base a su temperatura o entalpía, según la a Plataforma Tecnológica Española de Geotermia (GEOPLAT) se pueden clasificar de la siguiente manera [198], [199]:

- Recurso geotérmico de alta entalpía ($T > 150$ °C)
- Recursos geotérmicos de media entalpía ($T: 100-150$ °C).
- Recursos geotérmicos de baja entalpía ($T: 30-100$ °C).
- Recursos geotérmicos de muy baja entalpía ($T < 30$ °C).

En Canarias es de especial interés la geotermia de baja entalpía para sistemas de climatización o calefacción de espacios (invernaderos, edificios, piscinas). Se localizan a profundidades entre 1.500 y 2.500 m, o a profundidades inferiores a los 1.000 m en zonas con un gradiente geotérmico más elevado. Para aprovechar dicha energía es frecuente el uso de intercambiadores o bombas de calor pudiendo generar frío o calor indistintamente. De esta forma el uso de bomba de calor ha generado la posibilidad de que esta energía pueda aprovecharse casi en cualquier lugar [196], [198], [199].

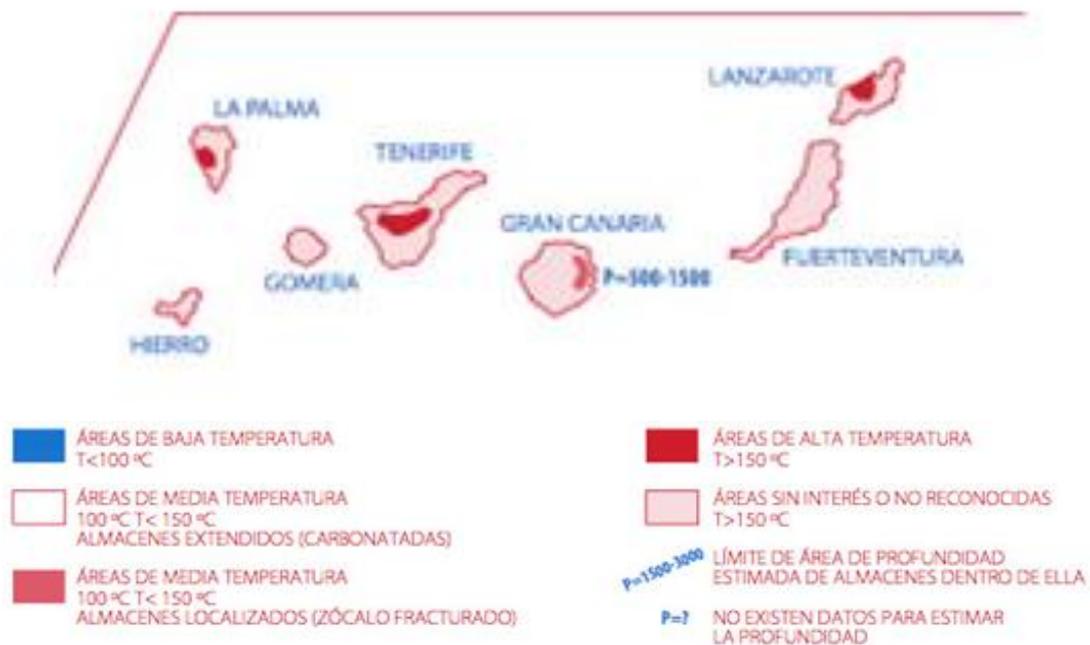


Figura 18. Áreas geotérmicas en Canarias. Fuente: <https://www.geoplat.org/wp-content/uploads/2016/05/mapapotencial.jpg>

En el mapa se puede observar el recurso geotérmico disponible en cada una de las islas del Archipiélago. puede decirse que la isla de Gran Canaria presenta un potencial geotérmico interesante, pero no se ha estudiado lo suficiente la mayor parte del territorio [199].

El aprovechamiento de la energía geotérmica mediante el uso de bombas de calor puede resultar especialmente útil para mantener la temperatura de las cámaras de los digestores con una temperatura controlada, mejorando y estabilizando así el rendimiento del proceso. Según el U.S. Department of Energy's las bombas de calor geotérmicas (GHP) utilizan entre un 25% y un 50% menos de electricidad que los sistemas convencionales de calefacción y refrigeración, reduciendo su consumo energético. Por lo que aunque el precio de instalación de un sistema geotérmico

puede ser varias veces mayor que el de un sistema de fuente de aire de la misma capacidad de calefacción y refrigeración, los costes adicionales pueden devolverse en ahorros de energía en 5 a 10 años, dependiendo del coste de la energía y los incentivos disponibles. La vida útil del sistema se estima en hasta 24 años para los componentes interiores y más de 50 años para el bucle de tierra [200]–[203].

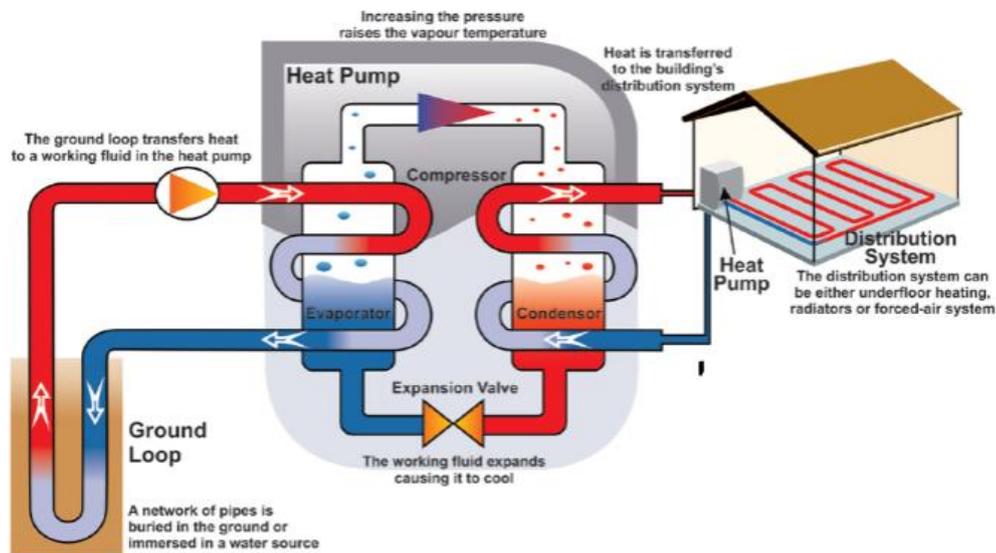
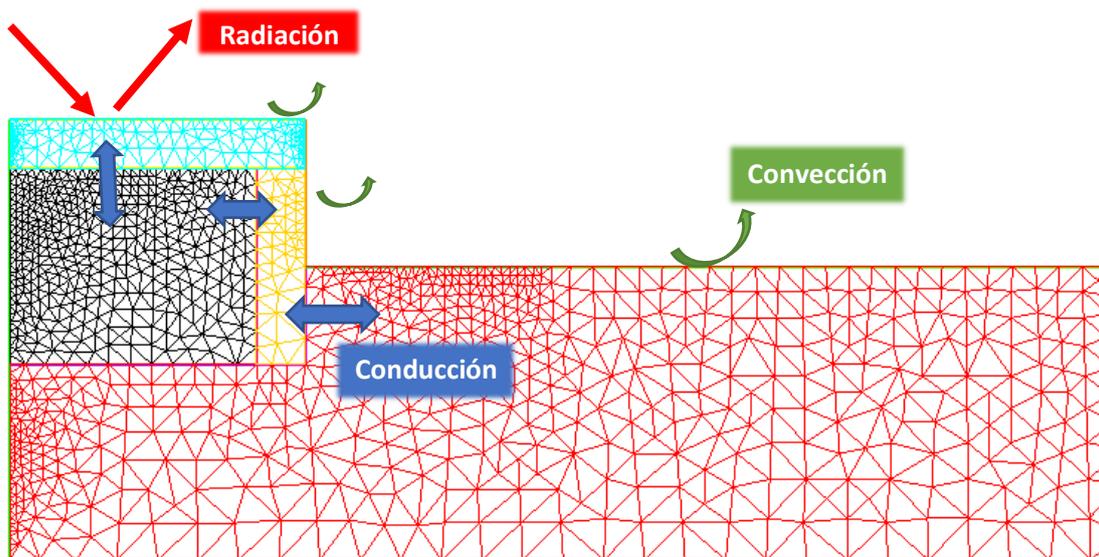


Figura 19. Esquema de funcionamiento de una bomba de calor geotérmica para calefacción. Fuente: Climo et al. (2014).

Los factores ambientales que afectan directamente a un sistema geotérmico son: temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, viento y las propiedades del terreno.

Se puede decir que el principio de funcionamiento de un sistema geotérmico para la obtención de energía se basa en la transferencia de calor, es decir, existe una diferencia de temperatura entre dos puntos. La transferencia de calor se puede realizar mediante conducción, convección y/o radiación [204]–[206].

Se utiliza el software Freefem++ para representar el digestor y el terreno de la planta piloto. Este es un software enfocado en resolver ecuaciones diferenciales parciales usando el método de elementos finitos, desarrollado en lenguaje C++, por la Universidad Pierre y Marie Curie, en Francia. [207]. En la siguiente figura se muestran los diferentes tipos de transferencia que afectan al sistema.



Rojo: transferencia por radiación
Verde: transferencia por convección
Azul: transferencia por conducción

Figura 20. Transferencias de calor que intervienen en el sistema. Mallado realizado con FreeFem++.

Como se puede observar en la figura, se producirá intercambio de calor por conducción, entre el terreno y el digestor y entre cámaras del digestor y el techo. Se produce también intercambio de calor mediante convección entre el terreno y el aire y entre el digestor y el aire. Por último, se produce intercambio de calor por radiación, existiendo una radiación solar incidente sobre la superficie y una radiación emitida por la superficie hacia el ambiente.

Para simular mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) los diferentes tipos de transferencia de calor, habría que definir los coeficientes de conductividad de los diferentes materiales, la radiación incidente, los coeficientes de convección, la absorptividad del terreno, la temperatura media del terreno y temperatura de cielo [203].

6. Propuesta metodológica para la mejora de la operación de los SDN.

La monitorización de procesos es el paso inicial y el componente crucial de cualquier sistema de control automático. Los avances en la instrumentación permiten monitorizar en tiempo real los parámetros críticos en el proceso de la depuración de aguas residuales. Tales instrumentos servirán para avisar si se producen perturbaciones que puedan perjudicar el proceso, disminuyendo así el rendimiento promoviendo el desarrollo estable del sistema [79].

El objetivo final de controlar el proceso de depuración es cumplir dos objetivos en conflicto: maximizar la eficiencia del proceso mientras se mantiene su estabilidad. Es decir, se pretende poder operar con una alta tasa de carga orgánica sin verse afectado el rendimiento. Sin embargo, tal caso requiere una estrategia de control adecuada, ya que el aumento de la velocidad de carga orgánica a menudo introduce perturbaciones en el sistema. Los operadores prefieren operar el digestor a bajas velocidades de carga para evitar las perturbaciones del proceso, lo que a menudo resulta en una pérdida económica significativa [208].

Hay tres elementos básicos en cualquier sistema de control: sensores, controlador y software de comunicación. Los sensores se implementan para medir los parámetros más relevantes en el proceso de la depuración del agua, como se ha indicado anteriormente. Los datos de los sensores se pueden transmitir a la pantalla, almacenarlos y enviarlos al controlador para su posterior cálculo. El controlador (microprocesador) recibe datos de los sensores para rastrear la desviación mediante la comparación con el punto de configuración deseado. El software de comunicación permite recoger y almacenar datos de los sensores en la nube y desarrollar aplicaciones IoT [79].

A continuación, se ofrece una propuesta metodológica para mejorar la operación de los sistemas de depuración naturales, utilizando sensores de bajo coste e implementados con tecnología Arduino. El objetivo es proporcionar una herramienta de bajo coste y fácil manejo para el control y mejora del proceso de depuración de los purines, siendo posible extrapolar dicho sistema al tratamiento de diferentes tipos de purines y explotaciones ganaderas, sin que esto suponga una gran inversión económica para el ganadero.

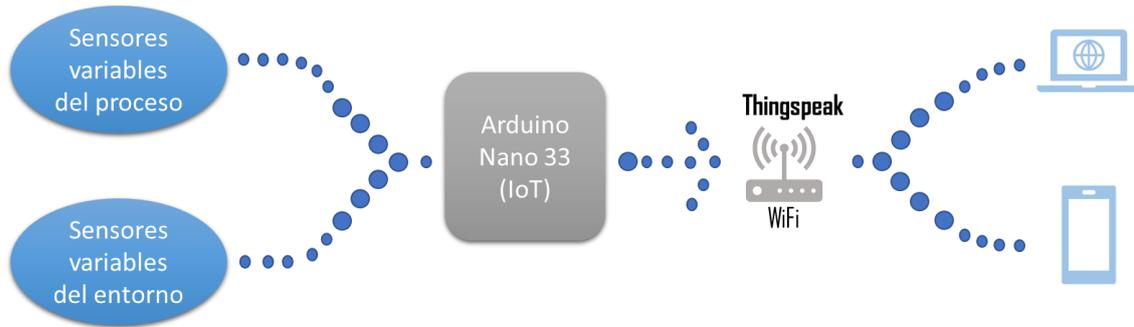


Figura 21. Diagrama general de propuesta metodológica.

En los siguiente apartado se describe el modelo de planta para la que sería diseñado, además se exponen los diferentes sensores que se aplicarán, así como el microcontrolador, la plataforma para recibir y tratar los datos obtenidos y el sistema de alimentación.

6.1. Localización y descripción de la planta piloto

La propuesta metodológica para la mejora operativa de los sistemas de depuración natural, desarrollada en el presente estudio utiliza como planta piloto una explotación de ganado porcino, situada en el municipio de Teror (Gran Canaria. España).



Figura 22. Vista aérea explotación ganadera. Fuente: Visor GrafCan

En esta granja se realiza una explotación ganadera de ciclo cerrado, es decir, alternando entre la población de madres en gestación, en espera y periodo de lactancia. En total, alberga más de 1400 cabezas de ganado, generando un caudal estimado de efluente de aproximadamente 9 m³/día. Se encuentra construida un planta de gestión de purines mediante un sistema híbrido de

depuración natural, dicha instalación ocupa alrededor de 200 m² y fue puesta en marcha en 2008. Está constituida por un biodigestor anaerobio de mezcla completa, dos humedales artificiales de flujo subsuperficial (SFS) y una laguna facultativa, además se utiliza un tamiz rotatorio, como pretratamiento mecánico del purín antes de introducirlo en el biodigestor. En la figura se muestra un esquema general de la planta [19].

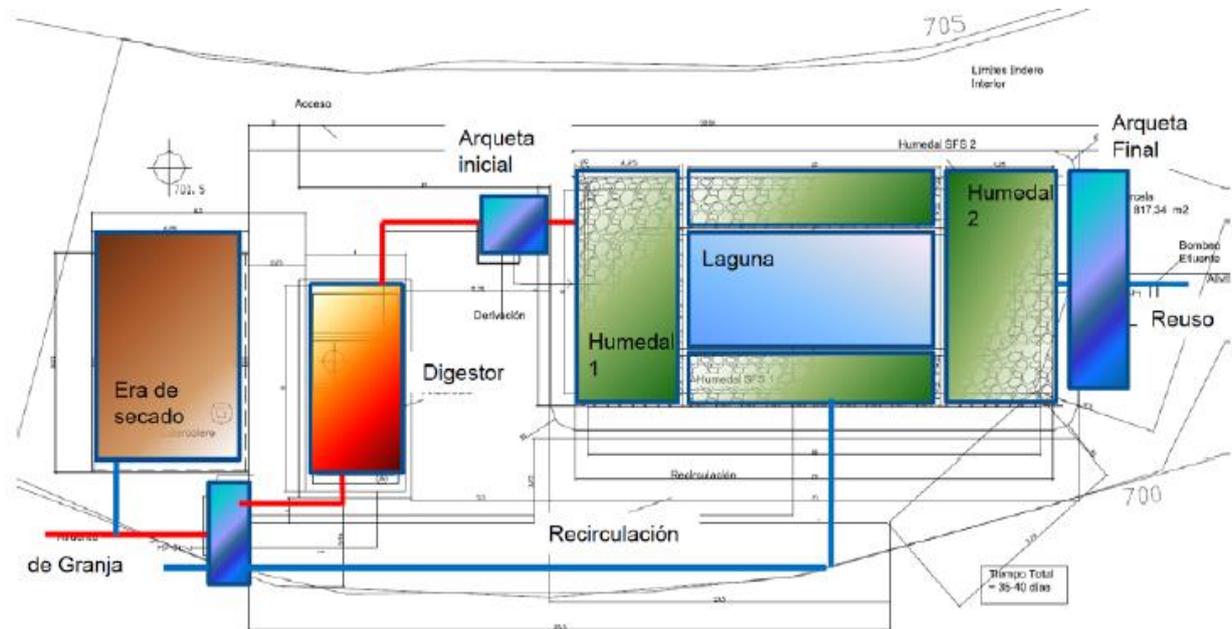


Figura 23. Esquema general de la planta piloto. Fuente: Mendieta, 2015.

El recogido del purín se realiza utilizando una arqueta de recepción con una capacidad de 10 m³/día, llevándose a un depósito de homogeneización, donde se almacena el purín. El depósito posee una capacidad de 35 m³ y tiempo de retención 3-5 días. Posteriormente el purín se bombea, mediante una bomba centrífuga hasta el tamiz rotatorio de paso de malla de 100 micras. En el tamiz se procede a la separación de la parte sólida y la parte líquida del purín, la parte sólida se lleva a un era de secado y la parte líquida se introduce en el biodigestor de mezcla completa.



Figura 24. Tamiz rotativo planta piloto. Fuente: Mendieta, 2015.

El digestor es un depósito de forma rectangular, que se encuentra semienterrado. Está compuesto por cuatro cámaras de igual dimensión e intercomunicadas entre sí, con una capacidad de 103 m³ y un tiempo de residencia de entre 12 y 14 días.



Figura 25. Digestor de mezcla completa en la planta piloto. Fuente: Mendieta, 2015.

A la salida del biodigestor, el efluente resultante pasa al primer humedal artificial, la zanja se encuentra semienterrada en la tierra, tiene una capacidad efectiva de 87,37 m³ y un tiempo de retención del purín de 5 días. En este humedal se encuentran juncuales y otros tipos de plantas emergentes que llevan a cabo la degradación de la materia orgánica. El agua residual que debe ser tratada se lleva por debajo de la superficie.

Posteriormente, el agua procedente del primer humedal llega hasta la laguna facultativa. Esta tiene un 1,5 de profundidad y un tiempo de retención de 8 días. Finalmente, pasa hasta el segundo humedal donde se realiza el último tratamiento del purín. En la laguna facultativa se encuentra un sistema de recirculación, donde el purín puede ser conducido total o parcialmente hasta una arqueta de control que comunica con el depósito de homogeneización [19].



Figura 26. Humedales, laguna facultativa y arqueta final de la planta piloto. Mendieta, 2015.

De esta forma, al tratarse de un sistema híbrido, se puede monitorizar las diferentes etapas con el fin de estudiar el desarrollo del proceso en cada una de ellas.



Figura 27. Vista general del SDN en la planta. Fuente: Mendieta, 2015.

6.2. Microcontrolador Arm Cortex-M0.

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto que permite la construcción de instrumentos científicos, utilizando el hardware y software de código abierto, y reduciendo el costo de las investigaciones [47], [190].

Ha sido utilizado eficientemente para monitorear y controlar equipos experimentales en procesos de automatización por la comunidad científica.

Para este estudio se utilizará el microcontrolador Arduino Nano 33 (IoT). El Arduino Nano 33 IoT (Internet of Things) alberga un procesador Arm Cortex-M0 + SAMD21 a 48MHz con 256 Kb de memoria Flash para el programa y 32 Kb de memoria SRAM, un módulo WiFi y Bluetooth basado en ESP32 que opera en el rango de 2,4GHz, una unidad de medición inercial (IMU) de 6 ejes y un chip criptográfico que puede almacenar de forma segura certificados [209].

Se elige dicho dispositivo por su bajo coste y la idoneidad de tener integrado el módulo Wifi para realizar la comunicación con el servidor, lo que simplifica la instalación. En la Tabla, se exponen las especificaciones técnicas de la placa.

Microcontrolador	SAMD21 Cortex®-M0+ MCU ARM de baja potencia de 32 bits (hoja de datos)
Módulo de radio	u-blox NINA-W102 (hoja de datos)
Elemento seguridad	ATECC608A (hoja de datos)
Voltaje de funcionamiento	3,3 V
Voltaje de entrada (límite)	21 V
Corriente de CC por pin de E/S	7 mA
Velocidad de reloj	48 MHz
Memoria Flash de la CPU	256 KB
SRAM	32 KB
Pines digitales de entrada / salida	14
Pines PWM	11 (2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 16 / A2, 17 / A3, 19 / A5)
Protocolos de comunicación	*UART, **SPI, ***I2C
Pines de entrada analógica	8 (ADC 8/10/12 bits)
Pines de salida analógica	1 (DAC de 10 bits)
Interrupciones externas	Todos los pines digitales (los pines analógicos también se pueden usar como pines de interrupt, pero tendrán números de interrupción duplicados)
LED_BUILTIN	13
USB	Nativo en el procesador SAMD21
IMU	LSM6DS3 (hoja de datos)

Largo x Ancho	45 x 18 mm
Peso	5 gr (con cabeceras)

*UART: Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

**ISP: Serial Port Interface.

***I2C: Inter-Integrated Circuit

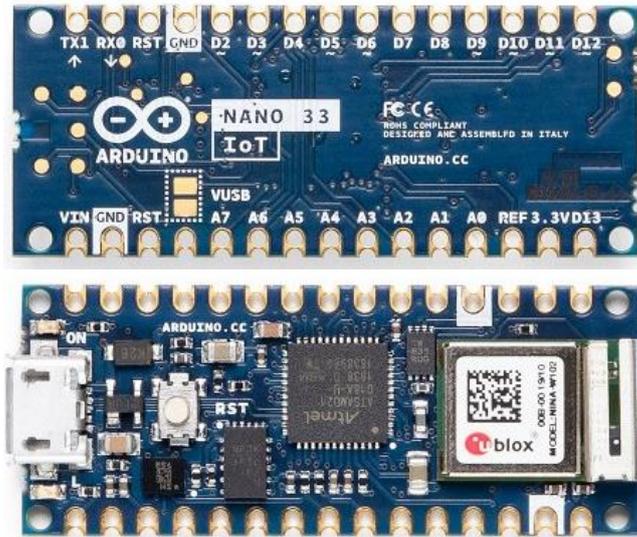


Figura 28. Microcontrolador SAMD21 Cortex®-M0+ MCU ARM (Arduino Nano 33 (IoT)).
Fuente: Arduino.

El microcontrolador en el Arduino Nano 33 IoT funciona a 3,3V, lo que significa que no se debe aplicar más de 3,3V a sus pines digitales y analógicos. No tiene conector de batería, ni cargador. Se puede conectar cualquiera batería externa siempre y cuando se respete los límites de voltaje de la placa. El pin V_{IN} puede ser usado para alimentar la placa con una fuente de voltaje DC. Si se alimenta a través de esta clavija, la fuente de alimentación USB se desconecta. La salida de a 5V de la placa para que funcione, es necesario hacer un cortocircuito en el puente VBUS de la parte posterior de la placa.

El nano 33 IoT tiene 14 pines digitales, 8 analógicos y 11 son PWM (Pulse Width Modulation) que permiten generar salidas analógicas desde pines digitales.

A diferencia de otras placas Arduino Nano, los pines A4 (SDA) y A5 (SCL) tienen un pull up interno y están predeterminados para ser usados como un bus I2C, por lo que no se recomienda su uso como entradas analógicas. Además, puede conectarse en protocolo UART (pines Rx y Tx) y en protocolo SPI (pines 10 (CS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK)).

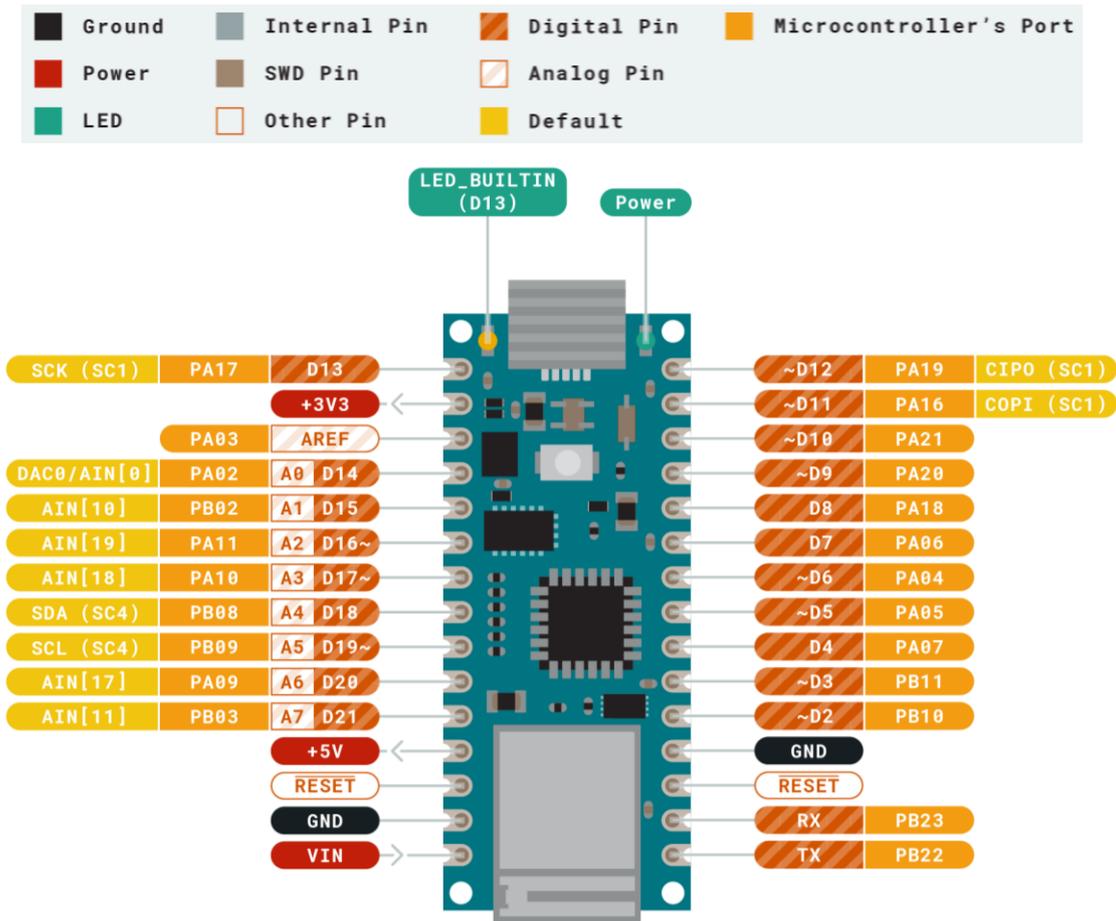


Figura 29. Diagrama de pines de la placa Arduino Nano 33 (IoT). Fuente: [Arduino](https://www.arduino.cc/).

El Arduino Nano 33 IoT tiene un consumo aproximado de 110 mA cuando se encuentra en estado de envío de información mediante Wifi. Para la opción de BLE tiene un consumo bastante menor, tan solo 47 mA [210].

6.2.1. Software.

Para empezar a programar la placa Arduino es necesario descargar un IDE (entorno de desarrollo integrado). El IDE es un conjunto de herramientas de software que permiten desarrollar y grabar todo el código necesario para hacer que el sistema creado funcione correctamente. El IDE de Arduino permite escribir, depurar, editar y grabar los programas (llamados "sketches" en el mundo Arduino) de una manera sencilla [211].

El IDE de Arduino es una aplicación multiplataforma (Windows, macOS, Linux) que está escrita en el lenguaje de programación Java. Aunque, admite los lenguajes C y C ++ utilizando reglas especiales de estructuración de códigos [212]. Se utiliza para escribir y cargar programas en placas compatibles con Arduino, pero también, con la ayuda de

núcleos de terceros, se puede usar con placas de desarrollo de otros proveedores. El IDE suministra una biblioteca de software del proyecto Wiring, que proporciona muchos procedimientos comunes de entrada y salida. Las bibliotecas proporcionan funcionalidad adicional en los programas, como manipular datos o trabajar con hardware. Algunas bibliotecas se incluyen con el software Arduino, otras se pueden descargar de una variedad de fuentes o a través del Administrador de la biblioteca [200], [201].

El entorno IDE se distribuye principalmente en tres secciones: la barra de menús, el editor de texto y el panel de notificaciones.

- Barra de menú. En esta sección se pueden realizar las siguientes acciones:
 - Verificar: se encarga de verificar la sintaxis del programa.
 - Cargar: carga el código en la placa de Arduino.
 - Nuevo: abre un documento en blanco para comenzar un nuevo programa.
 - Abrir: para abrir proyectos en otros directorios o rutas.
 - Guardar: guarda el programa en el directorio que especificado.
 - Monitor serial: muestra información en el monitor de lo que esté monitorizando la placa de Arduino.
- Editor de programación: Es la parte principal de Arduino IDE, donde se programan las líneas de código.
- Notificaciones: Conocido normalmente por consola, es la parte de depuración donde se notifica al programador sobre errores de sintaxis, comunicación, etc. [215].

6.3. Sensores.

Para llevar a cabo el seguimiento del proceso de depuración que ocurre en una planta con sistemas de depuración SDN, se propone medir diferentes parámetros en distintos puntos del sistema (digestor anaerobio, humedales, laguna y arqueta final) mediante sensores. Se considera utilizar un microcontrolador diferente para medir el conjunto de variables del entorno y el conjunto de variables propias del sistema por cuestión de cableado.

6.3.1. Variables del entorno.

La importancia de medir las variables del entorno radica, principalmente, en poder utilizar los recursos energéticos disponibles en la zona para alimentar el sistema, ya que este tipo de explotaciones ganaderas suelen encontrarse en zonas de difícil acceso. Esto podría ser por medio del uso de la energía solar fotovoltaica o utilizando la energía geotérmica de baja entalpía para mantener la temperatura del reactor constante. Por ello, es importante monitorizar parámetros como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación o la velocidad del viento incidente en la zona.

6.3.1.1. *Temperatura ambiental, humedad relativa y presión atmosférica.*

Como se ha expresado a lo largo de la memoria, la temperatura es uno de los factores más importantes para el proceso de la depuración de aguas mediante sistemas naturales. Tanto en el reactor como en la laguna y humedales, ésta tiene un papel clave en el desarrollo del proceso.

Se propone utilizar el sensor BME280, este sensor de precisión puede medir la humedad relativa de 0 a 100% con una precisión del $\pm 3\%$, la presión barométrica de 300Pa a 1100 hPa con una precisión absoluta de ± 1 hPa y la temperatura de -40 ° C a 85 ° C con una precisión de ± 1.0 ° C, también puede estimar la altitud con una precisión de ± 1 metro. [216], [217]. Se puede adquirir por aproximadamente 15 € del fabricante Adafruit o incluso por menos en Aliexpress. En la tabla, se muestran las especificaciones técnicas.

Tabla 20. Especificaciones técnicas sensor BME280. Fuente: [datasheet_bme280](#).

Característica	Valor
V_{DD}	1,71 – 3,6 V
V_{DDIO}	1,2 – 3,6 V
Protocolo de comunicación	I2C – SPI
Consumo de corriente medio	1,8 μ A a 1 Hz (H, T) 2,8 μ A a 1 Hz (P, T) 3,6 μ A a 1 Hz (H, P, T)
Consumo de corriente medio en modo de reposo	0,1 μ A
Sensor de temperatura	
Temperatura	-40 ° C – 85 ° C (± 1 ° C)
Máxima precisión	0 – 65 ° C
Ruido RMS*	0,005 ° C
Sensor de humedad	
Tiempo de respuesta	($\tau_{63\%}$): 1 s
Tolerancia de precisión	$\pm 3\%$ de humedad relativa
Histéresis:	$\leq 2\%$ de humedad relativa
Sensor de presión:	
Presión	300 Pa – 1100 HPA (± 1 hPa)
Ruido RMS	0,2 Pa
Error de sensibilidad	$\pm 0,25\%$
Desviación del coeficiente de temperatura	$\pm 1,5$ Pa / K

* ROOT MEAN SQUARE (error medio cuadrático)

Este sensor presenta diagrama de bloques presentado en la Figura, donde se observa que tiene dos pines de alimentación diferentes:

- V_{DD}: es la fuente de alimentación principal para todos los bloques funcionales analógicos y digitales internos.
- V_{DDIO}: es un pin de fuente de alimentación independiente que se utiliza para el suministro de la interfaz digital

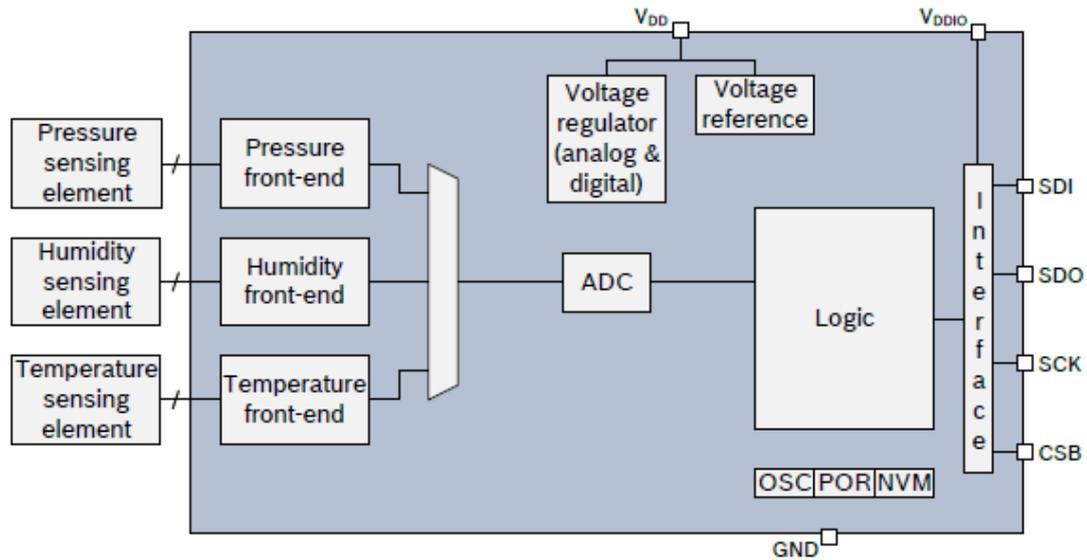


Figura 30. Diagrama de bloques sensor BME280.

Tiene incorporado un generador de reinicio de encendido (Power Of Reset, POR), que restablece la parte lógica y los valores de registro después de que V_{DD} y V_{DDIO} alcancen sus niveles mínimos. No se puede mantener ningún pin de interfaz (SDI, SDO, SCK o CSB) en un nivel lógico alto cuando V_{DDIO} está apagado. Tal configuración puede dañar permanentemente el dispositivo debido a un flujo de corriente excesivo a través de los diodos de protección ESD.

El BME280 ofrece tres modos de sensor: modo de suspensión, modo forzado y modo normal. Estos se pueden seleccionar mediante el ajuste de modo. Los modos disponibles son:

- Modo de suspensión: sin operación, todos los registros accesibles, potencia más baja, seleccionada después del inicio
- Modo forzado: realice una medición, almacene los resultados y vuelva al modo de suspensión
- Modo normal: ciclo perpetuo de medidas y periodos inactivos.

En el mercado existen diferentes fabricantes de este módulo, pero en este caso se utiliza el módulo de Adafruit, se muestra en la figura.

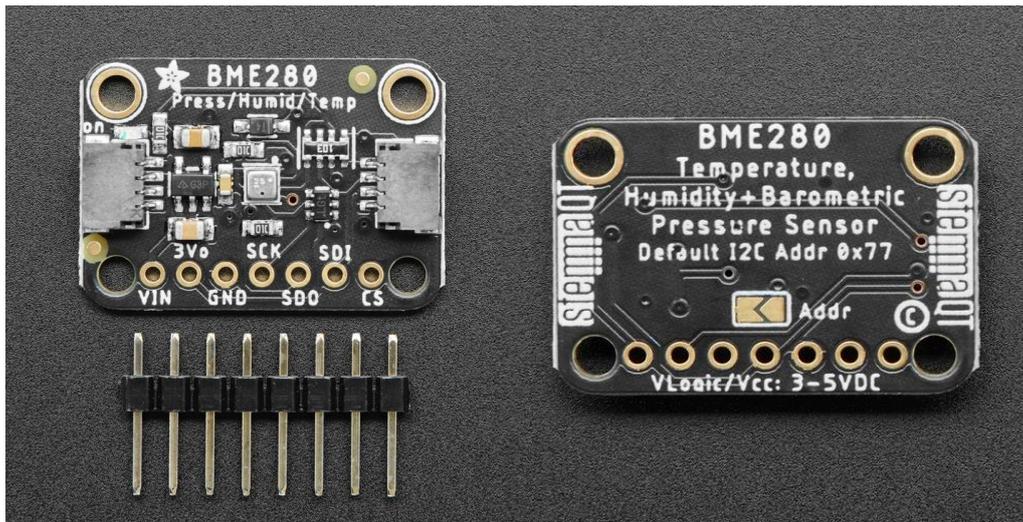


Figura 31. Módulo sensor BME280. Fuente: <https://www.adafruit.com/product/2652>.

El sensor de montaje en superficie está soldado a una PCB hecha a medida y viene con un regulador de 3,3V y cambio de nivel para que pueda ser usado con un microcontrolador lógico de 3 V o 5 V como Arduino sin preocupaciones. Consume menos de 1 mA durante las mediciones y solo 5 μ A durante el standby. Este bajo consumo de energía permite la implementación en dispositivos impulsados por baterías como móviles. [218]

Para la comunicación con el microcontrolador puede utilizarse el protocolo de comunicación I2C o SPI. La comunicación mediante el protocolo I2C ofrece una conexión muy sencilla, conectando los pines de la siguiente forma: se conecta el pin Vin a la salida de Vin en el Arduino y GND a tierra. Seguidamente se conectan los pines que se utilizan para la comunicación I2C. Hay que tener en cuenta que cada placa Arduino tiene diferentes pines I2C que deben conectarse en consecuencia. En las placas Arduino Nano 33 (IoT) el SDA (data line) y SCL (clock line) están en los encabezados A4 y A5 respectivamente. Se ha utilizado este protocolo de comunicación.[219]

Tabla 21. Conexión sensor BME280 en protocolo I2C.

BME280 (I2C)	Arduino Nano 33 (IoT)
Vin	Vin
GND	GND
SCK (Pin SCL)	A5
SDI (pin SDA)	A4

En el caso de querer conectar varios sensores y evitar que se puedan producir colisiones de direcciones, se recomienda utilizar el protocolo SPI. A continuación, se muestra el conexionado correspondiente.

Tabla 22. Conexión sensor BME280 en protocolo SPI.

BME280 (SPI)	Arduino Nano 33 (IoT)
Vin	Vin
GND	GND
SCK (reloj SPI)	Pin 13
SDO (MISO)	Pin 12
SDI (MOSI)	Pin 11
CS (Selección de chip)	Pin 10

6.3.1.2. Radiación ultravioleta.

Al igual que la temperatura, la radiación incidente es un factor determinante en el desarrollo del proceso de depuración de aguas mediante SDN. Para medir la radiación ultravioleta se ha utilizado el sensor ML8511, siendo este un sensor de luz ultravioleta fácil de usar. Funciona mediante la salida de una señal analógica en relación con la cantidad de luz radiación ultravioleta detectada. Está equipado con un amplificador interno, que convierte la fotocorriente en voltaje según la intensidad de los rayos UV. Trabaja en un rango 280 a 390 nm de longitud de onda. En este rango se encuentra parte del espectro UV-B (onda media) y la mayor parte del espectro UV-A (onda larga). Se produce una tensión analógica que está linealmente relacionada con la intensidad UV medida ($m \cdot W/cm^2$). Esta señal analógica puede ser conectada a un microcontrolador para ser convertido por un Convertidor Analógico/Digital (ADC). En el modo de standby, la corriente de espera típica es de $0,1 \mu A$ [220]. Se puede adquirir por menos de 3 € en Aliexpress.



Figura 32. Sensor GY-ML8511 Adafruit.

En la siguiente tabla se exponen las características técnicas del sensor.

Tabla 23. Características técnicas del sensor GY-ML8511. Fuente: [datasheet_ML8511](#).

Característica	Valor
Voltaje de suministro (V_{DD}) $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$	-0,3 a +4,6 V
Voltaje de entrada (V_I) $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$	-0,3 a +4,6 V
Corriente de salida de cortocircuito (I_{OS}) $T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$	5 mA
Disipación de potencia	30 mW
Rango de trabajo de temperatura	-20 – 75 $^\circ\text{C}$
Rango longitud de onda	280 – 390 nm

A continuación, se muestra el diagrama de bloques del sensor. Este tiene un fotodiodo sensible a UV-A y UV-B. Además, tiene un amplificador operacional interno integrado que convertirá la fotocorriente en salida de voltaje dependiendo de la intensidad de la luz UV. La salida es siempre en forma de voltaje analógico. A través de la salida de voltaje, es fácil interactuar con microcontroladores externos y ADC. [220]

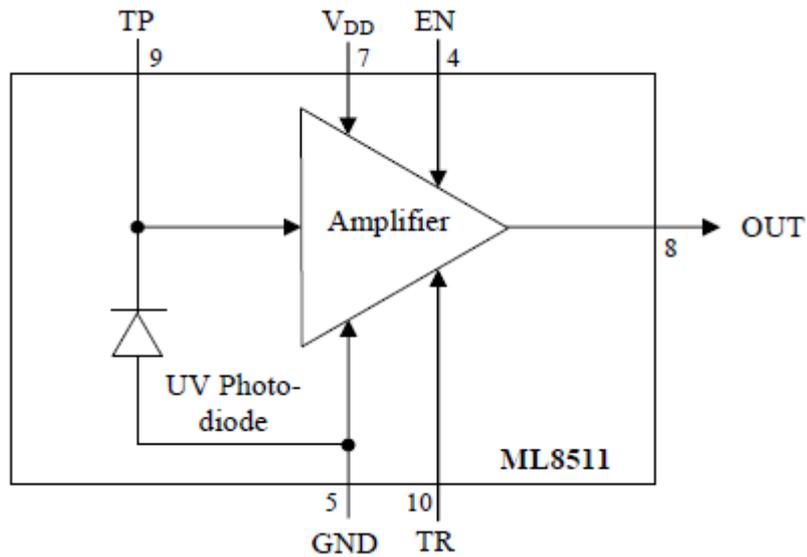


Figura 33. Diagrama de bloques sensor ML8511.

Tabla 24. Configuración pines sensor ML8511.

Pin	Símbolo	Función
7	VDD	Tensión de alimentación
5	GND	Toma de tierra
4	EN	Pin activo de alta habilitación (Alto: activo, Bajo: en espera)
8	OUT	Salida
9	TP	Pin de prueba. No se conecta.
10	TR	Voltaje de referencia interna

Las características se extraen entre el voltaje de salida del sensor con respecto a la intensidad UV (mW / cm^2) en el suministro constante de V_{DD} . Las curvas en diferentes colores representan el funcionamiento del sensor en los diferentes rangos de temperaturas.

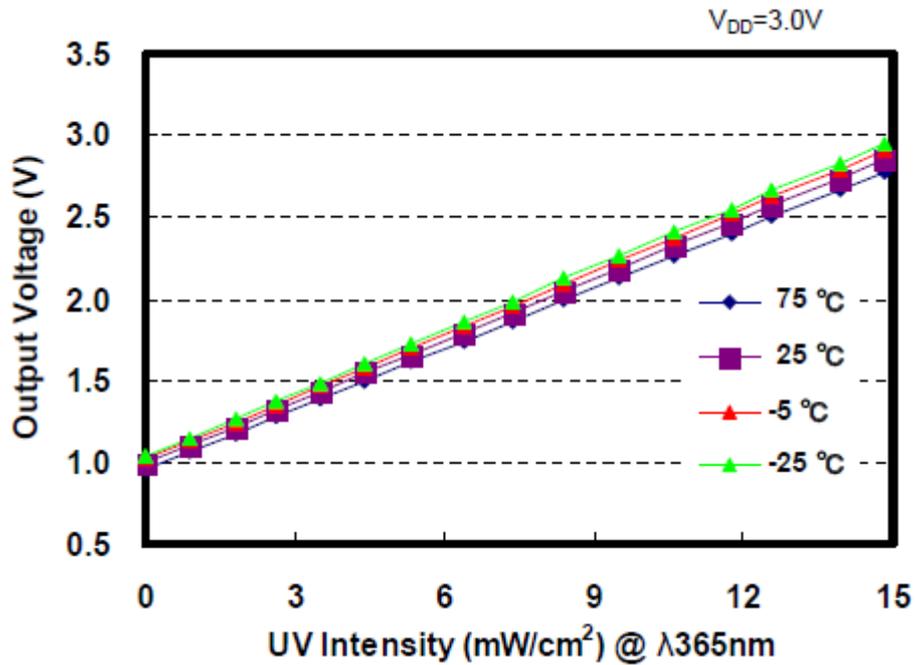


Figura 34. Tensión de salida características de intensidad UV

La conexión de este sensor resulta sencilla de implementar, se conectará el pin V_{in} del sensor al pin V_{in} del microcontrolador, el pin GND del sensor con el pin GND del microcontrolador y por último el pin OUT del sensor a una de las salidas analógicas que se tenga disponible en el Arduino, en este caso se ha escogido la salida A0.

Tabla 25. Conexión sensor ML8511 con microcontrolador.

ML8511	Arduino Nano 33 (IoT)
V_{in}	V_{in}
GND	GND
OUT	A0

6.3.1.3. Intensidad lumínica.

La luz es una fuente indispensable para la fotosíntesis de las plantas, pero también para su crecimiento y desarrollo. En [221] se evaluó la influencia de la intensidad de la luz en el crecimiento y floración de plantas ubicadas en humedales artificiales, demostrando que en los meses de mayor de intensidad lumínica se alcanzó una tasa de crecimiento hasta un 9,5% mayor que en los meses de menor intensidad lumínica. En [162], se obtiene que uno de los factores que más afecta a las concentraciones de los humedades así como a la eliminación de cargas másicas, es la cobertura vegetal, es decir, los meses

en los que hay una mayor vegetación en los humedales, coincidiendo con los meses de primavera – verano. El efecto sombra que ejercen las plantas de los humedales favorece la eliminación de la biomasa algal, favoreciendo también la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y fósforo [222]. Demostrando ser este, un factor importante en el proceso de la depuración de aguas mediante SDN.

Para medir este parámetro se ha utilizado el sensor TSL2561, este sensor de luminosidad es un sensor de luz digital avanzado, es decir, que transforma la intensidad de la luz en una salida de señal digital. Se puede adquirir por menos de 3€ en Aliexpress.

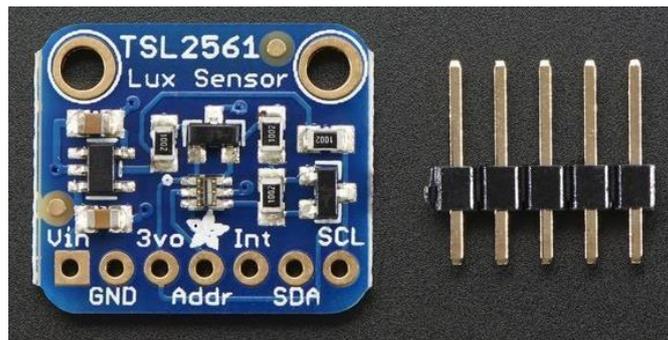


Figura 35. Sensor TSL2561 Adafruit.

Presenta las siguientes especificaciones:

Tabla 26. Especificaciones técnicas sensor TSL2561.

Característica	Valor
V _{DD}	2,7 – 3,8 V
Temperatura de trabajo	-40 – 85 °C
Rango trabajo intensidad luminosa	0,1 – 40000 Lux
Corriente de salida digital	-1 mA – 20 mA
Frecuencia máxima de transmisión:	400 KHz
Protocolo	I2C

El sensor integra un fotodiodo de banda ancha (visible más infrarrojo) y un fotodiodo de respuesta infrarroja en un solo circuito integrado CMOS (Semiconductor complementario de óxido metálico), capaz de proporcionar una respuesta casi fotópica en un rango dinámico efectivo de 20 bits (resolución de 16 bits). Lo que significa que se puede medir por separado la luz infrarroja, de espectro completo o visible humana. El sensor tiene una interfaz digital (I2C) y se puede seleccionar una de las tres direcciones

para tener hasta tres sensores en una misma placa, cada uno con una dirección i2c diferente. El consumo de corriente es extremadamente bajo, aproximadamente 0,5 mA cuando se detecta activamente, y menos de 15 μ A cuando se está en modo de standby. Dos ADC integrados convierten las corrientes de los fotodiodos en una salida digital que representa la irradiancia medida en cada canal, como se observa en el diagrama de bloques de la Figura.

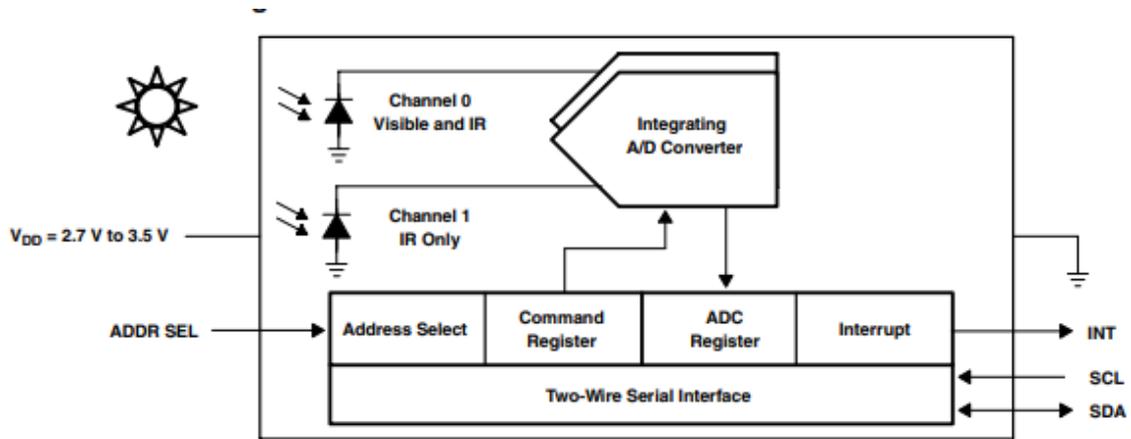


Figura 36. Diagrama de bloques sensor TSL2561. Fuente: [datasheet_TSL2561](#)

Tabla 27. Configuración pines sensor TSL2561.

Pin	Símbolo	Función
7	ADDR SEL	Selección de dirección I2C (tres direcciones)
5	GND	Toma de tierra
4	INT	Salida que indica cuando el nivel de luz ha cambiado
8	SCL	Línea de reloj
9	SDA	Línea de datos
10	V _{DD}	Tensión de alimentación

La integración de ambos canales ocurre simultáneamente. Una vez completado el ciclo de conversión, el resultado de la conversión se transfiere a los registros de datos del Canal 0 y del Canal 1, respectivamente. Las transferencias tienen doble búfer para garantizar que se mantenga la integridad de los datos. Después de la transferencia, el dispositivo comienza automáticamente el siguiente ciclo de integración. En consecuencia, el dispositivo TSL2561 se puede conectar fácilmente a un microcontrolador o controlador integrado sin la necesidad de utilizar circuitos externos para el acondicionamiento de señales [216, 217].

A la hora de programar el sensor habrá que configurar el tiempo de ganancia e integración. Pudiendo tener una ganancia de 0 (sin ganancia adicional, buena en situaciones de mucha luz) o una ganancia de 16 que aumentará la luz considerablemente en situaciones de poca luz. También se puede cambiar el tiempo de integración, que es el tiempo durante el que recopilará datos de luz. Cuanto mayor sea el tiempo de integración, más precisión tiene el sensor al recoger muestras de luz. En la versión 2.0 del sensor, hay una opción de ganancia automática que es útil cuando se mide en situaciones de iluminación mixta. Esto habilitará o desactivará automáticamente la ganancia dependiendo del nivel de luz. Se puede configurar para diferentes rangos de ganancia / tiempo de integración para detectar rangos de luz desde 0.1 hasta 40,000 Lux [225].

Tabla 28. Caracterización de los valores de ganancia y tiempo de integración.

Ganancia	<ul style="list-style-type: none"> - 1x – usar en condiciones de luz brillante para evitar la saturación del sensor - 16x – usar en condiciones de poca luz para aumentar la sensibilidad - Auto-gain – cambia automáticamente entre 1x y 16x
Tiempo de integración	<ul style="list-style-type: none"> - 13 ms – Rápido pero poca resolución - 101 ms – Velocidad y resolución media - 402 ms – Lento y resolución alta

La conexión de este sensor con el microcontrolador de Arduino es bastante sencilla, al tratarse de un sensor con interfaz en I2C. Se conecta el pin V_{IN} del sensor al V_{IN} del microcontrolador, el pin GND al pin GND, el pin SDA y el pin SLC se conectarán a los pines A4 y A5 de la placa, respectivamente.

Tabla 29. Conexión sensor TSL2561 con Arduino Nano 33 (IoT).

Sensor TSL2561	Arduino Nano 33 (IoT)
V_{IN}	V_{IN}
GND	GND
SLC	A5
SDA	A4



Figura 38. Sensores y microcontrolador instalados en una caja estanca de protección IP65.

Por lo que se debe colocar junto con el microcontrolador en un lugar fresco y alejado de la luz solar. También se observó que el sensor TSL2561 presenta saturación en condiciones de alta intensidad lumínica.

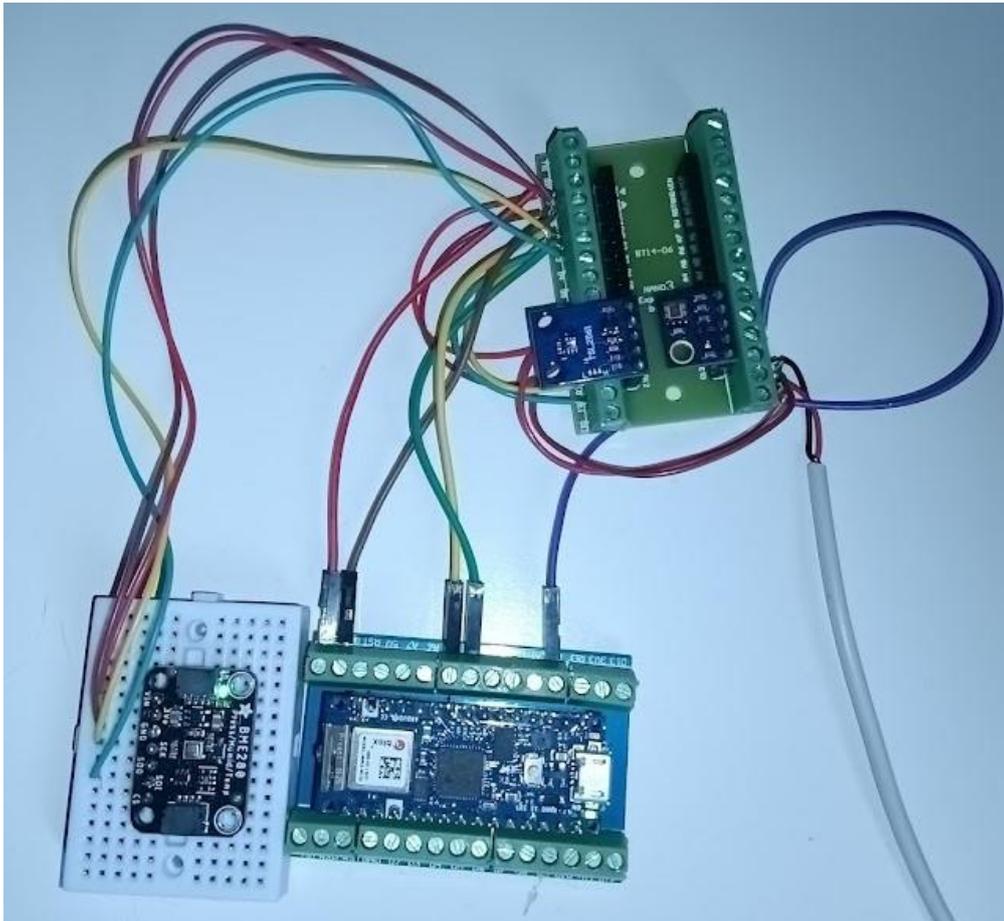


Figura 39. Conexión de los sensores BME280, TSL2561 y ML8511 a Arduino Nano 33 (IoT).

6.3.2. Variables propias del proceso.

Parametrizar y controlar la operación de los SDN, en este caso aplicados a explotaciones ganaderas, resulta fundamental para conocer mejor el proceso que se lleva a cabo en cada etapa, pudiendo determinar así su rendimiento, factores inhibidores del proceso o factores potenciadores del mismo. Por ello, se propone medir diversos parámetros como pueden ser: temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, potencial redox, concentración de CO₂ entre otros.

6.3.2.1. Temperatura.

La temperatura interna de las cámaras de los biodigestores es un factor determinante para el desarrollo del proceso anaerobio, como se ha indicado anteriormente. Así como la temperatura a la que se encuentra el agua de los humedales y lagunas facultativas, ya

que de esta dependerá en gran medida el rendimiento en el proceso de depuración y formación de biogás.

Por ello, se propone utilizar el módulo de temperatura EZO™ RTD (Resistance Temperature Detector) de Atlas Scientific. Este circuito integrado registra mediciones de gran precisión a través de una sonda genérica de temperatura. El circuito EZO-RTD puede funcionar con cualquier clase de sondas RTD de platino de 2, 3 o 4 hilos y tiene un rango de detección de -126 ° C a +1254 ° C. El precio de este módulo es de 29,99 \$.



Figura 40. EZO RTD Temperature. Fuente: Atlas Scientific.

Tiene por defecto una interfaz en protocolo UART aunque se puede pasar al protocolo I2C. Además, este módulo no necesita de aislamiento eléctrico. A continuación, se muestran las especificaciones técnicas. [226], [227]

Tabla 30. Especificaciones técnicas sensor EZO RTD Temperature de Atlas Scientific. Fuente: [datasheet RTD](#).

Característica	Valor
V _{cc}	3,3 – 5,5 V
Rango	-126 – 1254 ° C
Parámetros recomendados	-40 – 85 ° C
Resolución	0,001
Precisión	+/- (0,1 + 0,0017 x ° C)
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Sondas compatibles	Sondas PT-100 o PT-1000
Calibración	En un solo punto
Salida de temperatura	° C, K o ° F
Protocolo	UART, I2C (102 (0x66))
Datalogger integrado	50 lecturas
Formato de datos	ASCII
Dimensiones	13,97mm x 20,16mm
Peso	1,77 gr

Gracias a la integración del sistema de adquisición de datos, si se producen cortes de alimentación, el sensor podrá seguir almacenando hasta 50 lecturas.

A continuación se muestran los consumos propios del sensor según el modo en el que se encuentre.

Tabla 31. Consumos de corriente máximos y mínimos.

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
5V	ON	16 mA	15,4 mA	0,4 mA
	OF	15,3 mA	15 mA	
3V	ON	14,3 mA	13,8 mA	0,09 mA
	OF	14 mA	13,6 mA	

En el momento de hacer la calibración el fabricante recomienda hacerla usando el protocolo que viene por defecto (UART), una vez realizada se puede pasar al protocolo I2C si se desea, permaneciendo la calibración inalterada. La calibración se puede realizar a cualquier valor, un método simple consiste en calibrar la sonda en agua hirviendo. También se recomienda recalibrar cada tres años.

El conexionado del módulo con el microcontrolador es sencillo tanto para el protocolo UART como para el I2C.

Tabla 32. Conexión sensor EZO RTD Temperature a microcontrolador en protocolo UART.

Ezo RTD (UART)	Microcontrolador
V_{cc}	V _{in}
GND	GND
TX	RX
RX	TX

Tabla 33. Conexión sensor EZO RTD Temperature a microcontrolador en protocolo I2C.

Ezo RTD (I2C)	Microcontrolador
V_{cc}	V _{in}
GND	GND
SDA	A4
SCL	A5

Los pines PRB y PGND para ambos protocolos se conectan a la sonda para medir la temperatura, sin importar qué cable de la sonda de temperatura esté conectado a los dos pines de esta.

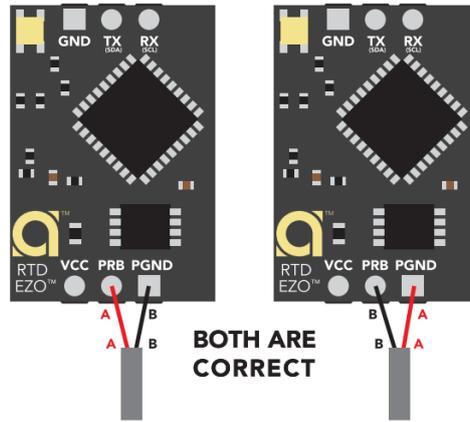


Figura 41. Conexión con sonda.

Las sondas aptas para el módulo son sondas elaboradas en platino de alta pureza con cable de caucho de silicona grueso. La punta de acero inoxidable A304 conduce rápidamente el calor del entorno al sensor de platino en el interior, tomando lecturas de baja latencia y alta precisión.



Figura 42. Sonda PT-1000 compatible con módulo EZO RTD Temperature.

El módulo es capaz de detectar automáticamente que modelo de sonda es el que se está utilizando. Para conectar la sonda al circuito integrado es necesario utilizar un adaptador BNC hembra.

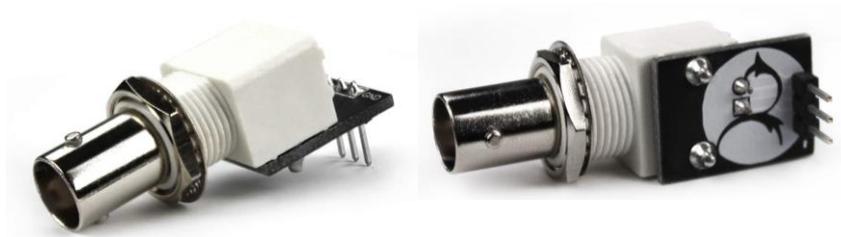


Figura 43. Conector BNC hembra.

6.3.2.2. Conductividad.

La conductividad eléctrica mide la capacidad de un material para transmitir una corriente eléctrica a una cierta distancia a través de él. Esta medida puede utilizarse para monitorear la cantidad de nutrientes, sales o impurezas dentro del agua. Por lo que puede ser apropiado utilizarla en las diferentes etapas de un sistema SDN para monitorizar la cantidad de nutrientes que se encuentran durante el proceso de depuración. De esta forma, se convierte en una medida fundamental para tener en cuenta.

Al igual que para medir la temperatura, y debido a la buena relación calidad – precio, se propone utilizar un módulo para medir la conductividad del fabricante Atlas Scientific. En concreto, el EZO™ Conductivity Circuit (EZO EC), este circuito integrado, además de ser capaz de medir la conductividad del agua, es capaz de medir la salinidad así como la cantidad de STD en ppm. Esta medida indicará todos los minerales disueltos, sales, cloruros, metales, compuestos orgánicos y otros contaminantes que se hallen en el agua. Lo que dará una visión clara de los componentes del agua presentes en cada una de las etapas de proceso de depuración, incluso antes de introducir los purines en el digestor para conocer la composición de la materia orgánica que se va a procesar [228]. El módulo tiene un precio de 61,99 \$.



Figura 44. EZO™ Conductivity Circuit. Fuente: Atlas Scientific

El circuito EZO – EC presenta las especificaciones técnicas mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 34. Especificaciones técnicas EZO-EC. Fuente: [Datasheet EZO_EC](#)

Característica	Valor
V _{cc}	3,3 – 5 V
Lecturas	<ul style="list-style-type: none"> - Conductividad (μS/cm) - Salinidad (PSU) - STD (ppm) - Densidad relativa (agua de mar solo)
Rango de lectura	<ul style="list-style-type: none"> - Conductividad: 0,07 – 500000 μS/cm - Salinidad: 0 – 42 PSU
Precisión	± 2 %
Rango operacional recomendado	-60 – 150 °C
Resolución*	A escala (disminuye a medida que aumentan los valores de conductividad)
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Sondas compatibles	Modelos K-0.1, K-1.0 y K-10
Calibración	De 2 o 3 puntos
Protocolo	UART, I2C (100 (0x64))
Formato de datos	ASCII
Dimensiones	13,97mm x 20,16mm
Peso	1,77 gr

* el circuito genera lecturas de conductividad donde los primeros 4 dígitos son válidos y los otros están configurados en 0. Esto excluye las lecturas de conductividad que son inferiores a 9,99. En ese caso, solo se emitirán 3 dígitos de conductividad [229].

A continuación se muestran los consumos propios del sensor según el modo en el que se encuentre operando.

Tabla 35. Consumos de corriente máximos y mínimos.

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
5V	ON	50 mA	18,14 mA	0,7 mA
	OF	45 mA	15,64 mA	
3V	ON	35 mA	16,85 mA	0,4 mA
	OF	34 mA	15,85 mA	

Según el tipo de sonda utilizado se podrá medir un rango de valores determinado para conductividad, salinidad y STD. Los valores se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 36. Tipos de sondas y características para EZO-EC

Sonda	Conductividad	Salinidad (ppt)	SDT (ppm)
K-0.1 (electrodo de grafito)	0,07– 50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0 – 33	0 – 25000
K-1.0 (electrodo de grafito)	5 – 200000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	0 – 42	2 – 100000
K-10 (electrodo de platino)	10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 1 S/cm	0 – 42	5 – 500000

Dentro de la sonda de conductividad, se colocan dos electrodos uno frente al otro, y se aplica un voltaje en CA, haciendo que los cationes se muevan al electrodo cargado negativamente, mientras que los aniones se mueven al electrodo positivo.



Figura 45. Sonda K-10.

En cuanto a la calibración del módulo, al igual que para el sensor de temperatura, el fabricante recomienda hacerla en el protocolo establecido por defecto (UART) y si es necesario configurarlo posteriormente con el protocolo I2C. En primer lugar, se conecta la sonda y se hace una calibración en seco siguiendo las indicaciones del fabricante. Posteriormente, según la sonda que se haya elegido se deberá usar un tipo solución determinado para realizar la calibración en un punto o en dos puntos. Las soluciones son de cloruro de potasio.

Tabla 37. Soluciones recomendadas para calibrar sensor de conductividad según modelo de sonda.

Sonda	Punto bajo	Punto alto	Porcentajes
K-0.1	84 μ S	1413 μ S	- Agua: 90% - KCl: 10%
K-1.0	12880 μ S	80000 μ S	- Agua: 70% - KCl: 30%
K-10	12880 μ S	150000 μ S	- Agua: 70% - KCl: 30%

Además, en el momento de la calibración hay que tener en cuenta la compensación de temperatura. La temperatura tiene un efecto significativo en las lecturas de conductividad. El circuito de conductividad la tiene establecida en 25 ° C como valor predeterminado, este valor no se debe modificar.

La conexión del módulo al microcontrolador se realiza de la misma forma que para el EZO RDT, tanto en el protocolo UART como en el I2C.

Tabla 38. Conexión EZO-EC en protocolo UART.

Ezo EC (UART)	Microcontrolador
V_{cc}	Vin
GND	GND
TX	RX
RX	TX

Tabla 39. Conexión EZO-EC en protocolo I2C.

Ezo EC (I2C)	Microcontrolador
V_{cc}	Vin
GND	GND
SDA	A4
SCL	A5

Este módulo es un dispositivo muy sensible, lo que le otorga una gran precisión. Sin embargo, esto hace que sea propenso a sufrir ruido eléctrico proveniente de otros sensores, sondas, válvulas, etc. Interfiriendo con las lecturas de conductividad. Si esto sucede es probable ver como las lecturas fluctúan rápidamente provocando lecturas

inexactas. Para evitar este problema el fabricante recomienda que esté eléctricamente aislado. Para ello, recomiendan utilizar el Basic EZO™ Inline Voltage Isolator.

6.3.2.2.1. Basic EZO™ Inline Voltage Isolator.

Este circuito integrado funciona como un aislador eléctrico que puede generar una potencia aislada de hasta 150 mW e incorpora dos canales de datos bidireccionales. Tiene un precio de 19,99 \$.

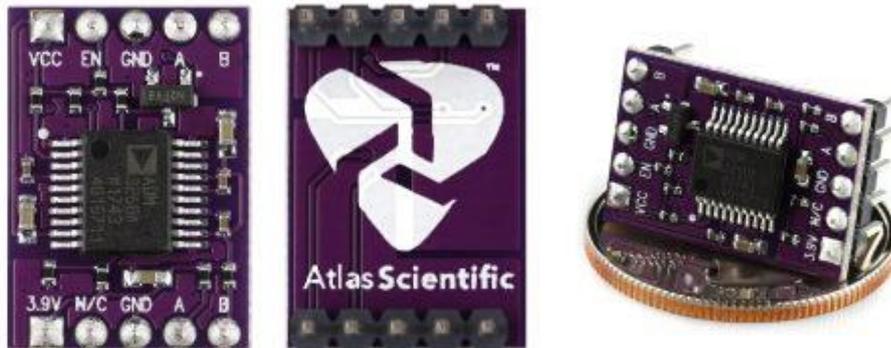


Figura 46. Aislador eléctrico Basic EZO™ Inline Voltage Isolator. Fuente: Atlas Scientific.

Los dos canales de datos tienen una resistencia pull up de 4,7k Ω tanto en las líneas aisladas como en las no aisladas (R1, R2, R3 y R4). El voltaje de salida se establece usando un divisor de voltaje (R5, R6 y R7) esto produce un voltaje de 3,9V independientemente de su voltaje de entrada. Hay que tener en cuenta que la tierra aislada es diferente de la no aislada por lo que no se deben conectar juntas [226, 227].

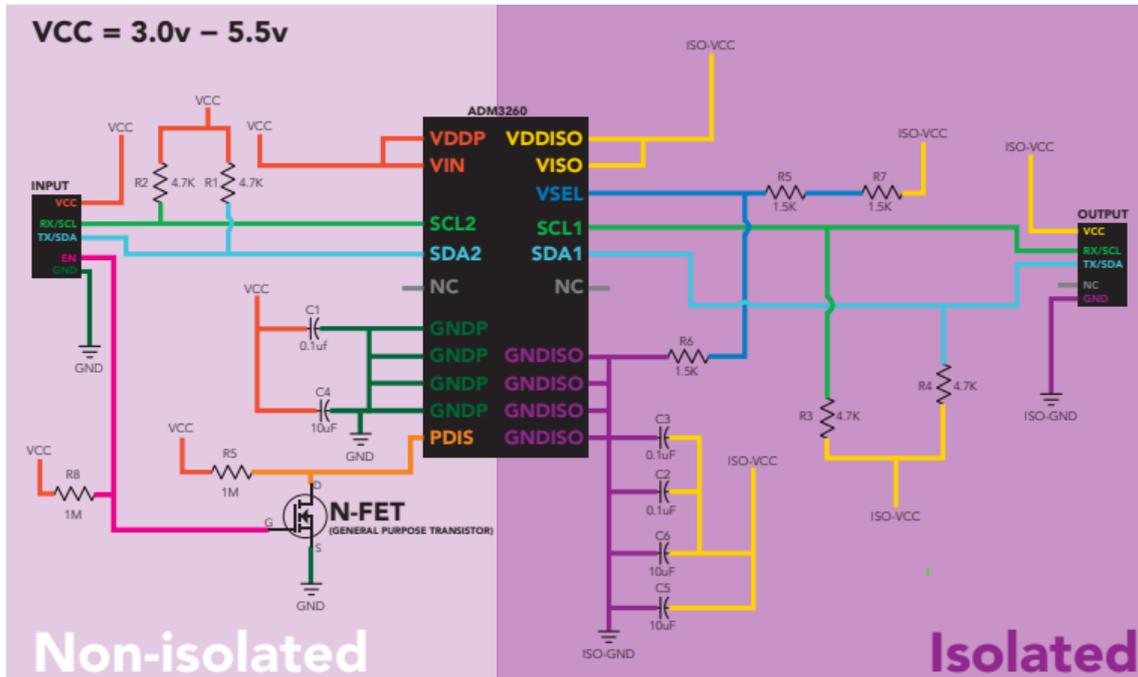


Figura 47. Diagrama de bloques Basic EZO. Fuente: Atlas Scientific.

A continuación, se muestra las especificaciones técnicas y el consumo de corriente correspondiente.

Tabla 40. Especificaciones técnicas EZO Basic Inline Voltage Isolator. Fuente: [Datasheet EZO Basic](#)

Característica	Valor
Voltaje entrada	3 – 5 V
Voltaje salida	3,9 V ± 0,7
Protocolo	UART, I2C y *SMBus
Consumo corriente	- 5 V – 15mA - 3,3 V – 20 mA
Ahorro de energía	PIN EN – Off
Velocidad máxima de datos	1 MHz

La siguiente tabla muestra cuánta corriente se consumirá cuando el aislador de voltaje en línea se conecte a un circuito EZO.

Tabla 41. Consumo de corriente del aislador eléctrico según tipo de circuito.

	5V	3V
+ EZO™ Conductividad	82 mA	97 mA
+ EZO™ Ph	57 mA	87 mA
+ EZO™ ORP	58 mA	84 mA
+ EZO™ Oxígeno Disuelto	53 mA	84 mA

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de cómo sería la conexión al microcontrolador y a un circuito integrado con su sonda correspondiente.

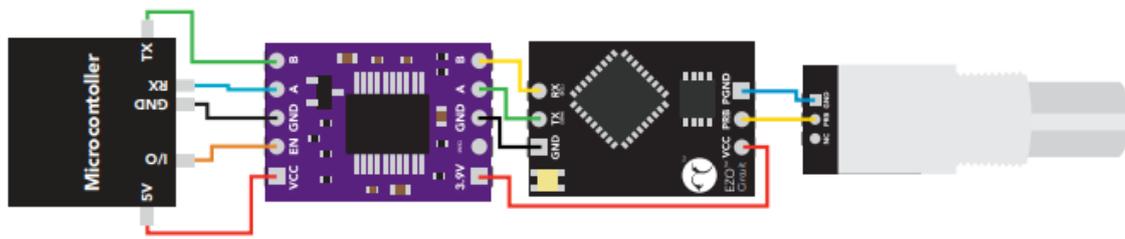


Figura 48. Esquema de conexión aislador eléctrico.

6.3.2.3. pH.

El pH como ya se ha indicado es uno de los factores que tienen más repercusión en el proceso de la digestión anaerobia. Por ello, conocer el pH en cada una de las diferentes etapas del proceso es importante. Con este fin y siguiendo en la línea de los otros sensores se propone utilizar para medir el pH en las diferentes etapas del biodigestor, así como en los humedales y la laguna facultativa (donde se tiene una parte anaerobia) el circuito integrado EZO-pH de Atlas Scientific con su sonda correspondiente. Tiene un precio de 41,99 \$.

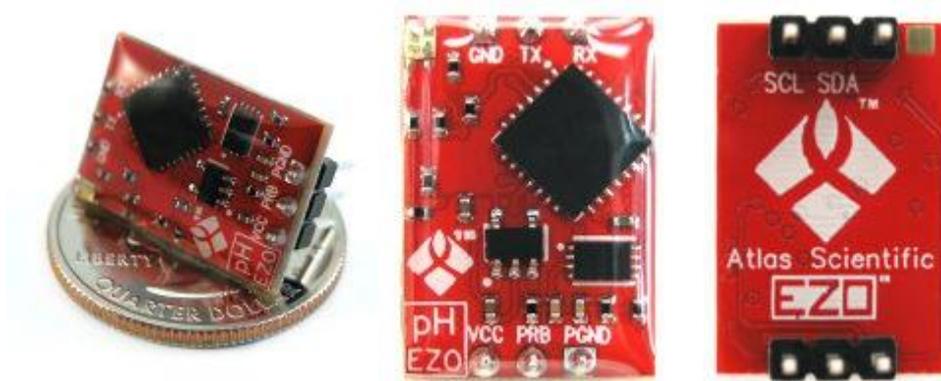


Figura 49. EZO-pH. Fuente: Atlas Scientific.

Este es un circuito que permite realizar mediciones de gran precisión por un coste relativamente pequeño, si es comparado con los equipos tradicionales. A continuación se exponen las especificaciones técnicas.

Tabla 42. Especificaciones técnicas EZO-pH. Fuente: [Datasheet EZO pH](#)

Característica	Valor
V _{cc}	3,3 – 5 V
Rango de lectura	0,001 – 14
Resolución	0,001
Precisión	± 0,002
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Sondas compatibles	Cualquier modelo y marca
Calibración	1, 2 o 3 puntos
Protocolo de datos	UART, I2C (99 (0x63))
Formato de datos	ASCII
Dimensiones	13,97 mm x 20,16 mm
Peso	1,76 gramos

Se expone también el consumo que tiene el circuito según el modo de funcionamiento en el que se encuentre.

Tabla 43. Consumos de corriente EZO-pH.

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
5V	ON	18,3 mA	16 mA	1,16 mA
	OF	13,8mA	13,8 mA	
3V	ON	14,5 mA	13,9 mA	0,995 mA
	OF	13,3 mA	13,3 mA	

Para medir el pH una sonda de pH mide la actividad de los iones de hidrógeno en un líquido. En la punta de una sonda de pH hay una membrana de vidrio. Esta membrana de vidrio permite que los iones de hidrógeno del líquido que se mide se difundan en la capa exterior del vidrio, mientras que los iones más grandes permanecen en la solución. La diferencia en la concentración de iones de hidrógeno (fuera de la sonda frente a dentro de la sonda) crea una corriente muy pequeña. Esta corriente es proporcional a la concentración de iones de hidrógeno en el líquido que se mide. Esta corriente (que puede ser positiva o negativa) es muy débil y no se puede detectar con un multímetro o un convertidor de analógico a digital. por lo que la señal se puede interrumpir fácilmente si no se tiene cuidado de usar solo conectores y cables adecuados.

La corriente que se genera a partir de la actividad del ion de hidrógeno se puede predecir usando la ecuación de Nernst: [232], [233]

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \cdot \ln(\alpha_{H^+}) = E^0 - \frac{2,303RT}{nF} \cdot pH \quad (4)$$

Donde:

E : potencial medido desde el electrodo sensor

E^0 : potencial del electrodo de referencia

R : constante de los gases ideales

F : constante de Faraday.

n : carga del ion.

T : temperatura en Kelvin

$(2,3 RT/nF)$: factor de Nernst

Una solución con una alta cantidad de actividad de iones de hidrógeno es un ácido ($\text{pH} < 7$). En contraste, una solución con una alta cantidad de actividad de iones de hidróxido es una base ($\text{pH} > 7$). Debido a que el pH es una propiedad del agua, la sustancia que se mide debe contener al menos algo de agua. De esta forma, el agua actúa como un medio para las interacciones hidrógeno/hidróxido [234], [235].

Al igual que el módulo para medir la conductividad, se trata de un circuito con una alta sensibilidad, lo que le otorga una gran precisión de medida. Sin embargo, esta misma propiedad hace que sea necesario utilizar un aislante eléctrico para evitar ruido e interferencias indeseadas. Se propone utilizar como en el caso anterior el Basic EZO™ Inline Voltage Isolator de Atlas Scientific.

Para calibrar el módulo, se puede hacer una calibración a un punto (punto medio, 7), dos puntos y tres puntos. La calibración de un solo punto utiliza como referencia el valor neutro de pH (7). La calibración en dos puntos proporciona una alta precisión entre 7 y el segundo punto calibrado, por ejemplo, 4. La calibración de tres puntos proporcionará una alta precisión en todo el rango de pH. Se considera como calibración estándar utilizar los puntos 4, 7 y 10.

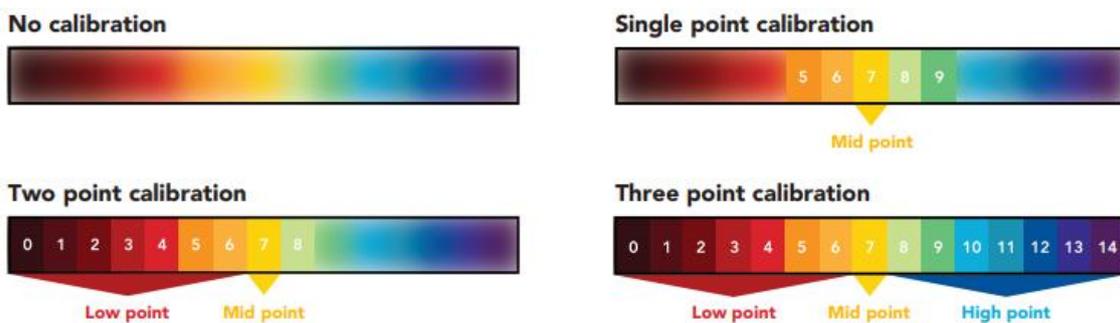


Figura 50. Calibración de pH de 1, 2 y 3 puntos.

La primera vez que es calibrado el módulo se recomienda por el fabricante calibrar en primer lugar el punto medio (7), luego el punto bajo (4) y por último el punto alto (10). Al igual que para el resto de los sensores se recomienda calibrar en protocolo UART. Se tiene también que la compensación de temperatura predeterminada de los circuitos de pH EZO™ se establece en 25 °C. Si la temperatura de la solución de calibración es ± 2 °C a partir de 25 °C, se debe considerar configurar primero la compensación de temperatura. Los cambios de temperatura de < 2 °C se pueden considerar insignificantes.

La conexión con el microcontrolador se realiza de la siguiente manera en protocolo UART y en I2C.

Tabla 44. Conexión EZO-pH con microcontrolador en protocolo UART.

EZO PH (UART)	Microcontrolador
V_{cc}	Vin
GND	GND
TX	RX
RX	TX

Tabla 45. Conexión EZO-pH con microcontrolador en protocolo I2C.

EZO pH (I2C)	Microcontrolador
V_{cc}	Vin
GND	GND
SDA	A4
SCL	A5

Se puede utilizar cualquier tipo de sonda y marca para tomar las mediciones. No obstante, las sondas que recomienda el fabricante para utilizar con el circuito integrado son las siguientes:

- Consumer Grade pH probe: proporciona lecturas precisas en un amplio rango de pH. Al eliminar la capacidad de las sondas para soportar ácidos y bases extremadamente potentes, se reduce el coste de la sonda. Esta sonda funcionará bien para la mayoría de las aplicaciones generales de detección de pH midiendo

en un rango de 2 a 13. Tiene una esperanza de vida útil de aproximadamente dos años y medio. [236]



Figura 51. Consumer Grade pH probe.

- Lab Grade pH Probe: es la sonda de pH de mayor precisión del fabricante. La doble unión interna le permite leer el pH de las soluciones ricas en proteínas sin



Figura 52. Lab Grade pH probe.

dañar la sonda. La punta de vidrio verde EXR facilita la detección del pH en agua altamente pura. El cuerpo está hecho de epoxi extruido que le da una resistencia increíble a ácidos y bases fuertes. Esta sonda puede leer el pH del ácido nítrico fumante sin ningún problema. Mide en un rango de pH de 0 a 14 con una esperanza de vida útil de aproximadamente un año [237].

- Industrial pH Probe: está hecha para el control de procesos industriales midiendo pH en un rango de 0 a 14. Debido a que la sonda es más grande, contiene más electrolito interno, lo que significa que tiene una esperanza de vida de aproximadamente cuatro años. A diferencia de las sondas de pH tradicionales que tienen una bombilla de vidrio en su punta, esta sonda tiene un área de detección plana, lo que hace que no haya peligro de rotura. Además, dispone de

sensor de temperatura interno por lo que usando dos adaptadores BNC se puede conectar simultáneamente al circuito EZO-pH y al circuito EZO- RDT. [238]



Figura 53. Industrial pH probe.

6.3.2.4. Potencial redox.

El potencial de oxidación-reducción (ORP) también se puede utilizar como indicador para digestores anaeróbicos, ya que mide la actividad de los electrones en un entorno acuoso [239]. En [240] se demuestra el ORP combinado con la temperatura tiene una buena relación lineal con la generación de AGV. La producción de metano ocurre en un amplio rango de valores de ORP, de -175 a -400 mV. Las sondas de ORP son sistemas de medición extremadamente versátiles para monitorear reacciones biológicas en plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que pueden indicar si se está produciendo una actividad biológica aceptable o inaceptable. [241]

Se propone para medir este parámetro el circuito integrado EZO-ORP de Atlas Scientific, este circuito integrado permite tomar mediciones de gran precisión, utilizando una sonda adecuada según la aplicación. Tiene un precio de 41,99 \$.



Figura 54. Módulo EZO-ORP de Atlas Scientific.

En la siguiente tabla se exponen sus especificaciones técnicas [242], [243].

Tabla 46. Especificaciones técnicas EZO-ORP. Fuente: [datasheet_ORP](#)

V_{cc}	3,3 – 5 V
Rango de lectura	-1019,9mV – 1019,9mV
Resolución	0,001
Precisión	± 1 mV
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Sondas compatibles	Cualquier modelo y marca
Calibración	1 punto
Protocolo de datos	UART, I2C (98 (0x62))
Formato de datos	ASCII
Dimensiones	13,97 mm x 20,16 mm
Peso	1,86 gramos

El consumo que tiene el circuito según el modo de funcionamiento en el que se encuentre se muestra en la tabla.

Tabla 47. Consumos módulo EZO-ORP.

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
5V	ON	18,3 mA	16 mA	1,16 mA
	OF	13,8mA	13,8 mA	
3V	ON	14,5 mA	13,9 mA	0,995 mA
	OF	13,3 mA	13,3 mA	

Al igual que una sonda de pH mide la actividad de los iones de hidrógeno en un líquido; una sonda de ORP representa la fuerza con la que se transfieren los electrones en un líquido. Este módulo, debido a su sensibilidad necesitará conectarse a un aislador eléctrico para evitar que las mediciones se vean afectadas por ruido o interferencias producidos por otros elementos.

La calibración de este módulo se realiza mediante un único punto, a partir de una solución de calibración de 225 mV. Se deberá realizar una vez al año para mantener la fiabilidad de las medidas. En caso de que se esté trabajando continuamente en valores extremos de ORP (-900 – 900 mV) será necesario hacer antes la recalibración. Además, este módulo no necesita de compensación de temperatura.

Una sonda de ORP tiene una punta de platino que está conectada a un cable de plata, rodeado de cloruro de plata. El fabricante Atlas Scientific recomienda varios modelos para su uso [244]–[247].

Tabla 48. Diferentes modelos de sondas para EZO-ORP y sus especificaciones técnicas. Fuente: Atlas Scientific

	Consumer Grade ORP Probe	Lab Grade ORP Probe	Industrial ORP Probe	Industrial ORP, pH, temp Probe
Modelo				
Lectura	ORP	ORP	ORP	ORP, Temperatura, pH
Rango de lectura	± 1000 mV	± 2000 mV	+/- 2000 mV	pH: 0 – 14 ORP: +/- 2000mV Temp: 1 – 99 °C
Precisión	± 1 mV	± 1 mV	± 1 mV	pH: +/- 0.002 ORP: +/- 1mV Temp: +/- (0.15 + (0.002*t))
Tiempo de respuesta	95% in 1s	95% in 1s	95% in 1s	-
Temp. de trabajo	1 – 60 °C	1 – 99 °C	1 – 99 °C	1 – 99 °C
Presión máx.	50 PSI	100 PSI	100 PSI	100 PSI
Profundidad máx.	35 m	70 m	70 m	70 m
Recalibración	≈ 1 año	≈ 1 año	≈ 1 año	≈ 1 año
Longitud de cable	1 m	1 m	3 m	3 m
Conector	SMA macho/ BNC macho	SMA macho/ BNC macho	Cables estañados	SMA macho
Esperanza de vida	≈12 – 18 meses	+ 2 años	≈ 4 años +	≈ 4 años +

La conexión del módulo se puede realizar en protocolo UART y en protocolo I2C, al igual que el resto de los módulos del fabricante Atlas Scientific mencionados.

Tabla 49. Conexión módulo EZO-ORP con microcontrolador en protocolo UART.

EZO-ORP (UART)	Microcontrolador
V _{CC}	V _{in}
GND	GND
TX	RX
RX	TX

Tabla 50. Conexión módulo EZO-ORP con microcontrolador en protocolo I2C.

EZO pH (I2C)	Microcontrolador
V _{CC}	V _{in}
GND	GND
SDA	A4
SCL	A5

6.3.2.5. Oxígeno Disuelto.

La visión tradicional de que el oxígeno es absolutamente tóxico en la AD ha sido objetada en diversos estudios. Es más, han demostrado que los digestores pueden soportar niveles significativos de oxigenación sin impactos negativos drásticos. Las cantidades limitadas de oxígeno pueden incluso conducir a un mejor rendimiento del reactor pudiendo mejorar la hidrólisis, mejorar el rendimiento de metano, estabilizar el proceso y eliminar el sulfuro de hidrógeno, entre otros [248]–[251]. Así mismo el oxígeno es también un factor clave para humedales y lagunas, por lo que se hace indispensable tener conocimiento de las concentraciones de oxígeno disuelto existentes en cada una de las diferentes etapas.

Por ello, se propone para su medición utilizar el módulo EZO-DO de Atlas Scientific, ya que ofrece lecturas precisas de O.D. en mg/l y porcentaje de saturación, sin tener que hacer pruebas de valoración química para comprobar que las lecturas son correctas. Tiene un precio de 47,99 \$.



Figura 55. módulo EZO-DO. Fuente: atlas Scientific

A continuación se exponen las especificaciones técnicas [252], [253].

Tabla 51. Especificaciones técnicas módulo EZO-DO. Fuente: Atlas Scientific.

V_{cc}	3,3 – 5 V
Rango de lectura	- 0,01 – 100+ mg/l - 0,1 – 400+ % saturación
Resolución	- 0,01 mg/l - 0,1 % saturación
Precisión	± 0,05 mg/L
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Sondas compatibles	Cualquier sonda galvánica
Calibración	1 o 2 puntos
Compensación de Temperatura	20 ° C
Compensación de Presión	101,3 kPa (se puede omitir si el agua tiene menos de 10 metros de profundidad)
Compensación de Salinidad	0 (Si la conductividad es inferior a 2500 µS es irrelevante)
Protocolo de datos	UART, I2C (97 (0x61))
Formato de datos	ASCII
Dimensiones	13,97 mm x 20,16 mm
Peso	1,77 gramos

Según el modo de funcionamiento en el que se encuentre su consumo será diferente, este se muestra en la tabla.

Tabla 52. Consumos módulo EZO-ORP.

	LED	MAX	STANDBY	SLEEP
5V	ON	13,5 mA	13,1 mA	0,66 mA
	OF	12,7 mA	12,7 mA	
3V	ON	12,1 mA	12 mA	0,3 mA
	OF	11,9 mA	11,9 mA	

El módulo tiene un protocolo de calibración flexible que permite la calibración de un solo punto o de dos puntos, según se considere. El fabricante recomienda realizar primero la calibración y posteriormente configurar la temperatura, presión y salinidad de compensación. Se recomienda hacer la calibración en protocolo UART.

En una sonda galvánica de oxígeno disuelto las moléculas de oxígeno se desactivan a través de la membrana de la sonda a una velocidad constante. Una vez que las moléculas de oxígeno han atravesado la membrana, se reducen en el cátodo y se produce un pequeño voltaje. Si no hay moléculas de oxígeno presentes, la sonda producirá 0 mV. A medida que aumenta el oxígeno, también lo hace la salida de mV de la sonda. Cada sonda producirá un voltaje diferente en presencia de oxígeno [253].

Aunque se puede utilizar cualquier tipo de sonda galvanizada, el fabricante recomienda utilizar unos modelos determinados, que se muestran en la siguiente tabla [254]–[256].

Tabla 53. Diferentes modelos de sondas para EZO-DO y sus especificaciones técnicas. Fuente: Atlas Scientific.

	Mini Lab Grade DO Probe	Lab Grade DO Probe	Industrial DO Probe
Modelo			
Rango de lectura	1 – 50 mg/l	0 – 100 mg/l	0 – 100 mg/l
Precisión	± 0,2 mg/L	± 0,05 mg/l	± 0,05 mg/l
Tiempo de respuesta	≈0,5 mg/l por segundo	≈0,3 mg/l por segundo	≈0,1 mg/l por segundo
Temp. de trabajo	1 – 50 °C	1 – 60 °C	1 – 99 °C
Presión máx.	100 PSI	500 PSI	300 PSI
Profundidad máx.	70 m	352 m	212 m
Recalibración	≈ 6 meses	≈ 1 año	≈ 1 año
Longitud de cable	45 cm	1 m	3 m
Conector	SMA macho	SMA macho/ BNC macho	Cables estañados
Esperanza de vida	≈2,5 años	4 años	≈ 4 años +
Mantenimiento	≈ 6 meses	≈ 18 meses	≈ 18 meses

La conexión del módulo con el microcontrolador se puede realizar en protocolo UART o en protocolo I2C, de la misma manera que el resto de los módulos del fabricante Atlas Scientific mencionados anteriormente. También necesitará instalarse con un aislador eléctrico para evitar ruidos e interferencias que puedan ocasionar lecturas erróneas.

6.3.2.6. Dióxido de carbono (gas).

Como resultado final de la digestión anaerobia se obtiene un porcentaje importante de dióxido de carbono. Por lo que es interesante tener este parámetro controlado.

Para hacer lecturas de este parámetro se propone utilizar el sensor de presión integrado de Atlas Scientific, (EZO-CO2). El sensor EZO-CO2 utiliza una celda de detección de gas de infrarrojos no dispersivos (NDIR) para derivar el contenido de CO2 en una matriz gaseosa. La celda de detección NDIR es un espectrofotómetro de longitud de onda única que ha sido diseñado específicamente para detectar radiación infrarroja de 4,2 μm compacto que obtiene las lecturas de CO₂ en ppm. Tiene compensación interna de temperatura y humedad. Tiene un precio de 151,99 \$.



Figura 56. Sensor EZO-CO2. Fuente: atlas Scientific.

En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas aportadas por el fabricante [257], [258].

Tabla 54. Especificaciones técnicas sensor EZO-CO2. Fuente: [datasheet_CO2](#)

V_{cc}	3,3 – 5 V
Rango de lectura	0 – 10000 ppm
Resolución	1 ppm
Precisión	± 5% (± 50 ppm)
Tiempo de respuesta	1 lectura por segundo
Calibración	Calibrado de fábrica
Compensación de Temperatura	20 °C
Rango de trabajo	-20 – 50 °C
Protección condensación	0 – 95 % humedad relativa
Protocolo de datos	UART, I2C (105 (0x69))
Formato de datos	ASCII
Esperanza de vida	5,5 años
Conector	Cable de datos de 5 cables

El consumo que tiene sensor según en el modo de funcionamiento en el que se encuentre se muestra a continuación.

Tabla 55. Tabla consumos sensor EZO-CO2

	LED	MAX	SLEEP
5V	ON	45 mA	3,4 mA
	OF	44 mA	
3V	ON	42 mA	3 mA
	OF	41 mA	

El contenido de CO₂ se obtiene cuantificando cuánta energía luminosa se ha perdido cuando viaja a través de una matriz gaseosa en una distancia fija. Colocar el sensor directamente bajo luz solar puede dar lecturas erróneas. Si no es posible evitarlo se puede colocar una te de PVC sobre el sensor, de esta forma se protege de la luz directa y sigue ventilado.

Cuando el sensor se enciende por primera vez debe calentarse antes de que pueda generar lecturas. El proceso de calentamiento tarda 10 segundos en completarse. A medida que la temperatura interna se estabilice, también lo harán las lecturas de CO₂.

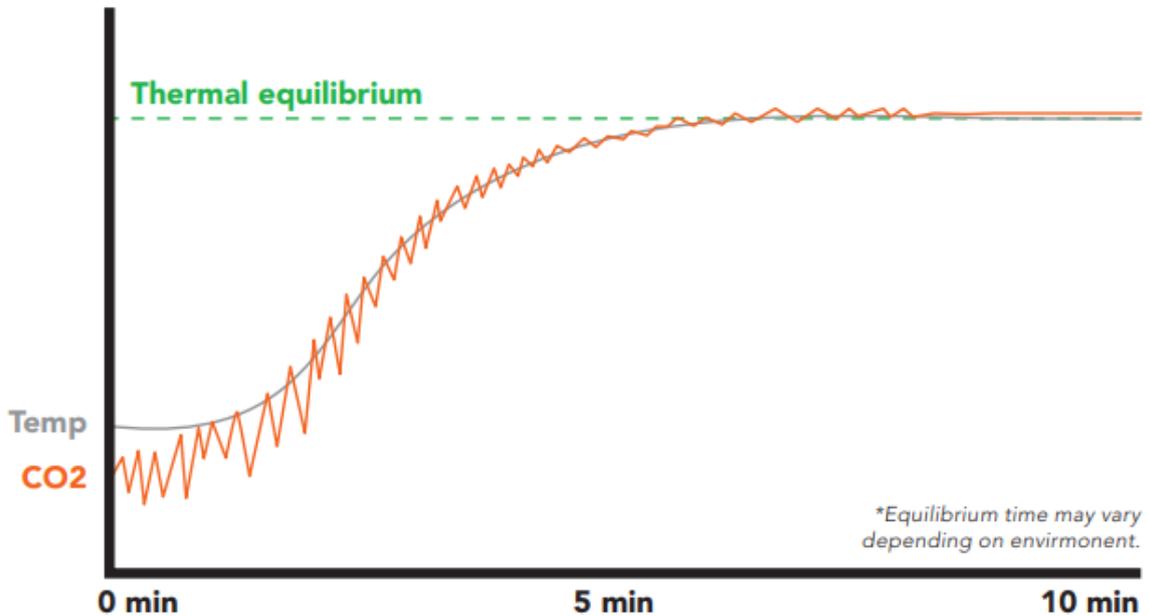


Figura 57. Gráfica de la estabilización de las lecturas de CO₂ en función de la temperatura interna.

El sensor viene calibrado de fábrica y no necesita ser recalibrado. El fabricante realiza una calibración de dos puntos (punto bajo = 0 ppm; punto alto = 4000 ppm) como parte del proceso de fabricación.

En cuanto a la conexión con el microcontrolador se puede hacer en protocolo UART o en I2C, como se muestra a continuación.

Tabla 56. Conexión sensor EZO-CO₂ en protocolo UART.

EZO-CO ₂ (UART)	Microcontrolador
Blanco	RX
Verde	TX
Negro	GND
Rojo	V _{in}
Azul	NC

Tabla 57. Conexión sensor EZO-CO₂ en protocolo I2C.

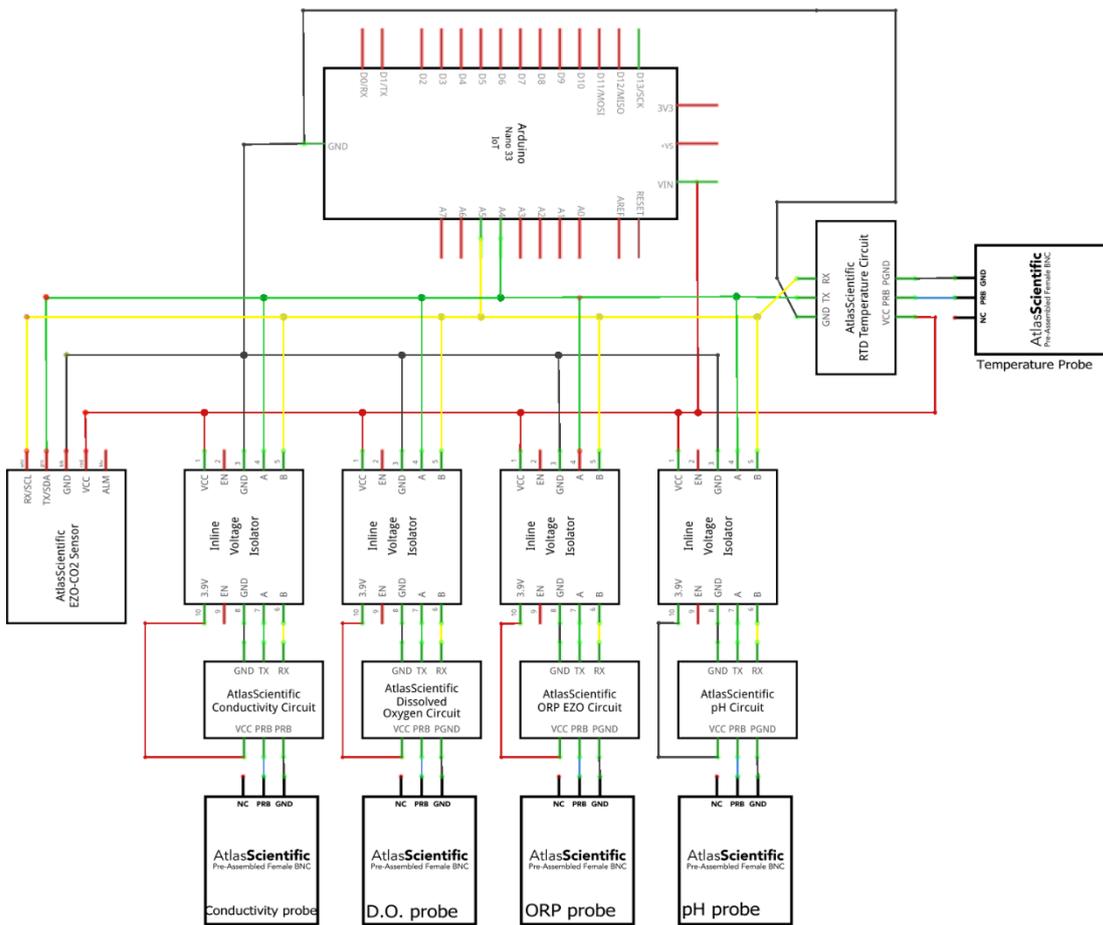
EZO-CO₂ (I2C)	Microcontrolador
Blanco	SCL (A5)
Verde	SDA (A4)
Negro	GND
Rojo	V _{in}
Azul	NC

Hay que decir que tiene alta sensibilidad a los lazos de tierra, esto es una causa importante de ruido, zumbido e interferencia. Para evitarlo se aconseja lo siguiente:

- Conectar un pin de tierra del microcontrolador (u otro dispositivo) a tierra.
- Conecte el cuerpo del sensor de CO₂ a un objeto metálico que esté conectado a una toma de tierra.

6.3.2.7. Esquema de conexión.

El montaje de los sensores destinados a medir las variables del proceso queda de la siguiente forma. Esta parte del sistema de monitorización no se ha podido probar. Los códigos para la configuración de los sensores se encuentran en el Anexo II. Lo ideal sería construir una sistema de recirculación donde tomar las muestras de las diferentes zonas del sistema de depuración natural.



fritzing

Figura 58. Esquema de conexión sensores para medir variables del sistema.

6.4. Sistema de Comunicación.

Se ha de tener en cuenta que las explotaciones ganaderas pueden estar ubicadas en lugares de difícil acceso al tendido eléctrico o aunque se pueda acceder a este, el terreno en el que se encontraría ubicado el SDN, de difícil manera podría estar conectado a la red eléctrica ni tener acceso a conexiones de área local (Ethernet, WiFi, etc.). Por esta razón, hay que pensar en un manera eficiente y económica de mantener la comunicación con el sistema establecido. En este caso, en la placa del microcontrolador Arm Cortex-M0 viene integrado un módulo MCU (Microcontroller Unit) multiradio autónomo de la serie NINA-W10 que integra un potente microcontrolador (MCU) y una radio para comunicación inalámbrica. Los módulos NINA-W102 utilizan una antena integrada montada en la placa [259].



Figura 59. Módulo MCU NINA- W102.

El módulo tiene integradas una serie de funciones de seguridad importantes, incluido el arranque seguro, que garantiza que el módulo se inicie solo en presencia de software autenticado. Los módulos NINA-W10 tienen una arquitectura de CPU abierta adaptada a los OEM (original equipment manufacturer) que desean integrar su propia aplicación además de la funcionalidad Wi-Fi disponible, incluida la compatibilidad con Bluetooth y Bluetooth de bajo consumo.

La serie NINA-W10 tiene un sistema de doble núcleo con dos CPU Xtensa LX6 de arquitectura Harvard con una frecuencia de reloj interna máxima de 240 MHz. La memoria interna de NINA-W1 incluye lo siguiente:

- ROM de 448 Kbytes para arranque y funciones básicas
- 520 Kbyte SRAM para datos e instrucción

- FLASH de 16 Mbit para almacenamiento de código, incluido el cifrado de hardware para proteger programas y datos
- EFUSE (memoria no borrable) de 1 kbit para direcciones MAC, configuración de módulo, cifrado flash y chip-ID.

Las variantes de CPU abiertas (NINA-W101 / NINA-W102) también admiten memoria FLASH y SRAM externa a través de una interfaz Quad SPI.

NINA-W10 no tiene software y proporciona una arquitectura de CPU abierta. Con la arquitectura de CPU abierta, se pueden desarrollar aplicaciones avanzadas que se ejecutan en la MCU de 32 bits de doble núcleo. La radio es compatible con Wi-Fi 802.11b/g/n en la banda ISM de 2,4 GHz, Bluetooth BR / EDR y comunicación Bluetooth de baja energía [260], [261].

Tabla 58. Características de corto alcance módulo NINA-W102. Fuente: [datasheet NINA](#)

Características de corto alcance	NINA-W102
Chip En El Interior	ESP32
Calificación Bluetooth	v4.2 (Bluetooth de baja energía y BR/EDR)
Potencia De Salida Bluetooth EIRP [Dbm]	8
Potencia De Salida Bluetooth De Baja Energía EIRP [Dbm]	8
Potencia De Salida Wi-Fi EIRP [Dbm]	18
Rendimiento [Mbit/S]	25,0
Micropunto De Acceso Wi-Fi [Estaciones Máximas]	10
Alcance Máximo De Bluetooth [M]	200
Alcance Máximo De Wi-Fi [M]	400
Frecuencia Wi-Fi [Ghz]	2,4
Características de la CPU	
MCU	Xtensa LX6
RAM [kB]	520 kB
Flash [kB]	4096 kB / 8192 kB

Tabla 59. Interfaces disponibles para módulo NINA-W102. Fuente: [datasheet NINA](#)

Interfaces	Nº
UART	3
SPI	3
TWI (COMPATIBLE CON I2C)	3
I2S	1
SDIO	1
ETHERNET RMII	1
JTAG	1
GPIO	26
ADC	4

Tabla 60. Condiciones de trabajo módulo NINA-W102. Fuente: [datasheet NINA](#)

Características de trabajo	Valor
Suministro mínimo [v]	3
Suministro mínimo [v]	3,6
Temperatura máxima [°c]	85
Temperatura mínima [°c]	-40
Tamaño [mm]	10 x 14 x 3,8

Una vez que el sistema esté en funcionamiento con los sensores tomando lecturas sobre los diferentes parámetros a estudiar, es necesario poder acceder a esta información. Este módulo de comunicación ofrece la posibilidad de enviar los datos a una plataforma web donde poder analizarlos en tiempo real. En la actualidad existe una gran variedad de plataformas similares para llevar a cabo el análisis IoT.

La potencia de computación en la nube y la mayor conectividad de los dispositivos (con elementos de bajo coste) presentan una tendencia emergente en la que una gran cantidad de dispositivos integrados están conectados a Internet. De esta forma, en los últimos años se han venido desarrollando diversos proyectos en el ámbito ambiental,

de salud, industrial o del hogar entre los más comunes. Se ha realizado una pequeña revisión bibliográfica de proyectos similares que se expone a continuación.

[262] con el fin de estudiar el subsidio a las aguas subterráneas de diferentes sistemas de cultivo en Taiwán, desarrollaron una ruta de transmisión de datos de bajo coste utilizando las TIC (Tecnologías de la información y Comunicación) con diferentes esquemas de transmisión de datos para mejorar la eficiencia y la inmediatez de la transferencia de datos desde el campo a las bases de datos en los laboratorios. Se concluyó que el avance tecnológico de las TIC con sus ventajas de costes razonables y alta flexibilidad y viabilidad, junto con Arduino y otros sistemas operativos de código abierto se pueden utilizar para desarrollar los registradores de datos (datalogger) e instrumentos relacionados para satisfacer las necesidades de los usuarios. Por lo tanto, se pudo afirmar que el uso de las TIC's son la estrategia más adecuada para desarrollar el sistema de vigilancia a largo plazo sobre el terreno y aplicarlo a otros sistemas de vigilancia del medio ambiente.

[263] proponen un nuevo sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) que se integra con la tecnología de Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de la calidad del agua en tiempo real. Su objetivo es determinar la contaminación del agua, las fugas en la tubería y también la medición automática de parámetros (como sensor de temperatura, sensor de flujo, sensor de color) en tiempo real utilizando Arduino Atmega 368 y el módulo Global System for Mobile Communication (GSM). El sistema SCADA se ajusta con sensores adicionales y se reduce el coste. Los resultados muestran que el sistema propuesto supera a los existentes y produce mejores resultados.

[264] desarrollan un sistema de monitorización basado en servicios en la nube para sistemas híbridos de energía renovable (panel solar y planta de biogás) mediante la implementación de la plataforma de Internet de las cosas. La conectividad inalámbrica con los sensores se logra mediante el uso del protocolo Zig-bee de baja potencia (basado en IEEE 802.15.4). Se utiliza la plataforma ThingSpeak para recopilar y almacenar datos de sensores en la nube. El sistema propuesto proporciona un sistema de monitoreo de rendimiento confiable y de bajo costo.

[265] diseñaron y construyeron un datalogger (registrador de datos) basado en la aplicación de IoT utilizando software y hardware libres, para monitorizar de forma remota pequeños sistemas fotovoltaicos (PV) autónomos, mejorando el rendimiento y el mantenimiento del sistema. Se utilizó tecnología 3G para la monitorización del sistema de forma remota a través de la web o a través de una aplicación móvil (utilizando ThingSpeak), todo a bajo coste. Se obtuvo que al recibir información instantánea se pueden detectar y resolver los problemas relacionados con la operación y el mantenimiento del sistema fotovoltaico rápidamente.

[266] presentan la integración a una red de sensores inalámbricos y una validación preliminar en un escenario de planta de tratamiento de aguas residuales de un dispositivo de monitoreo de calidad del agua de bajo coste. Este dispositivo consiste en un analizador de nitratos y nitritos basado en un novedoso método de detección de cromatografía iónica. Un sistema integrado basado en la unidad de microcontrolador Teensy 3.6 se utiliza para automatizar todas las funcionalidades del sistema. Para añadir la conectividad con la red de sensores inalámbricos, se implementa una solución IoT asociada al sistema utilizando una Raspberry Pi Zero W (Rpi) conectada a un componente integrado SimCom SIM800 Quad-Band GSM/GPRS. La plataforma IoT aplicada en esta investigación se basa en el middleware llamado *thethings.io*, plataforma similar a ThingSpeak. Los resultados demuestran la fiabilidad del sistema y verifican el método analítico implementado en el dispositivo.

A continuación, se ofrece un listado de las plataformas más utilizadas actualmente.

Tabla 61. Características y tarifas de los principales softwares de IoT

Plataforma	Descripción	Precio
Thing Speak [267]	Software de código abierto escrito en Ruby que permite a los usuarios comunicarse con dispositivos habilitados para Internet. Con las aplicaciones de MATLAB integradas para el análisis y visualización de los datos.	El precio se basa en el número de canales requeridos y en un recuento de mensajes que se procesarán y almacenarán en un período de un año. <ul style="list-style-type: none"> - Licencia Gratuita - Estudiante: 55 €/año - Hogar: 75 €/ año - Académica: 250 €/año - Estándar: 600 €/año
Google IoT Core [268]	Servicio administrado en la nube que permite conectar, administrar y transferir datos de manera fácil y segura desde millones de dispositivos en todo el mundo	Tiene un precio de acuerdo con el volumen de datos utilizado en un mes: <ul style="list-style-type: none"> - Hasta 250 MB: gratis - De 250 MB a 250 GB: 0,0045 \$*/MB - De 250 MB a 250 GB: 0.0020 \$/MB - De 250 MB a 250 GB: 0.00045 \$/MB
IBM Watson IoT Platform [269]	Un servicio completamente gestionado y alojado en la nube indicado para el registro de dispositivos, la conectividad, el control, la visualización rápida y el almacenamiento de datos. Utiliza comunicaciones basadas en estándares abiertos como MQTT y HTTPS.	<ul style="list-style-type: none"> - Prueba gratuita: 30 días - Servicio de conexión: Desde 500 \$ por instancia por mes - Servicio de análisis: Desde 300 \$ por instancia por mes - Servicio Blockchain: Desde 200 \$ por instancia por mes
Datadog [270]	La plataforma SaaS (Software como Servicio) integra y automatiza la monitorización de la infraestructura, del rendimiento de las aplicaciones y la administración de registros para proporcionar una gestión unificada y en tiempo real.	<ul style="list-style-type: none"> - Gratis: 14 días de prueba - Pro: 15 \$ por mes y usuario - Empresa: 23 \$ por mes y usuario
AWS IoT Analytics [271]	Servicio completamente administrado que recoge, procesa, almacena y analiza los datos de dispositivos de IoT a escala. Los clientes también pueden usar sus propios análisis personalizados. El procesamiento, el almacenamiento de datos, la ejecución de consultas y la ejecución de análisis	<ul style="list-style-type: none"> - Cuenta gratuita: 12 meses con límite de datos. - Procesamiento de datos: 0,2 \$/GB mes - Almacenamiento de datos: 0,03 \$/GB mes. - Ejecución análisis: 6,5 \$/TB de datos escaneados - Ejecución de análisis personalizado: 0,36 ACU*/hora.

<p>Blynk IoT Platform [272]</p>	<p>personalizados se facturan por separado.</p> <p>Un conjunto totalmente integrado de software IoT. Ofrece aprovisionamiento de dispositivos, visualización de datos de sensores, control remoto con aplicaciones móviles y web, actualizaciones de firmware, nube segura, análisis de datos, gestión de usuarios y accesos y alertas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cuenta gratuita: límite de 2 dispositivos. - Precios mensuales si se contrata un año. - MAS: 4,99 \$/mes - PRO: 41 \$/ mes - Personalizado: desde 599 \$/mes
<p>Thingsboard [273]</p>	<p>Plataforma de IoT de código abierto para la recopilación, el procesamiento, la visualización y la administración de dispositivos de datos. Permite la conectividad de dispositivos a través de protocolos MQTT, CoAP y HTTP.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Community edition: gratuito - Professional edition: desde 10 a 399 \$/ mes - Trendz edition: desde 175 a 350 \$/mes

*Todos los precios dados en dólares hacen referencia al dólar estadounidense (USD)

** ACU (Analytics Compute Unit)

Una vez que se ha tanteado un poco las diferentes plataformas que se pueden utilizar para la visualización y gestión de los datos. Se decide probar la aplicación gratuita Blynk IoT Platform.

6.4.1. Blynk IoT Platform

Esta aplicación una vez que se hace el registro, pide añadir el modelo de microprocesador que se va a utilizar.

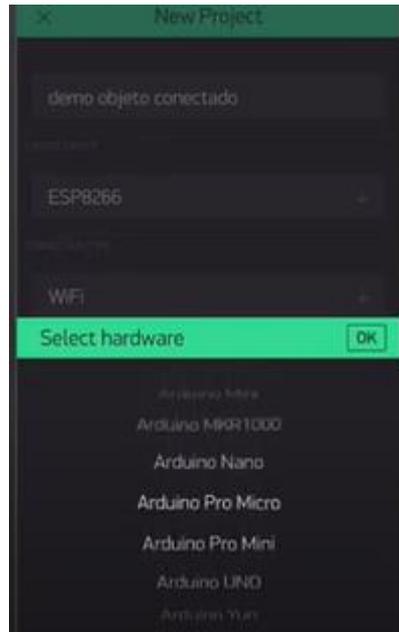


Figura 60. Pantalla configuración microprocesador aplicación Blynk.

Se elige la opción más parecida ya que no se encuentra el modelo nano 33 IoT, en este caso se escoge la opción de MKR1000. En la siguiente pantalla se puede elegir elementos para mostrar los datos. Aunque el número de elementos que se puede utilizar simultáneamente es limitado, puesto que en la versión gratuita se dispone de un número determinado de créditos, costando cada elemento una determinada cantidad de créditos.

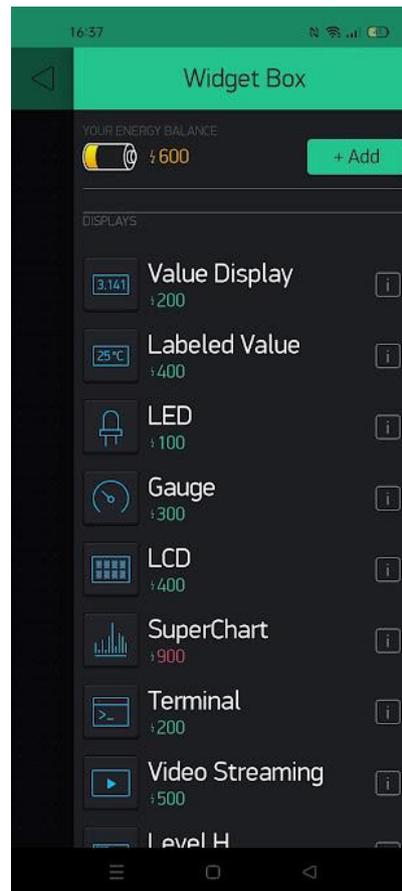


Figura 61. Pantalla de elementos disponibles en la aplicación Blynk.

Para hacer la prueba se decide utilizar un sensor común para tomar lecturas de temperatura y humedad como el DTH11.

6.4.1.1. DHT11

Se trata de un sensor digital que entregan medidas de temperatura y humedad ambientales simultáneamente. Internamente tienen un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir la temperatura. También, alberga un procesador interno que convierte las señales analógicas de los sensores en señales digitales listas para su uso [274].

Este sensor de bajo coste tiene una excelente calidad, rápida respuesta, protección a interferencias, comunicación digital y calibración precisa. Por lo que es uno de los más usado para medir dichos parámetros [275].

Se puede conectar a 3,3V o 5V, es capaz de medir en un rango de temperaturas entre 0 °C hasta 50 °C con un 5% de precisión y del 20% al 80% de humedad relativa con un 5%

de precisión. Los pines Los pines del DHT11 son los siguientes: VCC (alimentación), Data (transmisión de datos), NC (pin al aire), GND (conexión a tierra).

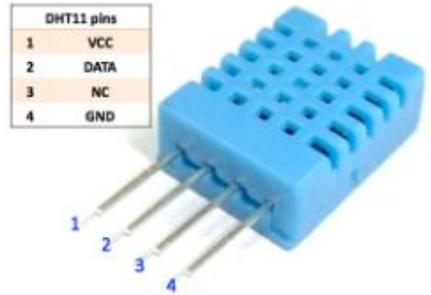


Figura 62. Sensor DHT11. Fuente: [Omniblug](#).

En la siguiente tabla se muestra las características técnicas del sensor.

Tabla 62. Características técnicas sensor DHT11. Fuente: [datasheet DHT11](#).

MODELO	DHT11
Alimentación	de 3,5 V a 5 V
Consumo	2,5 mA
Señal de salida	Digital
Temperatura	
Rango	0 – 50 °C
Precisión	a 25 °C ± 2
Resolución	1 °C (8-bit)
Humedad	
Rango	de 20% RH a 90% RH
Precisión	entre 0y 50 °C± 5% RH
Resolución	1% RH

Se necesita tener una resistencia pull-up conectada a la salida digital. La comunicación entre los sensores y Arduino se hace mediante una única línea que usa un protocolo de comunicación propio. En cada medición se envía un paquete de 40 bits que se pueden interpretar fácilmente con la librería adecuada [276].

0011 0101 0000 0000 0001 1000 0000 0000 0100 1001
8 bits humedad **8 bits humedad** **8 bits temperatura** **8 bits temperatura** **bits de paridad**

Figura 63. Estructura de comunicación entre el sensor y el microcontrolador. Fuente: [Omniblug](#)

El primer grupo de 8-bit es la parte entera de la humedad y el segundo grupo la parte decimal. Lo mismo ocurre con el tercer y cuarto grupo, ofrecen la parte entera de la temperatura y la parte decimal. Por último, se encuentran los bits de paridad para confirmar que no haya datos corruptos. La función de estos bits de paridad es asegurar de que la información es correcta, sumando los 4 primeros grupos de 8-bit.

La conexión con la placa Arduino Nano 33 (IoT) será de la siguiente manera:

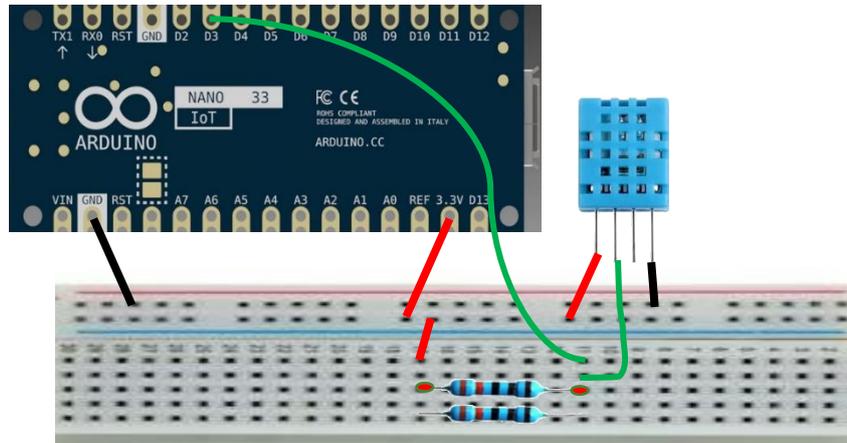


Figura 64. Esquema conexión DHT11 a Arduino Nano 33 (IoT).

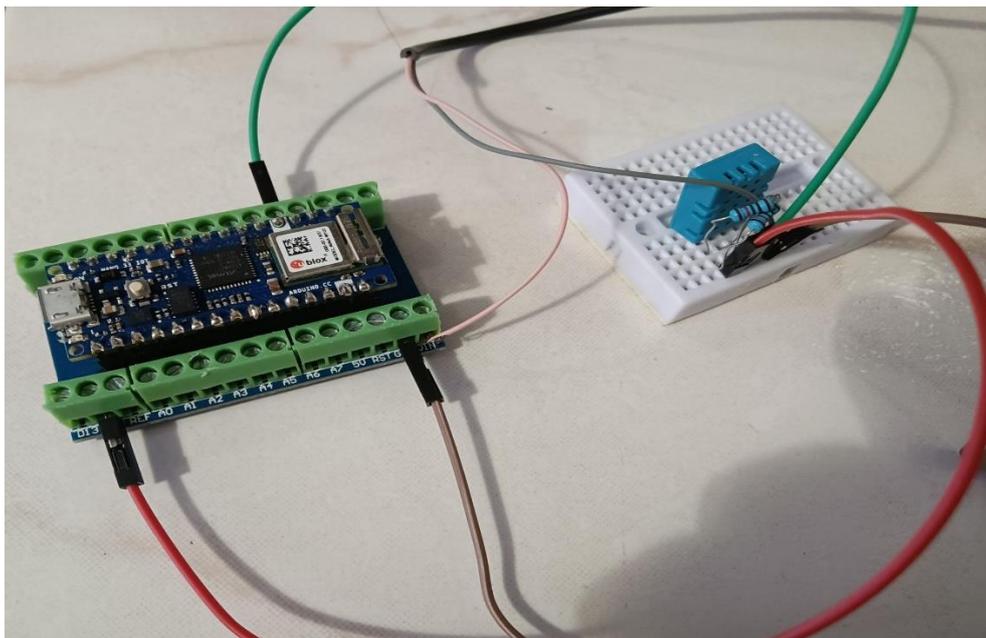


Figura 65. Conexión DHT11 con Arduino nano 33 (IoT).

El código utilizado para recibir los datos utilizando el microcontrolador de Arduino Nano 33 a través de la plataforma Arduino IDE se puede leer en el Anexo II. Es necesario descargarse varias librerías para su correcta ejecución.

Una vez conectado el sensor al microcontrolador y configurado el código para que funcione con la aplicación Blynk, en la aplicación se definen los canales para la salida de los datos de temperatura y humedad.

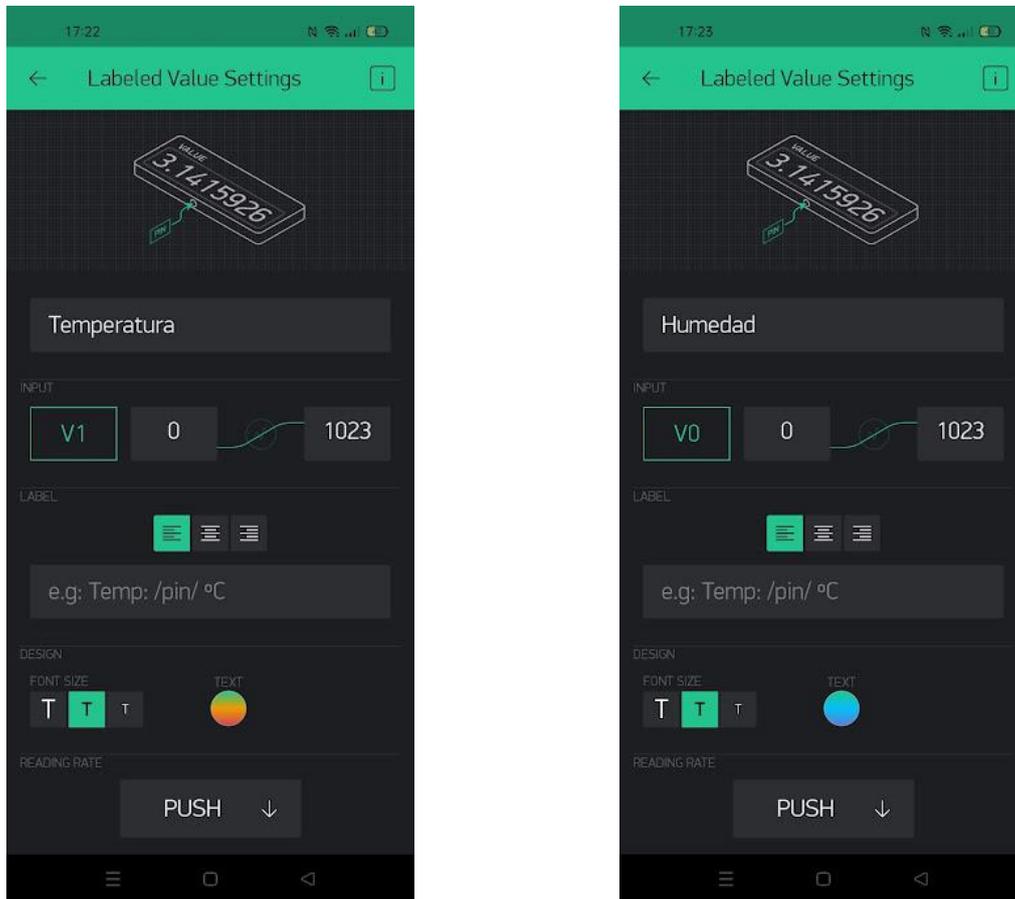


Figura 66. Configuración de canales para los datos de temperatura y humedad.

Una vez configurado todo se ejecuta y se observan los resultados en el teléfono móvil. La visualización de los datos se puede hacer en forma de gráfica o en forma de display.

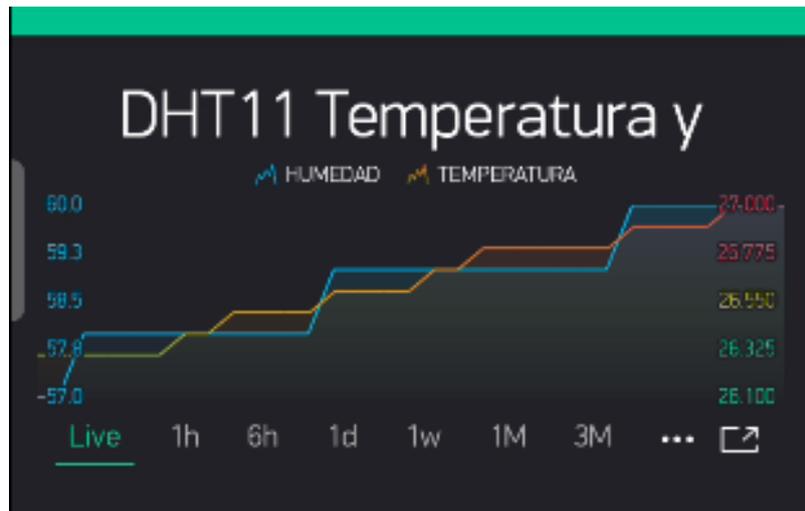


Figura 67. Visualización de los datos de temperatura y humedad en forma de grafica.



Figura 68. Visualización de los datos de temperatura y humedad en forma de display.

Los datos pueden ser enviados por email en un fichero CSV. Además, se puede crear notificaciones o alertas del estado de los dispositivos. Sin embargo, el hecho de tener limitado el número de dispositivos y de widgets que pueden ser utilizados simultáneamente dificulta realizar un proyecto que incluya más de dos o tres parámetros diferentes. Además, solamente almacena un histórico de datos de una semana.

Por lo que se decide probar la plataforma *ThingSpeak de MathWorks*.

6.4.2. ThingSpeak.

Como se ha mencionado en la tabla, es una plataforma de datos de código abierto para el Internet de las Cosas, que permite agregar, visualizar y analizar flujos de datos en vivo en la nube. Además, proporciona visualizaciones instantáneas de los datos publicados, pudiendo realizar análisis y procesamiento en línea de los datos a medida que son recopilados. Facilita el acceso a los datos, la recuperación y el registro de estos al proporcionar una API (interfaz de programación de aplicaciones) exclusiva por proyecto, tanto a los dispositivos como a los sitios web. También proporciona a los usuarios almacenamiento gratuito de datos de series temporales en canales. Cada canal puede incluir hasta ocho campos de datos. Resumiendo, esta herramienta encaja en la parte de la nube del diagrama y proporciona una plataforma para recopilar y analizar rápidamente datos de sensores conectados a Internet. Con las aplicaciones de MATLAB integradas, se puede desarrollar visualizaciones personalizadas de datos y programar análisis para que se ejecuten en los datos de los sensores. También tiene acceso a soporte técnico en vivo, uso compartido de canales privados y suscripciones MQTT (Message Queing Telemetry Transport), siendo este un protocolo de comunicación Machine to Machine (M2M), ampliamente utilizado para el Internet de las Cosas [277], [278].

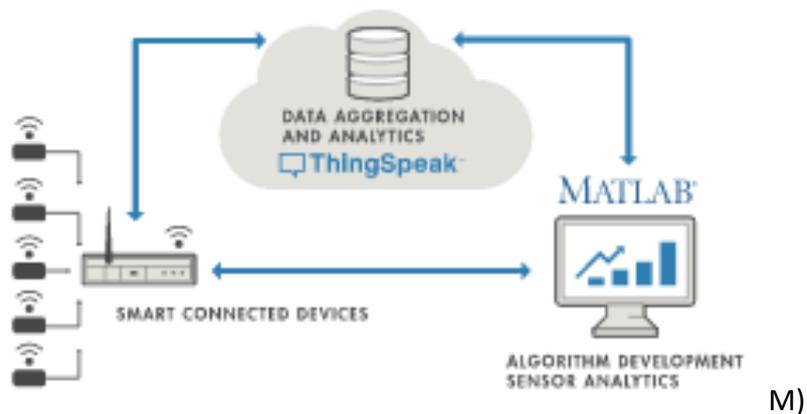


Figura 69. Esquema de funcionamiento Thingspeak. Fuente: www.thingspeak.com

Las principales características de esta herramienta son: [277]

- Configurar fácilmente dispositivos para enviar datos a ThingSpeak utilizando protocolos comunes de IoT.
- Visualizar los datos de los sensores instalados en tiempo real.
- Agregar datos bajo demanda de fuentes de terceros.
- Utilizar el potencial de MATLAB para manejar los datos.
- Ejecutar análisis de IoT automáticamente en función de las programaciones o eventos.
- Crear prototipos y sistemas IoT sin configurar servidores ni desarrollar software web.
- Proceder automáticamente sobre los datos y comunicarse utilizando servicios de terceros como Twilio® o Twitter®
- La licencia gratuita permite tener hasta 4 canales con 8 campos cada uno y 3 millones de mensajes al año (~ 8200 mensajes / día).
- La licencia académica permite procesar y almacenar hasta 33 millones de mensajes en un período de un año (~ 90000 mensajes / día). También proporciona la capacidad de crear hasta 250 canales.

Una vez que se ha creado una cuenta en la plataforma de MathWorks y se inicia sesión en ThingSpeak, se crea un nuevo canal.

Channel Settings

Percentage complete	50%
Channel ID	1501363
Name	<input type="text" value="Medidas granja porcina"/>
Description	<input type="text" value="Lecturas de variables atmosféricas y del entorno para sistema de depuración natural aplicado a"/>
Field 1	<input type="text" value="Humedad (%)"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 2	<input type="text" value="Temperatura (°C)"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 3	<input type="text" value="Visible"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 4	<input type="text" value="IR"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 5	<input type="text" value="Presión atmosférica (F)"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 6	<input type="text" value="Altitud aproximada (m)"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 7	<input type="text" value="Radiación UV (nm)"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Field 8	<input type="text" value="Intensidad Lumínica"/> <input checked="" type="checkbox"/>

Figura 70. Creación de nuevo canal en ThingsSpeak.

En esta sección se define el nombre del canal, se añade una descripción si se desea y se activan los campos que se quieran utilizar. Para el caso de estudio, se han activado los 8 canales con las diferentes variables de medida de las condiciones del entorno (temperatura, humedad, presión atmosférica, etc.). El canal tendrá una dirección ID única que servirá para comunicarse con él. Además, se crean dos “API keys”:

- Write API Key. Se utiliza para escribir datos en el canal.
- Read API Key. Se utiliza para dar permiso a terceros y que puedan ver los feed y gráficos del canal privado.

El canal puede ser privado con acceso a determinados usuarios a los que se le brinde la Read API Key o público, donde cualquier persona puede acceder a la visualización de los datos.

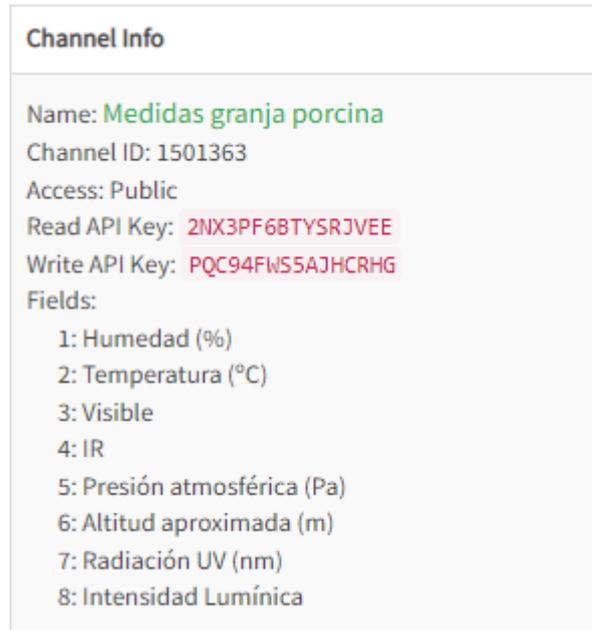


Figura 71. Canal creado para almacenar las lecturas recogidas por los sensores.

Una vez que se ha creado el canal y se han asignado los campos correspondientes, se crea el código para conectar el microcontrolador con la nube. Para ello, será necesario el uso de dos bibliotecas específicas, la biblioteca “ThingSpeak.h” y “WiFiNINA.h”, además de las utilizadas para la configuración de cada sensor.

La biblioteca “ThingSpeak.h” se encarga de realizar la vinculación con la nube, la segunda hace posible la conexión del módulo NINA con una red Wifi. Una vez que han configurado las bibliotecas se puede acceder a la visualización de los datos. El código completo se expone en el Anexo II.

Una vez compilado el programa en el Arduino IDE se sube a la placa y se comprueba que se encuentra el canal correctamente y se recogen los datos. En la pantalla de visualización de ThingSpeak, empiezan a aparecer los datos.



Figura 72. Feed de las lecturas tomadas.

Los datos se van mostrando en tiempo real y se pueden examinar en intervalos de tiempo de minutos, horas, días, meses o años. Se puede calcular valores medios según el intervalo de tiempo que se quiera. También se pueden mostrar en forma de dato numérico o display en vez de en gráfico.

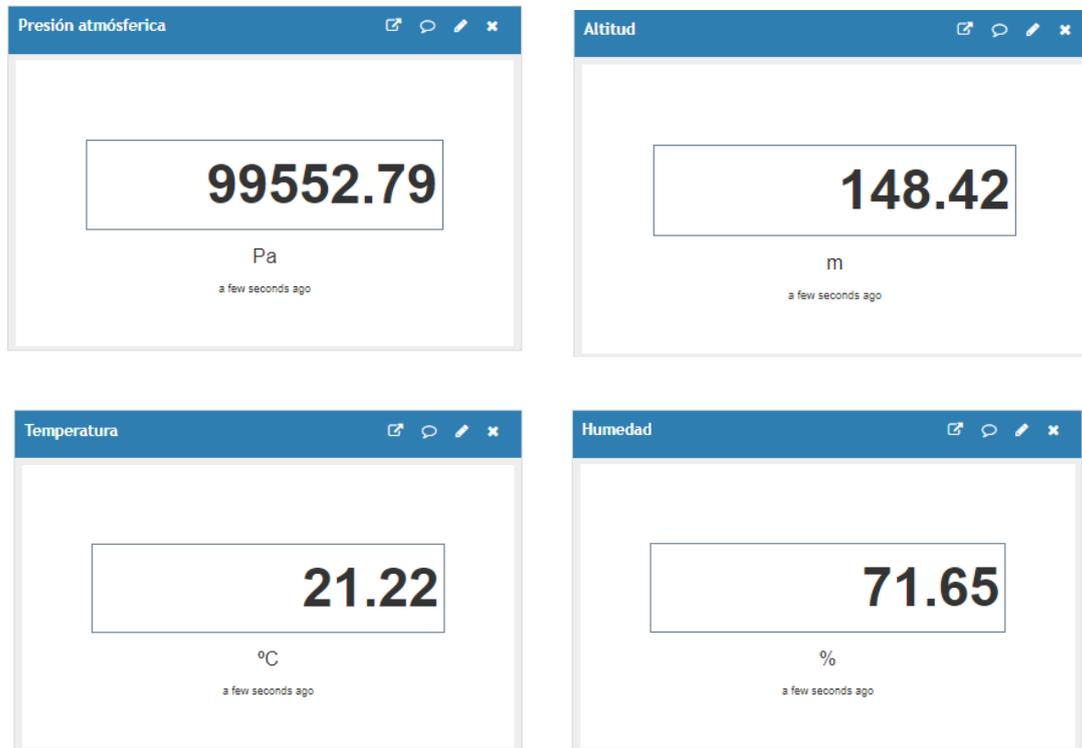


Figura 73. Visualización de datos en formato display.

Además, con Matlab se pueden realizar visualizaciones y análisis más completos utilizando los datos almacenados en los diferentes campos. Por ejemplo, se puede hallar la correlación entre la temperatura y la humedad relativa del ambiente.

```
MATLAB Code
1 % Read temperature and humidity from a ThingSpeak channel and visualize the
2 % relationship between them using the SCATTER plot
3
4
5
6 % Channel ID to read data from
7 readChannelID = 1501363;
8 % Temperature Field ID
9 TemperatureFieldID = 2;
10 % Humidity Field ID
11 HumidityFieldID = 1;
12
13 % Channel Read API Key
14 % If your channel is private, then enter the read API
15 % Key between the '' below:
16 readAPIKey = '2NX3PF6BTYSRJVEE';
17
18 % Read Temperature and Humidity Data. Learn more about the THINGSPEAKREAD function by
19 % going to the Documentation tab on the right side pane of this page.
20
21 data = thingSpeakRead(readChannelID,'Fields',[TemperatureFieldID HumidityFieldID], ...
22                       'NumPoints',300, ...
23                       'ReadKey',readAPIKey);
24
25 temperatureData = data(:,1);
26
27 % Read Humidity Data
28 humidityData = data(:,2);
29
30 % Visualize the data
31 scatter(temperatureData,humidityData);
32 xlabel('Temperature');
33 ylabel('Humidity');
34
```

Figura 74. Código para calcular correlación entre humedad y temperatura.

Como resultado se obtiene un gráfico que se va actualizando a medida que se toman lecturas.

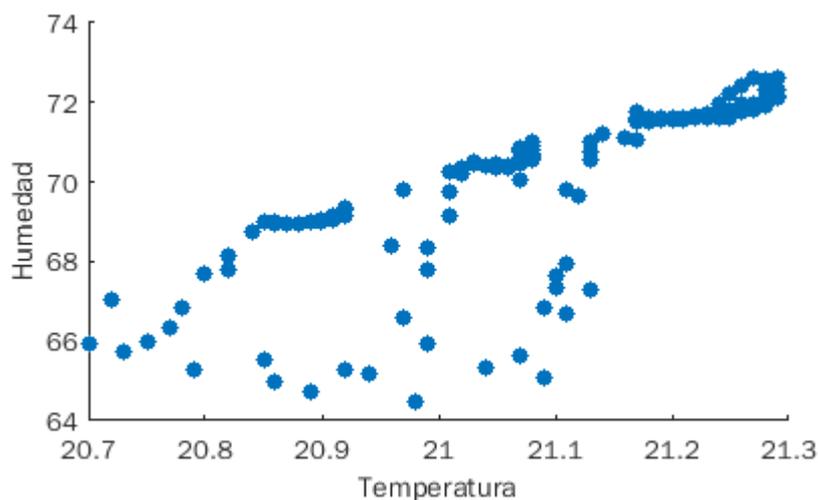


Figura 75. Visualización de correlación entre humedad y temperatura.

Con la herramienta Matlab Analysis se pueden crear histogramas de frecuencia, comparativas entre diferentes días de los datos, de manera que se puede realizar un análisis exhaustivo de los datos. A parte, se puede importar o exportar todas las lecturas obtenidas en formato .CSV.

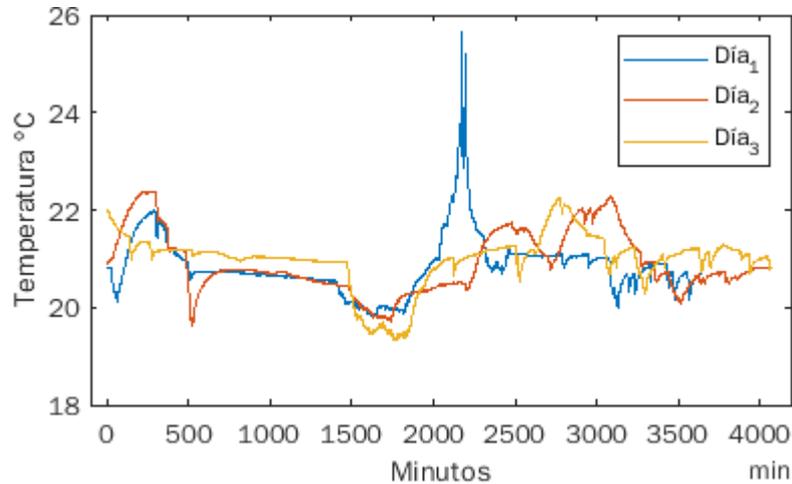


Figura 76. Comparación de temperatura durante 3 días.

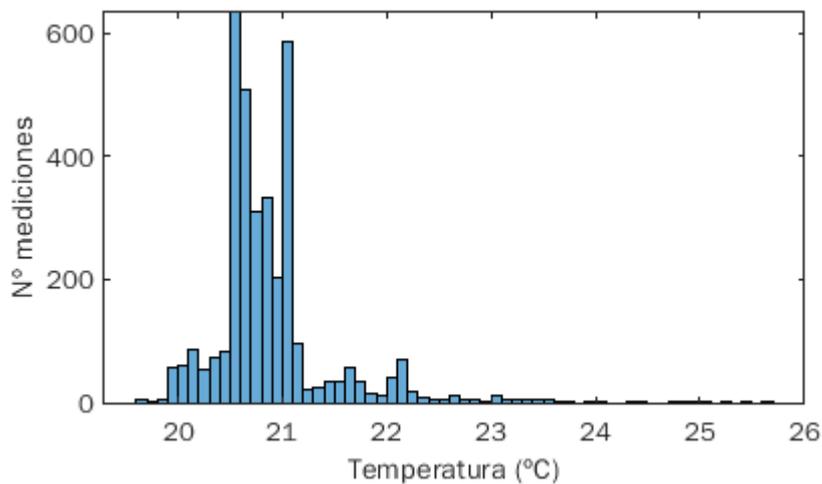


Figura 77. Histograma de la variación de temperatura.

Por lo que esta herramienta ofrece un gran abanico de posibilidades a la hora de visualizar y tratar los datos recopilados de manera sencilla y rápida. Pudiendo crear un gran banco de información en la nube. Los códigos de las figuras se encuentran en el Anexo II.

También permite el envío de alertas mediante diferentes opciones como email o Twitter. Se ha realizado una prueba, para avisar al usuario en caso de que el sistema deje de recibir datos durante un periodo de tiempo determinado. Esto podría significar

que es posible que el sistema se haya quedado sin alimentación eléctrica o que haya ocurrido algún error que se deba reparar.

Se desconectó el sistema de la red eléctrica durante un breve periodo de tiempo y se le indicó previamente, que enviara una notificación mediante Twitter de que se había dejado de recibir datos.



Figura 78. Mensaje de alerta indicando que el sistema ha dejado de recibir datos mediante Twitter.

Este tipo de alertas puede resultar especialmente útil en el proceso de la digestión anaerobia, donde es probable que se produzcan cambios relativamente bruscos de pH, por ejemplo, pudiendo alterar el rendimiento del proceso. De esta manera, mediante elementos de control se podría actuar de forma casi inmediata sin necesidad de estar presente en ese momento.

Además, la aplicación de ThingSpeak tiene también disponible una aplicación para teléfonos móviles, ThingView Full, donde se puede observar de manera rápida y visual los diferentes canales que puedan existir y los campos de cada canal. Por lo que es ideal para llevar el control si se tiene un gran número de canales de manera sencilla.



Figura 79. App móvil ThingView Full.

En la siguiente Figura, se muestra la pantalla principal donde se tienen los diferentes canales abiertos.

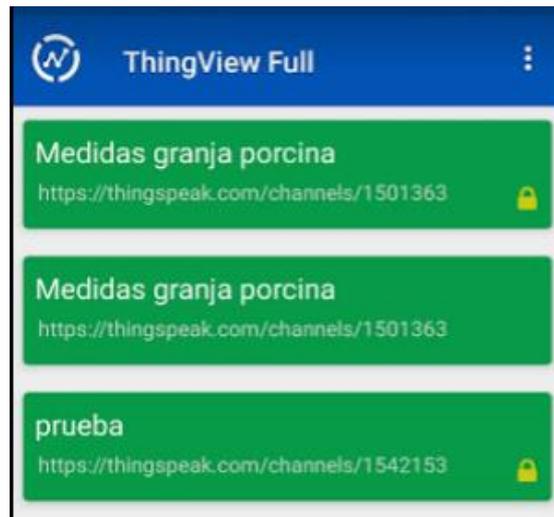


Figura 80. Pantalla inicial con los diferentes canales.

Si entramos en el canal Medidas granja porcina público se pueden observar los diferentes campos con los datos recopilados.



Figura 81. Visualización de los diferentes campos.

Si se entra en un campo en concreto para analizarlo con mayor detalle, se puede elegir el intervalo de tiempo o mostrar una comparativa entre valores de días diferentes o semanas o años. Además, se muestran los valores máximos y mínimos del intervalo escogido.



Figura 82. Comparativa de humedad entre dos días diferentes.

Es una herramienta que permite acceder a los datos en cualquier momento de forma sencilla, lo que facilita el trabajo de control. Es adecuado sobre todo para el caso en el que se tiene que gestionar datos de por ejemplo varias granjas ubicadas en localizaciones diferentes.

6.4.2.1. Código utilizado para tomar las lecturas y enviarlas a la nube.

El código desarrollado para el envío de las lecturas tomadas por los sensores ha sido el siguiente.

```
//-----Código-----//
//----- Arduino Nano 33 (IoT)-----//
//-----//

//En las siguientes líneas se incluyen las bibliotecas que son utilizadas//

#include <Wire.h>           // librería que permite comunicarse con dispositivos por bus I2C
#include <WiFiNINA.h>       // librería para la conexión Wifi
#include "secrets.h"       //librería para la ocultación de usuario y contraseña
#include "ThingSpeak.h"    // librería para la conexión con Thingspeak
#include "ArduinoLowPower.h" // librería para poner los elementos en modo sleep y reducir el consumo

#include <Adafruit_Sensor.h> //librería de Adafruit
#include <Adafruit_TSL2561_U.h> //librería para configurar sensor TSL2561
#include <Adafruit_BME280.h> // librería para configurar sensor BME280

// Dirección I2C (ID único para adjuntar a este sensor, puede dejar en el valor predeterminado de 12345)
Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 12345);

//definimos la variable necesaria para calcular la altitud y creamos un objeto de
//Adafruit_BME280 para acceder a las funciones de la biblioteca

#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)
Adafruit_BME280 bme; // I2C

//Datos de la red Wifi

char ssid[] = SECRET_SSID; // your network SSID (name)
char pass[] = SECRET_PASS; // your network password
int keyIndex = 0;          // your network key Index number
WiFiClient client;

//Datos de los canales de ThinSpeak.

unsigned long myChannelNumber = SECRET_CH_ID;
const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;

//Inicialización de las variables a medir por los sensores

float temperature = 0;
float pressure = 0;
float humidity = 0;
float altitude = 0;

uint16_t broadband = 0;
uint16_t infrared = 0;

int UV_value = 0;

String myStatus = "";
unsigned status;
```

```
//Datos de los canales de ThinSpeak.

unsigned long myChannelNumber = SECRET_CH_ID;
const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;

//Inicialización de las variables a medir por los sensores

float temperature = 0;
float pressure = 0;
float humidity = 0;
float altitude = 0;
|
uint16_t broadband = 0;
uint16_t infrared = 0;

int UV_value = 0;

String myStatus = "";
unsigned status;

void setup() {
  Serial.begin(115200);      // Inicialización del monitor serie

  ThingSpeak.begin(client); // Inicialización ThingSpeak
  //dht.begin();           // Inicialización DHT11
  bme.begin();            // Inicialización BME280
  tsl.begin();            // Inicialización TSL2561

  /*Configuración de la ganancia y tiempo de integración del sensor TSL2561*/
  void configureSensor(void)
  {
    /* Elección de la ganancia según condiciones de luz */
    // tsl.setGain(TSL2561_GAIN_1X);      /* No gain ... use in bright light to avoid sensor saturation */
    // tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X);    /* 16x gain ... use in low light to boost sensitivity */
    tsl.enableAutoRange(true);          /* Auto-gain ... switches automatically between 1x and 16x */

    /* Elección del tiempo de integración según resolución deseada ( */
    //tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_13MS);    /* fast but low resolution */
    //tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_101MS);  /* medium resolution and speed */
    tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS);   /* 16-bit data but slowest conversions */

    /* Imprime en pantalla los datos configurados para el sensor TSL2561 */
    Serial.println("-----");
    Serial.print ("Gain:          "); Serial.println("Auto");
    Serial.print ("Timing:        "); Serial.println("101 ms");
    Serial.println("-----");
  }
}
```

```
//Función de repetición del bucle//
void loop() {

  /* Comprobación de la conexión Wifi, restablece la conexión en caso de desconectarse*/
  if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
    Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");
    Serial.println(SECRET_SSID);
    while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
      WiFi.begin(ssid, pass); // Connect to WPA/WPA2 network.
      Serial.print(".");
      delay(5000);
    }
    Serial.println("\nConnected.");
  }
  /*Comandos utilizados para los cálculos*/
  sensors_event_t event;
  tsl.getEvent(&event);
  tsl.getLuminosity (&broadband, &infrared);

  /*Declaración de variables para almacenar los resultados*/
  float temperature = bme.readTemperature();
  float pressure = bme.readPressure();
  float humidity = bme.readHumidity();
  float altitude = bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA);
  int UV_value = analogRead(A0);

  /*Asignación de un número de campo en ThingSpeak a cada resultado*/
  ThingSpeak.setField(1, humidity);
  ThingSpeak.setField(2, temperature);
  ThingSpeak.setField(3, broadband);
  ThingSpeak.setField(4, infrared);
  ThingSpeak.setField(5, pressure);
  ThingSpeak.setField(6, altitude);
  ThingSpeak.setField(7, UV_value);
  ThingSpeak.setField(8, event.light);

  // set the status
  ThingSpeak.setStatus(myStatus);

  /* Escribe en el canal de ThingSpeak*/
  int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);
  if(x == 200){
    Serial.println("Channel update successful.");
  }
  else{
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));
  }
}
```

```
/*Muestra los datos en el monitor serie*/
if (event.light)
{
  Serial.print("Espectro Visible+ IR: ");
  Serial.println(broadband);
  Serial.print("Espectro Infrarrojo: ");
  Serial.println(infrared);
  Serial.print(event.light); Serial.println(" lux");
}
else
{
  Serial.println("Sensor overload");
}
Serial.print("Humedad = ");
Serial.print(humidity);
Serial.println(" %");

Serial.print("Temperatura = ");
Serial.print(temperature);
Serial.println(" °C");

Serial.print("Presión atmosférica = ");
Serial.print((pressure / 100.0F));
Serial.println(" hPa");

Serial.print("Approx. Altitud = ");
Serial.print(altitude);
Serial.println(" m");

Serial.print("Radiación UV = ");
Serial.print(UV_value);
Serial.println(" nm");

delay(2000); // Se espera 20 segundos para actualizar los canales

/*Comandos para configurar el Arduino en modo SLEEP*/

if (awake){
  Serial.println ("I am awake");
  delay (2000);
}
awake=false;
LowPower.attachInterruptWakeup(awake, WakeUp, CHANGE);
Serial.println("going to sleep");
LowPower.sleep (sleeping_time);
awake=false;
}
```

Figura 83. Código para enviar datos a ThingSpeak.

Ventana creada para introducir las credenciales (nombre de la red, contraseña, número de canal y API Write)

```
pruebacanales_8_low_level$ secrets.h
// Use this file to store all of the private credentials
// and connection details

#define SECRET_SSID "MOVISTAR_AAC8" // replace MySSID with your WiFi network name
#define SECRET_PASS "RokYeic3WjJ3q9Vdjqqj" // replace MyPassword with your WiFi password

#define SECRET_CH_ID 1501363 // replace 0000000 with your channel number
#define SECRET_WRITE_APIKEY "PQC94FWS5AJHCRHG" // replace XYZ with your channel write API Key
```

Figura 84. Ventana para introducir credenciales y conectar con ThingSpeak.

Para las variables propias del sistema habría que crear otro canal, ya que con las variables atmosféricas se completan los ocho campos disponibles por canal.

6.4.3. Conexión de red.

Teniendo en cuenta que el sistema de medición propuesto está destinado a zonas remotas en donde es difícil el acceso a la red eléctrica, así como a las conexiones de área local, se propone utilizar para crear una red de conexión inalámbrica, un router con tarjeta SIM.

Estudiando las diferentes opciones que presenta el mercado, se plantea utilizar un router con tarjeta SIM que se convierte en un punto de acceso portátil (MiFi). Se presenta el modelo M7200 V3 del fabricante TP-Link, ya que tiene un precio económico, además de ser de pequeñas dimensiones que puede ser conectado mediante batería recargable o directamente desde una fuente de alimentación [279].



Figura 85. Router MiFi del fabricante TP-Link. Fuente: <https://www.amazon.es/dp/B079GZnQ2B?tag=xtk-seleccion-21&th=1>

El M7200 es compatible con las redes 3G y 4G de última generación, lo que proporciona una cómoda conexión Wi-Fi en un gran número de países y regiones, compatible con la mayoría de los operadores de telefonía. Puede compartir fácilmente conexión con hasta 10 dispositivos inalámbricos al mismo tiempo.

Tabla 63. Especificaciones técnicas M7200 V3. Fuente: <https://www.tp-link.com/es/home-networking/mifi/m7200/#specifications>

Características De Hardware	
Interfaz	<ul style="list-style-type: none"> - 1 puerto micro USB para fuente de alimentación - 1 ranura para tarjeta SIM
Botones	Encendido / apagado
Fuente De Alimentación	<ul style="list-style-type: none"> - Batería interna recargable de 2000 mAh - Red: 5V
Tipo De Red	<ul style="list-style-type: none"> - 4G: FDD-LTE B1/B3/B7/B8/B20 (2100/1800/2600/900/800 MHz) - TDD-LTE B38/B40/B41 (2600/2300/2500 MHz) - 3G: DC-HSPA+/HSPA+/HSPA/UMTS B1/B8 (2100/900 MHz)
Tasa De Transferencia	DL: 150 Mbps, UL: 50 Mbps
Dimensiones	94×56,7×19,8 mm
Antenas	Antena interna
Pantalla De Led	Estado de Wi-Fi, estado de la conexión a Internet, estado de la batería
Características Inalámbricas	
Estándares Inalámbricos	IEEE 802.11b/g/n
Velocidad Inalámbrica	300 Mbps
Frecuencia	2,4 GHz
Potencia De Transmisión	<20 dbm
Seguridad Inalámbrica	Admite WPA-PSK / WPA2-PSK, filtrado MAC inalámbrico
DHCP (Protocolo De Configuración Dinámica De Host)	Servidor DHCP, Lista de clientes DHCP
Otros	
RNDIS Support	Sí
	Requisito del sistema: Windows XP / 7/8/10
Contenido Del Paquete	Wi-Fi móvil 4G LTE M7200
	Cable micro USB
	Batería de 2000 mAh
	Guía de Instalación Rápida
Requisitos Del Sistema	Windows 10/8/7/vista/XP, Mac OS, Android, iOS, Windows Phone
Certificaciones	CE, RoHS

El fabricante ofrece la aplicación tpMiFi, con la que se puede acceder y administrar fácilmente desde dispositivos iOS / Android conectados. Además, permite establecer límites de datos, controlar qué dispositivos pueden acceder la red y enviar mensajes.

6.4.3.1. Intensidad de señal.

Es importante conocer la intensidad de la señal que se tiene en el lugar de emplazamiento, con el fin de garantizar que todos los elementos reciben una señal apta para la entrada y salida de información.

Para ello, se han considerado dos opciones: la primera de ellas es utilizar un programa en Arduino IDE utilizando el módulo NINA-W102 integrado en la placa. Creando una aplicación que se conectará a la red Wi-Fi, medirá la intensidad de la señal y hará parpadear un LED en función de esta. Se utiliza el LED incluido en la placa Nano 33 IoT. El código utilizado es de código abierto encontrado en el repositorio de Arduino. [279]

En la primera parte del código se introducen los datos secretos, (nombre de la red y contraseña). También se declaran las variables necesarias para ejecutar el programa. En la apertura del comando void setup (), se inicia la comunicación serie a 9600 baudios. Posteriormente se crea un bucle que comprueba si se está conectados a la red y se genera un retraso de 10 segundos para darle tiempo suficiente para conectarse. Si la conexión es exitosa, se imprime en el monitor serial un mensaje como que se está conectado.

```
#include <WiFiNINA.h>

//please enter your sensitive data in the Secret tab
char ssid[] = SECRET_SSID;          // your network SSID (name)
char pass[] = SECRET_PASS;         // your network password (use for WPA, or use as key for WEP)
int status = WL_IDLE_STATUS;      // the Wi-Fi radio's status
int ledState = LOW;                //ledState used to set the LED
unsigned long previousMillisInfo = 0; //will store last time Wi-Fi information was updated
unsigned long previousMillisLED = 0; // will store the last time LED was updated
const int intervalInfo = 5000;    // interval at which to update the board information

void setup() {
  //Initialize serial and wait for port to open:
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  // set the LED as output
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

  // attempt to connect to Wi-Fi network:
  while (status != WL_CONNECTED) {
    Serial.print("Attempting to connect to network: ");
    Serial.println(ssid);
    // Connect to WPA/WPA2 network:
    status = WiFi.begin(ssid, pass);

    // wait 10 seconds for connection:
    delay(10000);
  }
}
```

Figura 86. Primera parte del código para medir intensidad de señal. Fuente: https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-33-iot/WiFi_connection

A continuación, se utiliza una instrucción para comprobar si el tiempo posterior a la última actualización es mayor que el intervalo previo. Se muestra en pantalla la información sobre la intensidad de la señal con la función `Wifi.RSSI`. Después, se inicializan otras dos variables, una para realizar un seguimiento del tiempo para el LED y otra para convertir la intensidad de la señal medida a un intervalo de tiempo. Por último, se establece una nueva instrucción para encender el LED si estaba apagado y viceversa, y una función para establecer el estado del LED.

```
// you're connected now, so print out the data:
Serial.println("You're connected to the network");
Serial.println("-----");
}

void loop() {
  unsigned long currentMillisInfo = millis();

  // check if the time after the last update is bigger the interval
  if (currentMillisInfo - previousMillisInfo >= intervalInfo) {
    previousMillisInfo = currentMillisInfo;

    // print the received signal strength:
    long rssi = WiFi.RSSI();
    Serial.print("signal strength (RSSI):");
    Serial.println(rssi);
    Serial.println("-----");
  }

  unsigned long currentMillisLED = millis();

  // measure the signal strength and convert it into a time interval
  int intervalLED = WiFi.RSSI() * -10;

  unsigned long currentMillisLED = millis();

  // measure the signal strength and convert it into a time interval
  int intervalLED = WiFi.RSSI() * -10;

  // check if the time after the last blink is bigger the interval
  if (currentMillisLED - previousMillisLED >= intervalLED) {
    previousMillisLED = currentMillisLED;

    // if the LED is off turn it on and vice-versa:
    if (ledState == LOW) {
      ledState = HIGH;
    } else {
      ledState = LOW;
    }
  }

  // set the LED with the ledState of the variable:
  digitalWrite(LED_BUILTIN, ledState);
}
}
```

Figura 87. Segunda parte del código para medir intensidad de señal. Fuente: https://docs.arduino.cc/tutorials/nano-33-iot/WiFi_connection

La segunda opción para saber cuál es el mejor punto donde colocar el router y que todos los elementos tengan una buena señal, es mediante una simulación utilizando el software FreeFem++, mediante la resolución de ecuaciones diferenciales parciales.

El Wifi es una onda electromagnética que contiene una señal: datos. Las ondas electromagnéticas son la combinación de ondas en campos eléctricos y magnéticos producidas por cargas en movimiento. La propagación de señales explica cómo se comportan las ondas de radio cuando se transmiten o se propagan de un punto a otro [280], [281].

Las ondas electromagnéticas se rigen por las 4 ecuaciones de Maxwell que le dan la solución para el campo eléctrico y el campo magnético, en el espacio pero también en el tiempo.

En este caso se busca una solución estacionaria donde la calidad de internet no cambia con el tiempo. De esta forma, las ecuaciones de Maxwell se pueden simplificar a una ecuación, la de Helmholtz, quedando de la siguiente manera:[282], [283]

$$\nabla^2 E + \frac{k^2}{n^2} \cdot E = 0 \quad (5)$$

Donde k es el número de onda angular de la señal wifi, n el índice de refracción del material en el que se encuentra la onda, ∇^2 es el laplaciano y E es el campo eléctrico.

Por lo que el punto principal de este estudio es el impacto de las paredes en la potencia de la señal, donde la n es diferente del aire (donde vale aproximadamente 1). En las paredes, el índice de refracción es un número complejo en el que las dos partes tienen una interpretación física:

- La parte real define la reflexión de la pared.
- La parte imaginaria define la absorción de la pared

Si bien es verdad que la mayor parte del terreno donde se colocarán los sensores es al aire libre, donde prácticamente no hay obstáculos que dificulten la propagación de las ondas, hay que tener en cuenta el biodigestor, puesto que este está construido con paredes de hormigón. El hormigón puede interferir en la intensidad de la señal de los sensores que se coloquen en las diferentes cámaras del digestor.

Considerando que las paredes del reactor están construidas de hormigón armado se tiene que el índice de refracción de dicho material según la literatura es: $n=2.55-0.084 i$ [284]. La intensidad de la señal se expresa en dBm. Este término representa los decibelios relativos a un milivatio. En España, la potencia de los routers para las redes de 2,4 Ghz se encuentra limitada a 100 mW (o 0,1 vatios), lo que equivale a 20 dBm [285]. A continuación, se explica el código utilizado. La escala de dBm es logarítmica y no lineal, lo que significa que los cambios entre las intensidades de la señal no se escalan de forma gradual. En esta escala, una diferencia de 3 dBm conduce a una reducción a la mitad o al doble de la intensidad de la señal anterior. [286]

Lo primero que se hace es construir el contorno creando el dominio.

```
/Contorno exterior
real a = 30, b = 20, c = 0.1;
border a00(t=0, 1) {x=a*t; y=0; label=1;}
border a10(t=0, 1) {x=a; y=b*t; label=1;}
border a20(t=1, 0) {x=a*t; y=b; label=1;}
border a30(t=1, 0) {x=0; y=b*t; label=1;}

//contorno interior
border a01(t=0, 1) {x=c+(a-c*2)*t; y=c; label=1;}
border a11(t=0, 1) {x=a-c; y=c+(b-c*2)*t; label=1;}
border a21(t=1, 0) {x=c+(a-c*2)*t; y=b-c; label=1;}
border a31(t=1, 0) {x=c; y=c+(b-c*2)*t; label=1;}

//digestor
real r = 1, s = 7, j = 8, u = 4;
border c00(t=0, 1) {x=r+j*t; y=s; label=3;}
border c10(t=0, 1) {x=r+j; y=s+u*t; label=3;}
border c20(t=1, 0) {x=r+j*t; y=s+u; label=3;}
border c30(t=1, 0) {x=r; y=s+u*t; label=3;}
```

Una vez que se tiene el dominio creado se procede a crear una malla con una buena precisión.

```
int n=13;
mesh Sh = buildmesh(a00(n) + a10(n) + a20(n) + a30(n)
+ a01(n*8) + a11(n*6) + a21(n*8) + a31(n*6)
//+ b00(5*n) + b10(5*n) + b20(5*n) + b30(n/2.5)
+ c00(4*n) + c10(2*n) + c20(4*n) + c30(n)
);
plot(Sh,wait=1);
```

Se ha creado el dominio y la malla pero falta crear el border que defina el punto que hará simulará la posición del router. Para ello, se define un punto en coordenadas paramétricas. Este irá cambiando de posición a lo largo del eje y realizando un bucle utilizando el comando for.

```
//.....se crea el hotspot y se utiliza bucle para cambiarlo de posición.....//  
  
int bx;  
for (bx = 1; bx <= 12; bx++){  
    border C(t=0, 2*pi){x=2*bx+0.25*cos(t); y=4+0.25*sin(t); label=2;}  
  
//..... se crea nueva malla incluyendo el router.....//  
  
mesh Th = buildmesh(a00(n) + a10(n) + a20(n) + a30(n)  
    + a01(10*n) + a11(10*n) + a21(10*n) + a31(n) + C(10)  
    //+ b00(5*n) + b10(n/2.5) + b20(5*n) + b30(n/2.5)  
    + c00(n) + c10(6*n) + c20(n) + c30(6*n)  
);
```

A continuación, se define un espacio de elemento finitos, con polinomios de grado 1 y se crea la función wall. Para ello, se definen las regiones formadas por las paredes y se exige que se devuelva 1 si se encuentra con un punto que pertenezca a dichas regiones o que devuelva 0 si pertenece al espacio perteneciente al aire.

```
fespace Vh(Th, P1);  
func real wall() {  
    if (Th(x,y).region == Th(0.1,0.1).region || Th(x,y).region == Th(1,6).region) { return  
1; }  
    else { return 0; }  
}
```

Se define el coeficiente de refracción del hormigón y el número de onda angular. Hay que señalar que el índice de refracción es un número complejo, por lo que se deben separar las partes.

```
Vh<complex> v,w;  
  
Vh wallreflexion = 2.55; //coeficiente de reflexión pared de hormigón  
Vh<complex> wallabsorption = -0.084i; //coeficiente de absorción pared de  
hormigon  
Vh k = 2.4; // frecuencia angular wifi en Ghz
```

Finalmente, se procede a resolver el problema utilizando la ecuación de Helmholtz. Se utiliza el comando *problem* y se definen las integrales, utilizando polinomios de grado 2. Se considera un valor de contorno fijo para el punto de acceso. Se plotea el resultado.

```
problem wifi(v,w) =
  int2d(Th)(
    (v*w*k^2)/(1+(wallreflexion+wallabsorption)*wall())^2
    - (dx(v)*dx(w)+dy(v)*dy(w))) + on(2, v=1) ;

wifi;
Vh vm = log(real(v)^2 + imag(v)^2);
plot(vm, wait=1, fill=true, value=1, nbiso=65);
}
```

Se muestra el mallado.

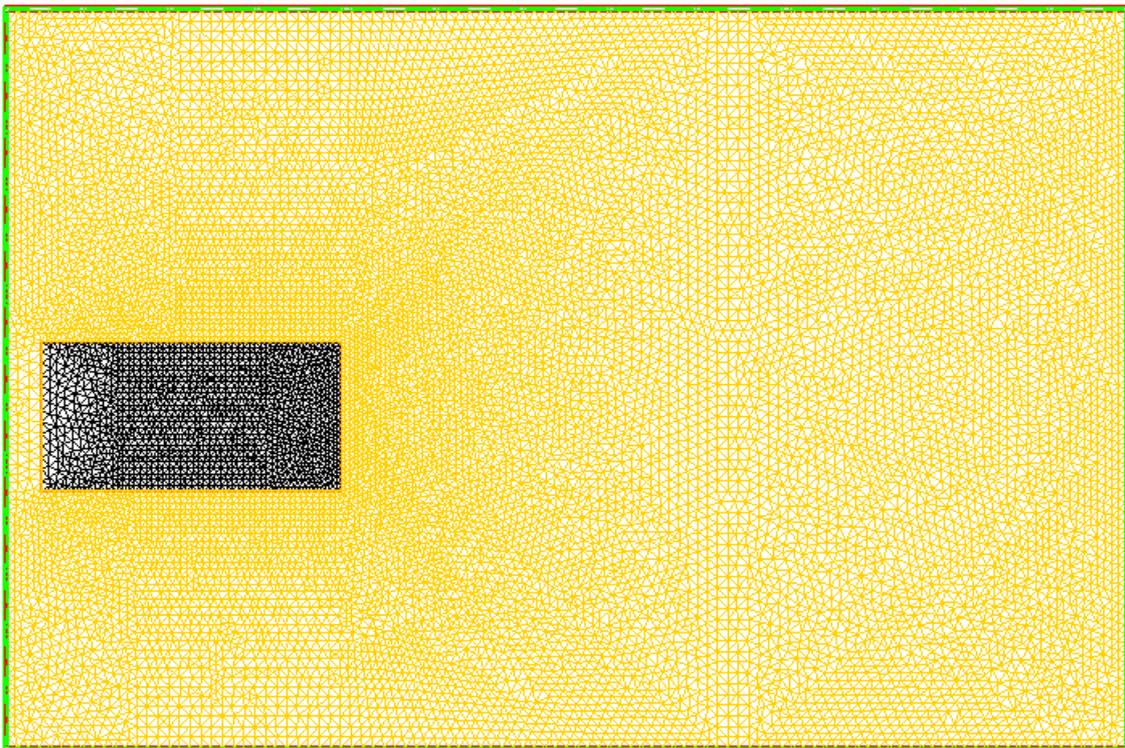
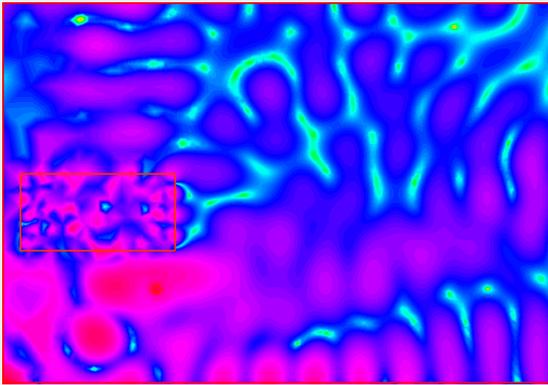
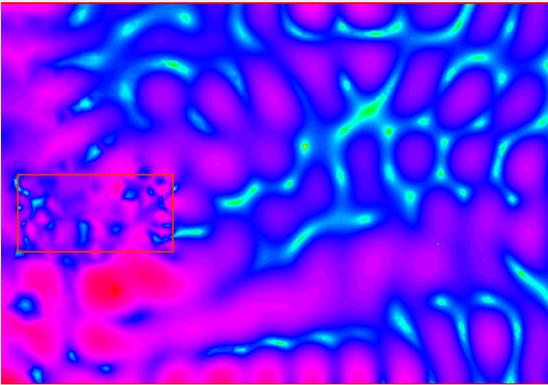
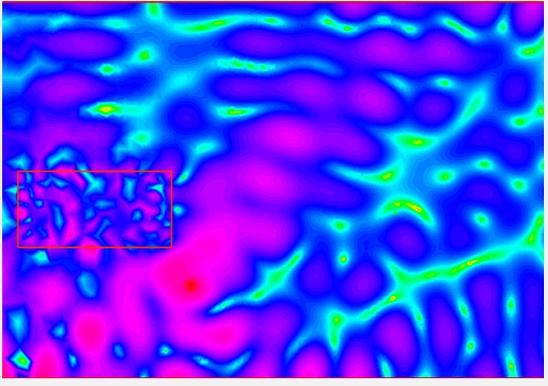
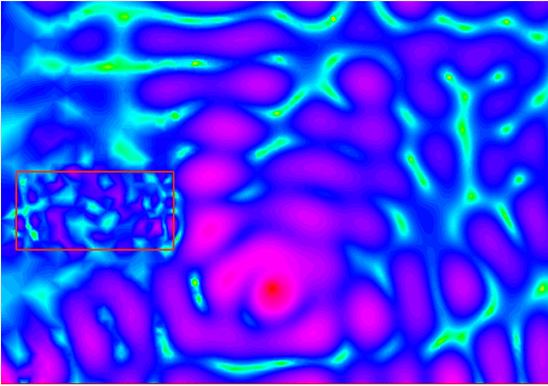
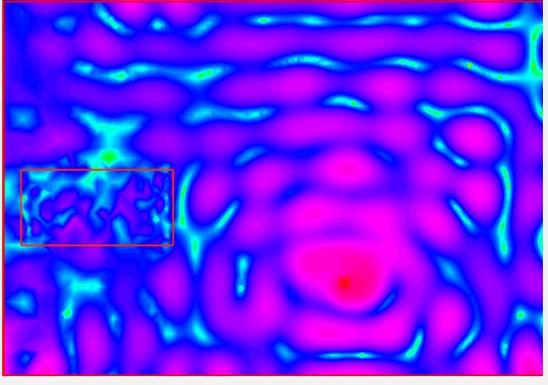
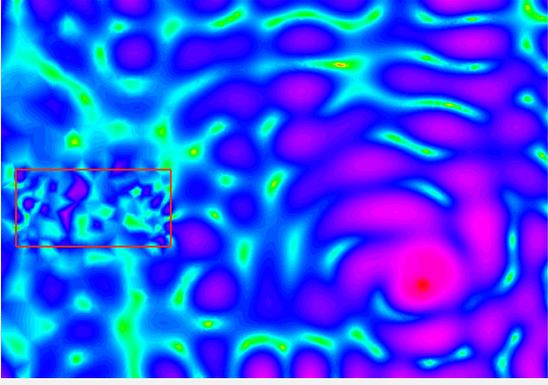
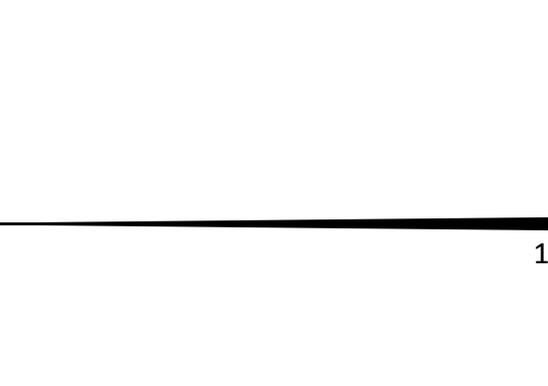
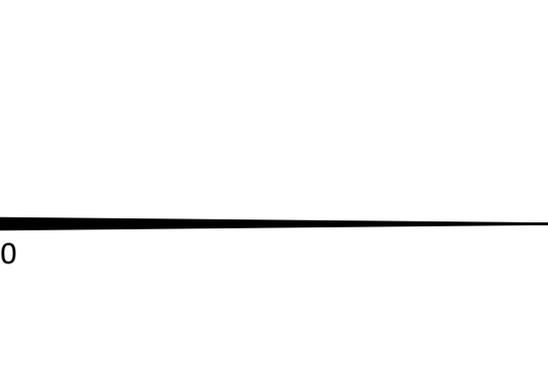
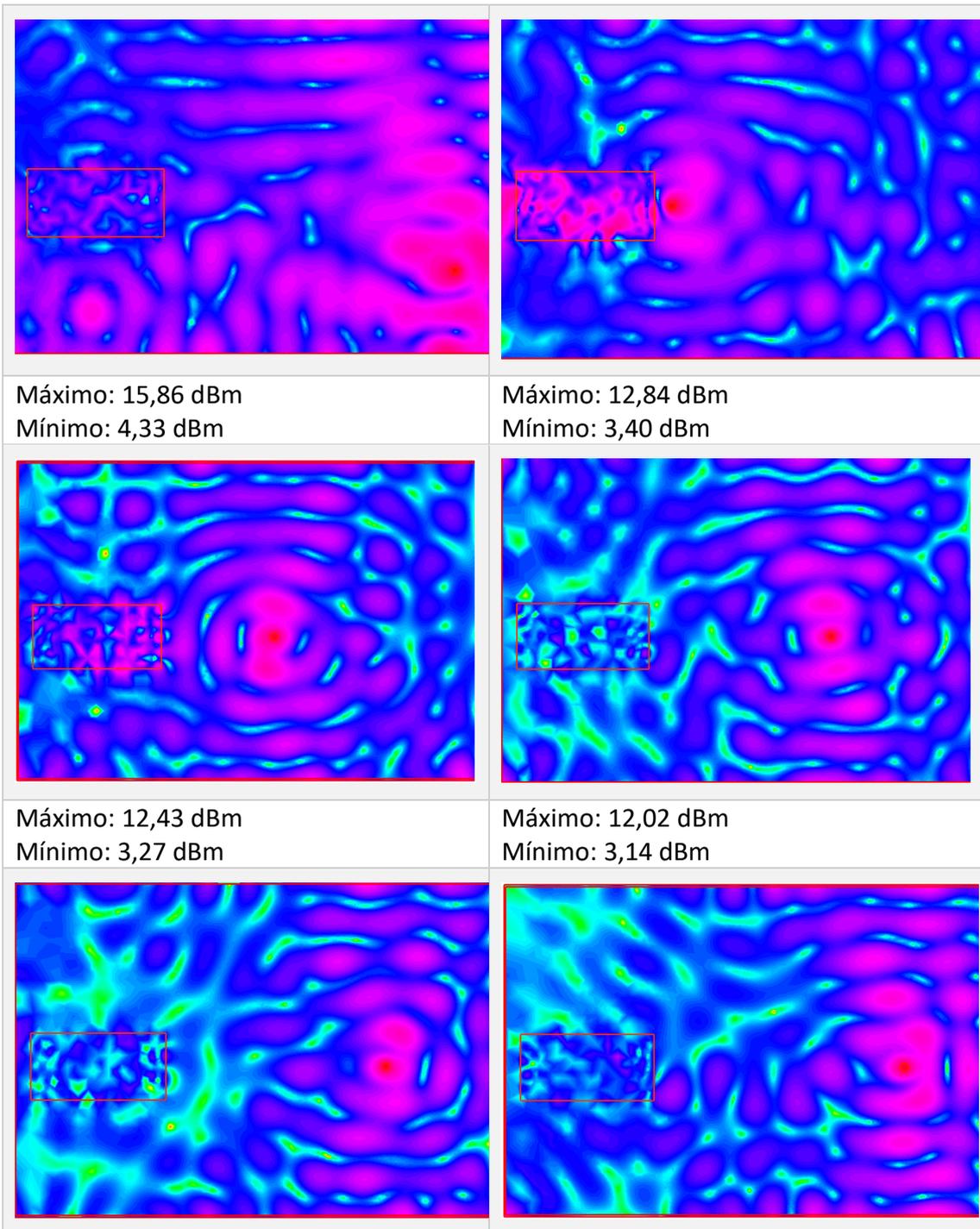


Figura 88. Mallado recinto planta piloto.

Se muestran los resultados obtenidos de manera visual, así como el valor máximo y mínimo de la señal wifi (dBm) alcanzado según la ubicación del router.

Tabla 64. Visualización de la intensidad de la transmisión wifi (dBm) según ubicación.

<p>Máximo: 13,38 dBm Mínimo: 3,56 dBm</p> 	<p>Máximo: 14,95 dBm Mínimo: 4,06 dBm</p> 
<p>Máximo: 15,18 dBm Mínimo: 3,87 dBm</p> 	<p>Máximo: 12,47 dBm Mínimo: 3,28 dBm</p> 
<p>Máximo: 12,78 dBm Mínimo: 3,39 dBm</p> 	<p>Máximo: 14,03 dBm Mínimo: 3,72 dBm</p> 
<p>Máximo: 18,79 dBm Mínimo: 5,23 dBm</p> 	<p>Máximo: 11,24 dBm Mínimo: 2,91 dBm</p> 



Las ondas en color rosa/violeta representan las zonas donde llega mayor intensidad de la señal, y las ondas de color azul oscuro a turquesa son las zonas donde la intensidad de la señal es menor.

Por lo que teniendo en cuenta la intensidad de la señal y la disponibilidad del terreno, se puede instalar el router en una zona donde llegue la señal a toda la superficie

en la que se encuentren instalados sensores, con una intensidad aceptable para la transmisión de los datos.

6.5. Alimentación del sistema.

En este proyecto se busca utilizar un sistema de alimentación que pueda abastecer de energía el sistema de forma independiente, mediante energías renovables como la solar fotovoltaicas. Debido principalmente a que se trata de sistemas que estarán instalados en entornos rurales donde el conexionado eléctrico es un desafío.

Para ello, se propone utilizar una batería encargada de alimentar el sistema cuando la radiación solar sea insuficiente para realizar dicha tarea (por ejemplo, al anochecer, días nubosos), un regulador de carga, con el fin de proteger la batería de sobrecargas y sobre descargas y un panel solar.

Para seleccionar adecuadamente el panel solar y la batería para el sistema que se quiere alimentar, se debe considerar sus necesidades energéticas. Para ello hay que aproximar el consumo de todos los componentes que tendría el sistema.

6.5.1. Elección de la batería.

Teniendo en cuenta que se ha propuesto utilizar dos microcontroladores, uno para la parte de las medidas del entorno y otro para las del proceso, se establecen los consumos de cada grupo. Se plantea colocar el router SIM junto con el grupo de variables del entorno.

Tabla 65. Consumos de grupo de sensores de variables propias del proceso.

Dispositivos	Consumo modo trabajo (mA)	Consumo modo sleep (mA)
NANO 33	110	36
EZO-T	16	0,4
EZO-EC	50	0,7
EZO-PH	16	1,16
EZO-ORP	18,3	1,16
EZO-DO	13,5	0,66
EZO-CO2	45	3,4
TOTAL	268,8	43,48

Tabla 66. Consumos grupo de sensores de variables del entorno y router SIM.

Dispositivos	Consumo modo trabajo (mA)	Consumo modo sleep (mA)
NANO 33	110	36
BME280	0,0036	0,0005
ML8511	0,3	0,14
TSL2561	0,6	0,0015
Router SIM	250	3,33
TOTAL	360,90	39,68

Se plantea un diseño en el que los sensores no estén midiendo continuamente. Se considera que los sensores destinados a tomar lecturas de las variables del entorno lo hacen cada media hora durante 5 minutos. Se fijan 5 minutos para que los sensores puedan estabilizarse correctamente y no haya error en las medidas. El resto del tiempo se pondrán en modo sleep. Para las variables propias del proceso se considera tomar lecturas cada hora durante 5 minutos y el resto del tiempo se encuentren en modo descanso. Así que los consumos diarios de corriente serían los siguientes.

Tabla 67. Consumo diario de los dispositivos para medir las variables del proceso.

Modo	Horas funcionamiento	Consumo dispositivos (mA)	Consumo día (mA)
on	2 horas	270	540
sleep	22 horas	43,48	956,56
Total			1496,56

Tabla 68. Consumo diario para medir variables del entorno más router.

Modo	Horas funcionamiento	Consumo dispositivos (mA)	Consumo día (mA)
on	4 horas	360,036	1443,61
sleep	20 horas	39,68	793,6
Total			2237,21

El consumo total diario asciende 3733,77 mA teniendo en cuenta que el sistema será alimentado por un panel fotovoltaico durante el día, se puede calcular la capacidad de la batería para satisfacer un consumo de 12 horas. Sin embargo, hay que tener en cuenta

también, que puede haber días donde la radiación solar incidente sea insuficiente para alimentar el sistema.

Por ello, se propone utilizar una batería de 8000 mA, con esta capacidad el sistema puede ser autosuficiente durante más de 48 horas seguidas. Se propone utilizar la batería del fabricante XUNZEL de 12V.



Figura 89. Batería 12 V 14 Ah. Fuente: <https://www.leroymerlin.es/fp/15276163/bateria-solar-solarx-8-xunzel-12v-de-larga-duracion-sellada-sin-mantenimiento#fichaTecnica>

Es una batería de plomo-ácido con válvula regulada-VRLA y construcción de malla de fibra de vidrio absorbente-AGM sin fugas y con sistema de recombinación de gas, de ciclo profundo monoblock. Especialmente diseñadas para aplicaciones solares, eólicas, respaldo, industriales, alimentación de equipos electrónicos, SAI/UPS, telecomunicaciones y aplicaciones de alta corriente de descarga como inversores, motores y automatismos, tiene una vida útil de 10 a 12 años. [287]

Tabla 69. Especificaciones técnicas batería 12V. Fuente: [datasheet battery](#)

Características	Valor
Tensión Nominal	12 V
Capacidad 100 %	8000 mAh
Dimensiones (largo x ancho x alto)	151x95x98 mm
Resistencia interna	30 mΩ
Temperatura rango de operación	
Descarga	20°C ~ 60°C
Carga	0°C ~ 50°C
Temperatura de trabajo operacional	10°C a 30°C
Máxima Corriente de Carga Recomendada	3,6 A

6.5.2. Panel solar.

Se propone utilizar un panel solar de 12 V para alimentar el sistema. Dependiendo de la meteorología, la época del año y la latitud en la que se encuentre el emplazamiento, la radiación solar incidente será diferente por lo que la energía que pueda producir el panel también. Por tanto para empezar, se debe estimar la cantidad de energía solar que se puede obtener en la localización elegida. Utilizando el Visor Grafcan e introduciendo la coordenadas donde se encuentra situada la granja, se obtienen los datos de radiación mensual.

Tabla 70. Valores de la radiación solar incidente en la localización de la planta piloto. Fuente: <https://visor.grafcan.es/visorweb/>

Mes	Radiación Superficie horizontal (kWh/m ² /día)
Enero	3,34
Febrero	4,09
Marzo	5,46
Abril	5,46
Mayo	6,28
Junio	7,10
Julio	6,92
Agosto	6,53
Septiembre	5,53
Octubre	4,24
Noviembre	3,15
Diciembre	3,07

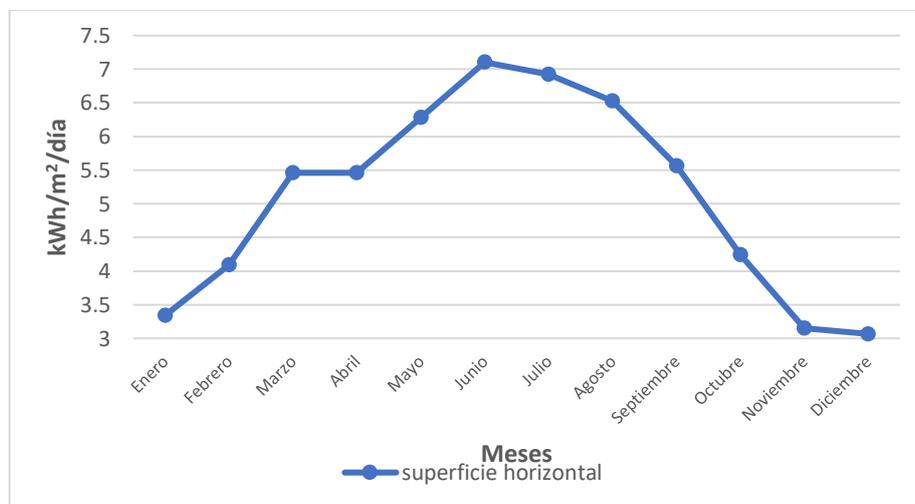


Figura 90. Radiación solar incidente sobre superficie horizontal en planta piloto.

El peor valor se obtiene en el mes de noviembre donde se registra una media diaria de 4,18 kWh/m². De forma que se dimensionará la instalación para estas condiciones.

$$I(A) = P(W) / V(V)$$

Si se tiene un panel de 12 V con capacidad de generar 60W de potencia, generará un total de 5 A, lo que sería suficiente para alimentar el sistema (1,86 A) durante el día. También sería suficiente para restablecer la carga de la batería gastada durante la noche. Además, hay que tener en cuenta que ese cálculo es para una superficie horizontal, si se orienta el panel en perpendicular a la dirección de la radiación solar podemos obtener un extra de energía como se puede observar en la gráfica.

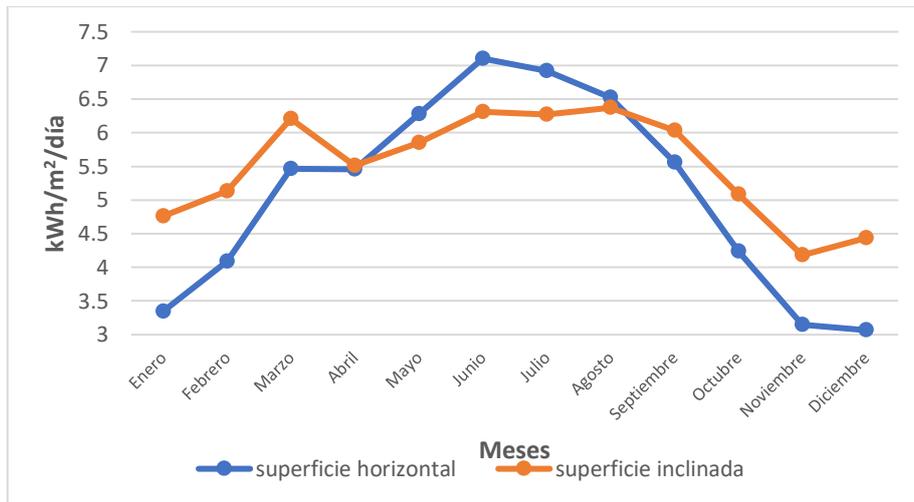


Figura 91. Comparativa entre radiación incidente en superficie horizontal e inclinada.

Para cargar por completo la batería en un día sería necesario generar al menos 83 W de potencia.

6.5.3. Controlador de carga.

Se propone utilizar un controlador de carga y descarga solar programables de alta eficiencia del fabricante XUNZEL, diseñado para sistemas de 12V y/o 24V, para la alimentación de cargas DC directamente y de forma eficiente ya que no se necesita un inversor. Con salida USB 5V para conectar dispositivos electrónicos. Este dispositivo gestiona automáticamente el funcionamiento del panel solar y la batería en el sistema solar.[288]



Figura 92. Dispositivo para control de carga XUNZEL ISCC-AU 5 80W 12v

La idea que se propone es conectar directamente las placas de Arduino Nano 33 a la entrada USB de 5V, así como el router SIM. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones técnicas del dispositivo.

Tabla 71. Especificaciones técnicas controlador de carga. Fuente: [Datasheet controlador](#)

Características	Valor
Tensión del sistema	12 V
Máx. potencia solar	80 W
Máx. corriente de carga	5 A
Interfaz USB	5V
Autoconsumo	4 mA
Máx. tensión batería	20 V
Máx. tensión solar	25 V
Protección sobretensión	15,50 V
Protecciones	Polaridad inversa, cortocircuito, sobre corriente, corriente inversa, sobrevoltaje, bajo voltaje, sobre temperatura
Rango de temperatura ambiente	-40°C ~ +60°C
Dimensiones	132x74x27mm

El controlador de carga solar debe conectar primero la batería, luego el panel solar y finalmente la carga. La secuencia de desmontaje es contraria al orden de cableado.

6.5.4. Caja de protección.

Se debe incluir un elemento de protección para instalar los componentes electrónicos y que queden protegidos de las condiciones meteorológicas adversas. Proporcionado una atmósfera interior adecuada con el que posibilite un buen funcionamiento del sistema.

Para elegir el tipo de envolvente se ha seguido la Norma UNE-EN 60529:2018, Grados de protección proporcionados por las envolventes (Código IP). Para la instalación del microcontrolador junto con el sensor BME280, el regulador de carga y el router SIM, así como el otro microcontrolador con los sensores de mediciones propias del sistema, se decide utilizar una envolvente estanca de grado de protección IP65: nivel 6 para la protección contra el ingreso de objetos sólidos (Protección fuerte contra polvo) y para la protección contra el agua el nivel elegido es el 5 (Protección contra los chorros de aguas, desde todas las direcciones) [289].

Para los sensores ML8511 y TSL2561 se utilizará una caja con tapa semitransparente para evitar los problemas de saturación en condiciones de alta intensidad lumínica. Como estos dos sensores tienen un consumo mínimo se podría poner otro par de sensores (sin verse apenas afectado el consumo total del sistema), en una caja totalmente transparente para comparar las lecturas tomadas con las diferentes cubiertas



Figura 93. Cajas de protección con tapa opaca, semitransparente y transparente: Fuente: Amazon.es

7. Conclusiones y líneas de investigación futuras.

Con el desarrollo del presente TFM se ha podido demostrar la gran versatilidad de los microcontroladores de bajo coste como Arduino. Se ha demostrado que con un sistema de aproximadamente 1000 € se pueden tomar lecturas de múltiples variables con una precisión más que aceptable. Alejándose de los precios de los dispositivos tradicionales para medir los parámetros (espectroscopía, cromatografía, ...), que además tienen el inconveniente de tener que analizar las muestras en laboratorio.

Esto supone una opción real para supervisar, controlar, o adquirir datos concernientes ya no solo acerca de los sistemas de depuración natural, sino de cualquier sistema, dada la sencillez de la programación y el bajo precio de los componentes para dicho propósito. Pudiéndose crear con relativa facilidad una red de datos reales, por ejemplo de varias plantas de depuración de aguas mediante SDN en España o incluso en Europa, ya que gracias a los servidores en la nube la información puede ser accesible a todo el mundo. Dicha información puede ser consultada desde un ordenador o desde el propio teléfono móvil, lo que permite gestionar de forma simultánea una gran cantidad de información, que no sería posible realizar de otra manera.

Este proyecto, aunque se ha aplicado a una granja con un sistema de depuración natural para tratar los residuos generados por una explotación porcina, se puede extrapolar a otro tipo de planta de depuración de aguas residuales, de pequeño o gran tamaño. Por lo que el potencial que ofrece este proyecto es amplio que puede explotarse de muchas formas.

La realización de este proyecto a lo largo del tiempo puede permitir la elaboración de modelos matemáticos a partir de los datos recogidos. Esto resulta de gran interés, ya que serían datos reales obtenidos en tiempo real.

Es importante destacar también el aprovechamiento de las energías renovables para conferir autonomía al sistema. De manera que cualquier sistema puede hacerse autónomo incorporando una batería acorde al consumo de este y un dispositivo capaz de aprovechar las energías renovables para recargar dicha batería, como una instalación

fotovoltaica. Por lo que se puede tomar datos de lugares situados en entornos rurales donde existe un difícil acceso al tendido eléctrico.

Como líneas de investigación futuras se propone lo siguiente:

- Realizar la instalación en la propia granja y observar como evoluciona el sistema (problemas que puedan surgir, mejoras que se puedan realizar).
- Medir parámetros que requieren sensores o sistemas de medición más complejos, como la concentración de AGV, DQO o DBO entre otros.
- Medir la concentración de gas metano producido, aunque en el mercado se encuentran sensores de bajo coste para medir la concentración de dicho gas, no se propuesto debido a la problemática que supone su calibración. Los sensores encontrados como el MQ-4, no muestran una gran precisión a la hora de tomar las medidas, ya que no solo detecta el metano sino otro tipo de gases, pudiendo generar lecturas poco fiables.
- Añadir elementos de control que sean capaz de interactuar con el sistema, dependiendo de los valores obtenidos por los sensores. Como actuar sobre el pH si se recibe una alarma de que su valor a disminuido o incrementado de manera brusca. De esta forma se puede tener un proceso más eficiente.
- Diseñar una red en la que los microcontroladores se comuniquen entre sí, utilizando por ejemplo, un protocolo maestro-esclavo.
- En cuanto al aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía se propone analizar el comportamiento del sistema geotérmico simulando las condiciones de transferencia de calor mediante el Método de Elementos Finitos. Sería interesante por tanto medir el viento que afecta a la zona.

Anexo I. Referencias

- [1] Consejería de Transición Ecológica Lucha contra el cambio climático y Planificación Territorial, “Anuario energético de canarias 2018.” 2020.
- [2] Compañía Española de Seguros de Crédito a la Exportación, “Energías renovables. Informe sectorial de la economía española.” p. 42, 2019.
- [3] “Análisis | ESIOS electricidad · datos · transparencia.” [Online]. Available: https://www.esios.ree.es/es/analisis/1739?vis=1&start_date=01-01-2019T00%3A00&end_date=30-06-2020T23%3A59&compare_start_date=01-12-2018T00%3A00&groupby=month&compare_indicators=1013,1014,1015. [Accessed: 25-Jun-2020].
- [4] Comisión Europea, “Marco sobre clima y energía para 2030 | Acción por el Clima.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es. [Accessed: 03-Mar-2020].
- [5] Comisión Europea, “El Pacto Verde Europeo,” 2019.
- [6] R. A. Parra Huertas, “Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,” *Producción + Limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142–159, 2015, doi: 10.22507/pml.v10n2a13.
- [7] R. Botero and T. R. Preston, “COMBUSTIBLE Y FERTILIZANTE A PARTIR DE EXCRETAS ” MANUAL PARA SU INSTALACION , OPERACION Y UTILIZACION ” Raúl Botero Botero y Thomas R . Preston Edición BIODIGESTOR DE BAJO COSTO Raúl Botero Botero1 y Thomas R . Preston,” *Agriculture*, p. 20, 1987.
- [8] A. J. Ward, P. J. Hobbs, P. J. Holliman, and D. L. Jones, “Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources,” *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 17, pp. 7928–7940, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.02.044.
- [9] V. Savran, M. R. D. Piñón, and J. S. A. Palacios, “Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores.,” *Pastos y Forrajes*, vol. 35, no. 2, pp. 219–226, 2012.

- [10] T. E. Lastra Bravo, "CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FRACCIÓN ORGÁNICA TRITURADA DE LOS RSU PARA VALORAR SU INCORPORACIÓN AL AGUA RESIDUAL Y TRATAMIENTO DE UNA EDAR," Universidad Politécnica de Valencia., 2013.
- [11] M. T. Varnero *et al.*, "Aprovechamiento racional de desechos orgánicos," *Ministerios de Agricultura - Fondo de Investigación Agropecuaria*. 1990.
- [12] M. Madsen, J. B. Holm-Nielsen, and K. H. Esbensen, "Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 6. Pergamon, pp. 3141–3155, 01-Aug-2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.04.026.
- [13] L. Castrillón Peláez and E. Marañón Maison, "Problemática de los residuos ganaderos," *Nuestra Cabaña*, vol. 323, p. págs. 16-24, 2003.
- [14] C. López, C. A. Mendieta, A. López, and Pérez S.O., "Proceso para el tratamiento de residuos ganaderos en la isla de gran canaria," in *I Simposio Iberoamericano de I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 2008, pp. 23–24.
- [15] OECD/FAO, *Agricultural Outlook 2018-2027*, vol. 181. Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome., 2018.
- [16] M. Watabe *et al.*, "Prevalence of bacterial faecal pathogens in separated and unseparated stored pig slurry," *Letters in Applied Microbiology*, vol. 36, no. 4, pp. 208–212, Apr. 2003, doi: 10.1046/j.1472-765X.2003.01293.x.
- [17] M. Marszałek, Z. Kowalski, and A. Makara, "Emission of Greenhouse Gases and Odorants from Pig Slurry - Effect on the Environment and Methods of its Reduction," *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 25, no. 3, pp. 383–394, Sep. 2018, doi: 10.1515/eces-2018-0026.
- [18] M. Marszałek, Z. Kowalski, and A. Makara, "Physicochemical and Microbiological Characteristics of Pig Slurry," *Technical Transactions*, vol. 2014, no. Chemia Zeszyt 1-Ch (18) 2014, pp. 81–91, 2014, doi: 10.4467/2353737XCT.14.278.3366.
- [19] C. A. Mendieta Pino, "Evaluación Y Modelización De Sistemas De Tratamiento No

- Convencional O Natural Para Efluentes Procedentes De Explotaciones Ganaderas De Porcino En La Isla De Gran Canaria,” Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2015.
- [20] U.S. Energy Information Administration, “Electric Power Monthly with Data for March 2020,” *Electric Power Monthly*. Washington, DC, 2020.
- [21] L. Loyon, “Overview of manure treatment in France,” *Waste Management*, vol. 61, pp. 516–520, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2016.11.040.
- [22] G. Grossi, P. Goglio, A. Vitali, and A. G. Williams, “Livestock and climate change: Impact of livestock on climate and mitigation strategies,” *Animal Frontiers*, vol. 9, no. 1, pp. 69–76, Jan. 2019, doi: 10.1093/af/vfy034.
- [23] M. Sánchez and J. L. González, “The fertilizer value of pig slurry. I. Values depending on the type of operation,” *Bioresource Technology*, vol. 96, no. 10, pp. 1117–1123, 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.10.002.
- [24] M. Marszałek, Z. Kowalski, and A. Makara, “The Possibility of Contamination of Water-Soil Environment as a Result of the Use of Pig Slurry,” *Ecological Chemistry and Engineering S*, vol. 26, no. 2, pp. 313–330, 2019, doi: 10.1515/eces-2019-0022.
- [25] *Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC)*. .
- [26] “BOE.es - BOE-A-1996-5618 Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por los nitratos procedentes de fuentes agrarias.” [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-5618>. [Accessed: 02-Jun-2021].
- [27] Z. Ciećko, A. Żołnowski, and A. Mierzejewska, “Impact of Foliar Nitrogen and Magnesium Fertilization on Concentration of Chlorophyll in Potato Leaves,” *Ecological Chemistry and Engineering. A*, vol. Vol. 19, no. nr 6, pp. 525–535, 2012, doi: 10.2428/ecea.2012.19(06)053.

- [28] P. Mantovi, G. Bonazzi, E. Maestri, and N. Marmiroli, "Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants," *Plant and Soil*, vol. 250, no. 2, pp. 249–257, 2003, doi: 10.1023/A:1022848131043.
- [29] L. Jih-Gaw, C. N. Chang, and S. C. Chang, "Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization," *Bioresource Technology*, vol. 62, no. 3, pp. 85–90, 1997, doi: 10.1016/S0960-8524(97)00121-1.
- [30] G. Giner Santonja, K. Georgitzikis, B. M. Scalet, P. Montobbio, S. Roudier, and L. D. Sancho, "Best Available Techniques Reference Document for the intensive rearing of poultry or pigs," 2003.
- [31] U. D. E. S. D. E. Compostela, *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*, no. January 2011. 2011.
- [32] E. T. Kornegay and A. F. Harper, "Environmental Nutrition: Nutrient Management Strategies to Reduce Nutrient Excretion of Swine," *Professional Animal Scientist*, vol. 13, no. 3, pp. 99–111, Sep. 1997, doi: 10.15232/S1080-7446(15)31861-1.
- [33] D. Myhre, G. *et al.*, "Global Warming Potential Values," *Greenhouse Gas Protocol*, vol. 2014, no. 1995, pp. 2–5, 2015.
- [34] "Resultados | Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM) | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura." [Online]. Available: <http://www.fao.org/gleam/results/es/>. [Accessed: 26-May-2021].
- [35] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, *Caracterización de Sistemas de Gestión de Deyecciones. Sector Porcino Intensivo*. 2010.
- [36] European Environment Agency, "EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 - 3.B Manure management 2019," pp. 1–70, 2019.
- [37] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "GLEAM 2, 2016. Global Livestock Environmental Assessment Model. FAO, Rome, Italy,," 2018.
- [38] "BOE.es - BOE-A-2020-2110 Real Decreto 306/2020, de 11 de febrero, por el que se establecen normas básicas de ordenación de las granjas porcinas intensivas, y

- se modifica la normativa básica de ordenación de las explotaciones de ganado porcino extensivo.” [Online]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2020-2110. [Accessed: 02-Jun-2021].
- [39] “Principales aspectos para una gestión correcta de los purines - Artículos - 3tres3, la página del Cerdo.” [Online]. Available: https://www.3tres3.com/articulos/principales-aspectos-para-una-gestion-correcta-de-los-purines_332/. [Accessed: 27-May-2021].
- [40] Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, *Evaluación de técnicas de gestión de deyecciones en ganadería*. Madrid, 2015.
- [41] Consejo Económico y Social de Canarias, “Informe anual del CES 2020 sobre la situación económica, social y laboral de Canarias en 2019,” Las Palmas de Gran Canaria, 2020.
- [42] C. A. Mendieta-Pino, A. Ramos-Martin, S. O. Perez-Baez, and S. Brito-Espino, “Management of slurry in Gran Canaria Island with full-scale natural treatment systems for wastewater (NTSW). One year experience in livestock farms,” *Journal of Environmental Management*, vol. 232, no. November 2017, pp. 666–678, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.073.
- [43] “Espacios naturales - Cabildo de Gran Canaria.” [Online]. Available: <https://cabildo.grancanaria.com/espacios-naturales>. [Accessed: 08-Jun-2021].
- [44] “Calculo de emisiones en ganadería.” [Online]. Available: <https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/ganaderia-y-medio-ambiente/calculo-emisiones/default.aspx>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [45] P. F. Pind, I. Angelidaki, B. K. Ahring, K. Stamatelatou, and G. Lyberatos, “Monitoring and control of anaerobic reactors,” *Advances in biochemical engineering/biotechnology*, vol. 82, pp. 135–182, 2003, doi: 10.1007/3-540-45838-7_4.
- [46] S. K. Khanal, B. Giri, S. Nitayavardhana, and V. Gadhamshetty, “Anaerobic

- Bioreactors/Digesters: Design and Development,” *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Biological Treatment of Industrial Effluents*, pp. 261–279, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-444-63665-2.00010-2.
- [47] H. Spanjers and J. B. van Lier, *Instrumentation in anaerobic treatment - Research and practice*, vol. 53, no. 4–5. 2006.
- [48] D. Maraba and E. Bulur, “Design and construction of an automated OSL reader with open source software and hardware,” *Radiation Measurements*, vol. 106, pp. 632–637, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.RADMEAS.2017.04.011.
- [49] W. M. Budzianowski, “A review of potential innovations for production, conditioning and utilization of biogas with multiple-criteria assessment,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 1148–1171, Feb. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2015.10.054.
- [50] P. A. Vanrolleghem and D. S. Lee, “On-line monitoring equipment for wastewater treatment processes: State of the art,” *Water Science and Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 1–34, 2003, doi: 10.2166/wst.2003.0074.
- [51] I. Angelidaki and L. Ellegaard, “Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and future trends,” *Applied Biochemistry and Biotechnology - Part A Enzyme Engineering and Biotechnology*, vol. 109, no. 1–3, pp. 95–105, 2003, doi: 10.1385/ABAB:109:1-3:95.
- [52] J. B. Holm-Nielsen, C. K. Dahl, and K. H. Esbensen, “Representative sampling for process analytical characterization of heterogeneous bioslurry systems-a reference study of sampling issues in PAT,” *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 83, no. 2, pp. 114–126, 2006, doi: 10.1016/j.chemolab.2006.02.002.
- [53] S. J. Coppella, “Analysis of a fermentation recycle loop for on-line measurements,” *Biotechnology Techniques*, vol. 4, no. 3, pp. 155–160, 1990, doi: 10.1007/BF00222497.
- [54] “Espectroscopia infrarroja - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available:

- https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_infrarroja. [Accessed: 10-Feb-2021].
- [55] R. Christian Barbosa, J. Soares, and M. Arêdes Martins, “Low-cost and versatile sensor based on multi-wavelengths for real-time estimation of microalgal biomass concentration in open and closed cultivation systems,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 176, p. 105641, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105641.
- [56] J. A. F. Pierna, P. Vermeulen, B. Lecler, V. Baeten, and P. Dardenne, “Calibration transfer from dispersive instruments to handheld spectrometers,” *Applied Spectroscopy*, vol. 64, no. 6, pp. 644–648, 2010, doi: 10.1366/000370210791414353.
- [57] C. J. Lomborg, M. H. Thomsen, E. S. Jensen, and K. H. Esbensen, “Power plant intake quantification of wheat straw composition for 2nd generation bioethanol optimization - A Near Infrared Spectroscopy (NIRS) feasibility study,” *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 4, pp. 1199–1205, 2010, doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.027.
- [58] M. T. Varnero Moreno, *Manual de Biogas*, Proyecto C. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2011.
- [59] A. Guevara Vega, “Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales: producción de gas y saneamiento de efluentes.” Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – Organización Panamericana de la Salud., Lima, p. 80, 1996.
- [60] H. Wahid, S. Ahmad, M. A. M. Nor, and M. A. Rashid, “FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas,” *Jurnal Ekonomi Malaysia*, vol. 51, no. 2, pp. 39–54, 2017, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [61] “untitled.” [Online]. Available: http://aulacidta1.usal.es/edar/modulos/Edar05/unidades/CURSO/UNI_08/u8c4

- s3.htm. [Accessed: 25-Mar-2020].
- [62] “BACTERIAS METANOGENICAS by Victor Mota on Prezi.” [Online]. Available: <https://prezi.com/fbl8wqlipbrx/bacterias-metanogenicas/>. [Accessed: 26-Mar-2020].
- [63] J. A. Hilbert, *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria- I.N.T.A - Castelar, 2003.
- [64] J. a Ramón, L. F. Romer, and J. L. Simanca, “Diseño De Un Biodigestor De Canecas En Serie Para Obtener Gas Metano Y Fertilizantes A Partir De La Fermentación De Excrementos De Cerdo,” *Revista Ambiental Agua, Aire Y Suelo*, vol. 1, pp. 15–23, 2006.
- [65] Y. Lorenzo Acosta and M. C. Obaya Abreu, “La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I.,” *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. XXXIX, no. 1, pp. 35–48, 2005.
- [66] E. A. Reyes Aguilera, “Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos,” *Revista Científica de FAREM-Estelí*, no. 24, pp. 60–81, 2018, doi: 10.5377/farem.v0i24.5552.
- [67] E. Campos, A. Bonmatí, M. Teira, and X. Flotats, “Aprovechamiento Energético De Lodos Residuales Y Purines. Producción De Biogás,” no. February 2014, 2001.
- [68] A. Nopharatana, P. C. Pullammanappallil, and W. P. Clarke, “A dynamic mathematical model for sequential leach bed anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste,” *Biochemical Engineering Journal*, vol. 13, no. 1, pp. 21–33, 2003, doi: 10.1016/S1369-703X(02)00097-9.
- [69] M. El-Fadel and M. Massoud, “Methane emissions from wastewater management,” *Environmental Pollution*, vol. 114, no. 2, pp. 177–185, 2001, doi: 10.1016/S0269-7491(00)00222-0.
- [70] H. C. H. Lützhøft, K. Boe, C. Fang, and I. Angelidaki, “Comparison of VFA titration procedures used for monitoring the biogas process,” *Water Research*, vol. 54, pp.

- 262–272, May 2014, doi: 10.1016/J.WATRES.2014.02.001.
- [71] X. Jin, X. Li, N. Zhao, I. Angelidaki, and Y. Zhang, “Bio-electrolytic sensor for rapid monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion process,” *Water Research*, vol. 111, pp. 74–80, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.WATRES.2016.12.045.
- [72] S. Alcayaga, J. Glaría, and L. Guerrero, “Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandido,” no. September, p. 11, 1999.
- [73] “Demanda Biológica de Oxígeno (D.B.O.)” [Online]. Available: <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/DBO.htm>. [Accessed: 07-Apr-2020].
- [74] I. Metcalf & Eddy, *Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*, Tercera Ed. Madrid: McGraw Hill, 1994.
- [75] J. Mihelcic, James y Zimmerman, *Ingeniería ambiental Fundamentos, sustentabilidad, di*. 2011.
- [76] J. Hilbert, *Manual para la producción de biogás*. 2010.
- [77] M. Esguerra, “Experiencias prácticas con biodigestores de bajo costo para la generación de energía y el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo.,” in *Conferencia Internacional de Mecanización Agraria. Seminario FAO-CNRE: Tecnologías de producción de biogás*, 1989, pp. 171–178.
- [78] P. L. Mc Carty, “Anaerobic Waste Treatment Fundamentals,” *Public Works*, vol. 95, pp. 91–94, 1964.
- [79] D. Nguyen, V. Gadhamshetty, S. Nitayavardhana, and S. K. Khanal, “Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review,” *Bioresource Technology*, vol. 193, pp. 513–522, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.06.080.
- [80] B. Drogg, *Process monitoring in biogas plants*, First elec. IEA Bioenergy, 2013.
- [81] Museo Nacional de Ciencias Naturales and Consejo Superior de Investigaciones

- Científicas, "Cromatografía de Gases." [Online]. Available: https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/cromatografia_de_gases.pdf.
- [82] A. J. Ward *et al.*, "Real time monitoring of a biogas digester with gas chromatography, near-infrared spectroscopy, and membrane-inlet mass spectrometry," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 5, pp. 4098–4103, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2010.12.052.
- [83] D. De Almeida Azevedo, S. Lacorte, T. Vinhas, P. Viana, and D. Barceló, "Monitoring of priority pesticides and other organic pollutants in river water from Portugal by gas chromatography–mass spectrometry and liquid chromatography–atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry," *Journal of Chromatography A*, vol. 879, no. 1, pp. 13–26, May 2000, doi: 10.1016/S0021-9673(00)00372-1.
- [84] P. F. Pind, I. Angelidaki, and B. K. Ahring, "A new VFA sensor technique for anaerobic reactor systems," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 82, no. 1, pp. 54–61, 2003, doi: 10.1002/bit.10537.
- [85] K. Boe, D. J. Batstone, and I. Angelidaki, "Online headspace chromatographic method for measuring VFA in biogas reactor," *Water Science and Technology*, vol. 52, no. 1–2, pp. 473–478, Jul. 2005, doi: 10.2166/WST.2005.0555.
- [86] V. Diamantis, P. Melidis, and A. Aivasidis, "Continuous determination of volatile products in anaerobic fermenters by on-line capillary gas chromatography," *Analytica Chimica Acta*, vol. 573–574, pp. 189–194, Jul. 2006, doi: 10.1016/J.ACA.2006.05.036.
- [87] M. A. Brown and G. L. Emmert, "On-line monitoring of trihalomethane concentrations in drinking water distribution systems using capillary membrane sampling-gas chromatography," *Analytica Chimica Acta*, vol. 555, no. 1, pp. 75–83, Jan. 2006, doi: 10.1016/J.ACA.2005.08.066.
- [88] K. Boe, D. J. Batstone, and I. Angelidaki, "An innovative online VFA monitoring system for the anerobic process, based on headspace gas chromatography,"

- Biotechnology and Bioengineering*, vol. 96, no. 4, pp. 712–721, Mar. 2007, doi: 10.1002/BIT.21131.
- [89] D. Kozaki, T. Ozaki, N. Nakatani, M. Mori, and K. Tanaka, “Utilization of Ion-Exclusion Chromatography for Water Quality Monitoring in a Suburban River in Jakarta, Indonesia,” *Water 2014, Vol. 6, Pages 1945-1960*, vol. 6, no. 7, pp. 1945–1960, Jul. 2014, doi: 10.3390/W6071945.
- [90] D. Li and S. Liu, *Water quality monitoring and management: Basis, technology and case studies*. Elsevier, 2018.
- [91] L. E. Ripley and W. C. Boyle, “Improved Alkalimetric Monitoring for Anaerobic Digestion of High-Strength Wastes,” *Converse Source: Journal (Water Pollution Control Federation)*, vol. 58, no. 5, pp. 406–411, 1986.
- [92] W. Nordmann, “Die Überwachung der Schlammfäulung.,” *KA-Informationen für das Betriebspersonal. Beil. Zur Korresp.*, vol. 3, no. 77, p. 77, 1977.
- [93] O. Lahav and B. Morgan, “Titration methodologies for monitoring of anaerobic digestion in developing countries—a review,” *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 79, no. 12, pp. 1331–1341, Dec. 2004, doi: 10.1002/JCTB.1143.
- [94] H. Feitkenhauer, J. Von Sachs, and U. Meyer, “On-line titration of volatile fatty acids for the process control of anaerobic digestion plants,” *Water Research*, vol. 36, no. 1, pp. 212–218, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0043-1354(01)00189-0.
- [95] E. Delahaye, B. Welté, Y. Levi, G. Leblon, and A. Montiel, “An ATP-based method for monitoring the microbiological drinking water quality in a distribution network,” *Water Research*, vol. 37, no. 15, pp. 3689–3696, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0043-1354(03)00288-4.
- [96] F. Molina, G. Ruiz-Filippi, C. Garcia, J. M. Lema, and E. Roca, “Pilot-Scale Validation of a New Sensor for On-Line Analysis of Volatile Fatty Acids and Alkalinity in Anaerobic Wastewater Treatment Plants,” <https://home.liebertpub.com/ees>, vol. 26, no. 3, pp. 641–649, Mar. 2009, doi: 10.1089/EES.2007.0308.

- [97] B. J. Jobling Purser, S. M. Thai, T. Fritz, S. R. Esteves, R. M. Dindale, and A. J. Guwy, "An improved titration model reducing over estimation of total volatile fatty acids in anaerobic digestion of energy crop, animal slurry and food waste," *Water Research*, vol. 61, pp. 162–170, Sep. 2014, doi: 10.1016/J.WATRES.2014.05.020.
- [98] H. Sun, J. Guo, S. Wu, F. Liu, and R. Dong, "Development and validation of a simplified titration method for monitoring volatile fatty acids in anaerobic digestion," *Waste Management*, vol. 67, pp. 43–50, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.WASMAN.2017.05.015.
- [99] D. Wu, L. Li, X. Zhao, Y. Peng, P. Yang, and X. Peng, "Anaerobic digestion: A review on process monitoring," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 103, pp. 1–12, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2018.12.039.
- [100] Y. Dahman, "Generic Methodologies for Characterization," *Nanotechnology and Functional Materials for Engineers*, pp. 19–45, Jan. 2017, doi: 10.1016/B978-0-323-51256-5.00002-2.
- [101] J. B. Holm-Nielsen, C. J. Lomborg, P. Oleskowicz-Popiel, and K. H. Esbensen, "On-line near infrared monitoring of glycerol-boosted anaerobic digestion processes: Evaluation of process analytical technologies," *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 99, no. 2, pp. 302–313, Feb. 2008, doi: 10.1002/BIT.21571.
- [102] J. P. Steyer, J. C. Bouvier, T. Conte, P. Gras, J. Harmand, and J. P. Delgenes, "On-line measurements of COD, TOC, VFA, total and partial alkalinity in anaerobic digestion processes using infra-red spectrometry," *Water Science and Technology*, vol. 45, no. 10, pp. 133–138, 2002, doi: 10.2166/wst.2002.0310.
- [103] E. Morel, K. Santamaria, M. Perrier, S. R. Guiot, and B. Tartakovsky, "Application of multi-wavelength fluorometry for on-line monitoring of an anaerobic digestion process," *Water Research*, vol. 38, no. 14–15, pp. 3287–3296, Aug. 2004, doi: 10.1016/J.WATRES.2004.05.003.
- [104] H. Spanjers, J. C. Bouvier, P. Steenweg, I. Bisschops, W. van Gils, and B. Versprille, "Implementation of in-line infrared monitor in full-scale anaerobic digestion process," *Water Science and Technology*, vol. 53, no. 4–5, pp. 55–61, Feb. 2006,

doi: 10.2166/WST.2006.110.

- [105] H. Et, H. Andree, J. B. Holm-Nielsen, and K. H. Esbensen, "Transflexive Embedded near Infrared Monitoring for Key Process Intermediates in Anaerobic Digestion/Biogas Production," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Vol. 15, Issue 2, pp. 123-135, vol. 15, no. 2, pp. 123–135, Apr. 2007.
- [106] H. F. Jacobi, C. R. Moschner, and E. Hartung, "Use of near infrared spectroscopy in monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion," *Water Science and Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 339–346, Jul. 2009, doi: 10.2166/WST.2009.345.
- [107] H. F. Jacobi, C. R. Moschner, and E. Hartung, "Use of near infrared spectroscopy in online-monitoring of feeding substrate quality in anaerobic digestion," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 7, pp. 4688–4696, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2011.01.035.
- [108] L. C. Krapf, D. Nast, A. Gronauer, U. Schmidhalter, and H. Heuwinkel, "Transfer of a near infrared spectroscopy laboratory application to an online process analyser for in situ monitoring of anaerobic digestion," *Bioresource Technology*, vol. 129, pp. 39–50, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2012.11.027.
- [109] H. M. Falk, P. Reichling, C. Andersen, and R. Benz, "Online monitoring of concentration and dynamics of volatile fatty acids in anaerobic digestion processes with mid-infrared spectroscopy," *Bioprocess and Biosystems Engineering* 2014 38:2, vol. 38, no. 2, pp. 237–249, Aug. 2014, doi: 10.1007/S00449-014-1263-9.
- [110] X. Yu, Y. Li, X. Gu, J. Bao, H. Yang, and L. Sun, "Laser-induced breakdown spectroscopy application in environmental monitoring of water quality: a review," *Environmental Monitoring and Assessment* 2014 186:12, vol. 186, no. 12, pp. 8969–8980, Sep. 2014, doi: 10.1007/S10661-014-4058-1.
- [111] W. Zheng, F. Lü, K. Phoungthong, and P. He, "Relationship between anaerobic digestion of biodegradable solid waste and spectral characteristics of the derived liquid digestate," *Bioresource Technology*, vol. 161, pp. 69–77, Jun. 2014, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2014.03.016.

- [112] IDAE, “Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura.,” *Solar Collectors, Energy Storage, and Materials*, vol. 53, no. 9, pp. 61–78, 2009, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [113] Z. Li, J. Wang, and D. Li, “Applications of Raman spectroscopy in detection of water quality,” <http://dx.doi.org/10.1080/05704928.2015.1131711>, vol. 51, no. 4, pp. 313–337, Apr. 2016, doi: 10.1080/05704928.2015.1131711.
- [114] C. Charnier *et al.*, “Fast characterization of solid organic waste content with near infrared spectroscopy in anaerobic digestion,” *Waste Management*, vol. 59, pp. 140–148, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.WASMAN.2016.10.029.
- [115] M. Heibati *et al.*, “Assessment of drinking water quality at the tap using fluorescence spectroscopy,” *Water Research*, vol. 125, pp. 1–10, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.WATRES.2017.08.020.
- [116] A. Sieburg, S. Schneider, D. Yan, J. Popp, and T. Frosch, “Monitoring of gas composition in a laboratory biogas plant using cavity enhanced Raman spectroscopy,” *Analyst*, vol. 143, no. 6, pp. 1358–1366, Mar. 2018, doi: 10.1039/C7AN01689A.
- [117] R. Petry, M. Schmitt, and J. Popp, “Raman Spectroscopy—A Prospective Tool in the Life Sciences,” *ChemPhysChem*, vol. 4, no. 1, pp. 14–30, Jan. 2003, doi: 10.1002/CPHC.200390004.
- [118] K. A. Bakeev, *Process Analytical Technology: Spectroscopic Tools and Implementation Strategies for the Chemical and Pharmaceutical Industries: Second Edition*. John Wiley and Sons, 2010.
- [119] B. Waltham and B. Örmeci, “Fluorescence intensity, conductivity, and UV–vis absorbance as surrogate parameters for real-time monitoring of anaerobic digestion of wastewater sludge,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, p. 101395, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101395.
- [120] A. Rudnitskaya and A. Legin, “Sensor systems, electronic tongues and electronic noses, for the monitoring of biotechnological processes,” *Journal of Industrial*

- Microbiology and Biotechnology*, vol. 35, no. 5, pp. 443–451, May 2008, doi: 10.1007/S10295-007-0298-1.
- [121] M. Peris and L. Escuder-Gilabert, “On-line monitoring of food fermentation processes using electronic noses and electronic tongues: A review,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 804, pp. 29–36, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.ACA.2013.09.048.
- [122] A. Buczkowska *et al.*, “The monitoring of methane fermentation in sequencing batch bioreactor with flow-through array of miniaturized solid state electrodes,” *Talanta*, vol. 81, no. 4–5, pp. 1387–1392, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.TALANTA.2010.02.039.
- [123] G. Adam, S. Lemaigre, A.-C. Romain, J. Nicolas, and P. Delfosse, “Evaluation of an electronic nose for the early detection of organic overload of anaerobic digesters,” *Bioprocess and Biosystems Engineering* 2012 36:1, vol. 36, no. 1, pp. 23–33, May 2012, doi: 10.1007/S00449-012-0757-6.
- [124] Y. Jiang, X. Yang, P. Liang, P. Liu, and X. Huang, “Microbial fuel cell sensors for water quality early warning systems: Fundamentals, signal resolution, optimization and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 292–305, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2017.06.099.
- [125] Z. Yu *et al.*, “A review on the applications of microbial electrolysis cells in anaerobic digestion,” *Bioresource Technology*, vol. 255, pp. 340–348, May 2018, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2018.02.003.
- [126] A. Kaur, J. R. Kim, I. Michie, R. M. Dinsdale, A. J. Guwy, and G. C. Premier, “Microbial fuel cell type biosensor for specific volatile fatty acids using acclimated bacterial communities,” *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 47, pp. 50–55, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.BIOS.2013.02.033.
- [127] X. Jin, I. Angelidaki, and Y. Zhang, “Microbial Electrochemical Monitoring of Volatile Fatty Acids during Anaerobic Digestion,” *Environmental Science and Technology*, vol. 50, no. 8, pp. 4422–4429, May 2016, doi: 10.1021/ACS.EST.5B05267.

- [128] N. Zhao, X. Li, X. Jin, I. Angelidaki, and Y. Zhang, "Integrated electrochemical-biological process as an alternative mean for ammonia monitoring during anaerobic digestion of organic wastes," *Chemosphere*, vol. 195, pp. 735–741, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.12.139.
- [129] J. J. Lamb, O. Bernard, S. Sarker, K. M. Lien, and D. R. Hjelme, "Perspectives of optical colourimetric sensors for anaerobic digestion," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 111, pp. 87–96, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.04.083.
- [130] D. Gaida, C. Wolf, and M. Bongards, "Feed control of anaerobic digestion processes for renewable energy production: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 869–875, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.06.096.
- [131] M. C. Sarraguça, A. Paulo, M. M. Alves, A. M. A. Dias, J. A. Lopes, and E. C. Ferreira, "Quantitative monitoring of an activated sludge reactor using on-line UV-visible and near-infrared spectroscopy," *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 395, no. 4, pp. 1159–1166, Oct. 2009, doi: 10.1007/s00216-009-3042-z.
- [132] A. S. Rao, S. Marshall, J. Gubbi, M. Palaniswami, R. Sinnott, and V. Pettigrov, "Design of low-cost autonomous water quality monitoring system," *Proceedings of the 2013 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2013*, pp. 14–19, 2013, doi: 10.1109/ICACCI.2013.6637139.
- [133] D. Yu, J. Liu, Q. Sui, and Y. Wei, "Biogas-pH automation control strategy for optimizing organic loading rate of anaerobic membrane bioreactor treating high COD wastewater," *Bioresource Technology*, vol. 203, pp. 62–70, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2015.12.010.
- [134] V. Oree and V. A. Maudhoo, "A microcontroller-based household anaerobic food digester," *2015 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications, ICSIMA 2015*, Sep. 2016, doi: 10.1109/ICSIMA.2015.7559018.

- [135] W. A. Ahmed, M. Aggour, and M. Naciri, "Biogas Control: Methane Production Monitoring Using Arduino," *International Journal of Biological, Life and Agricultural Sciences*, vol. 11, no. 2, pp. 130–133, 2017.
- [136] N. R. Moparthi, C. Mukesh, and P. Vidya Sagar, "Water quality monitoring system using IOT," *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Advances in Electrical and Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics, AEEICB 2018*, Oct. 2018, doi: 10.1109/AEEICB.2018.8480963.
- [137] K. S. Sunil Kumar, P. M. Tarun Naidu, M. Sumanth, D. S. Ashwini, and S. Shamsundar, "IOT Based Monitoring of Kitchen-Waste Biogas Plant," *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3, no. 5, pp. 316–319, 2018.
- [138] M. U. Tahir, S. M. Ahsan, S. M. Arif, and M. Abdullah, "GSM based advanced water quality monitoring system powered by solar photovoltaic system," *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2018*, Nov. 2018, doi: 10.1109/AUPEC.2018.8757904.
- [139] D. Dieudonne and H. Shima, "Effectiveness of applying IoT to improve biogas digesters in Rwanda," *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, ICASI 2018*, pp. 441–444, Jun. 2018, doi: 10.1109/ICASI.2018.8394279.
- [140] 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*, vol. 241, p. 118284, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118284.
- [141] I. A. Daniyan, O. L. Daniyan, O. H. Abiona, and K. Mpofo, "Development and Optimization of a Smart System for the Production of Biogas using Poultry and Pig Dung," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1190–1195, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROMFG.2019.06.076.
- [142] A. Mardiyanto, "Design and Development of Real-Time Plant Process Control Monitoring System in Organic Fertilizer Production," *IOP Conference Series:*

- Materials Science and Engineering*, vol. 536, no. 1, p. 012106, Jun. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/536/1/012106.
- [143] S. Yang, Y. Liu, N. Wu, Y. Zhang, S. Svoronos, and P. Pullammanappallil, "Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas," *Renewable Energy*, vol. 138, pp. 224–229, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.01.083.
- [144] X. Wu, R. Tong, Y. Wang, C. Mei, and Q. Li, "Study on an Online Detection Method for Ground Water Quality and Instrument Design," *Sensors 2019, Vol. 19, Page 2153*, vol. 19, no. 9, p. 2153, May 2019, doi: 10.3390/S19092153.
- [145] K. G. Chaudhari, "Water Quality Monitoring System using Internet of Things and SWQM Framework," *SSRN Electronic Journal*, Nov. 2019, doi: 10.2139/SSRN.3729062.
- [146] K. Laganovska *et al.*, "Portable low-cost open-source wireless spectrophotometer for fast and reliable measurements," *HardwareX*, vol. 7, p. e00108, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.OHX.2020.E00108.
- [147] A. B. D. Nandiyanto, R. Zaen, R. Oktiani, A. G. Abdullah, and L. S. Riza, "A simple, rapid analysis, portable, low-cost, and Arduino-based spectrophotometer with white LED as a light source for analyzing solution concentration," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 16, no. 2, pp. 580–585, Apr. 2017, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.V16I2.7159.
- [148] T. Zinchenko, E. Pecherskaya, P. Golubkov, D. Artamonov, G. Kozlov, and Y. Shepeleva, "Automated Spectrophotometer Control System," *Procedia Computer Science*, vol. 167, pp. 477–486, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROCS.2020.03.262.
- [149] D. González Morales, A. Valencia, A. Díaz-Nuñez, M. Fuentes-Estrada, O. López-Santos, and O. García-Beltrán, "Development of a Low-Cost UV-Vis Spectrophotometer and Its Application for the Detection of Mercuric Ions Assisted by Chemosensors," *Sensors 2020, Vol. 20, Page 906*, vol. 20, no. 3, p. 906, Feb. 2020, doi: 10.3390/S20030906.

- [150] S. Yang, S. Svoronos, and P. Pullammanappallil, "INEXPENSIVE, ARDUINO-BASED DEVICE FOR ON-LINE, AUTOMATIC, REAL-TIME MEASUREMENT OF METHANE COMPOSITION AND BIOGAS FLOWRATE FROM ANAEROBIC DIGESTERS," *Authorea Preprints*, Sep. 2020, doi: 10.22541/AU.160133622.25187555.
- [151] S. Pasika and S. T. Gandla, "Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT," *Heliyon*, vol. 6, no. 7, p. e04096, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E04096.
- [152] I. M. Hakimi and Z. Jamil, "Development of Water Quality Monitoring Device Using Arduino UNO," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1144, no. 1, p. 012064, May 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1144/1/012064.
- [153] W. J. Hong *et al.*, "Water Quality Monitoring with Arduino Based Sensors," *Environments 2021, Vol. 8, Page 6*, vol. 8, no. 1, p. 6, Jan. 2021, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS8010006.
- [154] R. W. Crites, E. J. Middlebrooks, and S. C. Reed, *Natural wastewater treatment systems*. 2010.
- [155] Instituto Tecnológico de Canarias (ITC), *Informe divulgativo sobre experiencias y resultados en la aplicación de Sistemas de Depuración Natural (SDN) de aguas residuales*. 2017.
- [156] M. Rozkosny, M. Kriska, J. Salek, I. Bodik, and D. Istenic, *Natural Technologies of Wastewater Treatment*. 2014.
- [157] L. Moreno, "Los Métodos Naturales De Depuración De Aguas Residuales Urbanas," in *La Depuración De Aguas Residuales Urbanas De Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa En El Terreno Fundamentos Y Casos Prácticos*, Instituto Geológico y Minero de España, Ed. 2003, pp. 13–27.
- [158] R. H. Kadlec and S. Wallace, *Treatment Wetlands. Second Edition*. 2008.
- [159] M. de C. e I. Instituto Geológico y Minero de España, *Métodos Naturales de Tratamiento de Aguas Residuales*. .
- [160] R. H. Kadlec, "Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands,"

- Water Science and Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 37–44, Jan. 1999, doi: 10.1016/S0273-1223(99)00417-5.
- [161] H. Huryňa, J. Brom, and J. Pokorný, “The importance of wetlands in the energy balance of an agricultural landscape,” *Wetlands Ecology and Management*, vol. 22, no. 4, pp. 363–381, Dec. 2014, doi: 10.1007/S11273-013-9334-2/FIGURES/8.
- [162] N. Oliver Rajadel, “Estudio de los Humedales Artificiales de Flujo Superficial del Tancat de la Pipa como instrumentos para la restauración ambiental del lago de l’Albufera de València.,” Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [163] E. Passeport *et al.*, “Ecological engineering practices for the reduction of excess nitrogen in human-influenced landscapes: A guide for watershed managers,” *Environmental Management*, vol. 51, no. 2, pp. 392–413, Feb. 2013, doi: 10.1007/S00267-012-9970-Y.
- [164] 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)*, 2019, doi: 10.14321/WATERPATHOGENS.65.
- [165] G. E. Alexiou and D. D. Mara, “Anaerobic Waste Stabilization Ponds Anaerobic Waste Stabilization Ponds A Low-Cost Contribution to a Sustainable Wastewater Reuse Cycle,” 2003.
- [166] N. W. Dahl, P. L. Woodfield, B. A. F. Simpson, H. M. Stratton, and C. J. Lemckert, “Effect of turbulence, dispersion, and stratification on *Escherichia coli* disinfection in a subtropical maturation pond,” *Journal of Environmental Management*, vol. 288, p. 112470, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.112470.
- [167] M. P. Varón, “IRC International Water and Sanitation Centre,” 2004.
- [168] F. J. Trevino Quiroga, “Waste Stabilization Ponds for Waste Water Treatment, Anaerobic Pond.”
- [169] M. Von Sperling, *Waste Stabilisation Ponds*. IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street, London SW1H 0QS, UK, 2007.

- [170] L. T. Ho, A. Alvarado, J. Larriva, C. Pompeu, and P. Goethals, "An integrated mechanistic modeling of a facultative pond: Parameter estimation and uncertainty analysis," *Water Research*, vol. 151, pp. 170–182, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.WATRES.2018.12.018.
- [171] S. Sunarsih, D. P. Sasongko, S. Sutrisno, G. A. Putri, and H. Hadiyanto, "Analysis of wastewater facultative pond using advection-diffusion model based on explicit finite difference method," *Environmental Engineering Research*, vol. 26, no. 3, Jun. 2021, doi: 10.4491/EER.2019.496.
- [172] A. Mercado and S. C. Agosto, "Lagunas de estabilización RALCEA: Eje Calidad de Agua y Saneamiento."
- [173] A. M. M. Batista *et al.*, "Relationships between abiotic and biotic variables in a maturation pond and their influence on E. coli removal," *Water Science and Technology*, vol. 00, p. 1, Jul. 2021, doi: 10.2166/WST.2021.268.
- [174] M. Johnson, M. A. Camargo Valero, and D. D. Mara, "Maturation ponds, rock filters and reedbeds in the UK: statistical analysis of winter performance," *Water Science and Technology*, vol. 55, no. 11, pp. 135–142, Jun. 2007, doi: 10.2166/WST.2007.364.
- [175] L. A. Hernández, "Technologies for the utilization of gas derived from anaerobic digestion of organic matter," *Agronomía Colombiana*, vol. XIII, no. 1, pp. 76–90, 1996.
- [176] J. Limongi Pereira, "Coproctor: un diseño para la industrialización de biodigestores rurales," *Iconofacto*, vol. 9, no. 13, pp. 9–26, 2013.
- [177] D. E. L. País, E. N. Á. Rural, I. Oliver, and C. Rivero, "Una Nueva Forma De Ver El Futuro Energético-Ambiental," pp. 1–8, 2009.
- [178] A. López Pérez, "Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás," *Asociación Colombiana De Porcicultores Fondo Nacional De La Porcicultura*, p. 37, 2003.
- [179] IDAE, *Biomasa: Digestores anaerobios*. 2007.

- [180] C. Acuña and A. M. Paredes, “Curso de Formación Especializada en Biogás para Profesionales,” p. 32, 2017.
- [181] S. B. Torrella, “Para una correcta selección y explotación de digestores anaerobios,” *Revista Prod. Anim.*, vol. 20, no. 2, pp. 102–109, 2008.
- [182] A. Pascual, B. Ruiz, P. Gómez, X. Flotats, and B. Fernández, *SITUACIÓN Y POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGÁS. ESTUDIO TÉCNICO PER 2011-2020*. Madrid: Intituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011.
- [183] “Biomasa.” [Online]. Available: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa>. [Accessed: 21-Mar-2020].
- [184] K. Reinaldo, C. Nacaza, G. Javier, and M. Cahuatijo, “Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Mecánica ‘Diseño Y Construcción De Un Biodigestor Para Pequeñas Y Medianas Granjas’ Proyecto Previo a La Obtención Del Título De Ingeniero Mecánico,” 2010.
- [185] M. D. J. Soria Fregoso *et al.*, “Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo.,” *Terra*, vol. 19, no. 4, pp. 353–362, 2001.
- [186] A. Martínez, “Biodigestores: la forma más económica y sostenible de obtener recursos en zonas rurales,” *PuentesDigitales*, 2018. [Online]. Available: <https://puentesdigitales.com/2018/01/08/biodigestores-la-forma-mas-economica-y-sostenible-de-obtener-recursos-en-zonas-rurales/>. [Accessed: 14-Apr-2020].
- [187] Ministerio de Fomento, “Documento Básico HE Ahorro de Energía 2019,” 2019.
- [188] “Legislación fotovoltaica en España (2019) – Censolar.” [Online]. Available: <https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-es-2019/>. [Accessed: 22-Apr-2020].
- [189] “Recursos – UNEF.” [Online]. Available: <https://unef.es/recursos/>. [Accessed: 14-Sep-2021].
- [190] “Energía solar fotovoltaica - Solarweb.net.” [Online]. Available: <https://www.solarweb.net/solar-fotovoltaica.php>. [Accessed: 14-Sep-2021].

- [191] Gobierno de Canarias, “Anuario Energético de Canarias 2019.” 2020.
- [192] “Capacity Factor - an overview | ScienceDirect Topics.” [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/capacity-factor>. [Accessed: 14-Sep-2021].
- [193] “El autoconsumo demuestra por qué Canarias es la Arabia Saudí de las renovables.” [Online]. Available: https://www.eldiario.es/canariasahora/energia/Canarias-potencial-energias-renovables-verde-ahorro-petroleo-auroconsumo-sustentable-opportunidad_0_807019296.html. [Accessed: 14-Jun-2020].
- [194] F. Donatini, “Geothermal Power,” *POWER ENGINEERING Advances and Challenges*, no. September, pp. 179–215, 2019, doi: 10.1201/9781315202105-7.
- [195] D. O. de la U. Europea, *BOE.es - DOUE-L-2009-81013 Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/3.* .
- [196] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Evaluación del Potencial de Energía Geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020,” 2011.
- [197] E. G. E. C. (EGEC), “EGEC-Brussels-Declaration-2009.” 2009.
- [198] “Energía geotérmica | Geoplat.” [Online]. Available: <https://www.geoplat.org/energia-geotermica/#recursos-geotermicos>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [199] Gobierno de Canarias, “Manual de Geotermia de Canarias.” .
- [200] “Geothermal Heat Pump Basics | NREL.” [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/research/re-geo-heat-pumps.html>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [201] “Geothermal Heat Pumps | Department of Energy.” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>. [Accessed: 10-Dec-2021].

- [202] M. Climo, L. Lind, B. Carey, and S. Bendall, "The rise and rise of geothermal heat pumps in New Zealand," *IPENZ Transactions*, vol. 41, no. March, pp. 1–7, 2014.
- [203] O. del P. Díaz Molina, "Valoración Del Potencial Energético Basado En El Recurso Geotérmico De Baja Entalpía En La Isla De Gran Canaria."
- [204] G. F. (Geoffrey F. Hewitt, G. L. Shires, and T. R. (Theodore R. Bott, *Process Heat Transfer*. Begell House, 1994.
- [205] F. Incropera and D. Dewitt, *Introduction to heat transfer*. 1985.
- [206] "Section B: Energy Transfer - Energy Education: Concepts and Practices | UWSP." [Online]. Available: <https://www.uwsp.edu/cnr-ap/KEEP/nres633/Pages/Unit2/Section-B-Energy-Transfer.aspx>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [207] "FreeFEM - An open-source PDE Solver using the Finite Element Method." [Online]. Available: <https://freefem.org/>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [208] J. Wiese and M. Haeck, "Instrumentation, control and automation for full-scale manure-based biogas systems," *Water Science and Technology*, vol. 54, no. 9, pp. 1–8, Nov. 2006, doi: 10.2166/WST.2006.869.
- [209] "Arduino Nano 33 IoT | Arduino Official Store." [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-nano-33-iot?queryID=undefined>. [Accessed: 19-Aug-2021].
- [210] "GitHub - ostaquet/Arduino-Nano-33-IoT-Ultimate-Guide: Arduino Nano 33 IoT - Ultimate guide." [Online]. Available: <https://github.com/ostaquet/Arduino-Nano-33-IoT-Ultimate-Guide>. [Accessed: 09-Dec-2021].
- [211] "Software de Arduino | Arduino.cl - Compra tu Arduino en Línea." [Online]. Available: <https://arduino.cl/programacion/>. [Accessed: 25-Aug-2021].
- [212] J. Purdum, *Beginning C for Arduino : learn C programming for the Arduino*. 2015.
- [213] "Arduino - Environment." [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/guide/environment>. [Accessed: 03-Sep-2021].

- [214] “Introducción a Arduino IDE - Los Proyectos de Ingeniería.” [Online]. Available: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/10/introduction-to-arduino-ide.html>. [Accessed: 03-Sep-2021].
- [215] “Software Arduino IDE - Curso de primeros pasos con Arduino.” [Online]. Available: <https://www.programoergosum.com/cursos-online/arduino/253-curso-de-iniciacion-a-arduino/software-arduino-ide>. [Accessed: 08-Sep-2021].
- [216] “Adafruit BME280 I2C o SPI Sensor de presión de temperatura y humedad [STEMMA QT] : ID 2652 : \$ 14.95 : Adafruit Industries, Electrónica y kits de bricolaje únicos y divertidos.” [Online]. Available: <https://www.adafruit.com/product/2652>. [Accessed: 11-Nov-2021].
- [217] “BME280 pdf, BME280 description, BME280 datasheets, BME280 view :: ALLDATASHEET ::” [Online]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132060/BOSCH/BME280.html>. [Accessed: 11-Nov-2021].
- [218] “Interfaz BME280 Sensor de temperatura, humedad y presión con Arduino.” [Online]. Available: <https://lastminuteengineers.com/bme280-arduino-tutorial/>. [Accessed: 11-Nov-2021].
- [219] “Guide for BME280 Sensor with Arduino (Pressure, Temperature, Humidity) | Random Nerd Tutorials.” [Online]. Available: <https://randomnerdtutorials.com/bme280-sensor-arduino-pressure-temperature-humidity/>. [Accessed: 11-Nov-2021].
- [220] “UV Sensor ML8511 & Arduino for UV Ray Intensity Meter.” [Online]. Available: <https://how2electronics.com/uv-sensor-ml8511-arduino-uv-ray-intensity-meter/>. [Accessed: 14-Nov-2021].
- [221] L. C. S. Herazo, A. Alvarado-Lassman, C. Nakase-Rodríguez, and G. Nani, “Influence of Light Intensity on Growth and Flowering Influence of Light Intensity on Growth and Flowering Ornamental Plants in Constructed,” *Renewable energy, biomass and sustainability*, vol. 1, no. 1, pp. 39–52, 2019.
- [222] T. Gschlößl, C. Steinmann, P. Schleypen, and A. Melzer, “Constructed wetlands for

- effluent polishing of lagoons,” *Water Research*, vol. 32, no. 9, pp. 2639–2645, 1998, doi: 10.1016/S0043-1354(98)00047-5.
- [223] “Overview | TSL2561 Luminosity Sensor | Adafruit Learning System.” [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/tsl2561/overview>. [Accessed: 17-Nov-2021].
- [224] Lady Ada, “TSL2561 Luminosity Sensor Created Datasheet.” .
- [225] “Arduino Code | TSL2561 Luminosity Sensor | Adafruit Learning System.” [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/tsl2561/arduino-code>. [Accessed: 17-Nov-2021].
- [226] “EZO™ RTD Temperature Circuit | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-rtd-temperature-circuit/>. [Accessed: 23-Nov-2021].
- [227] “EZO-RTD™ Embedded Temperature Circuit.”
- [228] “EZO™ Conductivity Circuit | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-conductivity-circuit/>. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [229] “EZO-EC, Atlas Scientific.”
- [230] “Basic EZO™ Inline Voltage Isolator | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/ezo-accessories/basic-ezo-inline-voltage-isolator/>. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [231] “Inline Voltage Isolator, Atlas Scientific,” pp. 1–7.
- [232] “Ecuación de Nernst | Textos Científicos.” [Online]. Available: <https://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/redox/ecuacion-nernst>. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [233] “Electrodos de pH I: Teoría del Electrodo de pH modulo articulos- Artículos seleccionados.” [Online]. Available: https://www.tecnofrom.com/articulo_2-electrodos-de-ph-i-teoria-del-electrodo-de-ph.html. [Accessed: 24-Nov-2021].

- [234] “pH Probes & Sensors | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/ph>. [Accessed: 24-Nov-2021].
- [235] Atlas Scientific, “EZO-pH,” vol. 99.
- [236] “Consumer Grade pH Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/consumer-grade-ph-probe/>. [Accessed: 27-Nov-2021].
- [237] “Lab Grade pH Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/ph-probe/>. [Accessed: 27-Nov-2021].
- [238] “Industrial pH Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/industrial-ph-probe/>. [Accessed: 27-Nov-2021].
- [239] C. Vongvichiankul, J. Deebao, and W. Khongnakorn, “Relationship between pH, Oxidation Reduction Potential (ORP) and Biogas Production in Mesophilic Screw Anaerobic Digester,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 25–26, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.113.
- [240] S. J. Lee, “Relationship between Oxidation Reduction Potential (ORP) and Volatile Fatty Acid (VFA) Production in the Acid-Phase Anaerobic Digestion Process,” University of Canterbury. Civil and Natural Resources Engineering, 2008.
- [241] YSI Environmental, “ORP Management in Wastewater as an Indicator of Process Efficiency,” 2008.
- [242] “circuito EZO™ ORP | Atlas Científico.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-orp-circuit/>. [Accessed: 28-Nov-2021].
- [243] Atlas Scientific, “EZO-ORP Datasheet.”
- [244] “Industrial pH/ORP/Temp Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/orp/industrial-ph-orp-temp-probe-orp/>. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [245] “Industrial ORP Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/industrial-orp-probe/>. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [246] “Lab Grade ORP Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/lab-grade-orp-probe/>.

- scientific.com/probes/orp-probe/. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [247] “Consumer Grade ORP Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/consumer-grade-orp-probe/>. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [248] D. Nguyen and S. K. Khanal, “A little breath of fresh air into an anaerobic system: How microaeration facilitates anaerobic digestion process,” *Biotechnology Advances*, vol. 36, no. 7, pp. 1971–1983, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.BIOTECHADV.2018.08.007.
- [249] I. Ramos and M. Fdz-Polanco, “The potential of oxygen to improve the stability of anaerobic reactors during unbalanced conditions: Results from a pilot-scale digester treating sewage sludge,” *Bioresource Technology*, vol. 140, pp. 80–85, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2013.04.066.
- [250] Q. Chen, W. Wu, D. Qi, Y. Ding, and Z. Zhao, “Review on microaeration-based anaerobic digestion: State of the art, challenges, and perspectives,” *Science of The Total Environment*, vol. 710, p. 136388, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.136388.
- [251] D. Botheju and R. Bakke, “Oxygen effects in anaerobic digestion - a review,” *The Open Waste Management Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 1–19, Apr. 2011, doi: 10.2174/1876400201104010001.
- [252] Atlas Scientific, “EZO-DO.”
- [253] “EZO™ Dissolved Oxygen Circuit | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-dissolved-oxygen-circuit/>. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [254] “Mini Lab Grade Dissolved Oxygen Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/mini-d-o-probe/>. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [255] “Lab Grade Dissolved Oxygen Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/dissolved-oxygen-probe/>. [Accessed: 03-Dec-2021].
- [256] “Industrial Dissolved Oxygen Probe | Atlas Scientific.” [Online]. Available:

- <https://atlas-scientific.com/probes/industrial-dissolved-oxygen-probe/>.
[Accessed: 03-Dec-2021].
- [257] Atlas Scientific, “EZO-CO2,” vol. 105.
- [258] “EZO-CO2™ Embedded Carbon Dioxide Sensor | Atlas Scientific.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/probes/co2-sensor/>. [Accessed: 04-Dec-2021].
- [259] “WiFinINA_Generic - Arduino Reference.” [Online]. Available: https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/wifinina_generic/. [Accessed: 10-Sep-2021].
- [260] “NINA-W10 series Stand-alone multiradio modules Data sheet Title NINA-W10 series Subtitle Stand-alone multiradio modules Document type Data sheet Document number UBX-17065507 This document applies to the following products: Product name Type number Hardware version PCN reference Product status.”
- [261] “NINA-W10 series (open CPU) | u-blox.” [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/product/nina-w10-series-open-cpu>. [Accessed: 06-Dec-2021].
- [262] Y. Chan, J. Hu, C. Chou, C. Liao, and C. Chen, “Development of ICT for Leaching Monitoring in Taiwan Agricultural LTER Stations,” *Environments 2017, Vol. 4, Page 47*, vol. 4, no. 3, p. 47, Jun. 2017, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS4030047.
- [263] K. Saravanan, E. Anusuya, R. Kumar, and L. H. Son, “Real-time water quality monitoring using Internet of Things in SCADA,” *Environmental Monitoring and Assessment 2018 190:9*, vol. 190, no. 9, pp. 1–16, Aug. 2018, doi: 10.1007/S10661-018-6914-X.
- [264] V. Dhongade and A. D. Shaligram, “Cloud service based monitoring system for hybrid renewable energy sources using internet of things platform,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 1989, no. 1, p. 020012, Jul. 2018, doi: 10.1063/1.5047688.
- [265] A. Lopez-Vargas, M. Fuentes, and M. Vivar, “IoT Application for Real-Time

- Monitoring of Solar Home Systems Based on Arduino™ with 3G Connectivity,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 2, pp. 679–691, Jan. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2018.2876635.
- [266] R. Martínez, N. Vela, A. el Aatik, E. Murray, P. Roche, and J. M. Navarro, “On the Use of an IoT Integrated System for Water Quality Monitoring and Management in Wastewater Treatment Plants,” *Water 2020, Vol. 12, Page 1096*, vol. 12, no. 4, p. 1096, Apr. 2020, doi: 10.3390/W12041096.
- [267] “How to Buy - Academic License - ThingSpeak IoT.” [Online]. Available: https://thingspeak.com/prices/thingspeak_academic?license_name=Academic&country_code=ES&number_of_devices=10&intervals=2&interval_type=Minutes. [Accessed: 23-Sep-2021].
- [268] “Pricing | Cloud IoT Core | Google Cloud.” [Online]. Available: <https://cloud.google.com/iot/pricing>. [Accessed: 23-Sep-2021].
- [269] “IBM - España.” [Online]. Available: <https://www.ibm.com/es-es>. [Accessed: 23-Sep-2021].
- [270] “Infrastructure & Application Monitoring as a Service | Datadog.” [Online]. Available: <https://www.datadoghq.com/product/>. [Accessed: 24-Sep-2021].
- [271] “Información general sobre AWS IoT Analytics – Amazon Web Services.” [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/iot-analytics/>. [Accessed: 24-Sep-2021].
- [272] “Blynk IoT platform: for businesses and developers.” [Online]. Available: <https://blynk.io/>. [Accessed: 24-Sep-2021].
- [273] “ThingsBoard - Open-source IoT Platform.” [Online]. Available: <https://thingsboard.io/>. [Accessed: 24-Sep-2021].
- [274] “Cómo utilizar el DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino.” [Online]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>. [Accessed: 20-Aug-2021].
- [275] “DHT11: Sensor digital de temperatura y humedad – Scidle.” [Online]. Available: <https://scidle.com/es/dht11-sensor-digital-de-temperatura-y-humedad/#more->

390. [Accessed: 20-Aug-2021].
- [276] “Artículo | Omniblug.” [Online]. Available: <http://www.omniblug.com/sensor-temperatura-humedad-DHT11-DHT22.html>. [Accessed: 20-Aug-2021].
- [277] “Learn More - ThingSpeak IoT.” [Online]. Available: https://thingspeak.com/pages/learn_more. [Accessed: 10-Sep-2021].
- [278] “MQTT - The Standard for IoT Messaging.” [Online]. Available: <https://mqtt.org/>. [Accessed: 18-Nov-2021].
- [279] “M7200 | Wi-Fi móvil 4G LTE | TP-Link Iberia.” [Online]. Available: <https://www.tp-link.com/es/home-networking/mifi/m7200/>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [280] A. H. Ali, M. R. A. Razak, M. Hidayab, S. A. Azman, M. Z. M. Jasmin, and M. A. Zainol, “Investigation of indoor WIFI radio signal propagation,” *ISIEA 2010 - 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, pp. 117–119, 2010, doi: 10.1109/ISIEA.2010.5679486.
- [281] M. Hidayab, A. H. Ali, and K. B. A. Azmi, “Wifi signal propagation at 2.4 GHz,” *APMC 2009 - Asia Pacific Microwave Conference 2009*, pp. 528–531, 2009, doi: 10.1109/APMC.2009.5384182.
- [282] L. E. Torres, G. Jorge, E. Triviño, M. Director, and J. Villegas Gutiérrez, “Problemas de frontera para la Ecuación de Helmholtz,” 2007.
- [283] D. K. Cheng, *Fundamentos de Electromagnetismo para Ingeniería*. 2014.
- [284] K. Sato *et al.*, “Measurements of reflection characteristics and refractive indices of interior construction materials in millimeter-wave bands,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 449–453, 1995, doi: 10.1109/vetec.1995.504907.
- [285] “BOE.es - BOE-A-2017-12318 Orden ETU/1033/2017, de 25 de octubre, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias.” [Online]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/o/2017/10/25/etu1033/con/20171027>. [Accessed: 09-Dec-2021].

- [286] “Wi-Fi Signal Strength Basics | MetaGeek.” [Online]. Available: <https://www.metageek.com/training/resources/wifi-signal-strength-basics/>. [Accessed: 08-Dec-2021].
- [287] “Industry Leading Technology for Off-Grid, Off-Shore and Backup Power Applications. SOLARX™ Series-XUNZEL.”
- [288] “Industry Leading Technology for Off-Grid, Off-Shore and Backup Power Applications.”
- [289] “UNE-EN 60529:2018 Grados de protección proporcionados por las ...” [Online]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0060015>. [Accessed: 10-Dec-2021].
- [290] “Atlas Scientific | Environmental Robotics.” [Online]. Available: <https://atlas-scientific.com/>. [Accessed: 10-Dec-2021].

Anexo II. Códigos utilizados.

Los códigos para configurar los sensores del fabricante Atlas Scientific son proporcionados por el mismo fabricante. Se utilizan los códigos con configuración en protocolo I2C [290].

- *Código para EZO RTD Circuit*

```
//-----Code to EZO RTD Circuit-----//

#include <Wire.h>          //biblioteca I2C.

#define address 102      //dirección I2C ID para EZO RTD Circuit.

char computerdata[20];   // matriz de caracteres de 20 bytes para contener los datos

byte serial_event = 0;   //alerta para señalar cuando se han recibido los datos

byte code = 0;          // utilizado para contener el código de respuesta I2C.

char RTD_data[20];      // matriz de caracteres de 20 bytes para contener los datos entrantes
del circuito byte

in_char = 0;           // se utiliza como un búfer de 1 byte para almacenar en bytes ligados desde
el circuito RTD.

byte i = 0;            // contador utilizado para la matriz RTD_data.

int time_ = 600;       // se utiliza para cambiar el retardo necesario según el comando
enviado al circuito

float tmp_float;

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  Wire.begin();        //inicilización en I2C.

}

void serialEvent() {    // se activará cuando se reciban los datos procedentes del monitor
serie (pc/mac/otro).
```

```
received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20);      //se leen los
datos enviados desde el monitor serie (hasta que vemos un <CR>. También contamos cuántos
caracteres se han recibido.
```

```
computerdata[received_from_computer] = 0;                                //impedir que el búfer
transmita datos innecesarios
```

```
serial_event = true;
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
if (serial_event == true) {                                           //Si se envió un comando al dispositivo
```

```
for (i = 0; i <= received_from_computer; i++) {                       // reconocer el comando "sleep".
```

```
computerdata[i] = tolower(computerdata[i]);                          //"Sleep" ≠ "sleep"
```

```
}
```

```
i=0;                                                                    //se inicializa i en 0
```

```
if (computerdata[0] == 'c' || computerdata[0] == 'r')time_ = 600;    //si se ha enviado un
comando para calibrar o tomar una lectura esperamos 600ms para que el circuito tenga tiempo
de tomar la lectura.
```

```
else time_ = 250;              //Si se ha enviado algún otro comando, esperamos sólo 250 ms.
```

```
Wire.beginTransmission(address);   //llama al circuito por su número de identificación.
```

```
Wire.write(computerdata);          //transmitir el comando que se envió a través del puerto
serie
```

```
Wire.endTransmission();            //finaliza la transmisión de datos I2C
```

```
if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) {                             //si el comando que se ha enviado NO es el
comando de suspensión, espere la cantidad correcta de tiempo y solicite datos.
```

```
//si es el comando de reposo, no hacemos nada. La emisión de un comando de suspensión y
luego la solicitud de datos activará el circuito RTD.
```

```
delay(time_);
```

```
Wire.requestFrom(address, 20, 1);    //llamar al circuito y solicitar 20 bytes (esto puede
ser más de lo que necesitamos)

code = Wire.read();                  // el primer byte es el código de respuesta, leemos esto por
separado.

switch (code) {                      //Cambiar mayúscula y minúscula en función del código de
respuesta.

case 1:

Serial.println("Success");           //significa que el comando se ha realizado correctamente.

break;

case 2:

Serial.println("Failed");            //significa que el comando ha fallado.

break;

case 254:

Serial.println("Pending");           //significa que el comando aún no se ha terminado de
calcular.

break;

case 255:

Serial.println("No Data");           //significa que no hay más datos que enviar.

break;

}

while (Wire.available()) {           //pregunta si hay bytes para recibir

in_char = Wire.read();               //recibir un byte.

RTD_data[i] = in_char;               //carga este byte en la matriz.

i += 1;                              //incurrir en el contador para el elemento array.

if (in_char == 0) {                 //si vemos que se nos ha enviado un comando nulo.

i = 0;                               //Restablecer el contador i a 0.
```

```
    break;

}

}

Serial.println(RTD_data);    // imprime los datos

}

serial_event = false;      //Restablecer el indicador

}

//Descomentar de esta sección si desea tomar el valor RTD y convertirlo en número de coma
flotante.

//RTD_float=atof(RTD_data);

}
```

- *Código para EZO-pH Circuit*

```
//-----Code for EZO pH Circuit-----//

#include <Wire.h>           //biblioteca I2C.

#define address 99        //dirección ID I2C

char computerdata[20]; // matriz de caracteres de 20 bytes para contener los datos entrantes

byte received_from_computer = 0; //indica cuántos caracteres se han recibido.

byte serial_event = 0;     // indica cuando se han recibido datos del pc

byte code = 0;            //se utiliza para contener el código de respuesta I2C.

char ph_data[20];        // matriz de caracteres de 20 bytes para contener los datos entrantes del circuito
de pH.

byte in_char = 0;        //se utiliza como búfer de 1 byte para almacenar bytes entrantes del circuito de
pH.
```

```
byte i = 0;           //contador utilizado para la matriz ph_data.

int time_ = 815;     //se utiliza para cambiar el retardo necesario en función del comando enviado
                    //al circuito de pH de la clase EZO.

float ph_float;

void setup()

{

  Serial.begin(9600); //inicialización Puerto serial

  Wire.begin();      //inicialización I2C

}

void serialEvent() { // se activará cuando se reciban los datos procedentes del monitor serie
                    //(pc/mac/otro).

  received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20); //lee los datos enviados
  //desde el monitor serie hasta que vemos un <CR>. Cuenta cuantos caracteres se han recibido.

  computerdata[received_from_computer] = 0; //impedir que el búfer transmita datos erróneos.

  serial_event = true; //establezca el indicador

}

void loop() {

  if (serial_event == true) { //si se envió un comando al dispositivo EZO.

    for (i = 0; i <= received_from_computer; i++) { // para reconocer el comando "sleep".

      computerdata[i] = tolower(computerdata[i]); // "Sleep" ≠ "sleep"

    }

    i=0;

    if (computerdata[0] == 'c' || computerdata[0] == 'r')time_ = 815; //Si se ha enviado un comando
    //para calibrar o tomar una lectura esperamos 815ms para que el circuito tenga tiempo de tomar la lectura.

    else time_ = 250; //si se ha enviado algún otro comando esperamos solo 250 ms.

    Wire.beginTransmission(address); //llama al circuito por su número de identificación.

    Wire.write(computerdata); //transmitir el comando que se envió a través del puerto serie.

    Wire.endTransmission(); //finalizar la transmisión de datos I2C.
```

if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) { //si el comando que se ha enviado NO es el comando de suspensión, espere la cantidad correcta de tiempo y solicite datos.

si es el comando de reposo, no hacemos nada. La emisión de un comando de suspensión y luego la solicitud de datos activará el circuito.

```
delay(time_);

Wire.requestFrom(address, 20, 1);           //llamar al circuito y solicitar 20 bytes

code = Wire.read();                        //el primer byte es el código de respuesta, leemos esto por separado.

switch (code) {                            //cambiar el caso en función de cuál sea el código de respuesta.

case 1:

    Serial.println("Success");             //significa que el comando se ha realizado correctamente.

    break;

case 2:

    Serial.println("Failed");              //significa que el comando ha fallado.

    break;

case 254:

    Serial.println("Pending");             //significa que el comando aún no se ha terminado de
calcular.

    break;

case 255:

    Serial.println("No Data");             //significa que no hay más datos que enviar.

    break;

}

while (Wire.available()) {                 //hay bytes para recibir.

in_char = Wire.read();                     //recibir un byte.

ph_data[i] = in_char;                      //cargue este byte en nuestra matriz.

i += 1;

if (in_char == 0) {                       //si vemos que se nos ha enviado un comando nulo
```

```
i = 0;                //resetear i a 0

break;

}

}

Serial.println(ph_data);        //imprimir los datos.

}

serial_event = false;        //Restablecer el indicador

}

//Descomentar de esta sección si desea tomar el valor de pH y convertirlo en número de coma flotante.

//ph_float=atof(ph_data);

}
```

- *Código para módulo EZO-EC.*

```
//-----Code fot EZO EC Circuit-----//

#include <Wire.h>        //biblioteca I2C.

#define address 100        //dirección ID I2C

char computerdata[20];        // matriz de caracteres de 20 bytes para contener los datos
entrantes

byte received_from_computer = 0; //conocer número de caracteres

byte serial_event = 0;        //señal para indicar cuando se han recibido datos del pc/mac/otro.

byte code = 0;        //se utiliza para contener el código de respuesta I2C.

char ec_data[32];        // matriz de caracteres de 32 bytes para contener los datos entrantes

byte in_char = 0;        //used as a 1 byte buffer to store inbound bytes from the EC Circuit.

byte i = 0;        // Contador para matriz ec_data
```

```
int time_ = 570;          //se utiliza para cambiar el retardo necesario en función del comando
enviado al circuito

//análisis de cadenas

char *ec;

char *tds;

char *sal;

char *sg;

//declaración de variables en valor flotante

float ec_float;          //conductividad

float tds_float;         //sólidos disueltos totales

float sal_float;         // salinity.

float sg_float;          //densidad relativa

void setup()

{

  Serial.begin(9600);     //enable serial port.

  Wire.begin();           //enable I2C port.

}

void serialEvent() {      // se activará cuando se reciban los datos
procedentes del monitor serie

  received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20); //leemos los
datos enviados desde el monitor serie hasta que vemos un <CR>. Cuenta número de caracteres

  computerdata[received_from_computer] = 0; //impedir que el búfer transmita
datos no deseados

  serial_event = true;    //establezca el indicador.

}
```

```
void loop() {  
  
  if (serial_event == true) {          // si se envió un comando al dispositivo  
  
    for (i = 0; i <= received_from_computer; i++) {          //establecer todos los caracteres  
    en minúsculas, para que el código pueda reconocer el comando "sleep".  
  
      computerdata[i] = tolower(computerdata[i]);          //"Sleep" ≠ "sleep"  
    }  
  
    i=0;          //resetea i a 0  
  
    if (computerdata[0] == 'c' || computerdata[0] == 'r')time_ = 570;          //si se ha enviado un  
    comando para calibrar o tomar una lectura esperamos 570ms para que el circuito tenga tiempo  
    de tomar la lectura.  
  
    else time_ = 250;          //si se ha enviado algún otro comando esperamos solo 250 ms.  
  
    Wire.beginTransmission(address);          //llama al circuito por su número de identificación.  
  
    Wire.write(computerdata);          //transmitir el comando que se envió a través  
    del puerto serie.  
  
    Wire.endTransmission();          //finalizar la transmisión de datos I2C.  
  
    if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) {          //si el comando que se ha enviado  
    NO es el comando de suspensión, espere la cantidad correcta de tiempo y solicite datos.  
  
    //si es el comando de reposo, no hacemos nada. La emisión de un comando de suspensión y  
    luego la solicitud de datos activarán el circuito EC.  
  
    delay(time_);  
  
    Wire.requestFrom(address, 32, 1);          //llame al circuito y solicite 32 bytes (es el  
    tamaño máximo del búfer i2c para un Arduino)  
  
    code = Wire.read();          // el primer byte es el código de respuesta  
  
    switch (code) {          // cambiar el caso en función de la respuesta.  
  
      case 1:  
  
        Serial.println("Success");          //significa que el comando se ha realizado correctamente.  
  
        break;
```

```
case 2:

    Serial.println("Failed");    //significa que el comando ha fallado.

    break;

case 254:

    Serial.println("Pending");    //significa que el comando aún no se ha terminado de
calcular.

    break;

case 255:

    Serial.println("No Data");    //significa que no hay más datos que enviar.

    break;

}

while (Wire.available()) {    //pregunta si hay byte para recibir

    in_char = Wire.read();    //recibe un byte.

    ec_data[i] = in_char;    //cargue este byte en la matriz.

    i += 1;    //se inicia el contador

    if (in_char == 0) {    //si vemos que se nos ha enviado un comando nulo.

        i = 0;    // restablece el Contador a 0

        break;

    }

}

Serial.println(ec_data);    //imprimir los datos.

Serial.println();

}

serial_event = false;    //restablecer el indicador
```

```
//if (computerdata[0] == 'r') string_pars(); //quite el comentario de esta función si desea dividir la cadena separada por comas en sus partes individuales.
```

```
}
```

```
}
```

```
void string_pars() {           //esta función dividirá el CSV en 4 partes columndas. CE| TDS| SAL|SG.
```

```
    ec = strtok(ec_data, ",");
```

```
    tds = strtok(NULL, ",");
```

```
    sal = strtok(NULL, ",");
```

```
    sg = strtok(NULL, ",");
```

```
    //imprime cada valor por separado.
```

```
    Serial.print("EC:");
```

```
    Serial.println(ec);
```

```
    Serial.print("TDS:");
```

```
    Serial.println(tds);
```

```
    Serial.print("SAL:");
```

```
    Serial.println(sal);
```

```
    Serial.print("SG:");
```

```
    Serial.println(sg);
```

```
    Serial.println();
```

```
    //Descomentar si desea tomar los valores y convertirlos en número de coma flotante.
```

```
/*
```

```
    ec_float=atof(ec);
```

```
    tds_float=atof(tds);
```

```
    sal_float=atof(sal);
```

```
sg_float=atof(sg);

*/

}

    • Código para EZO-ORP.

//-----Code for EZO-ORP Circuit-----//

#include <Wire.h>          //biblioteca I2C.

#define address 98        //dirección ID I2C

char computerdata[20];    // matriz de caracteres de 20 bytes

byte received_from_computer = 0; //necesitamos saber cuántos caracteres se han recibido.

byte serial_event = 0;    //señal para indicar cuando se han recibido datos del PC/MAC/otro.

byte code = 0;           //se utiliza para contener el código de respuesta I2C.

char ORP_data[20];       // matriz de caracteres de 20 bytes para contener los datos entrantes
del circuito ORP.

byte in_char = 0;        //Se utiliza como búfer de 1 byte para almacenar bytes entrantes desde
el circuito ORP.

byte i = 0;              //contador utilizado para la matriz ORP_data.

int time_ = 815;         //se utiliza para cambiar el retardo necesario en función del comando
enviado al circuito

float ORP_float;

void setup()

{

    Serial.begin(9600);

    Wire.begin();

}

void serialEvent() {      // se activará cuando se reciban los datos procedentes del monitor
serie
```

```
received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20);    // lee los datos
enviados desde el monitor serie hasta que vemos un <CR>. Cuenta número de caracteres

computerdata[received_from_computer] = 0;    // impedir que el búfer transmita
datos no deseados

serial_event = true;    //establezca el indicador
}

void loop() {

if (serial_event == true) {    //si se envió un comando al dispositivo

for (i = 0; i <= received_from_computer; i++) {    //establezca todos los caracteres
en minúsculas, para reconocer el comando "sleep".

computerdata[i] = tolower(computerdata[i]);    // "Sleep" ≠ "sleep"

}

i=0;    //reseta i a 0

if (computerdata[0] == 'c' || computerdata[0] == 'r')time_ = 815;    //si se ha enviado un
comando para calibrar o tomar una lectura esperamos 815ms para que el circuito tenga tiempo
de tomar la lectura.

else time_ = 250;    //si se ha enviado algún otro comando esperamos solo 250 ms.

Wire.beginTransmission(address);    //llamar al circuito por su número de identificación.

Wire.write(computerdata);    //transmitir el comando que se envió a través del
puerto serie.

Wire.endTransmission();    //finalizar la transmisión de datos I2C.

if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) {    //Si el comando que se ha enviado
NO es el comando de suspensión, espere la cantidad correcta de tiempo y solicite datos.

//si es el comando de reposo, no hacemos nada. La emisión de un comando de suspensión y
luego la solicitud de datos activará el circuito.

delay(time_);

Wire.requestFrom(address, 20, 1); //llamar al circuito y solicitar 20 bytes (
```

```
code = Wire.read();    //el primer byte es el código de respuesta.

switch (code) {        //cambiar el caso en función de cuál sea el código de respuesta.

    case 1:

        Serial.println("Success");    //significa que el comando se ha realizado correctamente.

        break;

    case 2:

        Serial.println("Failed");        //significa que el comando ha fallado.

        break;

    case 254:

        Serial.println("Pending");        //significa que el comando aún no se ha
terminado de calcular.

        break;

    case 255:

        Serial.println("No Data");        //significa que no hay más datos que enviar.

        break;

}

while (Wire.available()) {    // pregunta si hay bytes para recibir.

    in_char = Wire.read();

    ORP_data[i] = in_char;        //cargue este byte en nuestra matriz.

    i += 1;                        // se inicia el contador

    if (in_char == 0) {            //si vemos que se nos ha enviado un comando nulo.

        i = 0;                    //resetear el contador i a 0.

        break;

    }

}
```

```
Serial.println(ORP_data);           //imprime los datos

}

serial_event = false;             //restablecer el indicador

}

//Descomentar esta sección si desea tomar el valor ORP y convertirlo en número de coma
flotante.

//ORP_float=atof(ORP_data);

}
```

- *Código para EZO-D.O. Circuit*

```
//-----Code for EZO D.O. Circuit-----//

#include <Wire.h>                 //biblioteca I2C.

#define address 97               //dirección I2C

char computerdata[20];          //hacemos una matriz de caracteres de 20 bytes

byte received_from_computer = 0;

byte serial_event = 0;          //una señal para indicar cuando se han recibido datos

byte code = 0;                  //se utiliza para contener el código de respuesta I2C.

char do_data[20];               //hacemos una matriz de caracteres de 20 bytes

byte in_char = 0;               //Se utiliza como búfer de 1 byte para almacenar bytes entrantes

byte i = 0;                      //contador utilizado para DO_data

int time_ = 575;                //se utiliza para cambiar el retardo necesario en función del comando
enviado al circuito

//análisis de cadenas y definición de variables

char *DO;

char *sat;
```

```
float DO_float;

float sat_float;

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  Wire.begin();

}

void serialEvent() { // se activará cuando se reciban los datos procedentes del monitor serie

  received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20); //leemos los
datos enviados desde el monitor serie hasta que vemos un <CR> y cuenta número de caracteres.

  computerdata[received_from_computer] = 0; //impedir que el búfer transmita
datos indeseados

  serial_event = true; //establezca el indicador

}

void loop() {

  if (serial_event == true) { //si se envió un comando al dispositivo EZO.

    for (i = 0; i <= received_from_computer; i++) { //establezcer todos los
caracteres en minúsculas, para reconocer el comando "sleep".

      computerdata[i] = tolower(computerdata[i]); // "Sleep" ≠ "sleep"

    }

    i=0; //resetea i a 0

    if (computerdata[0] == 'c' || computerdata[0] == 'r')time_ = 575; //si se ha enviado un
comando para calibrar o tomar una lectura esperamos 575ms para que el circuito tenga tiempo
de tomar la lectura.

    else time_ = 250; //si se ha enviado algún otro comando esperamos solo 250 ms.

    Wire.beginTransmission(address); //call the circuit by its ID number.
```

```
Wire.write(computerdata);          //transmitir el comando que se envió a través del puerto serie.
```

```
Wire.endTransmission();           //finalizar la transmisión de datos I2C.
```

```
if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) {                                //si el comando que se ha enviado NO es el comando de suspensión, espere la cantidad correcta de tiempo y solicite datos.
```

```
//si es el comando de reposo, no hacemos nada. La emisión de un comando de suspensión y, a continuación, la solicitud de datos activará el circuito
```

```
delay(time_);
```

```
Wire.requestFrom(address, 20, 1);          //llamar al circuito y solicitar 20 bytes
```

```
code = Wire.read();                       //el primer byte es el código de respuesta
```

```
switch (code) {                          //Cambiar mayúscula y minúscula en función del código de respuesta.
```

```
case 1:
```

```
Serial.println("Success");               //significa que el comando se ha realizado correctamente.
```

```
break;
```

```
case 2:
```

```
Serial.println("Failed");               //significa que el comando ha fallado.
```

```
break;
```

```
case 254:
```

```
Serial.println("Pending");              //significa que el comando aún no se ha terminado de calcular.
```

```
break;
```

```
case 255:
```

```
Serial.println("No Data");              //means there is no further data to send.
```

```
break;
```

```
}
```

```
while (Wire.available()) {           //pregunta si hay bytes para recibir.

    in_char = Wire.read();           //recibir un byte.

    do_data[i] = in_char;           //carga este byte en la matriz.

    i += 1;                          //se inicia el contador.

    if (in_char == 0) {              //Si vemos que se nos ha enviado un comando nulo

        i = 0;                        //restablecer el contador i a 0.

        break;

    }

}

Serial.println(do_data);           //imprimir los datos.

Serial.println();

}

serial_event = false;

//if (computerdata[0] == 'r') string_pars(); //descomentar si desea dividir la cadena separada
por comas en sus partes individuales.

}

}

void string_pars() {                //Esta función dividirá la cadena 2 partes individuales.

DO|SAT| DO = strtok(do_data, "|");

sat = strtok(NULL, "|");

//imprime los resultados por separado

Serial.print("DO:");

Serial.println(DO);

Serial.print("SAT:");

Serial.println(sat);
```

Serial.println();

- *Código para EZO – CO2 sensor.*

```
//-----Code for EZO CO2 sensor-----//

#include <Wire.h>          //biblioteca I2C.

#define address 97        //dirección I2C

char computerdata[20];    //hacemos una matriz de caracteres de 20 bytes

byte received_from_computer = 0;

byte serial_event = 0;    //una señal para indicar cuando se han recibido datos

byte code = 0;           //se utiliza para contener el código de respuesta I2C.

char Co2_data[20];       //hacemos una matriz de caracteres de 20 bytes para los datos del
circuito

byte in_char = 0;        //se utiliza como búfer de 1 byte para almacenar bytes entrantes desde
el sensor de CO2.

byte i = 0;              //contador utilizado para Co2_data.

int time_ = 250;         //se utiliza para establecer el retardo necesario para procesar el
comando enviado al sensor.

int Co2_int;            //contiene valor CO2

void setup()

{

  Serial.begin(9600);

  Wire.begin();

}

void serialEvent() {      //se activará cuando se reciban los datos procedentes del monitor serie

  received_from_computer = Serial.readBytesUntil(13, computerdata, 20);    //lee los datos
enviados desde el monitor serie hasta que vemos un <CR>.
```

```
computerdata[received_from_computer] = 0;           //impedir que el búfer transmita datos
indeseados

serial_event = true;

}

void loop() {

if (serial_event == true) {                          //si se envió un comando al dispositivo

for (i = 0; i <= received_from_computer; i++) {      //establezca todos los caracteres
en minúsculas, para reconocer el comando "sleep".

computerdata[i] = tolower(computerdata[i]);         //"Sleep" ≠ "sleep"

}

i=0;          //reset i,

Wire.beginTransmission(address);                    //llame al circuito por su número de identificación.

Wire.write(computerdata);                           //transmitir el comando que se envió a través del puerto
serie.

Wire.endTransmission();                             //finalizar la transmisión de datos I2C.

if (strcmp(computerdata, "sleep") != 0) {          //si el comando que se ha enviado NO es el
comando de suspensión, espere la cantidad correcta de tiempo y solicite datos.

//si es el comando de reposo, no hacemos nada. Al emitir un comando de suspensión y luego
solicitar datos, se activará el sensor de Co2.

delay(time_);

Wire.requestFrom(address, 20, 1);                  //llamar al circuito y solicitar 20

code = Wire.read();                                //el primer byte es el código de respuesta,

switch (code) {                                     //cambiar el caso en función de cuál sea el código de respuesta.

case 1:

Serial.println("Success");                          //significa que el comando se ha realizado correctamente.

break;
```

```
case 2:

    Serial.println("Failed");    //significa que el comando ha fallado.

    break;

case 254:

    Serial.println("Pending");    //significa que el comando aún no se ha terminado de
calcular.

    break;

case 255:

    Serial.println("No Data");    //significa que no hay más datos que enviar.

    break;

}

while (Wire.available()) {    ¿Hay bytes para recibir?.

    in_char = Wire.read();    //recibir un byte.

    Co2_data[i] = in_char;    //cargar este byte en la matriz.

    i += 1;                //inicio del contador

    if (in_char == 0) {    //si vemos que se nos ha enviado un comando nulo.

        i = 0;            //restablecer el contador i a 0.

        break

    }

}

Serial.println(Co2_data);    //imprimir los datos.

}

serial_event = false;

}

//descomentar esta sección si desea tomar el valor de Co2 y convertirlo en número entero.
```

```
//Co2_int=atoi(Co2_data);  
}
```

- [Código para conectar el sensor DHT11 con Blynk.](#)

```
//-----Código para subir datos del sensor DHT11 a Blynk-----//  
  
#define BLYNK_PRINT Serial //define nombre para imprimir la información  
  
#define DHTPIN 2 //define el pin que al que se conecta la salida de datos del sensor  
(pin digital 2)  
  
#define DHTTYPE DHT11 //define el modelo del sensor (DHT11)  
  
// se habilitan las bibliotecas necesarias  
  
#include <DHT.h> // para usar el sensor DHT11  
  
#include <WiFiNINA.h> // para la conexión wifi  
  
#include <BlynkSimpleWiFiNINA.h> //para conectar con la nube de Blynk  
  
#include "arduino_secrets.h" //para introducir las credenciales privadas  
  
  
// Debe obtener autenticación mediante el Token en la aplicación Blynk.  
  
char auth[] = YOUR_TOKEN;  
  
// credenciales WiFi.  
  
// Establecer en SECRET_PASS "" para redes abiertas.  
  
char ssid[] = SECRET_SSID;  
  
char pass[] = SECRET_PASS;  
  
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);  
  
BlynkTimer timer; //permite enviar datos periódicamente con intervalos dados que no  
interfieran con las rutinas de la biblioteca Blynk Blynk Timer  
  
void myTimerEvent(){
```

//Puede enviar cualquier valor en cualquier momento. (no envíes más de 10 valores por segundo)

//Definición de variables

float h = dht.readHumidity(); //humedad

// Read temperature as Celsius (the default)

float t = dht.readTemperature(); //temperatura

// Compruebe si alguna lectura falló para intentarlo de nuevo

if (isnan(h) || isnan(t)) {

Serial.println(F("Failed to read from DHT sensor!"));

return;

}

//Selección de campos de la nube donde se va a recibir la información

Blynk.virtualWrite(V0, h); //se reciben los datos de humedad en pin virtual 0

Blynk.virtualWrite(V1, t); //se reciben los datos de temperatura en pin virtual 1

//se imprimen los valores en el monitor serie

Serial.print(F("Humidity: "));

Serial.print(h);

Serial.print(F("% Temperature: "));

Serial.print(t);

Serial.println(F("°C "));

}

void setup()

{ Serial.begin(9600);

dht.begin(); // se inicializa el sensor

Blynk.begin(auth, ssid, pass); // se inicializa la nube consultando token, nombre de la red y contraseña

timer.setInterval(1000L, myTimerEvent); // Mira el temporizador

}

void loop()

{

Blynk.run(); //procesa los comandos entrantes y realiza la comprobación de la conexión Blynk.

timer.run(); //ejecuta el temporizador

}

- Arduino_secret

#define SECRET_SSID "sagemcom8868" //introducir tu nombre de wifi

#define SECRET_PASS "MMYYUJZ4YMY4YT" //introducir tu clave de la wifi de casa

*#define YOUR_TOKEN "WYUIM5f-8c7BaJiR45xPR1f8yjauqQV7" //introducir tu token personal
(se puede enviar al correo desde la aplicación blynk o copiarlo y pegarlo desde Blynk)*

- *Código para conectar sensores con ThingSpeak.*

El código ha sido creado a partir de otros códigos encontrados en el repositorio de GitHub.

```
//-----Código-----//
//----- Arduino Nano 33 (IoT)-----//
//-----//
//En las siguientes líneas se incluyen las bibliotecas que son utilizadas//
#include <Wire.h>      // permite comunicarse con dispositivos por bus I2C

#include <WiFiNINA.h>  // para la conexión Wifi

#include "secrets.h"  // para la ocultación de usuario y contraseña

#include "ThingSpeak.h" // para la conexión con Thingspeak

#include "ArduinoLowPower.h" // para poner los elementos en modo sleep y reducir el consumo

#include <Adafruit_Sensor.h> //librería de Adafruit

#include <Adafruit_TSL2561_U.h> // para configurar sensor TSL2561

#include <Adafruit_BME280.h> // para configurar sensor BME280

Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 12345); //
//Dirección I2C (ID único para adjuntar a este sensor, puede dejar en el valor predeterminado
de 12345)

//definimos la variable necesaria para calcular la altitud y creamos un objeto de
//Adafruit_BME280 para acceder a las funciones de la biblioteca

#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)

Adafruit_BME280 bme; // I2C

//Datos de la red Wifi

char ssid[] = SECRET_SSID; // your network SSID (name)

char pass[] = SECRET_PASS; // your network password
```

```
int keyIndex = 0;    // your network key Index number (needed only for WEP)

WiFiClient client;

//Datos de los canales de ThinSpeak.

unsigned long myChannelNumber = SECRET_CH_ID;

const char * myWriteAPIKey = SECRET_WRITE_APIKEY;

//Inicialización de las variables en coma flotante a medir por los sensores

float temperature = 0; // temperatura

float pressure = 0;    //presión

float humidity = 0;    //humedad

float altitude = 0;    //altitud

uint16_t broadband = 0;    //espectro completo de luz visible +IR

uint16_t infrared = 0;    //espectro infrarrojo

int UV_value = 0;        // radiación UV

String myStatus = "";    //determinar estado

unsigned status;

void setup() {

  Serial.begin(115200);    // Inicialización del monitor serie

  ThingSpeak.begin(client); // Inicialización ThingSpeak

  //dht.begin();    // Inicialización DHT11

  bme.begin();    // Inicialización BME280

  tsl.begin();    // Inicialización TSL2561

}

/*Configuración de la ganancia y tiempo de integración del sensor TSL2561*/

void configureSensor(void)
```

```
{

/* Elección de la ganancia según condiciones de luz */

// tsl.setGain(TSL2561_GAIN_1X); /* No gain ... use in bright light to avoid sensor saturation
*/

// tsl.setGain(TSL2561_GAIN_16X); /* 16x gain ... use in low light to boost sensitivity */

tsl.enableAutoRange(true); /* Auto-gain ... switches automatically between 1x and 16x */

/* Elección del tiempo de integración según resolución deseada ( */

//tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_13MS); /* fast but low resolution */

//tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_101MS); /* medium resolution and
speed */

tsl.setIntegrationTime(TSL2561_INTEGRATIONTIME_402MS); /* 16-bit data but slowest
conversions */

/* Imprime en pantalla los datos configurados para el sensor TSL2561 */

Serial.println("-----");

Serial.print ("Gain: "); Serial.println("Auto");

Serial.print ("Timing: "); Serial.println("101 ms");

Serial.println("-----");

}

void loop() { /*Función de repetición del bucle

/* Comprobación de la conexión Wifi, restablece la conexión en caso de desconectarse*/

if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){

Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");

Serial.println(SECRET_SSID);
```

```
while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){

    WiFi.begin(ssid, pass); // Connect to WPA/WPA2 network.

    Serial.print(".");

    delay(5000);

}

Serial.println("\nConnected.");

}

/*Comandos utilizados para los cálculos*/

sensors_event_t event;

tsl.getEvent(&event);

tsl.getLuminosity (&broadband, &infrared);

/*Declaración de variables para almacenar los resultados*/

float temperature = bme.readTemperature();

float pressure = bme.readPressure();

float humidity = bme.readHumidity();

float altitude = bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA);

int UV_value = analogRead(A0);

/*Asignación de un número de campo en ThingSpeak a cada resultado*/

ThingSpeak.setField(1, humidity);

ThingSpeak.setField(2, temperature);

ThingSpeak.setField(3, broadband);

ThingSpeak.setField(4, infrared);

ThingSpeak.setField(5, pressure);

ThingSpeak.setField(6, altitude);

ThingSpeak.setField(7, UV_value);
```

```
ThingSpeak.setField(8, event.light);

// set the status

ThingSpeak.setStatus(myStatus);

/* Escribe en el canal de ThingSpeak*/

int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber, myWriteAPIKey);

if(x == 200){

    Serial.println("Channel update successful.");

}

else{

    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " + String(x));

}

/*Muestra los datos en el monitor serie*/

if (event.light)

{

    Serial.print("Espectro Visible+ IR: ");

    Serial.println(broadband);

    Serial.print("Espectro Infrarrojo: ");

    Serial.println(infrared);

    Serial.print(event.light); Serial.println(" lux");

}

else

{

    Serial.println("Sensor overload");

}

Serial.print("Humedad = ");
```

```
Serial.print(humidity);

Serial.println(" %");

Serial.print("Temperatura = ");

Serial.print(temperature);

Serial.println(" °C");

Serial.print("Presión atmosférica = ");

Serial.print((pressure / 100.0F));

Serial.println(" hPa");

Serial.print("Approx. Altitud = ");

Serial.print(altitude);

Serial.println(" m");

Serial.print("Radiación UV = ");

Serial.print(UV_value);

delay(2000); // Se espera 20 segundos para actualizar los canales

/*Comandos para configurar el Arduino en modo SLEEP*/

if (awake){

  Serial.println ("I am awake");

  delay (2000);

}

awake=false;

LowPower.attachInterruptWakeup(awake, WakeUp, CHANGE);

Serial.println("going to sleep");

LowPower.sleep (sleeping_time);

awake=false:

}
```

- Arduino_secret

// Utilice este archivo para almacenar todas las credenciales privadas y los detalles de conexión

#define SECRET_SSID "MOVISTAR_AAC8" // reemplace MySSID con el nombre de su red WiFi

#define SECRET_PASS "RokYeiC3WjJ3q9Vdjqqj" // reemplace MyPassword con su contraseña de WiFi

#define SECRET_CH_ID 0000000 // Reemplace 0000000 con su número de canal

#define SECRET_WRITE_APIKEY "PQC94FWSSAJHCRHG" // Reemplace XYZ con la clave de API de escritura de canal

- *Código para determinar intensidad de la señal Wifi. (Arduino IDE)*

//-----Código para determinar intensidad de la señal Wifi-----//

#include <WiFiNINA.h>

//Introduzca sus datos confidenciales en la pestaña Secret

char ssid[] = SECRET_SSID; // el SSID de su red

char pass[] = SECRET_PASS; // su contraseña de red

int status = WL_IDLE_STATUS; // el estado de la señal Wi-Fi

int ledState = LOW; // utilizado para configurar el LED

unsigned long previousMillisInfo = 0; //almacenará la última vez que se actualizó la información de Wi-Fi

unsigned long previousMillisLED = 0; // almacenará la última vez que se actualizó el LED

const int intervalInfo = 5000; // intervalo en el que actualizar la información de la placa

void setup() {

Serial.begin(9600);

// Configurar el LED como salida

```
pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);

// intente conectarse a la red Wi-Fi:

while (status != WL_CONNECTED) {

  Serial.print("Attempting to connect to network: ");

  Serial.println(ssid);

  // Conéctese a la red WPA/WPA2:

  status = WiFi.begin(ssid, pass);

  // espere 10 segundos para la conexión:

  delay(10000);

}

// ya está conectado, así que imprima los datos:

Serial.println("You're connected to the network");

Serial.println("-----");

}

void loop() {

  unsigned long currentMillisInfo = millis(); // declaración de variable de tamaño extendido
(almacena 32 bits)

  // Compruebe si el tiempo después de la última actualización es mayor, el intervalo

  if (currentMillisInfo - previousMillisInfo >= intervalInfo) {

    previousMillisInfo = currentMillisInfo;

    Serial.println("Board Information:");

    // imprima la intensidad de la señal recibida:

    long rssi = WiFi.RSSI();

    Serial.print("signal strength (RSSI):");

    Serial.println(rssi);
```

```
Serial.println("-----");

}

unsigned long currentMillisLED = millis();

// medir la intensidad de la señal y convertirla en un intervalo de tiempo

int intervalLED = WiFi.RSSI() * -10;

// check if the time after the last blink is bigger the interval

if (currentMillisLED - previousMillisLED >= intervalLED) {

    previousMillisLED = currentMillisLED;

    // si el LED está apagado, encenderlo y viceversa:

    if (ledState == LOW) {

        ledState = HIGH;

    } else {

        ledState = LOW;

    }

    // configure el LED usando el comando ledState de la variable:

    digitalWrite(LED_BUILTIN, ledState);

}

}
```

- *Código en FreeFem++ para simulación de ubicación con mejor señal Wifi.*

```
//Contorno exterior

real a = 30, b = 20, c = 0.1;

border a00(t=0, 1) {x=a*t; y=0; label=1;}

border a10(t=0, 1) {x=a; y=b*t; label=1;}

border a20(t=1, 0) {x=a*t; y=b; label=1;}

border a30(t=1, 0) {x=0; y=b*t; label=1;}

//contorno interior

border a01(t=0, 1) {x=c+(a-c*2)*t; y=c; label=1;}

border a11(t=0, 1) {x=a-c; y=c+(b-c*2)*t; label=1;}

border a21(t=1, 0) {x=c+(a-c*2)*t; y=b-c; label=1;}

border a31(t=1, 0) {x=c; y=c+(b-c*2)*t; label=1;}

real r = 1, s = 7, j = 8, u = 4;           //digestor

border c00(t=0, 1) {x=r+j*t; y=s; label=3;}

border c10(t=0, 1) {x=r+j; y=s+u*t; label=3;}

border c20(t=1, 0) {x=r+j*t; y=s+u; label=3;}

border c30(t=1, 0) {x=r; y=s+u*t; label=3;}

//creación del mallado

int n=13; // definición del mallado

mesh Sh = buildmesh(a00(n) + a10(n) + a20(n) + a30(n)

+ a01(n*8) + a11(n*6) + a21(n*8) + a31(n*6)

+ c00(4*n) + c10(2*n) + c20(4*n) + c30(n) );

plot(Sh,wait=1);           //plotea la malla creada

//.....se crea el punto Wifi y se utiliza bucle para cambiarlo de posición.....//

int bx;
```

```
for (bx = 1; bx <= 12; bx++){  
  
    border C(t=0, 2*pi){x=2*bx+0.25*cos(t); y=4+0.25*sin(t); label=2;}  
  
    //..... se crea nueva malla incluyendo el router.....//  
  
    mesh Th = buildmesh(a00(n) + a10(n) + a20(n) + a30(n)  
        + a01(10*n) + a11(10*n) + a21(10*n) + a31(n) + C(10)  
        + c00(n) + c10(6*n) + c20(n) + c30(6*n));  
  
    fespace Vh(Th, P1);  
  
    func real wall() {  
  
        if (Th(x,y).region == Th(0.1,0.1).region || Th(x,y).region == Th(1,6).region) { return 1; }  
  
        else { return 0; }  
  
    }  
  
    Vh<complex> v,w;  
  
    Vh wallreflexion = 2.55; //coeficiente de reflexion pared de hormigon  
  
    Vh<complex> wallabsorption = -0.084i; //coeficiente de absorcion pared de hormigon  
  
    Vh k = 10; // frecuencia angular wifi en Ghz  
  
    problem wifi(v,w) =  
  
        int2d(Th)(  
  
            (v*w*k^2)/(1+(wallreflexion+wallabsorption)*wall())^2  
  
            - (dx(v)*dx(w)+dy(v)*dy(w)) )  
  
        + on(2, v=1) ;  
  
    //Se resuelve el problema y se plotea la solución.  
  
    wifi;  
  
    Vh vm = log(real(v)^2 + imag(v)^2);  
  
    plot(vm, wait=1, fill=true, value=1, nbiso=65);  
  
}
```

- *Código en FreeFem++ para simulación de terreno.*

```
load "Element_P3";

real anchoterreno=2.5, profundidadterreno=.6;

real espesorparedes=.1, anchoedificio=0.5+espesorparedes, altoedificio=0.4;//Sin techo.

real ladohorizontal exterior=.5001+.0;

real alturapared=altoedificio;

real espesortecho1=0.001, largotecho1=anchoedificio;

real espesortecho2=0.1, largotecho2=anchoedificio;

real anchointerior=anchoedificio-espesorparedes;

real deltaprofundidadsuelointerior=.20001+.0;//Profundidad del interior del suelo del edificio.

real deltaenterradoparedes=deltaprofundidadsuelointerior;//Altura de la pared enterrada.

real deltanoenterradoparedes=alturapared-deltaenterradoparedes;//Altura de la pared no enterrada.

string archivo="_1";

//Etiquetas

int ladoprofundoinferior=1,ladoslateralesprofundo=2;

int ladolateralparednoenterrado=3,ladoizquierdoedificio=4;

int ladosuperiortecho1=5, ladosuperiortecho2=6;

int ladosueloexterior=7;

int ejesimetrico=8;

int ladosuelolateralexterior=9;

//Contorno exterior

border a(t=0,1){x=anchoterreno*t;y=0;label=ladoprofundoinferior;}//Lado profundo enterrado.
```

border

b(t=0,1){x=anchoterreno;y=profundidadterreno*t;;label=ladoslateralesprofundo;};//Lado lateral profundo a la derecha.

border

c(t=0,1){x=anchoterreno-(anchoterreno-anchoedificio-ladohorizontal exterior)*t;y=profundidadterreno;label= ladosuelo exterior;};//suelo exterior

border

c1(t=0,1){x=anchoedificio+ladohorizontal exterior-(ladohorizontal exterior)*t;y=profundidadterreno;label= ladosuelolateral exterior;};//suelo lateral exterior

border

d(t=0,1){x=anchoedificio;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes*t;label=ladolateral parednoenterrado;};//Pared no enterrada.

border

e(t=0,1){x=anchoedificio;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1*t;label=ladolateralparednoenterrado;};//Borde techo 1 derecho.

border

f(t=0,1){x=anchoedificio;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1+espesortecho2*t;label=ladolateralparednoenterrado;};//Borde techo 2 derecho.

border

g(t=0,1){x=anchoedificio-anchoedificio*t;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1+espesortecho2;label=ladosuperiortecho2;};//Techo 2.

border

h(t=0,1){x=0;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1+espesortecho2-espesortecho2*t;label=ejesimetrico;};

border

k(t=0,1){x=0;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1-espesortecho1*t;label=ejesimetrico;};

border

l(t=0,1){x=0;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes-deltanoenterradoparedes*t;label=ejesimetrico;};

border

m(t=0,1){x=0;y=profundidadterreno-deltaenterradoparedes*t;label=ejesimetrico;};

border

o(t=0,1){x=0;y=(profundidadterreno-deltaenterradoparedes)-(profundidadterreno-deltaenterradoparedes)*t;label=ejesimetrico;};

```
//Contorno interior

border                                p(t=0,1){x=(anchoedificio-espesorparedes)-(anchoedificio-
espesorparedes)*t;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1;label=lado
superiortecho1;};//Techo 1.

border                                p1(t=0,1){x=(anchoedificio)-
espesorparedes*t;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes+espesortecho1;label=lado
superiortecho1;};//Techo 1.

border                                q(t=0,1){x=(anchoedificio-espesorparedes)-(anchoedificio-
espesorparedes)*t;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes;};//Superficie      techo
interior.

border                                q1(t=0,1){x=(anchoedificio)-
espesorparedes*t;y=profundidadterreno+deltanoenterradoparedes;label=ladosuperiortecho1;
};//Techo 1.

border                                r(t=0,1){x=(anchoedificio-espesorparedes)*t;y=profundidadterreno-
deltaenterradoparedes;};//Superficie suelo interior.

border                                r1(t=0,1){x=(anchoedificio)-espesorparedes*t;y=profundidadterreno-
deltaenterradoparedes;};

border                                s(t=0,1){x=anchoedificio;y=profundidadterreno-
deltaprofundidadsuelointerior*t;};//Lado pared enterrada externa.

border                                w(t=0,1){x=anchoedificio-espesorparedes;y=(profundidadterreno-
deltaprofundidadsuelointerior)+(deltaprofundidadsuelointerior+deltanoenterradoparedes)*t;}
; //Lado pared enterrada externa.

//se crea la malla

int n=3;

//plot(a(10*n)+b(10*n)+c(10*n)+d(4*n)+e(n)+f(n)+g(4*n)+h(n)+k(n)+l(4*n)+m(4*n)+o(10*n)+p
(4*n)+p1(n)+q(4*n)+q1(n)+r(4*n)+r1(n)+s(n)+w(n));

mesh

th=buildmesh(a(10*n)+b(10*n)+c(10*n)+c1(10*n)+d(4*n)+e(15*n)+f(15*n)+g(10*n)+h(15*n)+
k(15*n)+l(4*n)+m(4*n)+o(10*n)+p(4*n)+p1(n)+q(10*n)+q1(n)+r(4*n)+r1(n)+s(n)+w(4*n));
```

```
//mesh
th=buildmesh(a(1*n)+b(1*n)+c(1*n)+c1(1*n)+d(1*n)+e(1*n)+f(1*n)+g(1*n)+h(1*n)+k(1*n)+l(1
*n)+m(1*n)+o(1*n)+p(1*n)+p1(n)+q(1*n)+q1(n)+r(1*n)+r1(n)+s(n)+w(1*n));

plot(th, wait=1);
```

- *Código correlación entre humedad y temperatura realizado Matlab*
- % Lee la temperatura y la humedad de un canal de ThingSpeak y visualice el
- % de relación entre ellos utilizando el gráfico SCATTER
-
- % ID de canal para leer datos
- readChannelID = 1501363;
- % ID de Campo de temperatura
- TemperatureFieldID = 2;
- % ID de campo de humedad
- HumidityFieldID = 1;
-
- % Clave de API de lectura de canal
- readAPIKey = '';
-
- % Lea los datos de temperatura y humedad
- data = thingSpeakRead(readChannelID,'Fields',[TemperatureFieldID
HumidityFieldID], ...
- 'NumPoints',200, ...
-
- 'ReadKey',readAPIKey);
-
- temperatureData = data(:,1);
-
- humidityData = data(:,2);
-
- % Visualizar los datos
-
-
- scatter(temperatureData,humidityData, 'filled');
- xlabel('Temperatura (°C)');
- ylabel('Humedad (%)');
-
-

- *Código realizado en Matlab para hacer histograma de frecuencia de temperatura*
- 1. % Leer la temperatura durante las últimas 24 horas desde un canal de ThingSpeak y
- 2. % visualizar las variaciones de temperatura mediante la función HISTOGRAMA DE MATLAB.
 -
 - %Introducir ID de canal
 - readChannelID = 1501363;
 -
 -
- 1. % Introducir ID de campo de temperatura
 - TemperatureFieldID = 2;
 -
 - % Clave de API de lectura del canal
 - readAPIKey = '';
 -
 - % Obtener datos de temperatura del campo 2 durante las últimas 24 horas = 24 x 60
 - % minutos.
 - tempF =
 - thingSpeakRead(readChannelID, 'Fields', TemperatureFieldID, ...
 - 'NumMinutes', 24*60, 'ReadKey', readAPIKey);
 -
 - %Visualiza el histograma
 - histogram(tempF);
 - xlabel('Temperatura (°C)');
 - ylabel('Nº mediciones');
 - title('Histograma de la variación de temperatura');
 -

