



**SISTEMA DE MONITOREO PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE BIODIGESTORES
DE DOS ETAPAS**

**JIMMY GERMÁN HIDALGO ESTRELLA
2210694
ANDRES FELIPE VALENCIA VIDAL
2111555**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIECIAS BÁSICAS
PROGRAMA MAESTRÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS
SANTIAGO DE CALI
2025**



**SISTEMA DE MONITOREO PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE BIODIGESTORES
DE DOS ETAPAS**

**JIMMY GERMÁN HIDALGO ESTRELLA
ANDRES FELIPE VALENCIA VIDAL**

**Tesis para optar al título de
Magister en Sistemas Energéticos**

**Director
LUZ MARINA FLÓREZ PARDO
Doctora en Ciencias Químicas**

**Codirector
IVÁN MAURICIO OSTOS ROJAS
Candidato a Doctor en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIECIAS BÁSICAS
PROGRAMA MAESTRÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS
SANTIAGO DE CALI
2025**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Magister en Sistemas Energéticos

JUAN MANUEL NÚÑEZ VELASCO

Jurado

JUAN CARLOS CLAVIJO SALINAS

Jurado

Santiago de Cali, 21 de marzo de 2025

AGRADECIMIENTOS

Consagro totalmente este logro a Dios por la vida y por abrir esta puerta de crecimiento personal y profesional y darme los recursos, el tiempo y el esfuerzo necesario, a mi familia por el apoyo incondicional en este proceso y de manera muy especial a Mi Padre, quien desde el Cielo me acompaña para recibir este título que siempre esperó.

Agradezco a mi compañero Andrés Felipe, por su dedicación, esfuerzo y comprensión conmigo durante el desarrollo de este trabajo, por secundar mis ideas y por su confianza en Dios y en mi para alcanzar este reto.

Agradezco a la directora de Tesis Dra. Luz Marina Flórez por su asesoría y acompañamiento permanente y sobre todo por todo el aprendizaje brindado.

Agradezco al codirector Magister Iván Mauricio Ostos por su valioso apoyo para que este proyecto llegue a su fin

. Finalmente agradezco a todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron en este logro.

Jimmy Germán Hidalgo Estrella

Agradezco a Dios por que sin él no soy nadie, a mi Esposa que ha tenido la paciencia para poder dedicarme a este proceso educativo, a mi hija que es mi inspiración para cada día seguir adelante, a mis padres y hermanos.

Agradezco a la Doctora Luz Marina Flórez por su apoyo y asesorías en este proceso

Agradezco al Magister Iván Mauricio Ostos por su apoyo y compromiso para cumplir los objetivos de la tesis.

Andrés Felipe Valencia

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	21
INTRODUCCIÓN	22
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	25
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	26
2. JUSTIFICACIÓN	27
2.1 SIGNIFICADO DE LA MONITORIZACIÓN EN LOS REACTORES DE DOS ETAPAS	27
2.2 RELEVANCIA DEL PROYECTO	27
2.3 IMPACTO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO	28
3. OBJETIVOS	29
3.1 OBJETIVO GENERAL	29
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
4. MARCOS DE REFERENCIA	30
4.1 MARCO TEÓRICO	30
4.1.1 Digestión anaerobia DA	30
4.1.2 Etapas de la digestión anaerobia	31
4.1.3 La materia prima para la digestión anaerobia	33
4.1.4 Importancia de la toma de muestras de Ácidos Grasos Volátiles AGV	34
4.1.5 Control de las variables de digestión anaerobia	34
4.1.6 Los reactores de digestión anaerobia DA	39

4.1.7 Variables críticas en los digestores	42
4.1.8 Importancia de la monitorización	43
4.1.9 Herramientas computacionales para el análisis y visualización de datos	44
4.1.10 Teorías y modelos relevantes	45
4.2 ANTECEDENTES	45
4.2.1 Sistemas de monitoreo	45
4.2.2 Herramientas computacionales usadas para el análisis y visualización de datos	50
4.2.3 Correlación y análisis de datos	51
5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	52
5.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CARACTERIZAR FÍSICA Y QUÍMICAMENTE LA BIOMASA DE AFRECHO DE YUCA, ESTIÉRCOL DE CERDO E INÓCULO	52
5.1.1 Recolección de las muestras de estiércol de cerdo e inóculo	52
5.1.2 Determinación del porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas.	54
5.1.3 Determinación de los pesos de las masas obtenidos de las muestras	54
5.1.4 Determinación de la densidad aparente de la biomasa utilizada.	57
5.1.5 Determinación del análisis de carbono, nitrógeno e hidrógeno en las muestras de afrecho de yuca, estiércol de cerdo e inóculo	59
5.1.6 Determinación de las propiedades térmicas de la biomasa utilizada	59
5.1.7 Determinación de material volátil de la biomasa utilizada	61
5.1.8 Determinación del contenido de carbono fijo y cenizas de la biomasa utilizada	62
5.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LA CONDICIÓN DEL SISTEMA EXISTENTE Y DEFINIR LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA PUESTA EN MARCHA	63
5.2.1 Medición de la estructura física de los reactores de dos etapas	63
5.2.2 Cálculo de la tasa de carga orgánica (OLR), tiempo de retención hidráulico (TRH)	64
5.2.3 Mantenimiento e instalación de los reactores de dos etapas existentes.	65

5.2.4 Puesta en marcha de los reactores de dos etapas existentes.	66
5.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS FACTORES DE OPERACIÓN PRIORIZADOS.	67
5.3.1 Hardware utilizado	67
5.3.2 Implementación del sistema de monitoreo	72
5.3.3 Desafíos y soluciones en la implementación	74
5.4 OBJETIVO ESPECÍFICO 4: DESARROLLAR E IMPLEMENTAR UNA HERRAMIENTA DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS.	75
5.4.1 Selección del protocolo de comunicaciones y plataforma de visualización	75
5.4.2 Programación y desarrollo algorítmico del sistema	76
5.4.3 Selección del ambiente para visualizar los datos	77
5.4.4 Validación de la plataforma	78
5.4.5 Plataforma de análisis de datos Power Bi	79
5.4.6 Plataforma para la ciencia de datos Python	81
5.4.7 Características de los datos	82
5.4.8 Aplicaciones avanzadas en ciencia de datos y tecnologías afines	83
5.4.9 Correlaciones de las variables estudiadas.	83
5.4.10 Descripción de la organización de datos en Power BI de las variables de estudio.	85
5.5 OBJETIVO ESPECÍFICO 5: EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LOS REACTORES HACIENDO USO DEL SISTEMA DE MONITOREO PROPUESTO.	93
5.5.1 Selección de la carga fija de alimentación de biomasa, estiércol e inóculo.	93
5.5.2 Primera alimentación de los reactores de dos etapas.	94
5.5.3 Segunda alimentación de los reactores de dos etapas.	94
5.5.4 Tercera alimentación de los reactores de dos etapas.	94
5.5.5 Cuarta alimentación de los reactores de dos etapas.	94
5.5.6 Análisis estadístico de los datos generados desde el sistema de monitoreo.	94

5.5.7 Análisis del rendimiento de los reactores de dos etapas, control y piloto en función de los parámetros relevantes medidos en cada una de las cuatro corridas.	94
6. RESULTADOS	95
6.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CARACTERIZAR FÍSICA Y QUÍMICAMENTE LA BIOMASA DE AFRECHO DE YUCA, EL ESTIÉRCOL DE CERDO Y EL INÓCULO.	95
6.1.1 Determinación del porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas.	95
6.1.2 Determinación de la densidad aparente de la biomasa utilizada	96
6.1.3 Determinación del análisis de carbono, nitrógeno e hidrógeno en las muestras de afrecho de yuca, estiércol de cerdo e inóculo.	97
6.1.4 Determinación de las propiedades térmicas de la biomasa utilizada	98
6.1.5 Determinación del material volátil de la biomasa utilizada	102
6.1.6 Determinación del contenido de carbono fijo y cenizas de la biomasa utilizada	103
6.1.7 Determinación de la carga de alimentación de los reactores.	105
6.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LA CONDICIÓN DEL SISTEMA EXISTENTE Y DEFINIR LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA PUESTA EN MARCHA	109
6.2.1 Medición de la estructura física de los reactores de dos etapas	109
6.2.2 Cálculo de la tasa de carga orgánica (OLR), tiempo de retención hidráulico (TRH)	109
6.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS FACTORES DE OPERACIÓN PRIORIZADOS.	110
6.3.1 Análisis de la serie temporal de las variables de proceso en las fases del reactor	111
6.3.2 Análisis cuantitativo de la serie temporal de ambas fases	113
6.3.3 Gráficas y análisis de las correlaciones antes de la estabilización fase 1	114
6.3.4 Gráficas y análisis de las correlaciones después de la estabilización fase 1	116
6.3.5 Análisis cuantitativo de las correlaciones de la fase 1 antes y después de la estabilización.	117

6.3.6 Gráficas y análisis de las correlaciones antes de la estabilización fase 2	118
6.3.7 Gráficas y análisis de las correlaciones después de la estabilización fase 2	119
6.3.8 Análisis cuantitativo de las correlaciones de la fase 2 antes y después de la estabilización.	121
6.3.9 Análisis de correlaciones diarias	122
6.3.10 Análisis de la serie temporal correspondiente a los días analizados, para la fase 1 del reactor de dos etapas.	123
6.3.11 Correlaciones relevantes de Pearson y Spearman del reactor en ambas fases.	138
6.4 OBJETIVO ESPECÍFICO 4: IMPLEMENTAR UNA HERRAMIENTA DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS.	140
6.4.1 Simulación del sistema de medición mediante software electrónico	140
6.4.2 Desarrollo del código para el monitoreo de digestores con ESP32	141
6.4.3 Componentes principales del código.	142
6.4.4 Estructura del sistema	143
6.4.5 Implementación del prototipo en laboratorio	143
6.4.6 Pruebas preliminares del sistema	145
6.4.7 Resultados cuantificables del sistema de monitoreo	146
6.5 OBJETIVO ESPECÍFICO 5: EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LOS REACTORES HACIENDO USO DEL SISTEMA MONITOREO PROPUESTO.	147
6.5.1 Análisis de los ácidos grasos en el reactor	147
6.5.2 Presentación de datos de los AGV y correlaciones	147
6.5.3 Análisis de las variables relevantes del proceso en función de los AGV y la concentración de gas metano.	149
6.5.4 Implicaciones para la operación del reactor	151
6.5.5 Análisis de variables relevantes en función de los Ácidos Grasos y pH	151
6.5.6 Consideraciones para la operación y optimización del reactor.	153
6.5.7 Análisis de datos de AGV respecto a las correlaciones	153

6.5.8 Análisis general de correlaciones temperatura – concentración de gas Vs. AGV	159
6.5.9 Análisis detallado del comportamiento de AGV y correlación temperatura–concentración de gas	160
6.5.10 Análisis detallado del comportamiento de AGV y correlación pH–concentración Gas	162
6.5.11 Análisis de AGV en la fase 2	163
6.5.12 Implicaciones y consideraciones adicionales.	165
6.5.13 Cálculo de la eficiencia del reactor mediante la remoción de AGV en la fase 1	165
6.5.14 Selección de fechas para el cálculo de la eficiencia en función de los AGV	166
6.5.15 Factores potenciales del colapso D_1F_2.	170
6.5.16 Cálculo de la eficiencia global de remoción de AGV para el reactor 1.	170
6.5.17 Cálculo de la eficiencia del reactor 2 por medio de la remoción de los AGV	172
6.5.18 Cálculo de la eficiencia de remoción de los AGV en el reactor 2 fase 1 y fase 2.	174
6.5.19 Cálculo global de la eficiencia de remoción de los AGV en el reactor 2.	175
6.5.20 Explicación del aumento global de los AGV.	175
7. CONCLUSIONES	176
8. RECOMENDACIONES	178
REFERENCIAS	180
ANEXOS	190

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Fig. 1. Entradas y salidas del proceso de digestión anaerobia [29]	30
Fig. 2. Esquema simplificado secuencial del proceso de biodigestión anaerobia	31
Fig. 3. Sustratos y productos en las distintas etapas del proceso de biodigestión de materia orgánica compleja. [31].	31
Fig. 6. Esquema de pantalla de inicio en modo local. [45].	39
Fig. 7. Pantalla principal sistema de gestión por lotes. [45].	39
Fig. 8. Sistema de medición y monitoreo de concentración de gas para la planta de biogás. [42].	46
Fig. 9. Biorreactor anaerobio controlado por arduino. (a) Tetrápodo empacado con biocarbón, (b) Tetrápodo de lecho inerte. [69].	47
Fig. 10. Ubicación satelital de la vereda El Tamboral. Cauca. [70].	52
Fig. 11. Finca la Palma, vereda El Tamboral. Cauca	53
Fig. 12. Porqueriza de cerdos	53
Fig. 13. Peso de las cápsulas vacías	55
Fig. 14. Peso neto de las muestras húmedas	55
Fig. 15. Horno Eléctrico para secado de las muestras	55
Fig. 16. Secado de las muestras en horno a temperatura controlada	56
Fig. 17. Peso seco de las muestras	56
Fig. 18. Peso húmedo de las muestras de biomasa	57
Fig. 19. Determinación del peso seco y del volumen del inóculo de cerdo	58
Fig. 20. Determinación del peso seco y del volumen del estiércol de cerdo	58
Fig. 21. Determinación del peso seco y del volumen del afrecho de yuca	59
Fig. 22. Equipo TA Instruments Modelo Q100 Modulated DSC (a) y Crisoles de Aluminio (b) barridos se realizaron con una rapidez de calentamiento	60
Fig. 23. Analizador Termogravimétrico	61

Fig. 24. Montaje reactores de dos etapas	64
Fig. 25. Medición de los parámetros geométricos de los reactores de dos etapas	65
Fig. 26. Instalación en la PTAR de los reactores de dos etapas	66
Fig. 27. Instalación en la PTAR de los reactores de dos etapas	67
Fig. 28. Sensor MQ4. [71].	69
Fig. 29. Sensor DS18B20. [72]	69
Fig. 30. Sensor de pH para Arduino E201 BNC. [73]	70
Fig. 31. ESP 32. [74].	71
Fig. 32. Diagrama de flujo del proceso de ejecución del algoritmo programado en el ESP-32.	74
Fig. 33. Sistema de monitoreo ubicado en ambas etapas del reactor	76
Fig. 34. “Estructura de librerías, variables, funciones y objetos del código programado en el ESP-32”	76
Fig. 35. “Plataforma Thing Speak con el sistema de monitoreo para evaluar el rendimiento de reactores de dos etapas”.	78
Fig. 36. Página oficial de descarga programa Power Bi.	80
Fig. 37. Archivo plano que se descarga de Thing Speak.	82
Fig. 38. Primera página del Dashboard diseñado en Power Bi.	87
Fig. 39. Cálculo de la covarianza utilizando lenguaje DAX.	87
Fig. 40. Cálculo del índice de correlación de Pearson utilizando lenguaje DAX.	88
Fig. 41. Presentación del análisis de variables de un reactor de dos etapas	90
Fig. 42. Página tres del Dashboard donde hay alta correlación	91
Fig. 43. Página tres del Dashboard donde hay baja correlación	92
Fig. 44. Diagrama de flujo del proceso de ejecución del algoritmo en Python para calcular la correlación de Spearman.	93
Fig. 45. Calorimetría diferencial de barrido (DSC), inóculo, estiércol de cerdo seco sin tratamiento y afrecho de yuca. [79].	98
Fig. 46. Análisis Termogravimétrico TGA, inóculo, estiércol de cerdo seco sin tratamiento y afrecho de yuca. [79].	100

Fig. 47. Fases de los digestores con el sistema de monitoreo D_1 y control D_2	110
Fig. 48. Serie temporal de variables medidas del reactor fase 1.	112
Fig. 49. Serie temporal de variables medidas del reactor fase 2	112
Fig. 50. Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 1 antes de la estabilización.	115
Fig. 51 . Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 1 después de la estabilización.	117
Fig. 52. Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 2 antes de la estabilización.	119
Fig. 53. Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 2 después de la estabilización.	120
Fig. 54. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 18 de abril	124
Fig. 55. Correlación de Pearson en Power Bi 18 de abril fase 1.	125
Fig. 56. Correlación de Spearman en Python.	125
Fig. 57. Gráficos de dispersión del 18 de abril del 2023 en la fase 1.	126
Fig. 58. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 17 de junio fase 1.	127
Fig. 59. Correlación de Pearson en Power Bi 17 de junio	128
Fig. 60. Correlación de Spearman en Python 17 de junio.	128
Fig. 61. Gráficos de dispersión del día 17 de junio del 2023 en la fase 1.	129
Fig. 62. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 5 de julio fase1.	130
Fig. 63. Correlación de Pearson en Power Bi 5 de julio.	131
Fig. 64. Correlación de Spearman en Python 5 de julio.	131
Fig. 65. Gráficos de dispersión del día 5 de julio del 2023 en la fase 1.	132
Fig. 66. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 8 de julio	133
Fig. 67. Correlación de Pearson en Power Bi 8 de julio.	134
Fig. 68. Correlación de Spearman en Python 8 de julio.	134
Fig. 69. Gráficos de dispersión del 8 de julio del 2023 en la fase 1.	135

Fig. 70. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 24 de abril, fase 2.	136
Fig. 71. Correlación de Pearson en Power Bi y Spearman en Python, abril 24 fase 2.	137
Fig. 72. Gráficos de dispersión del día 24 de abril del 2023 en la fase 2.	138
Fig. 73. Diagrama simulado de sistema de monitoreo reactores de dos etapas.[80]	141
Fig. 74. Diagrama de bloques de ejecución del código en el ESP 32	142
Fig. 75. Ubicación de sensores y cableado de reactores.	144
Fig. 76. Concentración Gas Vs AGV.	149
Fig. 77. Concentración pH Vs AGV	152
Fig. 78. Análisis temporal del día 23/06/2023 y mapas de calor de las correlaciones.	154
Fig. 79. Análisis temporal del día 26/06/2023 y mapas de calor de las correlaciones.	155
Fig. 80. Análisis temporal del día 03/07/2023 y mapas de calor de las correlaciones.	156
Fig. 81. Análisis temporal del día 26/07/2023 y mapas de calor de las correlaciones.	157
Fig. 82. Análisis temporal del día 8/08/2023 y mapas de calor de las correlaciones.	158
Fig. 83. Correlación Pearson Temperatura–concentración de gas en función de los AGV.	159
Fig. 84. Correlación de Spearman de Temperatura – concentración de gas Vs los AGV.	159
Fig. 85. Correlación de Pearson del pH – concentración de Gas Vs AGV.	161
Fig. 86. Correlación de Spearman del pH y concentración de gas en función de los AGV.	161
Fig. 87. Concentración de AGV del reactor 2.	172

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA I. Sustratos y productos de la hidrólisis	32
TABLA II. Características de los sensores en un digestor	37
TABLA III. Temperaturas recomendadas para un digestor tipo Taiwanés o tubular	40
TABLA IV. Porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas	68
TABLA V. Bloques funcionales del ESP32	72
TABLA VI. Porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas	95
TABLA VII. Densidad Aparente de las muestras de biomasa utilizadas	96
TABLA VIII. Análisis de porquinazas obtenidas de diferentes granjas. Masa seca	97
TABLA IX. Porcentaje de Carbono. Hidrógeno y Nitrógeno por combustión	97
TABLA X. Liberación de calor de las muestras de biomasa analizadas	99
TABLA XI. Pérdida de Peso en Porcentaje de las muestras de Biomasa	101
TABLA XII. Relación SV/ST de la biomasa utilizada	102
TABLA XIII. Porcentaje de cenizas de la biomasa utilizada	103
TABLA XIV. Porcentaje de Carbono Fijo de la biomasa utilizada	104
TABLA XV. Porcentajes de alimentación de la mezcla	105
TABLA XVI. Porcentajes de Alimentación de la Mezcla	106
TABLA XVII. Porcentaje de ST y SV en los sustratos	106
TABLA XVIII. Cálculo de la carga orgánica de alimentación	107
TABLA XIX. Cantidad de Agua para la Mezcla	107
TABLA XX. Cálculo de agua en cada sustrato	108
TABLA XXI. Adición de Agua a la Mezcla	108
TABLA XXII. Alimentación diaria del reactor	108
TABLA XXIII. Cálculo de la Tasa de Carga Orgánica OLR	109

TABLA XXIV. <i>Análisis cuantitativo de la serie temporal</i>	114
TABLA XXV. Análisis de correlaciones antes de la estabilización	117
TABLA XXVI. Análisis de correlaciones después de la estabilización.	118
TABLA XXVII. Análisis de correlación de Pearson	122
TABLA XXVIII. Análisis de correlación de Pearson después de la estabilización	122
TABLA XXIX. Valor de las correlaciones y su dominancia	139
TABLA XXX. Análisis de ácidos grasos, variables y correlaciones.	148
TABLA XXXI. Fechas de la toma de muestras de los AGV y los valores de las muestras.	163
TABLA XXXII. Valores de los AGV y gráfico de barras de la composición de los AGV.	164
TABLA XXXIII. Concentraciones de AGV del reactor 2.	172

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Concentración del afluente	41
Ecuación 2. Cálculo de la COV	42
Ecuación 3. Contenido de humedad	56
Ecuación 4. Densidad aparente	57
Ecuación 5. Sólidos totales a 105°C	62
Ecuación 6. Sólidos volátiles a 550°C	62
Ecuación 7. Porcentaje Carbono fijo	63
Ecuación 8. Porcentaje de cenizas	63
Ecuación 9. Tasa de carga orgánica	64
Ecuación 10. Tiempo de retención hidráulico	65
Ecuación 11. Coeficiente de correlación	84
Ecuación 12. Coeficiente de correlación de Pearson	85
Ecuación 13. Covarianza	88
Ecuación 14. Correlación	89
Ecuación 15. Eficiencia de remoción	167

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Análisis de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno por combustión a las muestras de Biomasa	190
Anexo B. Dimensiones de los digestores y sus correspondientes fases	191
Anexo C. Bitácora de seguimiento Digestores	191
Anexo D. Características del Hardware utilizado	193
Anexo E. Análisis Calorimétrico DSC del estiércol y el afrecho de yuca	197
Anexo F. Análisis termográfico TGA de la biomasa utilizada	198
Anexo G. Determinación Sólidos Totales y Sólidos Volátiles de la biomasa utilizada	200

GLOSARIO

ACIDOGÉNESIS: segunda fase de la digestión anaerobia en la que los monómeros se convierten en ácidos grasos volátiles.

ACETOGÉNESIS: proceso en la digestión anaerobia en el cual los ácidos grasos volátiles se convierten en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.

AGV: ácidos grasos volátiles.

ANÁLISIS DE DATOS: proceso de inspección, limpieza y modelado de datos con el objetivo de descubrir información útil, llegar a conclusiones y apoyar la toma de decisiones.

BIOGÁS: mezcla de gases producida por la descomposición anaerobia de materia orgánica, compuesta principalmente de metano y dióxido de carbono.

CONCENTRACIÓN DE METANO: cantidad de metano presente en una mezcla de gases, expresada generalmente como un porcentaje del volumen total.

CONTROL DE PROCESOS: técnicas y métodos utilizados para regular y optimizar el funcionamiento de un proceso industrial.

CORRELACIÓN DE VARIABLES: análisis estadístico que evalúa la relación entre dos o más variables.

EFICIENCIA ENERGÉTICA: relación entre la cantidad de energía utilizada y la cantidad de energía producida o útil en un proceso.

GESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS: procesos y técnicas utilizados para manejar y tratar los residuos orgánicos de manera sostenible.

HIDRÓLISIS: primera fase de la digestión anaerobia donde los polímeros complejos se descomponen en monómeros más simples.

INTERNET DE LAS COSAS (IOT): red de dispositivos interconectados que pueden recopilar y compartir datos en tiempo real a través de Internet.

METANOGÉNESIS: fase final de la digestión anaerobia en la cual los microorganismos producen metano a partir de ácidos grasos volátiles.

MODELOS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA: modelos matemáticos que describen y predicen el comportamiento de los procesos de digestión anaerobia.

MONITOREO DE BIODIGESTORES: proceso de seguimiento y control de las variables operativas de un biodigestor para asegurar su eficiencia y estabilidad.

OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO: proceso de ajustar las condiciones operativas para obtener el máximo rendimiento de un sistema o proceso.

POWER BI: herramienta de Microsoft para la visualización y análisis interactivo de datos.

PRODUCCIÓN DE BIOGÁS: proceso de generación de biogás, principalmente metano, a partir de la descomposición anaerobia de materia orgánica.

PYTHON: lenguaje de programación ampliamente utilizado en análisis de datos y desarrollo de software.

SENSORES DE pH: dispositivos que miden el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia.

SENSORES DE TEMPERATURA: dispositivos que miden la temperatura de un ambiente o sustancia.

SISTEMA EMBEBIDO: sistema de computación especializado que realiza funciones específicas dentro de un dispositivo más grande.

SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL: prácticas que aseguran el uso responsable de los recursos naturales para mantener el equilibrio ecológico a largo plazo.

SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS: conjuntos de dispositivos y software utilizados para recolectar y procesar datos de sensores y otros dispositivos.

VISUALIZACIÓN DE DATOS: representación gráfica de información y datos para facilitar su comprensión y análisis.

RESUMEN

Este estudio presenta el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real para mejorar la eficiencia de biodigestores de dos etapas.

Se aborda la problemática de la baja estabilidad en la producción de biogás debido a la falta de control sobre variables clave como temperatura, pH y concentración de metano.

El sistema propuesto integra sensores avanzados con herramientas de análisis de datos para optimizar la producción de biogás.

Metodológicamente, se diseñó e implementó un sistema embebido para la adquisición de datos de operación del biodigestor. Se emplearon sensores de temperatura, pH y concentración de metano, cuyos datos fueron procesados en plataformas computacionales como Python y Power BI. El sistema se evaluó en condiciones reales, permitiendo la recopilación y análisis de datos en tiempo real para la correlación de variables críticas.

Los resultados indican una mejora significativa en la estabilidad del proceso y un aumento del rendimiento de biogás en comparación con biodigestores sin monitoreo. El análisis estadístico reveló correlaciones directas entre la temperatura y la concentración de metano, validando la importancia del monitoreo automatizado en la optimización del proceso.

Este sistema ofrece una solución accesible y eficiente para la optimización de biodigestores de dos etapas, promoviendo el uso de energías renovables en comunidades rurales y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

Palabras clave: Anaerobio, biodigestor, monitoreo, sensores, rendimiento

INTRODUCCIÓN

Gran parte de la demanda mundial de energía se está cubriendo actualmente con petróleo, lo que está agotando los recursos ambientales. En parte, el aumento de la población está incrementando el uso de combustibles fósiles [1]. Se estima que la demanda de energía aumentará por un factor de dos a tres durante este siglo [2]. El aprovechamiento de biomasa residual o secundaria para la generación de biogás podría ser parte de la solución a la creciente necesidad de suministro de energía. Es muy importante tener información fiable, verídica de variables como temperatura y pH en función de la producción de biogás y como al variar los procesos de ingreso de biomasa residual al digestor se pueda observar la modificación del proceso que hará que cambie la producción. [3].

Este enfoque es particularmente relevante en zonas donde los sistemas de generación convencionales no llegan, como ocurre en las Zonas No Interconectadas (ZNI), áreas geográficas que no se encuentran acopladas eléctricamente al Sistema Interconectado Nacional (SIN), es decir no tienen acceso al servicio de energía eléctrica a través del SIN, pero cuentan con soluciones locales de generación, en su gran mayoría, funcionan a partir de combustibles líquidos. Representan aproximadamente el 52% del territorio colombiano con una población estimada de 1.900.000 habitantes [4].

Además de los combustibles tradicionales, como la leña y el estiércol seco, estas zonas rurales, especialmente en Colombia, enfrentan desafíos en cuanto al acceso a fuentes de energía limpias y sostenibles, que permita satisfacer sus necesidades diarias de calefacción y cocina. Por otro lado, el gas propano (GLP) es el combustible elegido por aquellos para quienes es asequible su uso en la cocción de alimentos.

Sin embargo, fuentes de alternativa de energía, como la biomasa residual, está comenzando a ganar terreno, especialmente en regiones como el Valle del Cauca, particularmente el afrecho de yuca, este residuo, derivado del procesamiento de la yuca, representa una valiosa oportunidad para la generación de biogás mediante digestión anaerobia, maximizando su aprovechamiento energético y minimizando el impacto ambiental asociado a su disposición [5].

Por otro lado, la producción ganadera intensiva también es un sector clave en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) debido a la concentración de animales en espacios reducidos [6]., lo que hace urgente la búsqueda de soluciones sostenibles. El manejo del estiércol genera alrededor de 230 millones de ton de CO₂ eq-año, siendo el ganado porcino responsable del 40% de dichas emisiones [7]. El metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son los principales gases emitidos en la producción agropecuaria, sobre todo por la gestión del ganado y su estiércol. Estas emisiones provienen de la fermentación entérica, el manejo de estiércol y el uso de fertilizantes.

Frente a estos desafíos ambientales, la integración de tecnologías como la digestión anaerobia DA, se presenta como una solución tanto para la gestión de desechos ganaderos como para la producción de biogás.

A nivel nacional la producción porcina es una fuente significativa de GEI, aunque su contribución total al inventario nacional de emisiones es menor en comparación con la ganadería bovina, se estima que el sector porcino emite aproximadamente 1,5 millones de toneladas de CO₂ eq-año. Este valor representa un porcentaje relativamente pequeño del total de emisiones de la agricultura, que en su conjunto podría superar los 70 millones de toneladas de CO₂ eq-año.

Esta situación se ve agravada por la gestión inadecuada de las aguas residuales generadas, lo cual conlleva a la liberación de gases contaminantes y contribuye a la degradación ambiental. Del volumen diario del alimento consumido por el cerdo únicamente es retenido dentro de sus tejidos el 33% y el resto es eliminado en sus excretas. El factor de emisión anual de CH₄ por granja porcina con respecto a la fermentación entérica ronda los 1.2 kg de CH₄/cabeza y la gestión del estiércol de un cerdo de 100 kg puede llegar a emitir hasta 50.33 kg de CH₄ al año [8].

En respuesta a estos problemas, se están evaluando alternativas para el manejo de estos desechos y la producción energética sostenible. Las aguas residuales porcinas con frecuencia son expulsadas a cuerpos de agua cercanos sin pasar por previo tratamiento, liberando metano, óxido nitroso, fósforo, elementos patógenos y gases presentes en el estiércol de los animales. Esto contribuye a la eutrofización de los mantos de agua, acidificación de los suelos por la acumulación de metales pesados y propagación de enfermedades [9].

Una de las soluciones más prometedoras para mitigar estos efectos es la instalación de sistemas de DA, que permiten tratar los residuos mientras producen biogás, en estos sistemas se depositan los residuos orgánicos de origen animal [10] o vegetal, con las condiciones adecuadas para dar lugar a la digestión anaerobia de los mismos, son una tecnología amigable con el medio ambiente, debido a que ayuda a los pequeños agricultores a tratar estos desechos de manera sostenible, mientras producen un biofertilizante (digestato) y satisfacen sus necesidades energéticas, proporcionando biogás, gas compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono en proporciones variables [11].

Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas aún presenta desafíos que deben ser superados, lo que lleva a la necesidad de monitorear las variables críticas del proceso como el pH, la temperatura, la concentración de sólidos volátiles (VS), el tiempo de retención hidráulica (TRH), la mezcla y la tasa de carga orgánica (OLR), que afectan el rendimiento del biogás y la concentración de metano (CH₄) [10]. Por ello es difícil controlar la producción de biogás, por lo cual es necesario monitorear las variables de proceso más relevantes en su producción, de tal forma que se pueda tomar decisiones en cuanto al mantenimiento del digestor o ajuste de estas variables de operación [12].

Sumado a lo anterior las bajas eficiencias de los digestores de bolsa, conlleva a que estas comunidades abandonen este tipo de proyectos en poco tiempo de operación. En la actualidad se sabe mucho respecto al análisis de correlación de variables de proceso para el mejoramiento de la DA, pero las comunidades aisladas que usan digestores para generar biogás desconocen el comportamiento de estas variables de proceso, siendo necesario buscar

herramientas que permitan a los usuarios de estos digestores contar con información verídica sobre la operación y producción de biogás del sistema [13].

Este trabajo propone una solución innovadora que integra tecnología avanzada de monitoreo para optimizar el rendimiento de los digestores y facilitar la toma de decisiones informadas, el sistema de monitoreo basado en un sistema embebido integra sensores para la captura en tiempo real de variables críticas como temperatura, pH y concentración de metano, lo que garantiza un control más preciso y eficiente del proceso de DA. Este sistema no solo permite una recolección de datos continua y automatizada, sino que, combinado con herramientas avanzadas de análisis de datos, como Python y Power BI, facilita la visualización y correlación. Estas capacidades no solo optimizan el rendimiento de los digestores, sino que también ofrecen una solución sostenible para la toma de decisiones informadas y mejora de la producción energética de biogás de manera sustentable.

Finalmente, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el rendimiento de un reactor de dos etapas, un paso crucial para avanzar en la optimización de los sistemas de DA.

Este trabajo es uno de los objetivos de la tesis doctoral, a cargo del Ingeniero Iván Mauricio Ostos, codirector de este trabajo.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las zonas rurales de Colombia, cerca del 50% de la población vive por debajo del umbral de pobreza y su economía se basa en la agricultura autosuficiente y familiar [14]. En estas zonas, los hogares dependen de combustibles como la leña y el estiércol seco, para satisfacer sus necesidades diarias de calefacción y cocción de alimentos, estos combustibles provenientes de la biomasa son recursos gratuitos; que, al ser quemados, emiten partículas y humos nocivos para la salud como: infecciones agudas de las vías respiratorias (pulmonía), bronquitis crónica, cáncer pulmonar, cataratas, entre otros. Además de estos riesgos para la salud, se producen problemas de deforestación causados por el uso excesivo de la leña [15].

Por otro lado, el gas licuado de petróleo (GLP) es el combustible disponible para aquellos que les es asequible [16]. Actualmente, el uso de GLP representa alrededor del 40% del mix energético para cocinar en zonas rurales de Colombia [17]. Los inconvenientes para acceder a este combustible, son los precios de compra, los costos de transporte de las zonas urbanas a las rurales y el riesgo en el manejo de los tanques de propano [18].

En las pequeñas fincas de estas zonas rurales, el estiércol del ganado tiene un manejo inadecuado, generando no solo impactos ambientales como olores, emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contaminación del agua y del suelo, sino también enfermedades que afectan a los animales y al ser humano causadas por microorganismos patógenos contenidos en el estiércol [19].

En Colombia, la implementación y el uso de digestores no surgió como respuesta a las necesidades energéticas, como ocurrió en el continente asiático, sino para resolver problemas de producción más limpia, relacionados con el inadecuado manejo de aguas residuales, estiércol y malos olores, dando cumplimiento a leyes y compromisos nacionales e internacionales adquiridos con la firma de diferentes tratados y acuerdos [20].

Sin embargo, la falta de información y conocimiento para un adecuado dimensionamiento, montaje, mantenimiento y principalmente la operación y control de variables, han sido hasta ahora las razones por las cuales la mayoría de los digestores instalados no funcionan y/o presentan múltiples fallas durante su operación. Esta situación, sumada a los altos costos iniciales para la construcción, desmotiva el uso de esta tecnología para el pequeño productor.

Por otra parte, con la exposición permanente al sol, la bolsa tubular de polietileno, se cristaliza, o si le caen ramas u objetos cortopunzantes se rompe fácilmente, generando problemas de tipo económico, técnico y ambiental, convirtiéndose en acumuladores de aguas residuales e impactando al ambiente.

Adicionalmente, las bajas eficiencias tecnológicas influenciadas por la falta en el control de variables de proceso como: temperatura, pH, cantidad y concentración de biogás generado, o el uso de estos sistemas de seguimiento de variables, con un alto costo, impide conocer la condición operativa del digestor y la toma de decisiones frente a su mantenimiento o ajuste de variables de operación, lo cual conlleva que estas comunidades abandonen este tipo de proyectos en poco tiempo.

Por lo expuesto anteriormente, se planteó el desarrollo de un sistema de seguimiento a las principales variables de producción de biogás, que permita medir la temperatura, pH y de esta forma asegurar un adecuado rendimiento en el digestor en función de la concentración de biogás.

Actualmente en la Universidad Autónoma de Occidente, Cali, se adelanta la investigación en el doctorado en Ingeniería, “Aumento de la eficiencia en la producción de biogás a través del análisis de estructuras microbianas con uso de sistemas de aprendizaje profundo durante la codigestión de residuos agroindustriales en el Valle del Cauca”, el equipo utilizado es un reactor de dos fases el cual carece de tecnología para la medición de variables de proceso.

El desarrollo de este trabajo permitirá determinar si al implementar este sistema de monitoreo se podría incrementar el tiempo de uso de este tipo de digestores.

1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo busca dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿De qué manera la implementación de un sistema de monitoreo de variables relevantes de proceso influye en el rendimiento de un reactor de dos etapas?

2. JUSTIFICACIÓN

Se debe tener un sistema de monitoreo de las variables relevantes en la digestión, como elementos determinantes en la evaluación del rendimiento de digestores de dos etapas con el objetivo de asegurar la eficiencia y sostenibilidad en la producción de biogás. Si bien el proyecto es de gran importancia en su naturaleza técnica y científica, se necesita encontrar formas sostenibles de obtener energía de los desechos orgánicos.

2.1 SIGNIFICADO DE LA MONITORIZACIÓN EN LOS REACTORES DE DOS ETAPAS

Es muy significativa la monitorización del pH, temperatura, concentración de biogás y otras variables importantes en los digestores de dos etapas para la eficiencia óptima de la digestión anaerobia. En muchos estudios, se ha demostrado que una regulación controlada de estos parámetros mejora el rendimiento del biogás y la estabilidad del proceso drásticamente.

La medición en tiempo real de pH, temperatura y concentración de biogás, permite una acción correctiva de las condiciones de operación a tiempo, mejorando así la productividad del digestor y los altos rendimientos de biogás [21].

Las variaciones en las condiciones ambientales y en la biomasa pueden influir en la actividad de los microorganismos, al controlar la temperatura y el pH en el nivel correcto a través de una verificación continua, se asegura las condiciones biológicas favorables de la digestión anaerobia [22].

Al observar cambios en los parámetros importantes de la digestión, en sus etapas iniciales, se evita que el sistema se acidifique y se inhiba la actividad de los microorganismos que podrían influir negativamente en la producción de biogás [23].

La recopilación sistemática de información es una de las mejores formas de base para la investigación. El estudio en profundidad se mejora al establecer una relación de correlaciones entre las variables más importantes a monitorear, no solo con respecto al rendimiento interno del digestor, sino también en términos de un mejoramiento y desarrollo del sistema [21].

2.2 RELEVANCIA DEL PROYECTO

El proyecto se llevó a cabo en un entorno multidisciplinario con la aplicación de tecnologías en las áreas de ingeniería electrónica, gestión ambiental, biología y fisicoquímica. El uso de tecnologías modernas, incluyendo la Internet de las Cosas y los sistemas embebidos, ofrece una plataforma para el diseño de sistemas de monitoreo más eficientes y efectivos. Por otro lado, el análisis y la visualización de datos a través de técnicas computarizadas como Python y Power Bi también establecen una base sólida para la toma de decisiones racionales y la mejora del proceso de digestión anaerobia.

2.3 IMPACTO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO

La adopción del sistema de monitoreo influye directamente en la sostenibilidad ambiental y la eficiencia energética. Esto implica, por lo tanto, mayor producción de biogás, menos dependencia de los combustibles fósiles y un mayor uso de las fuentes de energía renovable. La gestión adecuada de los desechos orgánicos también puede desempeñar un papel en la mitigación del cambio climático al ayudar a reducir la emisión de GEI [24].

El sistema de monitoreo para los digestores de dos fases debe ser mejorado para hacerlo altamente eficiente y sostenible. El proyecto no solo introdujo una de las soluciones tecnológicas más innovadoras, sino también uno de los desarrollos más importantes en el manejo sostenible de residuos y en la producción de energías renovables.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema de monitoreo para evaluar el rendimiento de biodigestores de dos etapas haciendo uso de un sistema empotrado.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímicamente la biomasa de afrecho de yuca, la enmienda de estiércol de cerdo y el inóculo.
- Evaluar la condición del sistema existente y definir los parámetros de operación para la puesta en marcha.
- Diseñar e implementar un sistema de monitoreo de los factores de operación priorizados.
- Implementar una herramienta de adquisición y visualización de datos.
- Evaluar el rendimiento de los biorreactores haciendo uso del sistema de monitoreo propuesto.

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Digestión anaerobia DA

El biogás generado de la descomposición anaerobia es una sustancia que se produce naturalmente; o usando equipos específicos conocidos como reactores o digestores, en los que se degrada biológicamente la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.), y otros factores de operación en un ambiente libre de oxígeno (anaerobio). [25]. Es un complejo proceso bioquímico, en el cual un grupo de microorganismos degrada la materia orgánica para obtener energía para la realización de sus actividades metabólicas y su reproducción, obteniéndose como productos finales, biogás y digestato. Desde un punto de vista microbiológico, la digestión es un tipo de respiración celular que se desarrolla en ausencia de oxígeno [26].

La DA se lleva a cabo dentro de un contenedor cerrado, conocido como reactor anaerobio, digestor anaerobio o biodigestor, el cual está compuesto de uno o más reactores para distintas etapas del proceso [27]. El proceso puede realizarse con o sin mezclado y ya sea de manera continua, semicontinua o por lotes (*batch*) [28].

En la fig. 1. Se aprecia un esquema general de las entradas y salidas del proceso de digestión anaerobia.

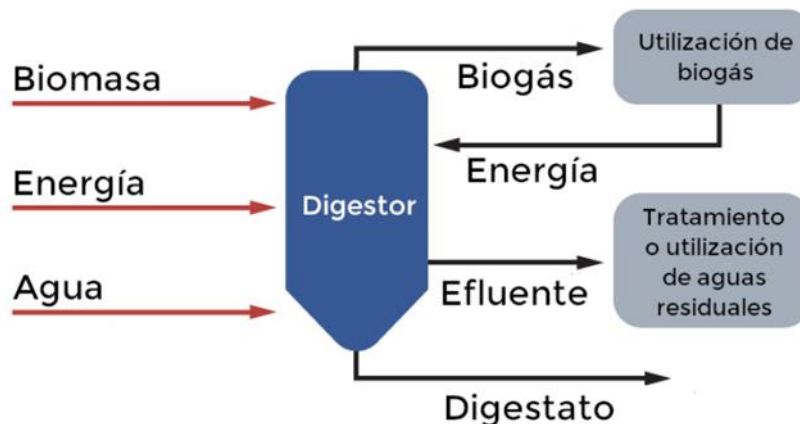


Fig. 1. Entradas y salidas del proceso de digestión anaerobia [29]

4.1.2 Etapas de la digestión anaerobia

Para ilustrar la secuencia de procesos microbiológicos que ocurren durante el proceso de digestión anaerobia (AD), este puede dividirse en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis (o fermentación), acetogénesis y metanogénesis [30].

Se entiende que la digestión anaerobia es un proceso secuencial, como se ilustra en la fig. 2, debido a que los productos de una etapa sirven como sustratos a la siguiente etapa, como se representa en la fig. 3, por lo que la inhibición de una etapa afecta a las siguientes. No obstante, dentro de un reactor estos procesos ocurren de manera simultánea, por lo que el carácter secuencial no debe interpretarse de manera estricta.



Fig. 2. Esquema simplificado secuencial del proceso de biodigestión anaerobia

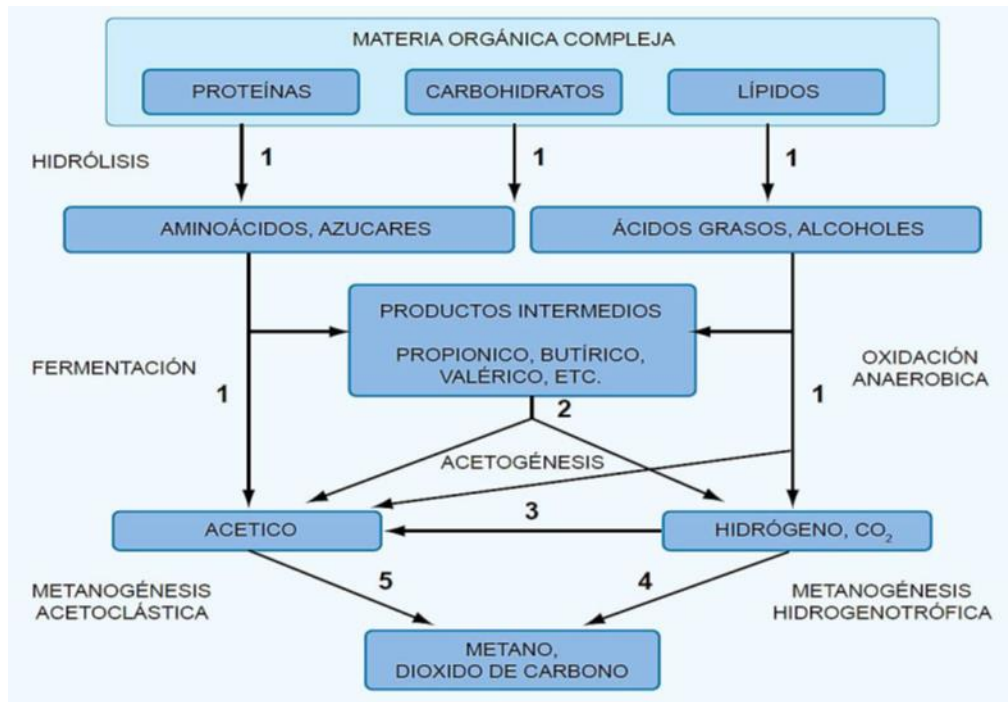


Fig. 3. Sustratos y productos en las distintas etapas del proceso de biodigestión de materia orgánica compleja. [31].

- **Hidrólisis**

La primera etapa del proceso de digestión es la hidrólisis, en la cual los compuestos particulados (carbohidratos, proteínas y lípidos) son degradados a compuestos químicos solubles por acción enzimática de distintas familias de bacterias. Esta etapa se da al exterior de la célula, por medio de exoenzimas producidas por microorganismos anaerobios. Las exoenzimas rompen las uniones de los compuestos orgánicos complejos, degradándolos y permitiendo que pasen a través de la pared celular. La tabla I, presenta algunos ejemplos de las exoenzimas utilizadas para la degradación de distintos sustratos, las bacterias que las producen y los productos obtenidos [26].

TABLA I.
Sustratos y productos de la hidrólisis

Sustratos	Exoenzimas	Ejemplo	Bacterias	Productos
Polisacáridos	Sacarolíticas	Celulasa	<i>Cellulomonas</i>	Monosacáridos
Proteínas	Proteolíticas	Proteasa	<i>Bacillus</i>	Aminoácidos
Lípidos	Lipolíticas	Lipasa	<i>Mycobacterium</i>	Ácidos grasos.

Nota: Se registra algunos ejemplos de las exoenzimas utilizadas para la degradación de distintos sustratos, las bacterias que las producen y los productos obtenidos. [26].

La facilidad con la que los compuestos orgánicos son hidrolizados influye significativamente en el tiempo requerido para completar el proceso de digestión anaerobia y por consiguiente en la cantidad de biomasa que el digester puede procesar por unidad de tiempo.

- **Acidogénesis o fermentación**

En la acidogénesis, los productos de la hidrólisis son fermentados en ácidos grasos de cadena larga (LCFA) y ácidos grasos volátiles (AGV). Como productos adicionales se obtienen también dióxido de carbono e hidrógeno. Los monosacáridos y aminoácidos producen, por lo general, ácidos volátiles, mientras que los ácidos grasos de cadena larga son producidos generalmente a partir de los lípidos [26].

- **Acetogénesis**

La acidogénesis produce ácidos grasos intermedios, los cuales requieren ser degradados en ácido acético antes de que puedan ser asimilados por los microorganismos metanogénicos. La acetogénesis es la etapa en la cual las bacterias acetogénicas actúan sobre esos ácidos grasos intermedios produciendo ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.

Esta etapa es llevada a cabo principalmente por dos tipos de bacterias acetogénicas: las productoras obligadas de hidrógeno (*obligate hydrogen-producing acetogens, OHPA*) y las homoacetogénicas. Las primeras producen ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno a partir de los ácidos grasos, mientras que las segundas producen ácido acético a partir del dióxido de carbono e hidrógeno [26].

- **Metanogénesis**

La metanogénesis es la etapa final de la digestión anaerobia. En esta etapa, distintos microorganismos metanogénicos (arqueas) producen metano a partir de los sustratos producidos en las etapas anteriores (acidogénesis y acetogénesis).

Existen dos fuentes de metano: a partir del ácido acético, por acción de los microorganismos metanogénicos acetoclásticos y por reducción del dióxido de carbono con hidrógeno, por acción de los microorganismos metanogénicos hidrogenotróficos. Se ha demostrado que el 70% del metano producido en la metanogénesis proviene de la descarboxilación del ácido acético [31].

El producto final de la metanogénesis es el metano que junto al dióxido de carbono son los compuestos principales del biogás [28].

En la DA de sustancias biodegradables, la velocidad de reacción está limitada por la metanogénesis, más que por la hidrólisis. Esto se debe a la rápida acidificación de estos desechos a AGV, lo que da como resultado una rápida disminución del pH del proceso y la posterior inhibición de la actividad metanógena necesaria. Esto se agrava aún más si la materia prima no se tampona adecuadamente y la disminución del pH tiende a inhibir la conversión de las fracciones orgánicas en AGV, por ello monitorear estas variables de proceso relevantes, permitirán tomar decisiones de manera oportuna, de tal forma que no se afecte la producción de biogás.

4.1.3 La materia prima para la digestión anaerobia

El nivel de producción de biogás depende, entre otros factores, del tipo de materia prima, existiendo diferentes fuentes tanto vegetales como animales, las cuales se degradan aplicando el método de DA. La generación de energía renovable junto con la gestión de residuos es posible utilizando estiércol de ganado vacuno, bobino y porcino, de esta forma no solo se produce biogás, sino que se reduce el impacto destructivo del estiércol animal no tratado en el medio ambiente. [32].

En la actualidad se exploran diferentes tipos de residuos orgánicos agroindustriales como la pulpa de yuca (*Manihot esculenta*), que contiene 50 a 60 % de almidón en materia seca y 60 a 70 % de contenido de humedad; es una materia prima promisoriosa para la producción de biogás en reactores. Por lo tanto, utilizar este tipo de residuos de manera efectiva, podría

contribuir al desarrollo de una fuente valiosa de generación de energía, minimizando costos de gestión ambiental. Sin embargo, las bajas concentraciones de nutrientes como el nitrógeno y la baja capacidad amortiguadora de este residuo limitan la conversión a metano. [33].

4.1.4 Importancia de la toma de muestras de Ácidos Grasos Volátiles AGV

Diagnóstico de la salud del sistema: los perfiles de AGV no solo muestran la eficacia con la que la biomasa se transforma en biogás, sino que también revelan desequilibrios o problemas de inhibición dentro del sistema, como niveles elevados de ciertos AGV indican condiciones ácidas que frenan la concentración de metano.

Optimización de procesos: la información de estas muestras permite afinar los parámetros de operación del digestor para potenciar la generación de biogás. Este ajuste se fundamenta en la comprensión de cómo diversas condiciones impactan la producción y el consumo de estos ácidos dentro del sistema.

Monitoreo del rendimiento: observar las fluctuaciones en las concentraciones de AGV ayuda a detectar cambios en la alimentación del digestor o en la actividad microbiana. Este seguimiento es mantiene la operación dentro de los límites óptimos y previene o mitiga posibles fallas.

Investigación y desarrollo: las muestras de AGV, ofrecen información importante para explorar la microbiología de la DA, que mejoran la estabilidad y eficiencia de los digestores.

Evaluación de impacto ambiental: analizar los AGV permite evaluar el impacto ambiental de los digestores, especialmente en cuanto a las emisiones de metano y otros gases de efecto invernadero.

La recolección y análisis de muestras de AGV no solo es una herramienta diagnóstica y de control; es también esencial para impulsar el entendimiento científico y tecnológico de los procesos biológicos que sustentan la DA. Este enfoque permite gestionar el proceso de manera más efectiva y sostenible, optimizando su rendimiento al tiempo que se alinea con los objetivos ambientales y de producción.

4.1.5 Control de las variables de digestión anaerobia

Por lo anteriormente expuesto, controlar las variables relevantes en el proceso de digestión de los residuos orgánicos, permitirá tomar decisiones en cuanto a la operación y/o mantenimiento de los digestores, de tal forma que se asegure la obtención de biogás, en el menor tiempo posible. Por ello, la tendencia actual en el uso de reactores exige una mayor necesidad del uso de sensores y sistemas innovadores que favorezcan la DA. Sin embargo, la industria del bio procesamiento ha tardado en implementar la tecnología analítica, debido a

los altos requisitos de los sistemas de monitoreo, y métodos de detección probados y comprobados, que cada vez se vuelven obsoletos con la aparición de reactores complejos y sofisticados. [41].

La fig. 4, muestra un digestor agitado a escala piloto, la tasa de producción diaria de biogás se registró manualmente con un medidor de flujo de gas conectado directamente a la salida de gas. La concentración de metano (CH_4) se midió con un GASTIGER 2000 y se utilizó un sensor de temperatura y humedad relativa conectándolo a la salida del caudalímetro de gas. Se ventiló el gas para mantener la presión atmosférica en el digestor anaerobio. La medición continua de la temperatura de operación del digestor y el pH fueron controlados por un panel de monitoreo computarizado. [42].

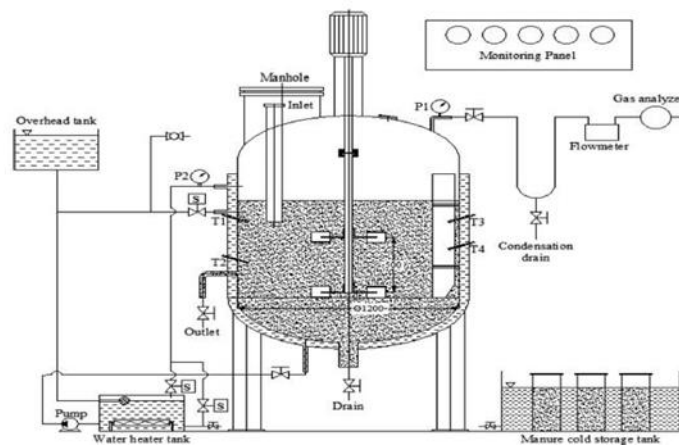


Fig. 4. Esquema del reactor tipo Batch enchaquetado con agitación. [43].

En el diseño y operación de digestores, el monitoreo en tiempo real de variables críticas, como la concentración de gases y la temperatura, es fundamental para garantizar la estabilidad del sistema y maximizar la producción de biogás. Un estudio desarrollado por Iswanto et al. (2021) presentó un sistema de monitoreo basado en sensores aplicado a un reactor de biogás, cuyos resultados ofrecen una valiosa referencia para este trabajo.

- Precisión y confiabilidad de los sensores: el sistema empleó sensores específicos: MQ-4 para metano (CH_4), MG-811 para dióxido de carbono (CO_2), MQ-136 para sulfuro de hidrógeno (H_2S) y un termopar tipo K para temperatura. Los datos obtenidos mostraron un error estándar de desviación de 5.0, lo que indicó un nivel de precisión adecuado para aplicaciones en digestores anaerobios.
- Automatización y reducción de errores humanos: la integración de una unidad de control basada en un Arduino Mega 2560 permitió procesar y visualizar datos automáticamente en una pantalla LCD, eliminando la necesidad de mediciones manuales, lo cual es crítico en entornos con recursos limitados.

- Optimización del control operacional: la presentación en tiempo real de las variables medidas permitió implementar estrategias de control, como ajustes en la temperatura o la carga orgánica, para evitar desequilibrios microbianos. Esto se traduce en una mejora directa del rendimiento del biogás.
- Desafíos técnicos identificados: uno de los principales retos encontrados fue la corrosión de los sensores, especialmente en entornos agresivos como los tanques digestores. Este problema destacó la necesidad de implementar estrategias de protección y mantenimiento para garantizar la vida útil del sistema.

Un microcontrolador es una computadora miniaturizada en un solo circuito integrado con un núcleo de procesador, memoria y periféricos configurables que constituyen los componentes principales del sistema, el cual consta de una memoria de solo lectura (ROM) para almacenar el código del programa y una de acceso rápido (RAM) que sirve como almacenamiento temporal de datos, como datos de medición o parámetros ajustables del sistema. La velocidad del reloj que corre hasta 100 MHz en los sistemas de microcontroladores modernos determina la velocidad del procesamiento que se ejecutará, lo que luego dicta el tiempo de muestreo necesario para el sistema bajo control.

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos que permite medir, analizar y actuar sobre las variables críticas de un proceso para mantenerlo dentro de parámetros óptimos. En el caso de los digestores, los sistemas de control son esenciales para garantizar la estabilidad microbiológica y maximizar la producción de biogás. Los sistemas de control generalmente están compuestos por:

Sensores: miden las variables clave del proceso, como temperatura, pH y concentración de gases (metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno).

Actuadores: dispositivos que ejecutan acciones específicas, como ajustar el flujo de biogás o la mezcla de la biomasa.

Controlador: procesa las señales provenientes de los sensores y decide las acciones que deben tomar los actuadores. En este trabajo se empleó un microcontrolador Arduino Mega 2560 como el núcleo del sistema.

Interfaz de usuario: permite visualizar los datos recolectados y ajustar parámetros operativos, como la pantalla LCD utilizada en este diseño.

Las entradas y salidas digitales sirven para interconectar el microcontrolador con la aplicación real en términos de control de bits, mientras que la interfaz analógica se realiza a través de canales analógicos a digitales. [44]

El número de entradas y salidas digitales y analógicas a digitales depende del tipo de microcontroladores utilizados, y para un diseño óptimo, la cantidad utilizada debe configurarse de acuerdo con la necesidad de la aplicación para la rentabilidad. Sin embargo, con la tendencia creciente de adaptar el uso de microcontroladores como un sistema integrado en muchas aplicaciones, algunos fabricantes han creado una placa de desarrollo para acelerar la interfaz de los microcontroladores con el sistema. Entre los más populares se encuentra la placa Arduino, que se ejecuta en una ventajosa plataforma de código abierto y presenta configuraciones de hardware y software fácilmente configurables. Con el microcontrolador ATMEL ejecutándose como su núcleo, tiene todas las entradas y salidas digitales con salidas de modulación de ancho de pulso (PWM) que son necesarias para fines de adquisición y control. [44].

De aquí se desprende la necesidad de contar con un sistema que permita monitorear las variables del proceso on-line y almacenar la información, a fin de evitar periodos largos sin evaluación como ocurre por las noches. Contar con pocas muestras de las variables hace más difícil la tarea de modelado y limita la posibilidad de utilizar herramientas de identificación de sistemas para la obtención de parámetros relevantes del modelo.

La tabla II, presenta las principales características de los sensores utilizados en el control de variables en los digestores.

TABLA II.
Características de los sensores en un digestor

Variable medida	Sensor utilizado	Precisión (%)	Desafíos identificados
Metano (CH ₄)	MQ-4	99,3	Corrosión del sensor
Dióxido de carbono (CO ₂)	MG-811	99,83	Incremento de desviación con uso
Sulfuro de hidrogeno (H ₂ S)	MQ-136	99,71	Mayor deterioro en tanques digestores
Temperatura	Termopar tipo K	98,81	Necesidad de limpieza periódica

La fig. 5, ilustra el desempeño de los sensores y su precisión relativa frente a los valores de referencia.

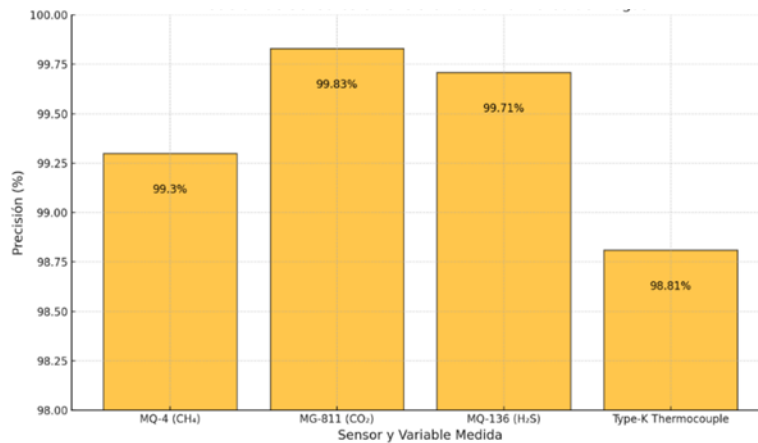


Fig. 5. Precisión de los sensores en el Sistema de Monitoreo de biogás.

En la fig. 5, se ilustra la precisión de los sensores utilizados en el sistema de monitoreo. Este gráfico destaca el alto nivel de precisión de cada sensor, lo que refuerza su idoneidad para aplicaciones en digestores.

Para lograr estos objetivos se requiere un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Los sistemas SCADA se utilizan para monitorear y controlar equipos y plantas industriales de todo tipo, este sistema reúne información de proceso que se transfiere al servidor central y proporciona datos de relevancia hacia las RTU (Remote Terminal Units). Un sistema SCADA típico consiste en:

- Uno o más dispositivos de interfaz de datos de campo, usualmente RTU's o PLC's.
- Un sistema de comunicaciones utilizado para transferir la información desde los dispositivos de campo, hacia el servidor central del SCADA.
- Un servidor central (*Master Terminal Unit*).
- Software especializado, además de un interfaz humano máquina (*HMI*).

La fig. 6, muestra la pantalla típica del sistema en modo local, existen en la pantalla diversos objetos que permiten monitorear el estado actual del equipo y del proceso.

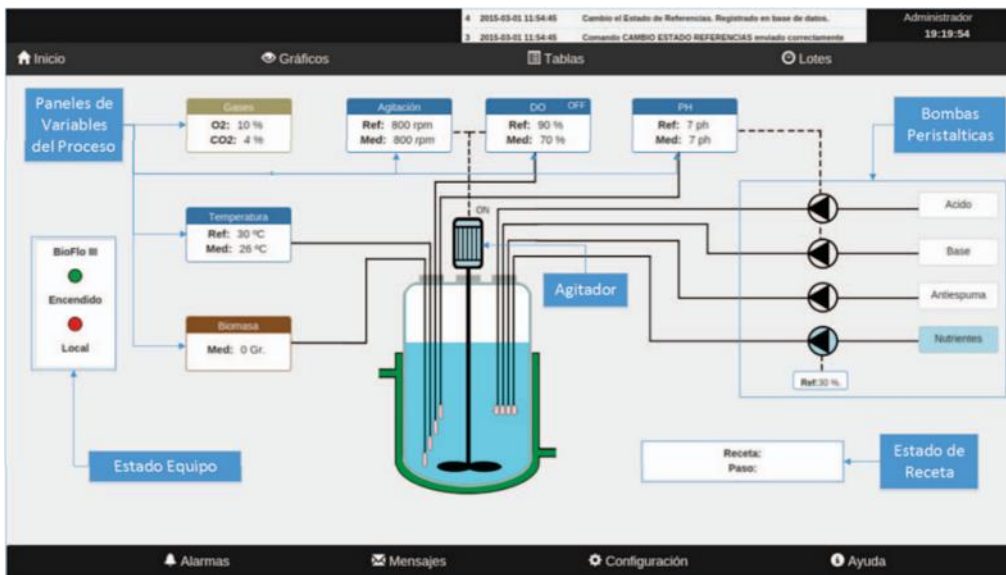


Fig. 4. Esquema de pantalla de inicio en modo local. [45].

La fig. 7, presenta la pantalla del sistema de gestión por lotes, la misma presenta una división de las herramientas del sistema en varias secciones.

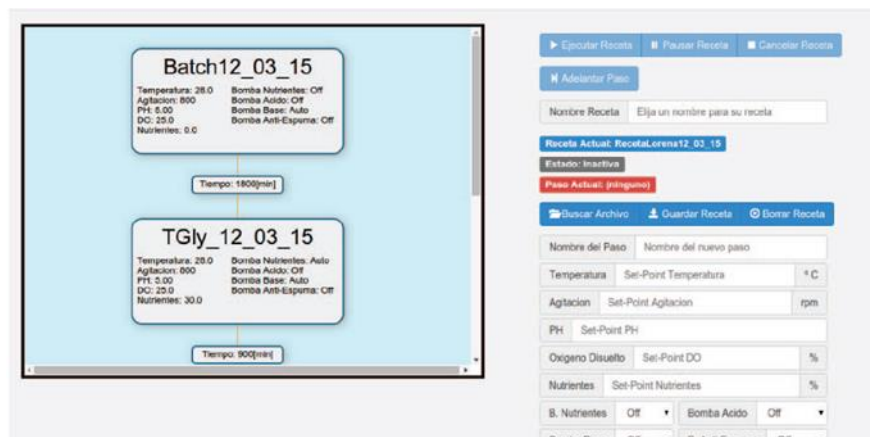


Fig. 5. Pantalla principal sistema de gestión por lotes. [45].

4.1.6 Los reactores de digestión anaerobia DA

Los reactores son los dispositivos más comunes para la producción de biogás, estos sistemas mantienen un ambiente biológico controlado, acompañado de procesos químicos. La digestión puede ser aerobia o anaerobia. Es por esta razón un reactor se debe mantener en condiciones ambientales favorables en cuanto a sus variables de operación relevantes de tal forma que se favorezca la producción de biogás, por la acción de los microorganismos. [34].

Factores como el diseño de las plantas de biogás, el tipo de materia prima, el pH, la temperatura, la concentración de sólidos volátiles (VS), el tiempo de retención hidráulica (TRH), la mezcla y la tasa de carga orgánica (OLR); afectan el rendimiento del biogás y la concentración de metano (CH₄), [66]. Sin embargo, este proceso es difícil de controlar y debe optimizarse, por lo cual es necesario monitorear las variables de proceso más relevantes en la producción de biogás, de tal forma que se pueda tomar decisiones en cuanto al mantenimiento del reactor o ajuste de estas variables de operación. [8].

La temperatura es uno de los factores más importantes, a mayor temperatura se tiene un menor TRH; por lo tanto, un digestor de menor tamaño y costo. La tabla III, muestra temperaturas que caracterizan a los diferentes tipos de regiones de los países andinos. [11].

TABLA III.
Temperaturas recomendadas para un digestor tipo Taiwanés o tubular

Región	T° Ambiente	T° Trabajo	Altura (msnm)
Altiplano	-12°C a 20°C	6°C - 16°C	2900 – 4500
		(con invernadero)	
Valle	5°C - 30°C	15°C - 20°C	1800 – 2900
Trópico	13°C - 38°C	25°C - 30°C	0 -1800

Nota: Se muestran las temperaturas referenciales que caracterizan a los diferentes tipos de regiones de los países andinos. [15].

Por otra parte, los valores sugeridos para determinar el porcentaje de sólidos totales (ST) en la mezcla estiércol – agua (para digestores tipo flujo pistón), se encuentran alrededor de un valor mínimo de 8%, para evitar la acumulación de residuos sólidos en el fondo del reactor se debe reducir el TRH y la producción de biogás, esto sugiere usar bajas diluciones.

La concentración del afluente (C_o) se define como la cantidad de sólidos (SV) por volumen de mezcla que ingresa diariamente al digestor ($\frac{gSv}{l}$ o $\frac{KgSv}{m^3}$). Puede determinarse por cada volumen de mezcla que contenga 1 kg de estiércol, utilizando las siguientes ecuaciones. [35].

$$c_0 = \frac{SV(g)}{\text{volumendemezcla}(l)} = \frac{(\%ST / 100) \times (\%SVdeST / 100) \times 1000g}{l_{\text{agua}} + l_{\text{estiércol}}}$$

$$c_0 = \frac{\%ST \times (\%SVdeST)}{10 \times \left(\underbrace{\frac{\%ST}{\%ST_{\text{deseados}} - 1}}_{\text{Volumendeaguapara1kgestiércol}} + \underbrace{\frac{1kg}{\rho_{\text{estiércol}} (kg/l)}}_{\text{Volumende1kgestiércol}} \right)}$$

Ecuación 1. Concentración del afluente

Dónde: Co = Concentración del efluente

Sv de ST = Cantidad de sólidos volátiles de los sólidos totales

%ST = Porcentaje de sólidos totales en la mezcla estiércol – agua o materia seca.

l_{agua} + l_{estiércol} = volumen total de la mezcla agua y estiércol en litros

El porcentaje de ST o también llamado materia seca (MS) varía entre 13% y 25% para el caso del estiércol fresco de ganado vacuno [31] [32] [34] [36] [37] [38]. El porcentaje de sólidos volátiles (SV) respecto a los sólidos totales (ST) varía entre un 75% y un 82%. Para los cálculos, se consideran valores comunes como un 15% de ST y un 12% de SV, lo que equivale a que el 80% de los ST son SV. La densidad del estiércol bovino, dependiendo de su frescura, oscila entre $0.95 \frac{Kg}{l}$ y $1 \frac{Kg}{l}$; para estiércol fresco con un 15% de materia seca (MS), el valor recomendado es $0.95 \frac{Kg}{l}$. En el caso del estiércol de cerdo, el porcentaje de ST está entre 18.9% y 32%, y los SV se encuentran entre un 67% y un 83% de los ST. [39].

El TRH y la Co, son los que más influyen en la producción de biogás. En cuanto al TRH puede variar conforme varíe el volumen del afluente y/o el volumen líquido del digestor, aunque el volumen líquido suele considerarse constante una vez que el digestor ha sido diseñado; disminuye gradualmente con el tiempo a medida que los sólidos inertes se acumulan en el fondo del digestor. La variación del volumen del afluente puede ocurrir para una concentración constante (%ST y %SV constantes), manteniéndose las mismas proporciones de estiércol y agua, o para una concentración variable (una misma cantidad de kg de estiércol mezclada con diferentes volúmenes de agua). Por esta razón, el TRH está ligeramente relacionado con la producción de gas, donde la carga orgánica volátil (COV) es el factor determinante [40]. De esta manera, el efecto de la Co y el TRH pueden combinarse en la COV como se observa en las ecuaciones planteadas, ya que describe la cantidad diaria de materia orgánica que se agrega al digestor por volumen de trabajo, es decir, el volumen líquido.

$$COV \left(\frac{kgSV}{m^3 \text{ biodigestor.día}} \right) = c_0 \left(\frac{kgSV}{m^3 \text{ afluyente}} \right) \times TRH (\text{días})$$

$$TRH (\text{días}) = \frac{c_0 \left(\frac{kgSV}{m^3 \text{ afluyente}} \right)}{COV \left(\frac{kgSV}{m^3 \text{ biodigestor.día}} \right)}$$

Ecuación 2. Cálculo de la COV

Dónde: COV = Carga orgánica volátil

TRH = Tiempo de retención hidráulico

4.1.7 Variables críticas en los digestores

- **pH.**

Es una variable que influye significativamente en la actividad de los microorganismos que intervienen en la generación de metano. Para una eficiencia óptima del proceso de digestión anaerobia, el pH del medio debe variar entre 5,5 y 6,9, un pH demasiado ácido o alcalino inhibe la actividad de los microorganismos metanogénicos. [46].

- **Temperatura**

Afecta directamente la actividad de los microorganismos; por lo que, la mayoría de los digestores operan a temperaturas mesofílicas y termofílicas comprendidas entre 30°C a 40 °C y 50°C a 60 °C, respectivamente. La temperatura debe mantenerse constante para garantizar una producción continua de biogás. [44].

- **Concentración de metano**

El monitoreo de la concentración de metano es fundamental para evaluar la eficiencia del digestor y la calidad de biogás producido. Los sensores de gas, como el MQ-4, se utilizan para medir estas concentraciones en tiempo real [47].

4.1.8 Importancia de la monitorización

Este proyecto se erige en la confluencia de la ingeniería electrónica y la gestión ambiental, buscando abordar un desafío crucial en la gestión de residuos orgánicos: la eficiente producción de biogás mediante digestores de dos etapas [48]. La esencia de esta iniciativa fue el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo basado en el Internet de las Cosas (IoT), destinado a realizar un seguimiento continuo y detallado de variables críticas como el pH, la temperatura y la concentración de biogás.[44].

La visión esencial va más allá de la optimización de la producción de biogás; se adentra en una comprensión más profunda de los complejos procesos biológicos y químicos que tienen lugar en la DA. [47]. A través de una aproximación multidisciplinaria, este proyecto pretende no solo mejorar la sostenibilidad de la generación de biogás, sino también contribuir al conocimiento integral de los factores que influyen en el rendimiento de los digestores. [49].

Desde la caracterización de la biomasa hasta el análisis de datos, este proyecto se configuró como un hito colaborativo, impulsando la frontera de la eficiencia y sostenibilidad en la tecnología de digestores de dos etapas.

- **Importancia de monitorear variables clave en reactores de dos etapas**

La monitorización de variables clave en digestores de dos etapas constituye un pilar fundamental en la eficiente gestión de estos sistemas avanzados de generación de biogás. [50]. Esta vigilancia minuciosa se traduce en múltiples beneficios, que abarcan desde la optimización de la producción hasta la comprensión profunda de los procesos biológicos y químicos. A continuación, se destacan las razones que subrayan la importancia de este monitoreo integral:

- La medición en tiempo real del pH, la temperatura y la concentración de gas metano permite ajustes inmediatos en las condiciones operativas. [51]. Esto se traduce en un rendimiento óptimo del digestor, maximizando la producción de biogás.
- La variabilidad en las condiciones ambientales y en la composición de la biomasa puede afectar la actividad microbiana. El monitoreo continuo de la temperatura y el pH contribuye a mantener condiciones biológicas ideales para una DA eficiente. [52].
- La identificación temprana de desviaciones en las variables críticas permite prevenir problemas potenciales, como la acidificación del sistema o la inhibición de la actividad microbiana, evitando así un impacto negativo en la producción de biogás. [53].
- La recopilación sistemática de datos proporciona una base sólida para investigaciones más profundas. [54]. El análisis de correlaciones entre las variables clave no solo mejora la

comprensión de los procesos internos del digestor, sino que también abre el camino para posibles mejoras y desarrollos futuros.

- Un monitoreo efectivo contribuye a la sostenibilidad global del sistema al reducir el riesgo de fallas, prolongando la vida útil del digestor y mejorando la eficiencia en la generación de biogás, un recurso energético renovable.

El monitoreo de variables clave resulta fundamental no solo para optimizar el funcionamiento del digestor, sino también para impulsar la investigación continua y el desarrollo de sistemas cada vez más eficientes y sostenibles. [22].

Este enfoque holístico hacia la monitorización se alinea con la visión de un futuro donde la gestión de residuos se integra armoniosamente con la producción de energía limpia y sostenible.

4.1.9 Herramientas computacionales para el análisis y visualización de datos

- **Python**

Es una herramienta para el análisis de datos debido a su versatilidad y la disponibilidad de numerosas bibliotecas especializadas, como pandas, NumPy y scikit-learn permiten el procesamiento de grandes volúmenes de datos, la manipulación, transformación, carga y graficación, importantes para la analítica de datos de las variables a monitorear [55].

- **Power Bi**

Es una herramienta de visualización de datos que permite crear Dash Board interactivos y detallados. Esta plataforma facilita la interpretación y comunicación de resultados a través de visualizaciones intuitivas y personalizables, proporcionando una visión clara del rendimiento del digestor [51].

- **Thing Speak**

Es una plataforma IoT que permite recopilar, almacenar, analizar y visualizar datos en tiempo real. Utilizando protocolos HTTP/HTTPS, los datos de sensores como pH, temperatura y concentración de gas, se transmiten a Thing Speak, donde se visualizan y analizan mediante gráficos y tablas [56].

4.1.10 Teorías y modelos relevantes

- **Modelos de digestión anaerobia**

Los modelos de digestión anaerobia, como el modelo ADM1 (Anaerobic Digestion Model No. 1), proporcionan una comprensión detallada de los procesos bioquímicos y fisicoquímicos involucrados en la DA. Estos modelos ayudan a simular y optimizar las condiciones operativas de los digestores [53].

- **Correlaciones de variables de proceso en la digestión anaerobia**

Las correlaciones entre las principales variables de proceso, como el pH, la temperatura y la concentración de biogás, son cruciales para entender la dinámica del sistema y optimizar su rendimiento. La relación entre estas variables puede afectar significativamente la concentración de biogás y la estabilidad del proceso. El análisis de correlaciones permite identificar patrones y ajustar los parámetros operativos para mejorar la eficiencia del digestor [54], [57].

El desarrollo de un sistema de monitoreo para digestores de dos etapas requiere una comprensión profunda de las variables críticas, el uso de herramientas computacionales avanzadas y la aplicación de teorías y modelos relevantes.

4.2 ANTECEDENTES

El alto interés en la optimización de sistemas de DA se debe a la creciente preocupación por el cambio climático y la búsqueda de fuentes de energía renovable. Los digestores de dos etapas se han implementado como una estrategia exitosa para convertir los desechos orgánicos en biogás, un recurso de energía verde. La producción de biogás y su uso, requieren un conjunto de tecnologías; sin embargo, para asegurarse de que sean efectivas y rentables, es necesario mantener un sistema de monitoreo de calidad.

En los reactores de dos etapas, ocurre en primer lugar la hidrólisis y acidogénesis, y en seguida la acetogénesis y metanogénesis. Este proceso permite optimizar las condiciones para la producción en cada fase, asegurar la eficiencia de la digestión y la calidad del biogás. Es importante destacar que esta complejidad del proceso, requiere un control preciso adicional para garantizar el equilibrio y la eficiencia máxima en ambas etapas.

4.2.1 Sistemas de monitoreo

En el año 2021 se publicaron los resultados de la investigación titulada "Diseño de un Sistema de Medición y Monitoreo de Concentración de Gas para la Planta de Biogás". El objetivo

principal fue obtener registros precisos de la concentración de biogás. Los investigadores analizaron cómo establecer un sistema de monitoreo efectivo para los reactores de biogás. Instalaron varios sensores en los tanques digester y de almacenamiento, para detectar concentración de metano (CH_4), utilizaron el sensor MQ-4, para detectar dióxido de carbono (CO_2), el MG-811, para detectar ácido sulfhídrico (H_2S) el MQ-136 y para medir la temperatura un termopar tipo K, como se observa en la fig. 8.

Estos sensores enviaban señales a una unidad de control llamada Arduino Mega 2560. Luego, la información era procesada y mostrada en una pantalla de cristal líquido (LCD). Los resultados fueron muy prometedores, ya que la desviación estándar de los sensores estuvo por debajo de 5,0, lo que indica una gran precisión en las mediciones. Además, se encontró que la linealidad de cada sensor era bastante alta, lo que significa que los resultados eran confiables.

El sensor instalado en el reactor de biogás fue utilizado para monitorear constantemente la concentración de gas y la temperatura. Un control adecuado de estos parámetros puede garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de la planta de biogás.

Esta investigación demostró la viabilidad de diseñar e implementar sistemas para monitorear la concentración de gas en una planta de biogás. Los resultados obtenidos tienen un alto potencial para optimizar tanto la eficiencia como la seguridad en este tipo de instalaciones. [68].

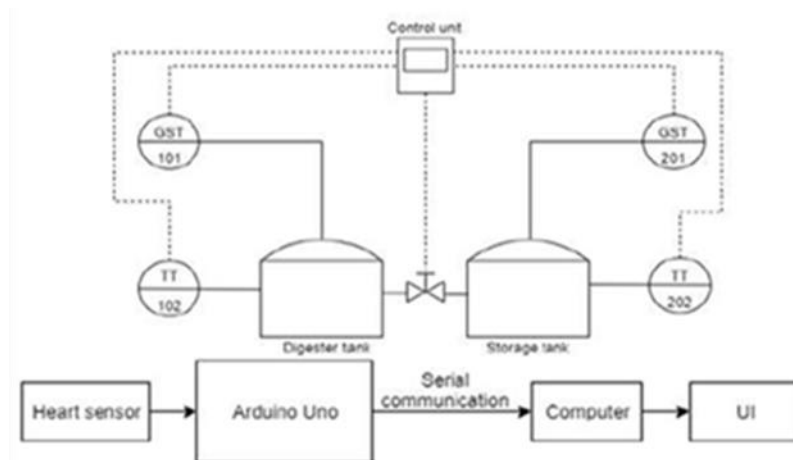


Fig. 6. Sistema de medición y monitoreo de concentración de gas para la planta de biogás. [42].

Por otro lado, en un estudio realizado en 2021, se desarrolló un reactor innovador llamado "tetrápodo" que utilizó biocarbón como medio filtrante poroso. Este reactor tenía la capacidad de tratar sustratos desafiantes como los líquidos pirolíticos. Para monitorear en línea el cambio de biogás en el sistema a escala de laboratorio, se diseñó un gasómetro digital basado en Arduino de código abierto. Este dispositivo utilizó un sensor ultrasónico y una bolsa de gas flexible para determinar el volumen total de gas disponible. Cuando la bolsa de gas se llenaba,

se expandía y reducía la distancia entre la capa superior y el sensor. En la fig. 9, se puede observar los componentes de este sistema.

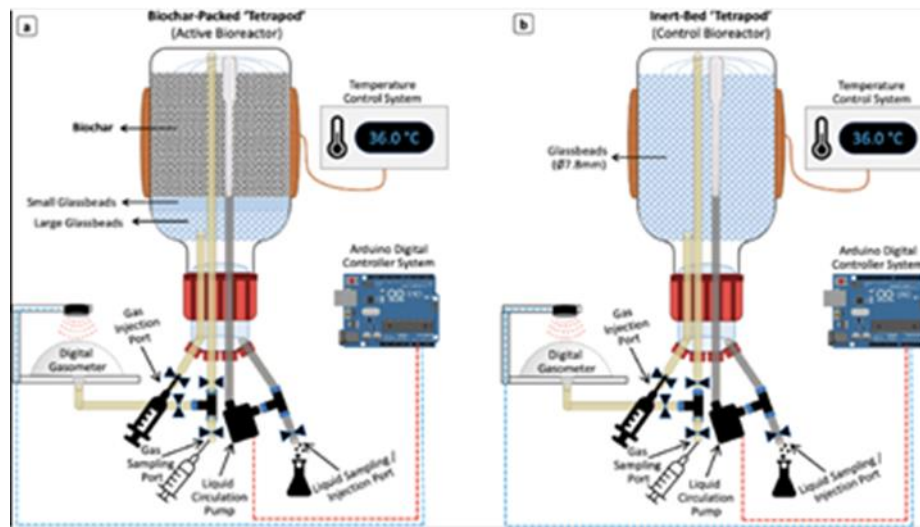


Fig. 7. Biorreactor anaerobio controlado por arduino. (a)Tetrápodo empacado con biocarbón, (b) Tetrápodo de lecho inerte. [69].

La implementación de sistemas de monitoreo avanzados en digestores es esencial para optimizar su rendimiento y maximizar la producción de biogás. La integración de tecnologías IoT y sistemas embebidos, junto con el análisis avanzado de datos, proporciona herramientas para la gestión y mejora continua de estos sistemas. La investigación en este campo no solo contribuye a la sostenibilidad energética, sino que también ofrece soluciones innovadoras para la gestión de residuos y la protección del medio ambiente.

- **Implementación de sistemas de monitoreo**

Monitorear variables como el pH, la temperatura y la concentración de biogás, asegura que los digestores funcionen de la mejor manera. Gracias al internet de las cosas (IoT), se cuenta con sistemas inteligentes que pueden monitorear y analizar datos en tiempo real, ayudando a tomar decisiones y mejorar los procesos.

- **Logros obtenidos con el sistema de monitoreo y adquisición de datos**

Monitoreo continuo y preciso de variables clave del digestor, tales como:

- Concentración de gases (CH_4 , CO_2 , H_2S): los sensores instalados proporcionaron mediciones confiables con un error estándar aceptable de ± 5.0 , lo que permitió evaluar la eficiencia del proceso anaerobio en tiempo real.

- Temperatura: la medición precisa de la temperatura garantizó que el reactor se mantenga en un rango óptimo para la actividad microbiana.
- Reducción de la dependencia de mediciones manuales: la automatización mediante sensores y una interfaz LCD minimizó los errores humanos y mejoró la calidad de los datos recolectados.

Aunque este sistema no implementó acciones correctivas automáticamente (como haría un sistema de control), proporcionó información clave útil para tomar decisiones informadas y mejorar la operación del digestor. Esto representa un avance significativo donde el monitoreo manual es poco práctico o impreciso.

- **Monitoreo y control en la estabilidad y eficiencia en la producción de biogás:**

El monitoreo y control de los procesos en reactores anaeróbicos es esencial para garantizar la estabilidad y eficiencia en la producción de biogás y la biodegradación de residuos orgánicos. Particularmente, los reactores de dos etapas representan un avance significativo al permitir la separación de fases metabólicas, optimizando las condiciones para cada etapa del proceso anaeróbico. La implementación de sistemas de monitoreo avanzados, que incorporan sensores embebidos y herramientas analíticas, mejoran la operación y estabilidad de estos sistemas [58]. [59].

Los reactores anaeróbicos de dos etapas presentan retos únicos debido a la interacción de sus fases acidogénica y metanogénica. Estas etapas requieren condiciones específicas de temperatura, pH y tiempos de retención hidráulicos (TRH) para operar de manera óptima [58]. [60]. La estabilidad del sistema puede verse comprometida si no se monitorean adecuadamente estas variables, lo que puede resultar en acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV), inhibición por amoníaco o fallos operativos.

El monitoreo en tiempo real permite identificar cambios tempranos en las condiciones operativas, facilitando la implementación de estrategias correctivas antes de que ocurran fallos [61]. [62]. Además, la analítica de datos aplicada al monitoreo ofrece la capacidad de predecir el rendimiento del sistema, permitiendo un control proactivo basado en modelos predictivos [63]. [64].

Los avances en sensores embebidos han revolucionado el monitoreo de reactores anaeróbicos al permitir la medición continua de parámetros clave como temperatura, pH, presión de gas y composición de biogás [58]. [60]. Por ejemplo, Fröner-Lacerda et al. [58]., diseñaron un sistema automatizado que emplea sensores digitales para controlar estas variables en reactores de laboratorio y piloto. Este sistema permitió una mejor adaptación de los microorganismos al sustrato y un aumento en la producción de biogás.

La integración de tecnologías IoT ha facilitado la operación remota y el análisis colaborativo en sistemas de digestión anaeróbica. Radu et al. [55]., implementaron una red de monitoreo descentralizada que utiliza electrónica de bajo costo para controlar plantas de biogás a nivel comunitario, demostrando su efectividad en el mantenimiento de la estabilidad operativa.

El uso de modelos predictivos no lineales es útil en reactores de dos etapas debido a la complejidad de las interacciones biológicas y químicas. Cortés et al. [63]., desarrollaron un controlador predictivo que optimiza la eficiencia de producción de metano en sistemas industriales, logrando un incremento en la eficiencia del 24 % en comparación con métodos tradicionales.

La integración de biosensores ha permitido un monitoreo más preciso de los indicadores biológicos y químicos en los reactores. Röhlen et al. [66]., diseñaron un biosensor híbrido para cuantificar AGV en tiempo real, mejorando la capacidad de respuesta frente a condiciones inestables. Leite et al. [61]., utilizaron análisis multivariados para identificar disfunciones tempranas en reactores termofílicos, mostrando la importancia de combinar datos estadísticos con monitoreo físico-químico.

- **Beneficios de los sistemas de monitoreo avanzados**

Estabilidad operativa: los sistemas de monitoreo permiten mantener condiciones óptimas para los microorganismos, evitando inhibiciones metabólicas [58]. [62].

Optimización de la producción: el análisis predictivo y la integración de datos en tiempo real maximizan la producción de metano [63]. [64].

Respuesta proactiva: la detección temprana de cambios operativos reduce los tiempos de inactividad y los costes de mantenimiento [61]. [66].

Escalabilidad: los sistemas IoT y embebidos facilitan la implementación en plantas a diferentes escalas [65]. [59].

La implementación de sistemas de monitoreo en reactores anaeróbicos de dos etapas es clave para superar los retos asociados en la operación de estos sistemas. Tecnologías como sensores embebidos, IoT y modelos predictivos mejoran la eficiencia y estabilidad de los procesos. Los avances recientes en biosensores y analítica de datos subrayan la importancia de adoptar enfoques integrados para el monitoreo y control en tiempo real. Estos desarrollos optimizan el rendimiento de los reactores y contribuyen a una gestión más sostenible de los recursos.

Actualmente se estudia cómo hacer que los digestores funcionen mejor mediante el uso de sensores especiales que proporcionen información precisa. Ortega-Bucio et al. Creó una

máquina especial que detecta temperatura, humedad y presión. Utilizaron esta máquina para hacer más eficiente el proceso de producción de biogás [40]. De manera similar, Küçükağa et al., utilizó un reactor anaeróbico controlado por Arduino con biocarbón como medio filtrante. Destacaron la importancia del seguimiento en tiempo real para maximizar la producción de biogás [44].

Gracias a la combinación de tecnologías IoT y sistemas integrados, se cuenta con medio de monitoreo de variables relevantes. Teixeira et, al., creó un sistema simple y asequible para recopilar datos de digestores, utilizando sensores digitales para medir los niveles de temperatura, presión y pH, brindando información en tiempo real para mejorar el proceso [47].

4.2.2 Herramientas computacionales usadas para el análisis y visualización de datos

Para analizar los datos obtenidos, se usó Python y para visualizarlos Power Bi. Python facilita el análisis de datos. Con estas herramientas, es posible manejar una gran cantidad de datos, analizarlos e incluso utilizar el aprendizaje automático para predecir y mejorar la cantidad de biogás que se puede producir [67]. [51].

Existen múltiples herramientas y lenguajes de programación que podrían haberse utilizado para desarrollar el sistema de monitoreo y adquisición de datos, como LabVIEW, MATLAB, C/C++ y Java, cada uno con características específicas.

LabVIEW, por ejemplo, es ampliamente reconocido por su enfoque gráfico y su capacidad para integrarse con hardware industrial, pero sus licencias costosas limitan su aplicación en proyectos de bajo presupuesto.

MATLAB, por su parte, es excelente para el análisis estadístico y simulaciones avanzadas, aunque su uso también está restringido por el costo y la necesidad de hardware especializado.

C/C++ es el estándar en sistemas embebidos debido a su eficiencia y control sobre el hardware, pero su curva de aprendizaje puede complicar el desarrollo rápido de prototipos.

Java ofrece portabilidad y versatilidad, pero consume más recursos, lo que lo hace menos ideal en sistemas de bajo costo.

En este proyecto, se eligió Python como lenguaje principal debido a su equilibrio entre facilidad de uso, flexibilidad y eficiencia para proyectos de monitoreo, Python tiene una sintaxis intuitiva que facilita la programación y permite un desarrollo rápido, lo cual es esencial en un entorno académico. Además, cuenta con bibliotecas especializadas como numpy, pandas, matplotlib y pySerial, ideales para el análisis y visualización de datos en tiempo real, así como para la integración con hardware como Arduino y Raspberry Pi. Al ser un lenguaje de código abierto con una comunidad activa, Python también asegura soporte técnico accesible y recursos

educativos gratuitos. Estas características hacen de Python una opción óptima para este proyecto, ya que permite desarrollar un sistema funcional, económico y adaptable que se alinea con los objetivos de la investigación.

4.2.3 Correlación y análisis de datos

El análisis de datos utilizando técnicas estadísticas ayuda a entender mejor cómo interactúan las diferentes variables en un sistema. Esto permite encontrar patrones y predecir cómo se comportará un digestor. Para lograr esto, algunos estudios han utilizado modelos de correlaciones estadísticas, efectivos para monitorear en tiempo real el proceso de DA. Estas técnicas ayudan a mejorar la gestión y el control de los digestores. Al monitorear y analizar los datos, se puede obtener mejores resultados y optimizar el proceso de DA. [52].

5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo se desarrolló bajo un enfoque deductivo que partió de la teoría e investigaciones en los procesos de DA (estado de la cuestión) hacia la aplicación del fenómeno específico propuesto, para la generación de datos que permitieron contrastar el estado actual del campo de investigación, evidenciar y aplicar potenciales mejoras que fueron traducidas en mayores eficiencias del sistema de estudio.

Se propuso una aproximación abductiva/deductiva, que permitió a partir de la información generada y teoría relevante, contar con datos suficientes, para presentar un camino posible hacia el incremento en eficiencias del sistema de interés, buscando validar posibles predicciones o presunciones expuestas.

Para el desarrollo metodológico de esta investigación se propuso monitorear las variables relevantes del proceso en un reactor de dos etapas de control y otro piloto en el que se ajustó la tasa de carga orgánica (OLR). A uno de los reactores de dos etapas se le instaló un sistema de monitoreo.

A continuación, se presenta el desarrollo metodológico de las actividades por cada objetivo específico.

5.1 OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CARACTERIZAR FÍSICA Y QUÍMICAMENTE LA BIOMASA DE AFRECHO DE YUCA, ESTIÉRCOL DE CERDO E INÓCULO

5.1.1 Recolección de las muestras de estiércol de cerdo e inóculo

En el mes de febrero de 2023, se viajó a la vereda el Tamboral, vía Florida (Valle del Cauca) - Miranda (Cauca), finca la Palma. La ubicación se observa en la fig. 10

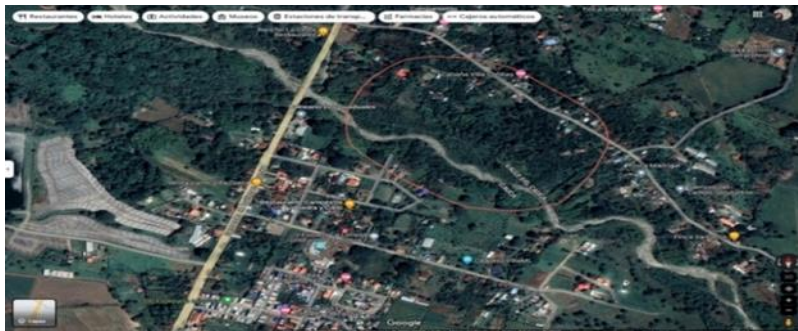


Fig. 8. Ubicación satelital de la vereda El Tamboral. Cauca. [70].



Fig. 9. Finca la Palma, vereda El Tamboral. Cauca

Como se observa en las fig. 11 y 12, se recolectó las muestras de estiércol de cerdo e inóculo en la finca la Palma, propiedad del señor Mauricio Ortiz, ubicada en la vereda el Tamboral.



Fig. 10. Porqueriza de cerdos



Fig. 12. (Continuación). Porqueriza de cerdos

5.1.2 Determinación del porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas.

Para determinar el porcentaje de humedad de las muestras, se tuvo en cuenta el procedimiento de la norma NTC 1776 ICONTEC 2019, para lo cual se procedió de la siguiente manera:

5.1.3 Determinación de los pesos de las masas obtenidos de las muestras

Como se observa en las fig. 13 y 14, para determinar la humedad de las muestras inicialmente se registraron el peso de las cápsulas vacías. Posteriormente se pesaron 5 gramos netos de cada muestra de inóculo de cerdo, estiércol de cerdo y afrecho de yuca. Este procedimiento se realizó por triplicado de tal forma que se pueda tener mayor precisión en los resultados.



Fig. 11. Peso de las cápsulas vacías



Fig. 12. Peso neto de las muestras húmedas

En las fig. 15 y 16, se observa cómo se secó completamente las muestras, utilizando un horno eléctrico marca Hach Gravity Oven, modelo 35GM, mediante la circulación por gravedad de aire por convección, hasta alcanzar un peso constante a una temperatura controlada de 105°C y por un tiempo de 24 horas. Hasta obtener un peso constante.



Fig. 13. Horno Eléctrico para secado de las muestras



Fig. 14. Secado de las muestras en horno a temperatura controlada

Después de secar las muestras en el horno a 105°C durante 24 horas, como se ve en la fig.17, se retiró y verificó los pesos secos, descontando el peso de las cápsulas vacías previamente pesados.



Fig. 15. Peso seco de las muestras

Finalmente, para determinar el contenido de humedad total evaporable, se utilizó la ecuación 3:

$$\rho = \frac{100 * (W - D)}{W}$$

Ecuación 3. Contenido de humedad

Dónde: ρ = contenido de humedad total evaporable de la muestra (%)
 W = masa de la muestra original (g)

D = masa de la muestra seca (g)

Los resultados obtenidos se detallan en el capítulo de resultados

5.1.4 Determinación de la densidad aparente de la biomasa utilizada.

Para determinar la densidad de la biomasa utilizada, se calculó mediante el cociente de la masa de cada material y su volumen contenido en una probeta; como se observa en la fig. 18, se pesó una masa en g determinada de cada muestra húmeda y la misma se depositó en una probeta para calcular el volumen.

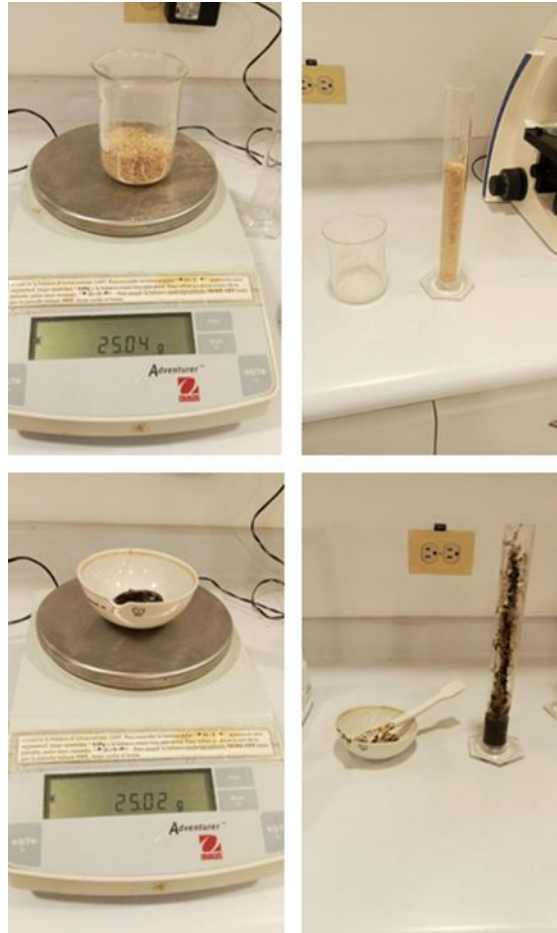


Fig. 16. Peso húmedo de las muestras de biomasa

Para ello se utilizó la ecuación 4:

$$\rho_{\text{biomasa}} = \frac{\text{masa biomasa}}{\text{Volumen biomasa}}$$

Ecuación 4. Densidad aparente

Donde: ρ = densidad aparente de la muestra ($\frac{g}{ml}$)
 m = masa de la muestra original (g)
 V = volumen de la muestra (ml)

Sin embargo, y después de haber secado las masas de afrecho de yuca, inóculo y estiércol de cerdo se procedió a determinar sus densidades aparentes en base seca, para ello y como se ve en las fig. 19, 20 y 21, se procedió a pesar una muestra seca de cada masa y determinar su volumen mediante una probeta y de esta forma calcular su densidad.



Fig. 17. Determinación del peso seco y del volumen del inóculo de cerdo



Fig. 18. Determinación del peso seco y del volumen del estiércol de cerdo



Fig. 19. Determinación del peso seco y del volumen del afrecho de yuca

Los valores calculados de las densidades en base seca del inóculo y estiércol de cerdo, así como del afrecho de yuca se presentan en el capítulo correspondiente a los resultados

5.1.5 Determinación del análisis de carbono, nitrógeno e hidrógeno en las muestras de afrecho de yuca, estiércol de cerdo e inóculo

El 21 de octubre de 2022, se llevaron al laboratorio de servicios analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, las muestras de estiércol de cerdo, inóculo y afrecho de yuca, donde se analizó el porcentaje de carbono, hidrógeno y nitrógeno por combustión. Los resultados se pueden ver en el anexo A.

Se utilizó un equipo automático, marca Perkin Elmer 2400. El método aplicado fue dry combustión o combustión seca que aplica pirólisis, mediante un proceso de combustión y reducción. Se pesaron en una micro balanza digital, marca Termo Scientific, 4 mg de cada una de las muestras de afrecho de yuca, inóculo y estiércol de cerdo en cápsulas de estaño, posteriormente se cerraban las cápsulas y se colocaban en el equipo.

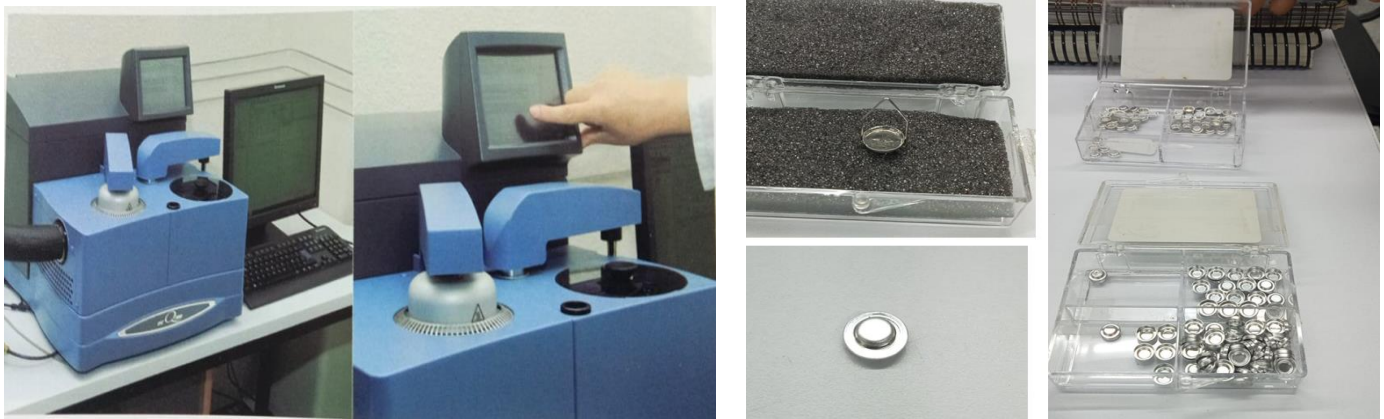
5.1.6 Determinación de las propiedades térmicas de la biomasa utilizada

Las muestras de afrecho de yuca, inóculo y estiércol de cerdo, fueron sometidas a dos pruebas termogravimétricas:

- **Calorimetría diferencial de barrido (DSC):**

Es una técnica que mide el flujo calorífico diferencial entre una muestra de estudio y una de referencia como función de la temperatura o el tiempo. Como se observa en la fig. 22 (a), el equipo utilizado es TA Instruments Modelo Q100 Modulated DSC; las medidas fueron

realizadas en un ambiente inerte de N₂, con un flujo de $50 \frac{mL}{min}$. Las muestras utilizadas son del orden de 5 a 10 mg y se sellan en crisoles de aluminio (Al) (fig 22 (b)). Los barridos se realizaron con una rapidez de calentamiento de $10 \frac{K}{min}$ en un rango de 300 K a 500 K.



(a)

(b)

Fig. 20. Equipo TA Instruments Modelo Q100 Modulated DSC (a) y Crisoles de Aluminio (b) barridos se realizaron con una rapidez de calentamiento

- **Termogravimetría:**

La fig. 22, muestra el equipo utilizado para el análisis termogravimétrico TA Instruments Modelo 2050, en rangos de temperatura comprendidos entre $300 \leq T \leq 600K$ con una rapidez de calentamiento de $10 \frac{K}{min}$ y bajo un flujo permanente de N₂ de aproximadamente $90 \frac{mL}{min}$. Se utilizó para analizar la estabilidad térmica de los compuestos; se pesaron muestras del orden de 5 a 10 mg.

Los componentes del TGA 2050 se ilustran en la fig. 23. La balanza, la cual proporciona medidas precisas del peso de la muestra; la plataforma de la muestra, la cual carga y descarga automáticamente la muestra hacia y desde la balanza; el horno, el cual controla la temperatura y la atmósfera de la muestra; la unidad con el sistema electrónico y mecánico que controlan los procesos térmicos, y el intercambiador de calor, el cual disipa el calor desde el horno.



Fig. 21. Analizador Termogravimétrico

- Micro balanza electrónica y su equipo de control.
- Horno y sensores de temperatura, habitualmente un termopar colocado en las proximidades de la muestra, pero no en contacto con ella.
- Programador de temperatura
- Controlador de la atmósfera
- Dispositivo para almacenar los datos de peso y temperatura fundamentalmente.

5.1.7 Determinación de material volátil de la biomasa utilizada

Los análisis de sólidos totales (ST) y los sólidos volátiles (SV) se realizaron por triplicado, utilizando la misma biomasa usada en la determinación de la humedad. Las muestras de 5 gramos dispuestas en los crisoles se llevaron al horno 35GM GRAVITY OVEN HACH a una temperatura de 105°C por aproximadamente 12 horas. Para el cálculo de sólidos totales se usó la ecuación 5.

$$ST = \frac{(A-B)}{Y} * Z$$

Ecuación 5. Sólidos totales a 105°C

Donde: ST = sólidos totales ($\frac{mg}{L}$)

A = cápsula + muestra 105°C

B = cápsula vacía (g)

Y = volumen muestra (mL)

Z = 10² (muestra analizada sólida)

Para determinar los sólidos volátiles las muestras secas se colocaron en una mufla marca Terrígeno MM12 a una temperatura de 550°C por un tiempo de 4 horas. Con la ecuación 6 se calcularon los sólidos volátiles.

$$SV = \frac{(A-C)}{Y} * Z$$

Ecuación 6. Sólidos volátiles a 550°C

Donde: SV = sólidos volátiles ($\frac{mg}{L}$)

A = cápsula + muestra 105°C

C = cápsula + muestra 550°C

Y = volumen muestra (mL)

Z = 10² (muestra analizada sólida)

5.1.8 Determinación del contenido de carbono fijo y cenizas de la biomasa utilizada

El carbono fijo se utiliza como índice de producción de coque a partir de la madera o del carbón y como una medida del material combustible que queda tras la volatilización de los compuestos ligeros.

El porcentaje de carbono fijo se obtiene por diferencias una vez conocidas los datos de los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil, por lo que se sumaron los porcentajes hallados anteriormente y se restó del 100%.

Se realizó el procedimiento establecido en la norma (ASTM D3172-13). Se utilizó la ecuación 7 para determinar el porcentaje de carbono fijo de cada muestra.

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\% \text{ humedad}) - (\% \text{ materia volátil}) - (\% \text{ cenizas})$$

Ecuación 7. Porcentaje Carbono fijo

El porcentaje de cenizas indica la fracción de residuos inorgánicos que quedaron luego de la ignición u oxidación completa de la materia orgánica. Se realizó el procedimiento establecido en la norma (ASTM D3174-12). Se utilizó la ecuación 8 para conocer el porcentaje de cenizas de cada muestra.

$$\% \text{ Cenizas} = \left(\frac{F}{E} \right) * 100$$

Ecuación 8. Porcentaje de cenizas

Donde: E = Peso muestra inicial, gr de muestra en A.

F = Peso final, gr de muestra después del calentamiento.

5.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LA CONDICIÓN DEL SISTEMA EXISTENTE Y DEFINIR LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA PUESTA EN MARCHA

5.2.1 Medición de la estructura física de los reactores de dos etapas

Haciendo uso de un calibrador pie de rey y de un flexómetro, se procedió a tomar las medidas de las variables altura (h), diámetro interno (Θ) y las distancias al eje de salida de gas y de la mezcla en cada una de las fases de los dos reactores.

Con los valores medidos, se calculó el área de la sección transversal y los volúmenes disponibles y efectivos de cada reactor, así como el volumen del mezclador. En el anexo B, se muestran los valores medidos y calculados.

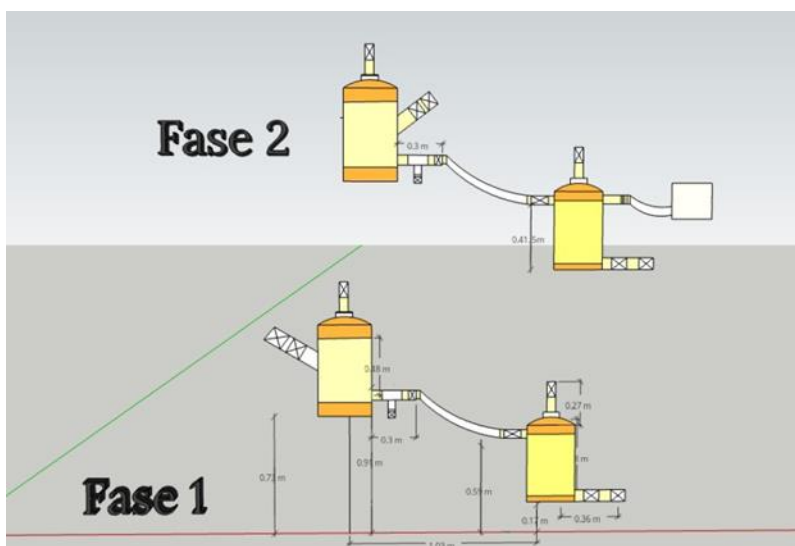


Fig. 22. Montaje reactores de dos etapas

Los reactores de dos fases, provenientes de la investigación doctoral, a cargo del Ingeniero Iván Mauricio Ostos, fueron construidos con tubería y accesorios sanitarios de 4", a ellos se acoplaron tubería y accesorios en PVC de 1-1/2" como se ilustra en las fig. 24 y 25.

Aunque se estimó en los reactores un volumen de trabajo de 3 litros, en el capítulo de resultados se observan los cálculos de los volúmenes efectivos de cada fase en cada uno de los reactores, para lo cual se tuvo en cuenta un diámetro interior de 10,77 cm y alturas variables en cada fase. Los reactores estaban equipados con una entrada de alimentación, un punto de muestreo de líquido, una salida de efluente y una línea de gas conectada al sistema de medición de concentración de gas. El muestreo se realizó teniendo en cuenta la bitácora de muestreo propuesta, la cual se presenta en el Anexo C y se especifica en los resultados.

5.2.2 Cálculo de la tasa de carga orgánica (OLR), tiempo de retención hidráulico (TRH)

La tasa de carga orgánica (OLR) se calculó dividiendo la cantidad de sólidos volátiles (VS) en el sustrato determinados en el ítem 8.1.6 del objetivo anterior, entre el volumen del reactor.

$$OLR = \frac{SV}{Vol\ reactor}$$

Ecuación 9. Tasa de carga orgánica

Donde: SV = cantidad de sólidos volátiles ($\frac{mg}{l}$).

El tiempo de retención hidráulica (HRT) se calculó dividiendo el volumen del reactor por el caudal de entrada.

$$TRH = \frac{Vol\ reactor}{Q\ entrada}$$

Ecuación 10. Tiempo de retención hidráulico

Donde:

Q = caudal de entrada al reactor $\left(\frac{l}{min}\right)$

5.2.3 Mantenimiento e instalación de los reactores de dos etapas existentes.

Los reactores se limpiaron y se tomaron las respectivas medidas para la determinación del volumen de carga antes de instalarlos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR de la Universidad Autónoma de Occidente, como se observa en la fig. 26 y 27. Para instalarlos se tuvo en cuenta las pendientes entre los reactores de cada una de las fases, finalmente se realizó un lavado profundo con agua a presión, esto con el fin de evaluar posibles fugas.



Fig. 23. Medición de los parámetros geométricos de los reactores de dos etapas



Fig. 24. Instalación en la PTAR de los reactores de dos etapas

5.2.4 Puesta en marcha de los reactores de dos etapas existentes.

Una vez instalados los reactores y tan pronto se realizó la prueba hidráulica para determinar posibles fugas, se procedió con la instalación de los dispositivos electrónicos para monitorear las variables relevantes de pH, temperatura y concentración de gas, como se observa en la fig. 27; al igual que se instalaron las bolsas TedLar de 5 litros, las cuales fue necesario importar con el proveedor CEL Scientific Corporation, ubicado en USA, en vista de que a nivel nacional no fue posible adquirirlas.

De igual manera con el cálculo de los parámetros de operación de los reactores Tasa de Carga Orgánica (OLR), relación Carbono Nitrógeno (C/N) y Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), y una vez caracterizada la biomasa, se realizó la respectiva carga para lo cual se propuso por parte del codirector de este trabajo, Ingeniero Iván Mauricio Ostos, una bitácora de carga, como se observa en el Anexo C, la cual permitió el seguimiento de la fase experimental.



Fig. 25. Instalación en la PTAR de los reactores de dos etapas

5.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS FACTORES DE OPERACIÓN PRIORIZADOS.

5.3.1 Hardware utilizado

La elección de componentes para este proyecto se basó en una cuidadosa consideración de varios factores, sus características principales se encuentran detalladas en el anexo C. Aunque existen sensores más costosos en el mercado con condiciones operativas más favorables, la selección se centró en la accesibilidad económica, la facilidad de instalación y la comprensión para personas sin experiencia técnica.

La selección de sensores adecuados es un factor crítico para garantizar la precisión y confiabilidad en la monitorización de biodigestores de dos etapas, la tabla IV, presenta algunos tipos y sus ventajas.

TABLA IIV.
Porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas

Sensor	Rango de Medición (ppm)	Precisión	Ventajas/Desventajas
MQ-4	200 a 10.000 ppm de metano	Moderada	Económico, fácil integración, susceptible a interferencias de otros gases
TGS2611	50 a 10.000 ppm de metano	Alta, mayor sensibilidad	Mayor precisión y sensibilidad, mayor costo y complejidad en la calibración.
MiCS-6814	Detecta metano, CO y otros gases	Alta, multivariable	Detecta múltiples gases, requiere procesamiento adicional, mayor costo.
DS18B20	-55\textdegree C a +125\textdegree C	Alta, digital	Alta precisión digital, fácil de usar, resolución ajustable
DHT22	-40\textdegree C a +125\textdegree C 0 a 100%HR	+/-0.5\textdegree C +/- 2 a 5%HR	Mide temperatura y humedad, menor estabilidad en ambientes extremos.
Arduino E201 BNC	pH 0 - 14	Moderada, depende de calibración	Aplicaciones básicas de bajo costo, menor precisión y estabilidad.
Atlas Scientific pH sensor	pH 0 - 14	Muy alta	Alta precisión y estabilidad, ideal para aplicaciones críticas, costo alto.

- **Sensor MQ4:**

Es un sensor de gas semiconductor diseñado para detectar concentraciones de gas metano (CH₄) en el aire en ppm, debido a que las concentraciones de estos gases en el aire son generalmente muy bajas, y expresarlas en porcentaje no sería práctico ni preciso. Es parte de la serie de sensores MQ fabricada por Winsen Electronics y ampliamente utilizado en aplicaciones de detección de gases en entornos como la seguridad industrial, la detección de fugas de gas, la monitorización ambiental y sistemas de control de calidad del aire.

Como se observa en la fig. 28, el sensor MQ-4 utiliza una capa de material semiconductor sensible al gas metano. Cuando el gas se encuentra en el aire, interactúa con la capa semiconductor, lo que provoca cambios en su resistencia eléctrica, estos cambios en la resistencia eléctrica se convierten en señales eléctricas que se pueden medir y cuantificar para determinar la concentración de gas metano presente en el entorno.

El sensor MQ4 es un sensor electro-químico que varía su resistencia al estar en contacto con el gas metano, gas natural y gas LP. Algunas de sus características principales son:

- Voltaje de operación: 5 V

- Consumo de potencia calorífica: < 750 mW
- Rango de detección: desde 200 ppm a 10.000 ppm
- Tiempo de respuesta: $\leq 10s$



Fig. 26. Sensor MQ4. [71].

- **Sensor de temperatura DS18B20**

El sensor de temperatura DS18B20, fig. 29 utilizado en este proyecto es un sensor digital de alta precisión que utiliza el protocolo One Wire para la comunicación, es ampliamente utilizado en proyectos de monitoreo y control de temperatura debido a su precisión y facilidad de uso. El sensor DS18B20 se utilizó para medir la temperatura en vista de que es un factor crítico en el proceso de DA, ya que puede afectar la actividad de los microorganismos y, por lo tanto, la eficiencia del proceso de descomposición. Monitorizar y controlar la temperatura es esencial para asegurarse de que las condiciones sean óptimas para la producción de biogás.



Fig. 27. Sensor DS18B20. [72]

- **Sensor de pH Arduino E201 BNC**

El sensor de pH para Arduino E201 BNC, que se ve en la fig. 30, es una componente importante para la monitorización de digestores de dos etapas.

Opera según el principio de medición potenciométrica, donde la diferencia de potencial entre dos electrodos se utiliza para determinar el nivel de pH. El electrodo sensible contiene un vidrio especial que reacciona con los iones de hidrógeno en la solución, generando una señal eléctrica proporcional al pH. La sonda generalmente consiste en dos electrodos: uno de referencia saturado con cloruro de plata y otro de vidrio sensible al pH.

Es un sensor de pH diseñado para ser utilizado con placas de desarrollo como Arduino.

Medir el pH en el proyecto de monitoreo de digestores fue esencial para garantizar un proceso biológico eficiente, una concentración de biogás óptima y el funcionamiento adecuado del sistema en general. El control y mantenimiento del pH adecuado son aspectos cruciales para lograr un funcionamiento óptimo, maximizar la concentración de biogás y garantizar la sostenibilidad del proyecto.



Fig. 28. Sensor de pH para Arduino E201 BNC. [73]

- **Módulo ESP32**

Es un microcontrolador de bajo costo y alto rendimiento diseñado por Espressif Systems.

El ESP32 de la fig. 31, desempeñó un papel integral y significativo en el proyecto de monitoreo de digestores, su presencia aportó una plataforma versátil y potente para la adquisición y gestión de datos. Su contribución abarca múltiples aspectos clave que mejoran la eficiencia y la efectividad de la monitorización del proceso.

- Ofrece capacidades de conectividad Wi-Fi, permitiendo la comunicación sin cables con otros dispositivos y con la nube. Esto es esencial para transmitir los datos de medición, como el pH, la temperatura y la concentración de gas, a una plataforma de registro y análisis, como Thing Speak.

- Habilita la recopilación continua de datos desde los sensores y su transmisión a través de la red Wi-Fi en tiempo real. Esto posibilita una monitorización constante y en tiempo real del digestor, permitiendo una toma de decisiones basada en información actualizada.
- Actúa como el puente entre los sensores utilizados para medir pH, temperatura y concentración de gas, y la pantalla LCD que muestra los resultados. Facilita la adquisición de datos, su procesamiento y la presentación visual en la pantalla, brindando una interfaz amigable y comprensible.
- Se programa con facilidad y ofrece una plataforma flexible para desarrollar lógica personalizada. Permite implementar algoritmos de control, establecer umbrales de alarma y realizar ajustes en la frecuencia de medición según las necesidades específicas del proceso de digestión.
- Puede almacenar temporalmente datos antes de enviarlos a la nube, lo que garantiza la integridad de la información en caso de interrupciones temporales de la conectividad. Además, puede utilizar protocolos como MQTT para establecer comunicación bidireccional con plataformas en la nube.
- La combinación de la medición de variables críticas y la transmisión de datos a través del ESP32 empodera a los operadores del digestor con información clave. Esto facilita la toma de decisiones informadas para optimizar el proceso, detectar problemas y minimizar tiempos de inactividad.



Fig. 29. ESP 32. [74].

El ESP32 opera en el conjunto de instrucciones Xtensa LX6 y se basa en una arquitectura RISC de 32 bits. Con su velocidad de reloj ajustable hasta 240 MHz, capaz de manejar tareas complejas de forma eficiente. La presencia de la unidad de procesamiento de señal digital (DSP) amplía su capacidad para aplicaciones que requieren manipulación intensiva de datos, como el procesamiento de señales de los sensores.

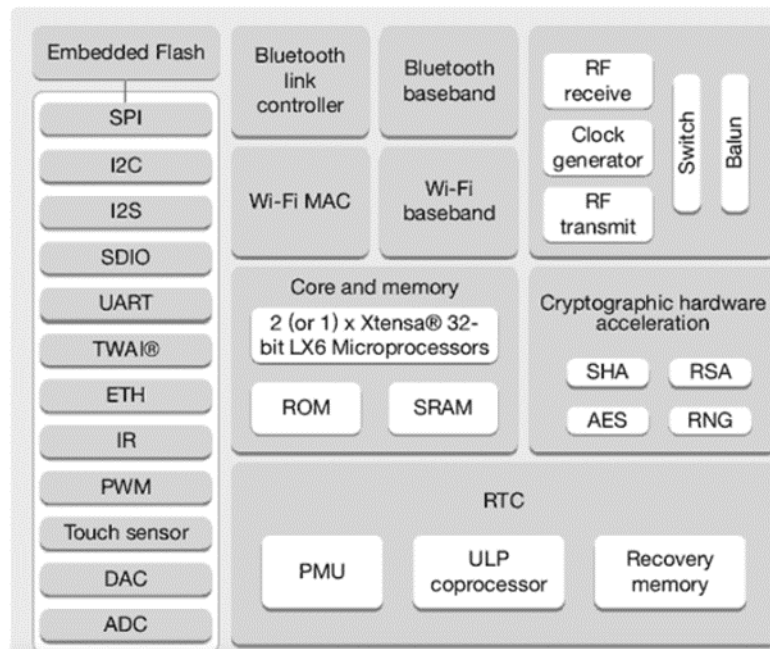
El ESP32 se convierte en el cerebro del sistema de monitoreo, orquestando la recopilación de datos, la comunicación inalámbrica y la interacción con los sensores. Su capacidad de

gestionar múltiples tareas simultáneamente y su conectividad robusta son fundamentales para la operación continua y eficiente del sistema. Además, su eficiencia energética contribuye a la sostenibilidad del proyecto, especialmente en entornos donde la autonomía energética es esencial.

El ESP32 fue un elemento clave en el proyecto, ya que ofreció la potencia y la versatilidad indispensables para la implementación efectiva de un sistema de monitoreo IoT aplicado a los digestores de dos etapas.

En la tabla V, tomada de la hoja de datos, se muestran todos los bloques funcionales que conforman un SoC ESP32.

TABLA V.
Bloques funcionales del ESP32



Nota: se muestran todos los bloques funcionales que conforman un SoC ESP32. [75].

5.3.2 Implementación del sistema de monitoreo

La fig.32, muestra el código de inició con la inclusión de las bibliotecas necesarias para el funcionamiento del dispositivo, como Thing Speak para la comunicación con la plataforma en la nube, Wi-Fi para la conexión a la red, Wire para la comunicación I2C, LiquidCrystal_I2C para el control de la pantalla LCD, One Wire para la comunicación con el sensor DS18B20 y DallasTemperature para el manejo del sensor.

En la sección de configuración (Setup ()), se inicializaron las diferentes bibliotecas y se estableció la conexión Wi-Fi con la red local. Mientras se estableció la conexión, aparecía un mensaje en la pantalla LCD para informar al usuario sobre el proceso en curso. Una vez establecida la conexión, se mostraba un mensaje de confirmación en la pantalla LCD.

En la función loop (), se llaman a tres funciones principales: obtener Nuevo pH (), obtener Temperatura () y obtener Gas Metano (). Estas funciones son responsables de obtener las lecturas de pH, temperatura y concentración de gas metano, respectivamente. En la función obtener Nuevo pH (), se realizaron varias lecturas del sensor de pH y se promediaron para obtener un valor más preciso. Este valor se convirtió luego en el valor de pH utilizando una fórmula específica. El valor de pH calculado se actualizó en la pantalla LCD y se envió a Thing Speak para su registro.

En la función obtener Temperatura (), se solicitó la lectura de temperatura al sensor DS18B20 y se actualizó el valor de temperatura en la pantalla LCD. Este valor también se envió a Thing Speak para su registro.

En la función obtener Gas Metano (), se realizó una lectura del sensor de gas MQ4 y se convirtió en una concentración de gas metano utilizando una fórmula específica. Este valor se actualizó en la pantalla LCD y se envió a Thing Speak para su registro.

Finalmente, en cada iteración del bucle principal, se enviaron los datos recopilados a Thing Speak para su registro en el canal correspondiente.

Este código asegura la adquisición precisa de datos de pH, temperatura y concentración de gas metano, y su registro en la plataforma Thing Speak para su posterior análisis y monitoreo remoto.

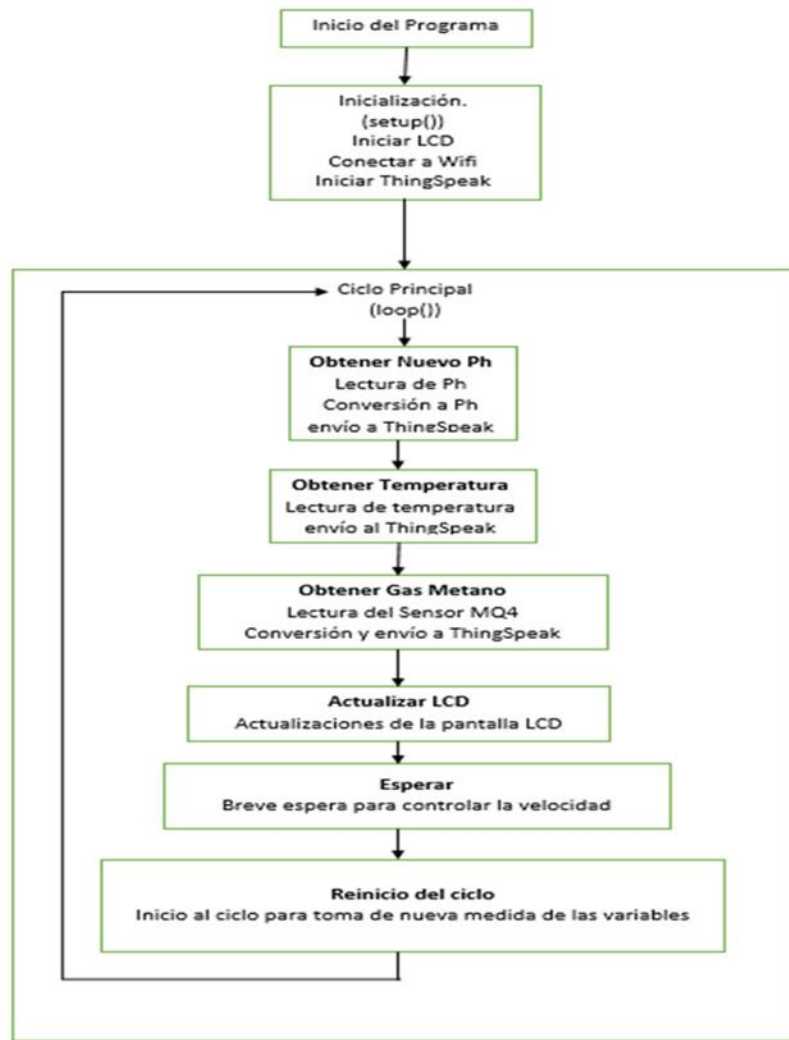


Fig. 30. Diagrama de flujo del proceso de ejecución del algoritmo programado en el ESP-32.

5.3.3 Desafíos y soluciones en la implementación

Durante el desarrollo de este proyecto en la Universidad Autónoma de Occidente en la ciudad de Cali, se enfrentó desafíos que pusieron a prueba la robustez y confiabilidad del sistema de monitoreo. Uno de los desafíos más significativos fue la limitación de acceso a la red Wi-Fi de la universidad debido a restricciones de firewall y medidas de seguridad. Ante esta limitación, se implementó una solución ingeniosa al utilizar un teléfono celular como punto de acceso Wi-Fi. Aunque esto permitió establecer la conexión, la inestabilidad de la red celular, resultó en desconexiones frecuentes y pérdida de datos valiosos.

La elección de sensores económicos también presentó desafíos. En particular, los sensores de pH y MQ₄ en ambas fases del digestor tuvieron una vida útil limitada y requerían cambios periódicos.

En la fase 2, el sensor de pH se reemplazó tres veces, mientras que en la fase 1 se reemplazó dos veces, del mismo modo, el sensor MQ4 tuvo tres cambios en la fase 2 y dos en la fase 1. Aunque estos sensores económicos eran propensos a alcanzar su límite operativo, se resalta que el sensor de temperatura DS18B20 demostró ser excepcionalmente confiable y no requirió ningún reemplazo durante los cinco meses de pruebas.

Otro desafío común fue la necesidad de reiniciar los dispositivos de monitoreo, principalmente debido a las peculiaridades del hardware en la etapa de prototipo. Esta situación, aunque planteó inconvenientes temporales, fue manejada mediante procedimientos de reinicio rutinarios.

5.4 OBJETIVO ESPECÍFICO 4: DESARROLLAR E IMPLEMENTAR UNA HERRAMIENTA DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS.

5.4.1 Selección del protocolo de comunicaciones y plataforma de visualización

- **Wi-Fi (Protocolo de Comunicación Inalámbrica):** el dispositivo se conecta a una red Wi-Fi utilizando el protocolo IEEE 802.11. Esto le permite comunicarse con otros dispositivos en la misma red y acceder a Internet. En este caso, se utilizó para conectarse a Thing Speak y enviar los datos recopilados a través de la conexión Wi-Fi.
- **One Wire (Protocolo de Comunicación Serie):** el protocolo One Wire se utilizó para comunicarse con el sensor de temperatura Dallas DS18B20. Es un protocolo de comunicación de un solo cable que permite la transferencia de datos entre el microcontrolador y el sensor.
- **I2C (Protocolo de Comunicación en Serie):** el protocolo I2C se utilizó para comunicarse con la pantalla LCD utilizando el chip convertidor de interfaz I2C. Permite la comunicación entre el microcontrolador y la pantalla LCD utilizando solo dos cables, lo que reduce la complejidad de la conexión.
- **Thing Speak (Protocolo HTTP/HTTPS):** es una plataforma en la nube que utiliza el protocolo HTTP o HTTPS para enviar y recibir datos. El dispositivo utiliza una biblioteca proporcionada (Thing Speak.h) para establecer una conexión con Thing Speak a través de la red Wi-Fi y enviar los valores medidos de pH, temperatura y concentración de gas metano a través de solicitudes HTTP/HTTPS.
- **Serial (Comunicación Serie):** se utilizó para la depuración y el monitoreo del dispositivo a través del puerto serie (puerto UART). El dispositivo puede enviar datos y mensajes a un PC u otro dispositivo compatible con comunicación serie, lo que facilita la depuración y el seguimiento del funcionamiento del dispositivo. En la fig. 33 se observa el sistema de monitoreo con sus respectivos módulos de comunicaciones.



Fig. 31. Sistema de monitoreo ubicado en ambas etapas del reactor

5.4.2 Programación y desarrollo algorítmico del sistema

La fig. 34 describe la lógica para leer datos de sensores (pH, temperatura y concentración de gas metano) y enviarlos a Thing Speak, una plataforma de Internet de las Cosas (IoT). El código utilizó una pantalla LCD para mostrar los valores de los sensores y se comunicó con una red Wi-Fi para cargar los datos a Thing Speak.

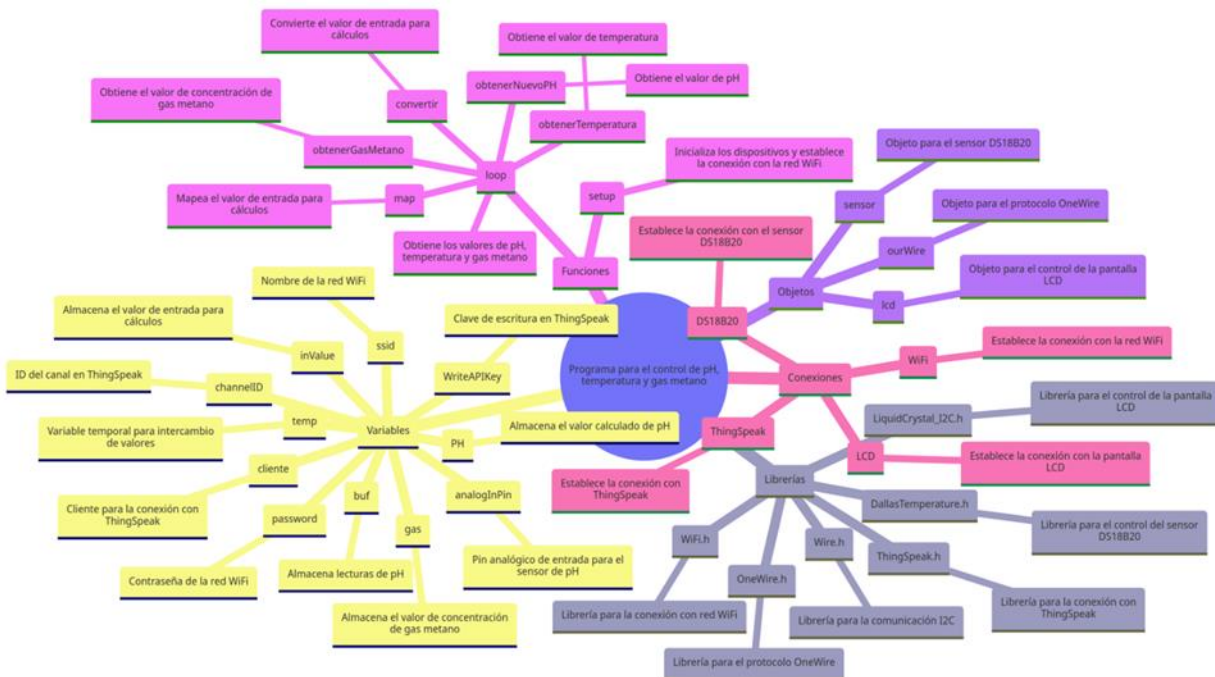


Fig. 32. “Estructura de librerías, variables, funciones y objetos del código programado en el ESP-32”

5.4.3 Selección del ambiente para visualizar los datos

En la fig. 35, se observa que Thing Speak es una plataforma de IoT que permite a los usuarios recopilar, almacenar, analizar y visualizar datos en tiempo real provenientes de una variedad de dispositivos y sensores, está diseñada para facilitar la creación de aplicaciones y proyectos relacionados con IoT. Las principales funciones de la herramienta en este proyecto.

Los sensores instalados en las diferentes etapas del digestor, como el de pH, temperatura y concentración de gas metano, continuamente generaron datos. Estos datos se leyeron periódicamente y se enviaron a Thing Speak para su almacenamiento y análisis, donde se configuraron canales individuales para cada sensor en cada una de las etapas del digestor. Cada canal presentó campos específicos para los datos recopilados, un campo para el sensor de pH, otro para la temperatura y otro para la concentración de gas metano.

Se utilizó el protocolo HTTP/HTTPS para enviar los datos recopilados desde un dispositivo a Thing Speak, esto se realizó mediante solicitudes POST a la API de Thing Speak, los datos fueron empaquetados en el formato adecuado y enviados a los campos correspondientes en los canales.

Con los datos en Thing Speak, se accedió a la plataforma y visualizó los valores en tiempo real. Thing Speak ofrece una interfaz de usuario para ver los gráficos y tablas que representan los datos de los sensores. Esto le permitió monitorear el estado del digestor y detectar cualquier cambio o tendencia. Se accedió a los datos y las visualizaciones de Thing Speak desde cualquier lugar con conexión a Internet. Esto fue útil para monitorear el digestor de forma remota o compartir información con otros colaboradores.

Se utilizó los datos recopilados y los análisis proporcionados por Thing Speak, para tomar decisiones informadas y optimizar el proceso de digestión en el digestor. Por ejemplo, ajustar las condiciones de pH o temperatura en función de los resultados obtenidos.

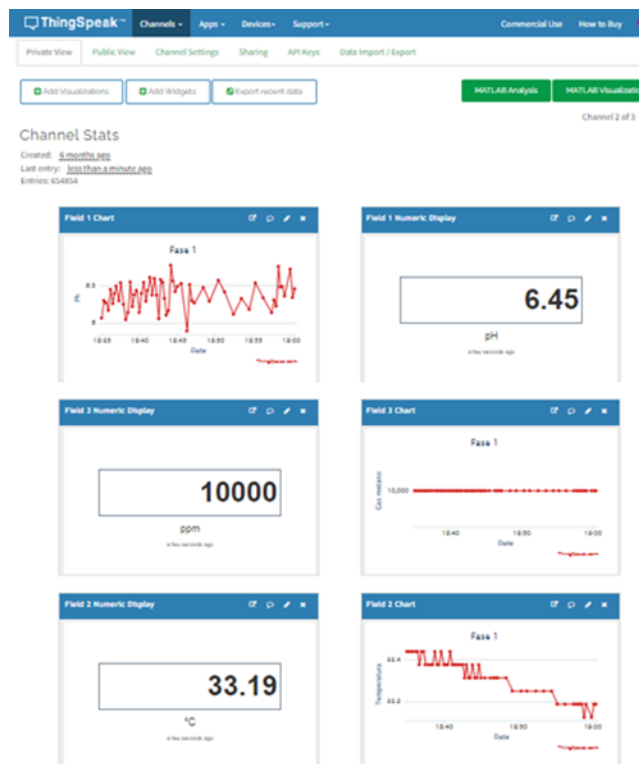


Fig. 33. “Plataforma Thing Speak con el sistema de monitoreo para evaluar el rendimiento de reactores de dos etapas”.

5.4.4 Validación de la plataforma

Para validar el buen funcionamiento del dispositivo y asegurarse de que recopilará y enviará datos de manera precisa y confiable, se estableció los siguientes pasos:

- **Verificación de sensores:** se verificó que los sensores estuvieran conectados correctamente y en buenas condiciones, se calibró inicialmente los sensores, siguiendo las instrucciones del fabricante y se verificó que los valores reportados fueran coherentes con las condiciones reales del digestor.
- **Prueba de conexión Wi-Fi:** se verificó que el dispositivo estuviera conectado a la red Wi-Fi y con acceso a Internet, igualmente que los datos se enviaran correctamente a Thing Speak. Se monitoreo el canal en Thing Speak y se aseguró de que los valores se actualizarán de acuerdo con las mediciones en tiempo real.
- **Comparación con mediciones manuales:** se realizó mediciones manuales de pH y temperatura en diferentes momentos y se comparó con los valores registrados por los sensores, las cuales fueron consistentes y cercanas en magnitud.

- **Monitoreo continuo:** se validó el funcionamiento de los sensores durante un período prolongado y monitoreo continuo de los valores registrados y enviados a Thing Speak. Se realizó comparaciones regulares entre las mediciones del dispositivo y las mediciones manuales para detectar cualquier desviación.
- **Pruebas de estabilidad:** se expuso el dispositivo a situaciones de estrés controladas, como cambios bruscos en la temperatura o variaciones en los niveles de pH, se observó la respuesta del dispositivo y se verificó que los valores registrados fueron coherentes.
- **Pruebas de reinicio y recuperación:** se realizó pruebas de reinicio en el dispositivo y verificó su recuperación, la reconexión a la red Wi-Fi y envío de datos a Thing Speak.
- **Análisis de datos históricos:** se utilizó Thing Speak para identificar patrones o tendencias inusuales que podrían indicar un mal funcionamiento.
- **Comparación con referencias conocidas:** se comparó los resultados del dispositivo con referencias externas conocidas y confiables para validar la precisión de las mediciones.

Se debe recordar que la validación es un proceso continuo e importante para llevar a cabo pruebas periódicas que aseguren que el dispositivo funcione correctamente a lo largo del tiempo y en diferentes condiciones.

5.4.5 Plataforma de análisis de datos Power Bi

La elección de la plataforma de análisis de datos fue una decisión que impactó directamente en la calidad y eficacia de la interpretación de los resultados obtenidos del monitoreo de digestores de dos etapas.

- **Visualización intuitiva y dinámica:** Power BI ofrece un entorno visual intuitivo que facilita la creación de informes y paneles dinámicos. [40]. Esta capacidad fue esencial al trabajar con conjuntos de datos masivos, como los más de 700,000 registros recopilados de pH, temperatura y concentración de gas metano. La capacidad de representar visualmente datos complejos de manera clara y comprensible simplificó la identificación de patrones, tendencias y relaciones entre las variables. [76].
- **Escalabilidad y manejo eficiente de grandes volúmenes de datos:** el volumen considerable de datos recolectados demandó una plataforma capaz de manejar grandes cantidades de información, y que también ofreciera un rendimiento eficiente. [47]. Power Bi, con su capacidad de procesamiento en la nube y optimización para conjuntos de datos extensos, garantizó una experiencia de usuario fluida y sin compromisos en términos de velocidad y rendimiento.[76].

- Integración con diversas fuentes de datos: Power Bi permitió la integración fluida de datos desde diversas fuentes, lo cual fue esencial en el proyecto de monitoreo de digestores.[76]. Al consolidar datos de variables biológicas, físicas y químicas en un solo entorno, se facilitó una comprensión holística del sistema y la identificación de correlaciones complejas entre las variables medidas. [51].
- Análisis avanzado y herramientas estadísticas: la plataforma Power BI proporcionó una gama de herramientas estadísticas y funciones analíticas avanzadas que potenciaron el análisis de datos. [76]. Esto fue crucial para la identificación de patrones no evidentes a simple vista y para la generación de insights valiosos que podrían pasar desapercibidos con enfoques analíticos convencionales.
- Flexibilidad en la presentación de resultados: el diseño y la personalización flexibles de informes y Dash boards en Power Bi ofreció la capacidad de adaptarse a las necesidades específicas de los usuarios y a los requisitos cambiantes del proyecto. [76]. Esto facilitó la comunicación efectiva de resultados, para la toma de decisiones.
- Actualizaciones en tiempo real: la posibilidad de realizar actualizaciones en tiempo real en Power Bi garantizó que los datos más recientes estén siempre disponibles para el análisis.[76]. En un contexto de monitoreo continuo, esta capacidad es esencial para evaluar tendencias y tomar decisiones informadas de manera oportuna.
- Accesibilidad con versión gratuita: como se observa en la fig. 36, Power BI ofrece una versión gratuita, que cumple con los requerimientos fundamentales para el proyecto. Esto fue esencial, ya que demostró la robustez y versatilidad de la plataforma, también proporcionó herramientas y capacidades cruciales para el análisis de datos, permitiendo una evaluación efectiva del rendimiento de los reactores de dos etapas. La accesibilidad financiera de esta versión contribuyó a la viabilidad y sostenibilidad del monitoreo, [76].

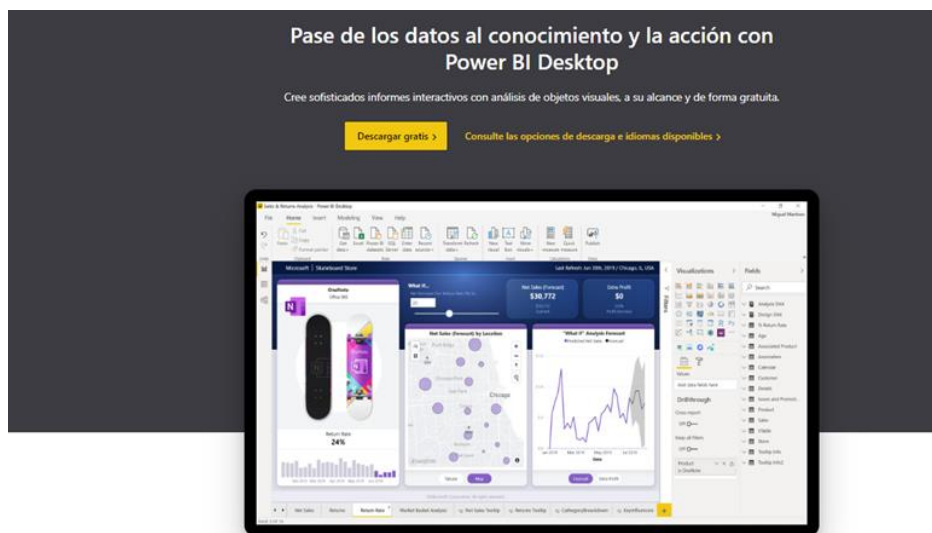


Fig. 34. Página oficial de descarga programa Power Bi.

5.4.6 Plataforma para la ciencia de datos Python

Python es un lenguaje de programación ampliamente utilizado en el análisis de datos, incorporado en este proyecto debido a su versatilidad, capacidad de manejo de grandes volúmenes de información, esencial en el análisis, modelado y visualización de las variables monitoreadas en los digestores de dos etapas. Los principales aportes de Python en este proyecto fueron:

Procesamiento y limpieza de datos:

- Librerías utilizadas: pandas, numpy: e utilizó para procesar y limpiar los datos recolectados por los sensores de temperatura, pH y concentración de biogás. Estas tareas incluyen la detección y eliminación de valores atípicos, manejo de datos faltantes y normalización de variables para su análisis posterior.

- Análisis estadístico: permitió realizar análisis de correlaciones (Pearson y Spearman) entre las variables monitoreadas, que permitieron identificar relaciones significativas entre parámetros como la temperatura y concentración de biogás, así como el impacto del pH en la estabilidad del sistema.

- **Visualización de datos:**

- Librerías utilizadas: matplotlib, seaborn, plotly.

- Se generaron gráficos avanzados, como diagramas de dispersión, mapas de calor de correlaciones y gráficas de series temporales, para complementar los análisis realizados en Power Bi, que permitieron una comprensión más profunda de los datos y facilitaron la comunicación de los resultados.

- **Ventajas de usar Python en este proyecto**

Flexibilidad: Python permitió realizar análisis personalizados y adaptar los métodos a las necesidades específicas del proyecto.

Escalabilidad: permitió manejar grandes volúmenes de datos generados por los sensores en tiempo real.

Reproducibilidad: los scripts generados son fácilmente replicables, lo que garantiza que otros investigadores puedan validar y ampliar los análisis [77].

5.4.7 Características de los datos

Los datos obtenidos para este proyecto fueron de vital importancia para entender el rendimiento de los digestores de dos etapas, se descargaron en Thing Speak en formato CSV, estos archivos contenían información detallada sobre fecha, hora y las mediciones de temperatura, pH y concentración de gas metano como se observa en la fig. 37. Desde el 15 de marzo de 2023 hasta el 15 de agosto de 2023, se realizaron capturas de datos cada 15 segundos, generando así una cantidad significativa de información para el análisis.

Los datos recopilados en el proyecto ascendieron a 694,111 para la fase 1 y 573,216 para la fase 2. Debido a la naturaleza continua del proceso de monitoreo, estos datos presentaron información no solo sobre las variables monitoreadas, sino también sobre eventos relacionados con el mantenimiento de los equipos, cambios de sensores, ajustes y reparación en los digestores, así como fallos en los sensores.

Este conjunto de datos, se sometió a un proceso de filtrado para eliminar observaciones no pertinentes, enfocando así el análisis en eventos y condiciones directamente relacionados con el rendimiento de los digestores. Esta depuración garantizó que las correlaciones y conclusiones extraídas estén directamente vinculadas a las condiciones operativas normales.

El análisis de esta cantidad de datos fue esencial para la validación de patrones de comportamiento, la identificación de correlaciones significativas entre variables y la evaluación del rendimiento global de los digestores. Este enfoque basado en datos respaldó las conclusiones del proyecto. La continuidad en la toma de datos durante todas las horas del día proporcionó una visión holística, considerando las variaciones en el entorno y la influencia de factores temporales en el proceso de concentración de biogás.

created_at	entry_id	field1	field2	field3	latitude	longtude	elevation	status
2023-01-14T15:30:32-05:00	1	3.82534	123.75	0				
2023-01-14T15:36:21-05:00	2	3.83223	-127	446				
2023-01-14T15:36:38-05:00	3	3.02149	-127	429				
2023-01-14T15:37:04-05:00	4	2.8791	-127	999				
2023-01-14T15:37:20-05:00	5	3.36294	25	138				
2023-01-14T15:52:09-05:00	6	16.82774	-127	363				
2023-01-14T15:52:34-05:00	7	19.80647	-127	480				
2023-01-14T15:52:39-05:00	8	15.80571	-127	449				
2023-01-14T15:52:55-05:00	9	16.50008	-127	343				
2023-01-14T15:53:11-05:00	10	19.49269	-127	371				
2023-01-14T15:54:14-05:00	11	19.75221	-127	183				
2023-01-14T15:54:32-05:00	12	21.34	-127	324				
2023-01-14T15:54:53-05:00	13	20.28505	-127	435				
2023-01-14T15:55:25-05:00	14	5.60375	-127	454				
2023-01-14T15:56:17-05:00	15	2.93958	-127	340				
2023-01-14T15:56:33-05:00	16	2.92733	-127	498				
2023-01-14T15:56:49-05:00	17	2.53459	-127	397				
2023-01-14T15:57:04-05:00	18	2.62493	-127	399				
2023-01-14T15:57:26-05:00	19	2.62416	-127	396				
2023-01-14T15:57:52-05:00	20	2.65708	-127	999				
2023-01-14T15:58:08-05:00	21	2.85537	26.0625	0				
2023-01-14T15:58:25-05:00	22	2.81403	26.125	69				
2023-01-14T15:58:44-05:00	23	3.37136	26.125	858				

Fig. 35. Archivo plano que se descarga de Thing Speak.

5.4.8 Aplicaciones avanzadas en ciencia de datos y tecnologías afines

- Índice de correlación de Pearson: utilizado como técnica estadística para cuantificar la relación lineal entre variables como pH, temperatura y concentración de gas metano. Esta métrica proporcionó información sobre la fuerza y dirección de la asociación, punto de partida para comprender las interdependencias básicas.
- Segmentación temporal y análisis de tendencias: la presentación de los datos en segmentos temporales más pequeños y el análisis de tendencias a lo largo del tiempo, revela patrones estacionales, ciclos de concentración y cambios a largo plazo en el rendimiento de los digestores.
- Clasificación de eventos específicos: el uso de modelos de clasificación para identificar eventos específicos, como cambios en la biomasa o la introducción de nuevos sustratos, facilita la correlación de eventos particulares con variaciones en las variables medidas.
- Análisis de series temporales avanzado: aplicar técnicas avanzadas de análisis de series temporales para comprender mejor la dinámica del comportamiento de las variables monitoreadas a lo largo del tiempo, identificando ciclos, patrones estacionales y cambios graduales.
- Correlación de Spearman: mide la relación monotónica (a medida que una variable aumenta, la otra también lo hace o disminuye) entre dos variables, pero no necesariamente de manera constante o lineal. Se utilizó cuando las variables relacionadas de manera monotónica pero no necesariamente de forma lineal, presentaron estas tendencias en los datos, pero no siguen una relación estrictamente lineal.

Estas aplicaciones y modelos estadísticos avanzados, representan solo una fracción de las posibilidades que ofrece la integración de tecnologías de ciencia de datos en el monitoreo de digestores. La elección de los índices de correlación de Pearson y Spearman establece una base sólida para evaluar las relaciones iniciales entre las variables monitoreadas, además de los análisis de series temporales tanto generales como diarios ofrecieron información importante de la dinámica del digestor.

5.4.9 Correlaciones de las variables estudiadas.

- Uso del índice de correlación de Pearson: es una herramienta estadística que evalúa la relación lineal entre dos variables cuantitativas. La ecuación 11, representa la covarianza de las dos variables dividida por el producto de sus desviaciones estándar, se expresa matemáticamente así:

$$r_{xy} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Ecuación 11. Coeficiente de correlación

Donde:

r_{xy} = coeficiente de correlación.

Cov (X, Y) = covarianza entre las variables.

$\sigma_x \sigma_y$: desviación estándar de X y Y, respectivamente.

El resultado de esta fórmula proporciona un valor r que oscila entre -1 y 1. Un valor de 1 indica una correlación positiva perfecta, -1 indica una correlación negativa perfecta, y 0 sugiere falta de correlación.

Aporte del índice de correlación de Pearson en el proyecto:

Quantificación de relaciones lineales: el índice de correlación de Pearson permitió cuantificar la relación lineal entre variables monitoreadas como pH, temperatura y concentración de gas metano. Proporcionó una medida de la fuerza y la dirección de estas asociaciones.

Identificación de dependencias y tendencias: al aplicar el índice a los datos recolectados, se identificó dependencias entre las variables monitoreadas, un alto coeficiente de correlación positiva entre la temperatura y la concentración de gas metano, infiere que a medida que la temperatura aumenta, la concentración de gas tiende a aumentar.

Base para análisis predictivos: las correlaciones identificadas se utilizaron como base para modelos predictivos más complejos, una alta correlación entre la temperatura y la concentración de gas podría alimentar modelos de predicción de concentración en función de la temperatura.

- Uso del índice de correlación de Spearman: es una medida estadística no paramétrica que evalúa la relación entre dos variables. A diferencia de la correlación de Pearson, esta correlación no considera que las variables sigan una distribución normal y es menos sensible a valores atípicos. La correlación de Spearman se basa en el concepto de rangos, en lugar de utilizar los valores reales de las variables, asigna rangos a esos valores y luego calcula la correlación entre esos rangos.

- Explicación matemática.

Asignación de rangos: Para cada variable, se ordenan los datos y se les asigna un rango. Si hay empates, se asigna el rango promedio a los valores empatados.

Diferencia de rangos: Luego, se calcula la diferencia entre los rangos de las dos variables para cada observación.

Cuadrado de las diferencias: Se elevan al cuadrado estas diferencias.

Suma de los cuadrados de las diferencias: Se suman todas las diferencias al cuadrado.

Cálculo del coeficiente de correlación de Spearman, se utiliza la ecuación 12.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum di^2}{n(n^2-1)}$$

Ecuación 12. Coeficiente de correlación de Pearson

Donde:

ρ = coeficiente de correlación de Spearman.

D_i = diferencias entre los rangos de las dos variables.

n = número total de observaciones.

- Aporte del índice de correlación de Pearson en el proyecto:

Robustez: la correlación de Spearman es robusta frente a valores atípicos, lo cual fue crucial cuando los datos contenían observaciones extremas.

No paramétrica: al ser no paramétrica, no asume ninguna distribución específica en los datos. Esto es beneficioso cuando las condiciones para la correlación de Pearson no se cumplen.

- Relaciones monotónicas: evalúa las relaciones monotónicas, lo que significa que puede detectar patrones de aumento o disminución, incluso si no son estrictamente lineales.

La correlación de Spearman es una herramienta útil para analizar datos que podrían no ajustarse a una distribución normal o contener valores atípicos. Su enfoque basado en rangos y su capacidad para detectar relaciones monotónicas la hacen útil para este proyecto.

5.4.10 Descripción de la organización de datos en Power BI de las variables de estudio.

El sistema de monitoreo implementado para los digestores de dos etapas está respaldado por un Dashboard intuitivo que facilita la visualización y análisis de los datos recopilados. La fig. 38 presenta una representación visual de la primera página del Dashboard, el cual se

estructura para proporcionar una visión completa del rendimiento de los digestores a lo largo del tiempo.

- Características principales:

Segmentación temporal: en la parte superior derecha del Dashboard, se encuentran páginas desplegables que permiten segmentar la información temporalmente. Desde trimestres hasta días, esta funcionalidad permite analizar los datos en intervalos específicos, facilitando una evaluación detallada de las tendencias y cambios en el comportamiento de las variables.

Gráficas principales: las tres gráficas ubicadas en la parte central del Dashboard representan las variables monitoreadas: pH, concentración de gas metano y temperatura en función del tiempo. Cada gráfica ofrece una visualización clara y detallada de la evolución de estas variables a lo largo del proyecto.

Análisis cuantitativo: en la parte superior izquierda, se presentan tres ventanas con valores numéricos, estos representan el promedio de cada variable según la segmentación temporal seleccionada y proporcionan una visión instantánea del comportamiento de las variables en el período de interés.

Estructura y análisis: el Dashboard se concibe para ser una herramienta de análisis integral. La estructura jerárquica, con la posibilidad de segmentación temporal, permite un enfoque escalonado en la revisión de datos. El usuario puede comenzar con una visión general y, a medida que se identifican patrones específicos, profundizar en segmentos temporales más estrechos.

Interpretación analítica: la combinación de gráficas y valores numéricos posibilita una mejor interpretación analítica. El usuario puede observar las tendencias generales en las gráficas y, al mismo tiempo, obtener información cuantitativa instantánea con los valores promedio.

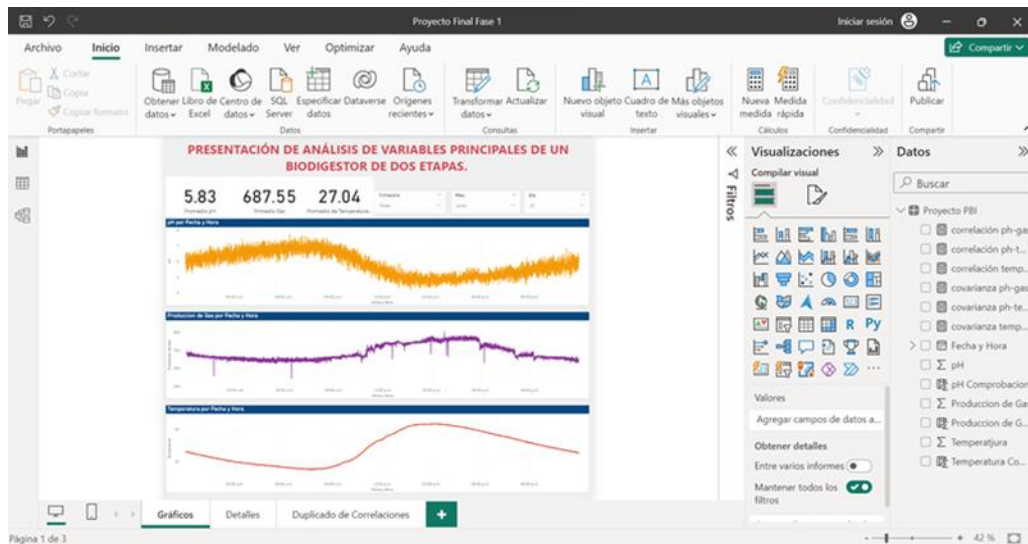


Fig. 36. Primera página del Dashboard diseñado en Power Bi.

- Análisis detallado del cálculo de covarianza en DAX (Data Analysis Expressions):

El cálculo de la covarianza entre el pH y la concentración de gas en el conjunto de datos 'Proyecto PBI' se realizó utilizando el lenguaje DAX en Power BI como se observa en la fig. 39. Este cálculo permitió evaluar la relación lineal entre estas dos variables y comprender mejor su comportamiento. Este cálculo se realizó por cada variable que necesita ser correlacionada, en la fig. 39 se presenta el cálculo de los datos de pH y concentración de gas, pero también se realiza para calcular la covarianza entre temperatura y concentración de gas y temperatura y pH solo cambiando las variables.

```

1 covarianza ph-gas =
2   var _conteo=COUNTRONS('Proyecto PBI')
3   var _Avg1= AVERAGEX('Proyecto PBI','Proyecto PBI'[pH Comprobacion])
4   var _Avg2 =AVERAGEX('Proyecto PBI','Proyecto PBI'[Produccion de Gas Comprobacion])
5   var _tablaintermedia=
6   ADDCOLUMNS(
7     'Proyecto PBI',
8     "Covarianza",
9     DIVIDE(
10      ('Proyecto PBI'[pH Comprobacion]-_Avg1)*
11      ('Proyecto PBI'[Produccion de Gas Comprobacion]-_Avg2),
12      _conteo)
13   Return
14   SUPX(_tablaintermedia,[covarianza])
15

```

Fig. 37. Cálculo de la covarianza utilizando lenguaje DAX.

Explicación paso a paso:

- Definición de Variables:

_Conteo: Calcula el número total de filas en el conjunto de datos 'Proyecto PBI'.

_Avg1: Calcula el promedio del pH en el conjunto de datos.

_Avg2: Calcula el promedio de la concentración de gas en el conjunto de datos.

- Creación de tabla intermedia:

_tabla intermedia: Utiliza la función ADDCOLUMNS para agregar una columna llamada "Covarianza" a 'Proyecto PBI'. Usando la ecuación 13, se calcula la covarianza para cada fila.

$$\text{Covarianza} = \text{DIVIDE} ((\text{'Proyecto PBI'}[\text{pH Comprobación}] - _Avg1) * (\text{'Proyecto PBI'}[\text{Producción de Gas Comprobación}] - _Avg2), _Conteo)$$

Ecuación 13. Covarianza

En la fórmula 12, se resta el promedio de pH (_Avg1) de cada valor de pH y el promedio de concentración de gas (_Avg2) de cada valor de concentración de gas. Luego, se multiplican estos resultados y se dividen por el número total de filas en el conjunto de datos.

- Cálculo Final

Utilizando la función SUMX, se suma la columna de covarianza en la tabla intermedia. Esto da como resultado la covarianza total entre pH y concentración de gas en el conjunto de datos.

- Explicación del cálculo del índice de correlación de Pearson.

El código de la fig. 40 y la ecuación 14, proporcionan el cálculo del índice de correlación de Pearson entre las variables pH y concentración de gas en el conjunto de datos 'Proyecto PBI'. Este índice mide la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables. Este método se aplica también a las variables temperatura - concentración de gas y temperatura - pH.

```
1 correlación ph-gas = |
2 DIVIDE([covarianza ph-gas],
3 STDEV.P('Proyecto PBI'[pH Comprobacion])*
4 STDEV.P('Proyecto PBI'[Produccion de Gas Comprobacion]),0)
```

Fig. 38. Cálculo del índice de correlación de Pearson utilizando lenguaje DAX.

correlación pH – gas
 = *DIVIDE* ([*covarianza pH*
 – *gas*], *STDEV.P*('Proyecto PBI'[*pH Comprobación*])
 * *STDEV.P*('Proyecto PBI'[*Producción de Gas Comprobación*]), 0):

Ecuación 14. Correlación

Define una nueva medida llamada "correlación pH-gas" que representa el índice de correlación de Pearson.

Utiliza la función *DIVIDE* para realizar la división de dos valores.

DIVIDE ([*covarianza pH-gas*], divide el valor de la covarianza calculada previamente.

STDEV.P ('Proyecto PBI'[*pH Comprobación*]): Calcula la desviación estándar poblacional del pH en el conjunto de datos.

STDEV.P ('Proyecto PBI'[*concentración de Gas Comprobación*]): Calcula la desviación estándar poblacional de la concentración de gas en el conjunto de datos.

La desviación estándar permite el cálculo del índice de correlación de Pearson, el cual se obtiene dividiendo la covarianza entre el producto de las desviaciones estándar de las dos variables.

El índice de correlación de Pearson varía entre -1 y 1, un valor cercano a 1 indica una correlación positiva fuerte, un valor cercano a -1 indica una correlación negativa fuerte, un valor cercano a 0 indica una correlación débil o nula.

Este código permite cuantificar y comprender la relación lineal entre las variables monitoreadas del proceso de DA, brindando información útil para el análisis estadístico en el proyecto.

- Página dos del Dashboard: Exploración detallada

En la segunda página del Dashboard de la fig. 41, se mantiene la estructura visual de indicadores en la parte superior, proporcionando promedios de las tres variables clave: pH, concentración de gas y temperatura. Al igual que en la página anterior, se presentan indicadores desplegados para segmentar la información en trimestres, meses y días, permitiendo un análisis temporal detallado.

La característica destacada en esta ventana es la tabla dinámica que presenta una estructura de columnas con fechas y variables medidas. Esta tabla se convierte en una herramienta útil para explorar y profundizar en la data que permite:

Segmentación temporal precisa: los indicadores desplegable facilitan la selección de datos específicos en trimestres, meses o días, brindando la capacidad de explorar y analizar información en unidades de tiempo específicas.

Filtrado personalizado: la tabla es completamente interactiva, permitiendo aplicar filtros según sus necesidades. Pueden seleccionar variables específicas y obtener medidas numéricas fijas para un análisis cuantitativo detallado.

Visión global y numérica: la tabla proporciona una visión global de las variables medidas, pero también presenta valores numéricos específicos en unidades de tiempo designadas, esto facilita la interpretación y comprensión de las tendencias y comportamientos a lo largo del tiempo.

Esta página del Dashboard, mostrada en la fig. 41, proporciona una herramienta robusta para la exploración de los datos, permitiendo ajustar el análisis de acuerdo con las necesidades específicas del usuario. La integración de indicadores visuales y una tabla interactiva facilita la comprensión y el análisis de las variables clave en los reactores de dos etapas.

Fecha y Hora	pH	Producción de Gas	Temperatura
05/05/2023 12:00:03 a.m.	4.79	171.00	28.88
05/05/2023 12:00:20 a.m.	4.52	168.00	28.88
05/05/2023 12:00:36 a.m.	4.86	164.00	28.88
05/05/2023 12:00:52 a.m.	4.60	166.00	28.88
05/05/2023 12:01:09 a.m.	4.69	164.00	28.88
05/05/2023 12:01:26 a.m.	4.38	178.00	28.88
05/05/2023 12:01:42 a.m.	4.47	166.00	28.88
05/05/2023 12:01:59 a.m.	4.66	164.00	28.88
05/05/2023 12:02:16 a.m.	4.85	164.00	28.94
05/05/2023	4.73	168.00	28.88
Total	4.78	2324.99	29.37

Fig. 39. Presentación del análisis de variables de un reactor de dos etapas

- Página tres del Dashboard: Análisis de correlación

La tercera página del Dashboard constituye un elemento esencial, permite el traslado de un análisis cualitativo a uno cuantitativo respaldado por fundamentos matemáticos. Al igual que en las páginas anteriores, se mantienen los menús desplegables para la segmentación de datos por trimestres, meses y días.

En la sección izquierda de esta página, se presentan seis indicadores numéricos para el análisis de correlación de Pearson. Tres de estos indicadores corresponden a la covarianza entre las variables temperatura y concentración de gas, pH y concentración de gas, y temperatura y pH. Como se revisó previamente, la covarianza permite el cálculo de la correlación de Pearson y revela como las variables fluctúan juntas, el cálculo de la covarianza permite comprender la variabilidad de la temperatura, pH y concentración de gas metano. Los otros tres indicadores representan la correlación entre temperatura y concentración de gas, pH y concentración de gas, y temperatura y pH. La escala de estos indicadores oscila entre -1 y 1, donde 1 indica una correlación directa fuerte, -1 una correlación inversa fuerte y 0 una correlación nula.

En la parte derecha, hay una representación gráfica que ofrece una visión más tangible de la correlación. Tres planos representan la relación entre temperatura y concentración de gas, pH y concentración de gas, y temperatura y pH. La dispersión de puntos en estos planos revela la fuerza y dirección de la correlación. En el caso de baja dispersión, los puntos se alinean cerca de una línea recta, indicando una correlación fuerte como se ve en la fig. 42, en casos de alta dispersión, la falta de un patrón común entre las variables reflejará puntos dispersos, como se ve en la fig. 43.

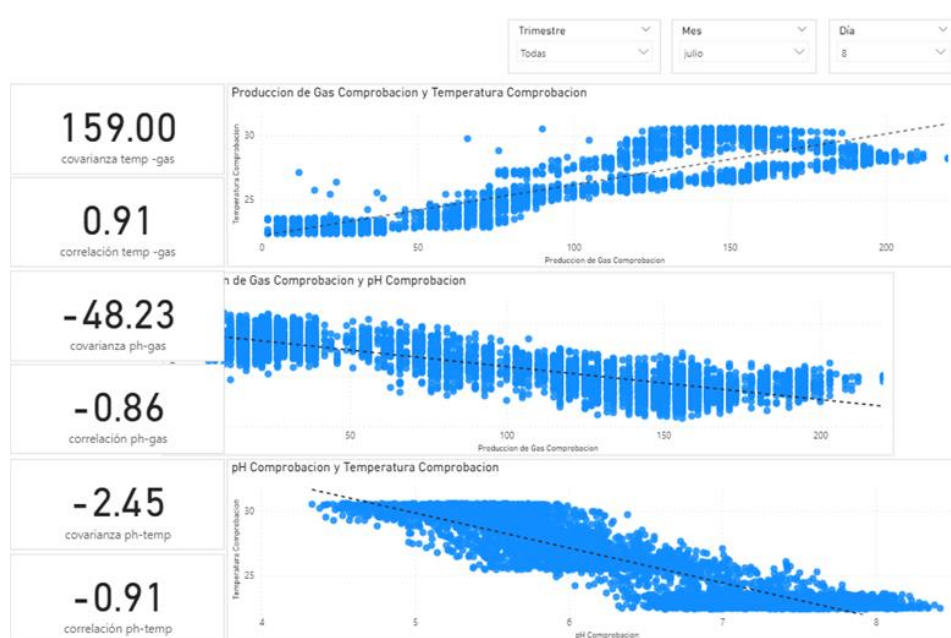


Fig. 40. Página tres del Dashboard donde hay alta correlación

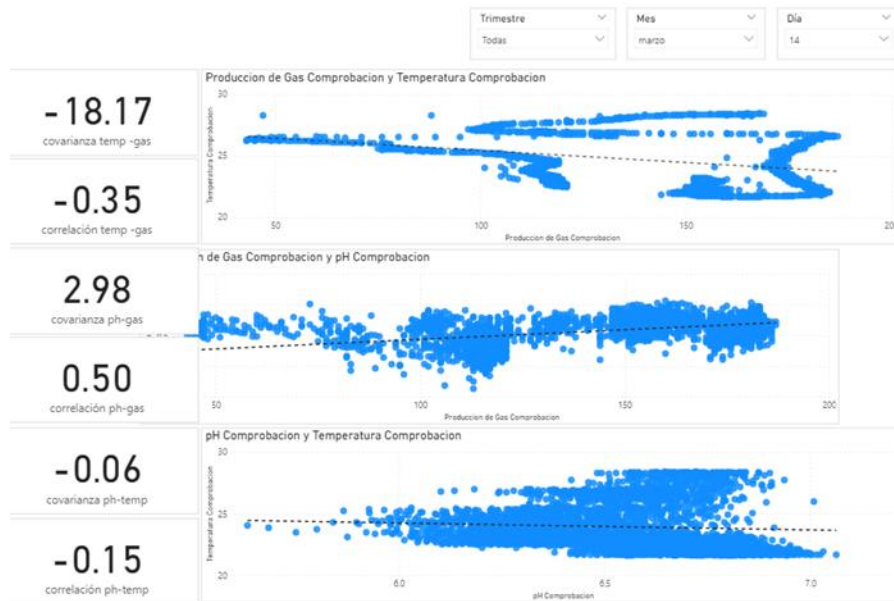


Fig. 41. Página tres del Dashboard donde hay baja correlación

Esta pestaña no solo presenta cifras y gráficos, sino que descifra la complejidad de las relaciones entre las variables clave de los reactores. La rigurosidad matemática proporciona una evaluación precisa de la dependencia e independencia de las variables, mientras que la visualización gráfica facilita la interpretación de patrones y tendencias. Este análisis profundo permite entender cómo las variaciones en una variable impactan en otras.

- **Ejecución del código en Python para calcular el índice de correlación de Spearman**

Las etapas del código en Python para calcular el índice de correlación de Spearman, requieren:

Pandas (import pandas as pd): biblioteca de manipulación y análisis de datos. Se utiliza para cargar datos desde archivos, filtrarlos y realizar operaciones en conjuntos de datos tabulares.

Numpy (import numpy as np): biblioteca para realizar operaciones matriciales y numéricas eficientes. Se utiliza para manipulación de datos numéricos y cálculos científicos.

Matplotlib.pyplot (import matplotlib.pyplot as plt): biblioteca para la creación de gráficos y visualizaciones en Python. pyplot es un módulo de Matplotlib que proporciona funciones para crear gráficos.

Seaborn (import seaborn as sns): biblioteca de visualización basada en Matplotlib, facilita la creación de gráficos. En este caso, se utilizó para los gráficos de dispersión.

Estas bibliotecas proporcionan las herramientas para cargar datos, realizar operaciones numéricas, crear gráficos y visualizaciones efectivas.

En la fig. 44 se observa el diagrama de bloques de ejecución de código en Python para calcular el índice de correlación de Spearman.

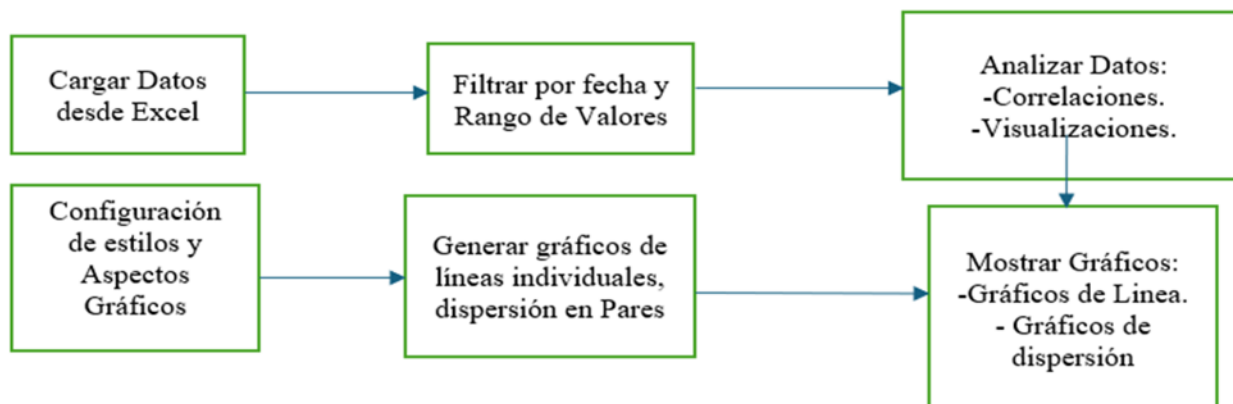


Fig. 42. Diagrama de flujo del proceso de ejecución del algoritmo en Python para calcular la correlación de Spearman.

5.5 OBJETIVO ESPECÍFICO 5: EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LOS REACTORES HACIENDO USO DEL SISTEMA DE MONITOREO PROPUESTO.

5.5.1 Selección de la carga fija de alimentación de biomasa, estiércol e inóculo.

En el reactor control 50% en volumen y para el reactor piloto carga variable en cada una de las 4 corridas realizadas.

Carga variable en volumen en el 80%, 60%, 40% y 20% en cada una de las 4 corridas realizadas.

La fase 1 de los reactores 1 y 2, se cargaron durante 5 días con una mezcla de 205,47 g de inóculo de cerdo y 540 g de agua, con el objetivo de estabilizar durante este tiempo los reactores y permitir el crecimiento de las bacterias que realizan la descomposición de la materia orgánica; los datos se registraron en la bitácora de manera diaria como se muestra en el anexo C.

5.5.2 Primera alimentación de los reactores de dos etapas.

Reactor de control carga de biomasa y estiércol fija, reactor piloto variando en un 80% en volumen. Primera corrida hasta la estabilización.

- **Alimentación y retiro del 10% en volumen de la carga de biomasa.**

Cada 3 días para asegurar una alimentación continua.

- **Registro de las mediciones de las variables relevantes en cada reactor de dos etapas.**

Captura de registros cada 8 horas, durante 30 días que dura cada corrida

5.5.3 Segunda alimentación de los reactores de dos etapas.

Reactor de control carga de biomasa y estiércol fija, reactor piloto variando en un 60% en volumen. Segunda corrida hasta la estabilización. Se repiten los pasos 5.1.5.3. y 5.1.5.4. en la segunda corrida.

5.5.4 Tercera alimentación de los reactores de dos etapas.

Reactor de control carga de biomasa y estiércol fija, reactor piloto variando en un 40% en volumen. Tercera corrida hasta la estabilización. Se repiten los pasos 5.1.5.3. y 5.1.5.4. en la segunda corrida.

5.5.5 Cuarta alimentación de los reactores de dos etapas.

Reactor de control carga de biomasa y estiércol fija, reactor piloto variando en un 20% en volumen. Cuarta y última corrida hasta la estabilización. Se repiten los pasos 5.1.5.3. y 5.1.5.4. en la segunda corrida.

5.5.6 Análisis estadístico de los datos generados desde el sistema de monitoreo.

5.5.7 Análisis del rendimiento de los reactores de dos etapas, control y piloto en función de los parámetros relevantes medidos en cada una de las cuatro corridas.

6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos por cada uno de los objetivos propuestos en este trabajo de investigación.

6.1. OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CARACTERIZAR FÍSICA Y QUÍMICAMENTE LA BIOMASA DE AFRECHO DE YUCA, EL ESTIÉRCOL DE CERDO Y EL INÓCULO.

6.1.1 Determinación del porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas.

La metodología desarrollada con las muestras de inóculo y estiércol de cerdo, recogidas en la Finca la Palma y el afrecho de yuca suministrado, entregaron los siguientes resultados:

TABLA VII.
Porcentaje de humedad de las muestras de biomasa utilizadas

Biomasa	Peso Cápsula (g)	Peso Cápsula + Muestra Seca (g)	Peso Muestra Seca (g)	% Humedad
Inóculo 1	81,25	82,70	1,45	71,0
Inóculo 2	72,07	73,34	1,27	74,6
Inóculo 3	83,57	85,09	1,52	73,8
Valor Medio del porcentaje de humedad inóculo				73,1
Desviación Estándar del porcentaje de humedad inóculo				1,89
Estiércol 1	80,31	82,11	1,80	64,0
Estiércol 2	82,77	84,43	1,66	66,8
Estiércol 3	81,72	83,46	1,74	65,2
Valor Medio del porcentaje de humedad estiércol				65,3
Desviación Estándar del porcentaje de humedad estiércol				1,40
A. Yuca 1	80,40	85,15	4,75	5,0
A. Yuca 2	80,58	85,32	4,74	5,2
A. Yuca 3	80,83	85,82	4,99	5,1
Valor Medio del porcentaje de humedad A. Yuca				5,1
Desviación Estándar del porcentaje de humedad A. Yuca				0,10

Nota: Se observa en la tabla VI, como era de esperarse que el inóculo presenta el mayor

porcentaje de humedad con un promedio de 73,1 +/- 1,89 %, seguido del estiércol con un 65,3 +/- 1,40 % y un 5,1 +/- 0,10 % para el afrecho de yuca, la metodología aplicada entregó valores del porcentaje de humedad muy cercanos entre sí.

6.1.2 Determinación de la densidad aparente de la biomasa utilizada

La tabla VII, presenta los resultados de la densidad aparente de la biomasa utilizada.

TABLA VII.
Densidad Aparente de las muestras de biomasa utilizadas

Biomasa	Masa (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml)
Inóculo 1	21,98	18,00	1,22
Inóculo 2	28,12	22,50	1,25
Inóculo 3	31,45	25,00	1,26
Valor Medio de la Densidad Aparente inóculo			1,24
Desv. Estándar de la Densidad Aparente inóculo			0,02
Estiércol 1	15,33	30,0	0,51
Estiércol 2	26,81	50,0	0,54
Estiércol 3	24,44	44,0	0,56
Valor Medio Densidad Aparente Estiércol			0,54
Desv. Estándar Densidad Aparente estiércol			0,03
A. Yuca1	25,00	88,0	0,28
A. Yuca 2	14,01	51,0	0,27
A. Yuca 3	19,83	72,0	0,28
Valor Medio de la Densidad Aparente			0,28
Desviación Estándar de la Densidad Aparente			0,01

Nota: se observa que el inóculo tiene el valor mayor de densidad en base seca, con un promedio de 1,24 +/- 0,02 $\frac{g}{ml}$, esto debido a la mayor cantidad de materia contenida en el volumen de referencia; la densidad aparente promedio del estiércol fue de 0,54 +/- 0,03 $\frac{g}{ml}$ y la del afrecho de yuca 0,28 +/- 0,01 $\frac{g}{ml}$.

TABLA VIII.
Análisis de porquinazas obtenidas de diferentes granjas. Masa seca

Muestra	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K (%)	pH	Cond.	Humed. (%)	Cenizas (%)	CO (%)	MO (%)	Dens (g/ml)	C/N
1	4,45	2,90	1,00	6,50	3,91	73,60	18,00	30,20	52,10	0,12	6,80
2	3,70	2,85	1,31	6,70	6,13	75,80	22,40	27,20	46,90	0,16	7,30
3	3,10	0,90	1,65	7,30	0,95	74,80	25,40	28,70	49,50	0,13	9,30
4	2,80	1,49	0,98	8,60	0,91	69,30	14,70	32,30	55,70	0,14	8,50
5	4,87	1,47	1,19	6,60	1,40	72,00	23,80	28,00	48,20	0,16	5,70
6	3,92	1,20	1,37	8,05	0,65	65,70	25,90	27,90	48,20	0,15	7,10
7	4,81	1,23	1,44	6,60	3,64	76,90	22,50	24,40	42,10	0,13	5,10
8	4,26	1,33	1,86	8,17	1,16	70,26	23,60	27,20	46,90	0,20	6,40
9	2,45	0,91	1,12	8,23	1,20	67,40	22,50	27,60	47,60	0,27	11,30

Nota: Presenta la composición de algunas porquinazas crudas en base seca, procedentes de diferentes granjas. Esta diferencia de valores en densidad puede variar o depender de la dieta y la raza del ganado porcino evaluado. [78]

6.1.3 Determinación del análisis de carbono, nitrógeno e hidrógeno en las muestras de afrecho de yuca, estiércol de cerdo e inóculo.

Los resultados del porcentaje de carbono, hidrógeno y nitrógeno por combustión, realizados en el laboratorio de servicios analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT, a las muestras de estiércol de cerdo, inóculo y afrecho de yuca, se presentan en la tabla IX y se adjuntan en el anexo A.

TABLA IX.
Porcentaje de Carbono. Hidrógeno y Nitrógeno por combustión

Descripción	C Comb. (%)	H Comb. (%)	N Comb. (%)	Relación C/N
1 Afrecho de yuca	43,1	0,0190	0,939	45,90
2 Estiércol de Cerdo	12,9	<LCM	1,85	6,97
3 Inóculo del estiércol de Cerdo	32,9	<LCM*	3,18	10,35

Nota: Donde LCM hace referencia al Mínimo Común Múltiplo, utilizado en cálculos

estequiométricos y la determinación de la cantidad de reactivos o productos involucrados en la combustión de una muestra orgánica.

Se observa que para el estiércol de cerdo la relación C/N fue de 7, muy cercana a los valores reportados en la tabla VIII. Este valor es bajo para usar como único sustrato en la DA debido a su baja relación C/N, por ello se justifica hacer la codigestión con el afrecho de la yuca que tiene una relación C/N mucho más alta y cercana a 45. De esta manera se buscará mezclas entre los dos sustratos que den relaciones C/N en el rango de 20 a 30, que son las ideales para la producción de biogás.

6.1.4 Determinación de las propiedades térmicas de la biomasa utilizada

- Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

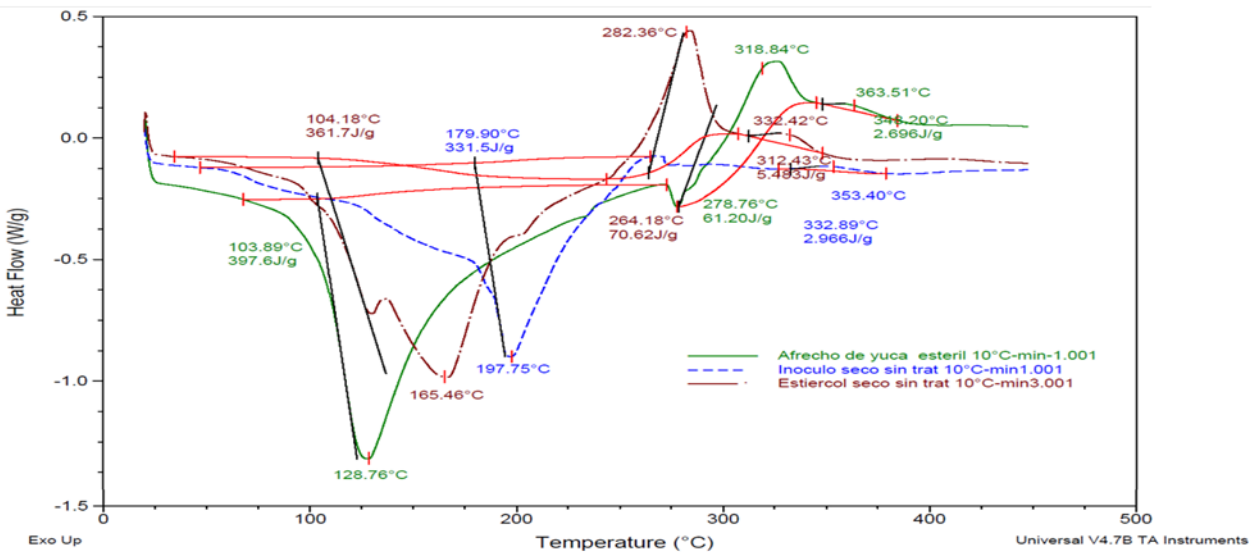


Fig. 43. Calorimetría diferencial de barrido (DSC), inóculo, estiércol de cerdo seco sin tratamiento y afrecho de yuca. [79].

TABLA X.
Liberación de calor de las muestras de biomasa analizadas

	Temp. 1 (°C)	Entalp. 1 (J/g)	Temp. 2 (°C)	Entalp. 2 (J/g)	Δh (h1- h2) (J/g)	Temp. 3 (°C)	Entalp. 3 (J/g)	Δh (h1- h3) (J/g)
Inóculo	179,90	331,50		0	331,50	332,89	2,97	328,53
Estiércol	104,18	361,70	264,18	70,62	291,08	312,43	5,48	356,22
A. Yuca	103,89	397,60	278,76	61,20	336,40	348,20	2,70	394,90

Nota: Se consolida las variaciones de la entalpía de las muestras de biomasa analizadas. Se observa como al alcanzar el margen de los 104°C, se presenta la mayor liberación de calor en las muestras de biomasa analizada, presentándose el mayor valor en el afrecho de yuca con un valor de $398 \frac{J}{g}$, seguido del estiércol con un $362 \frac{J}{g}$; en cuanto al inóculo al alcanzar los 175°C, libera $332 \frac{J}{g}$ de calor.

Esto se compagina con los resultados químicos. El mayor aporte de carbono del afrecho de la yuca aporta mayor energía durante la degradación endotérmica de la biomasa. También se relaciona con la mayor liberación de energía durante la degradación exotérmica de los productos de descomposición de estos residuos. Esto justifica aún más el uso del afrecho de la yuca en la codigestión.

Por otra parte, al alcanzar una máxima temperatura de 348°C, se libera en el afrecho de yuca $2,7 \frac{J}{g}$, seguido de una liberación de calor de $3 \frac{J}{g}$ a 333°C en el inóculo y de $5,5 \frac{J}{g}$ a 312°C en el estiércol.

Finalmente, la mayor liberación de calor total se presenta en el afrecho de yuca con $395 \frac{J}{g}$, seguida del estiércol con $356 \frac{J}{g}$ y finalmente el inóculo con $329 \frac{J}{g}$.

En el Anexo D, se encuentra las gráficas del análisis calorimétrico DSC del estiércol seco y el afrecho de yuca

- Termogravimetría

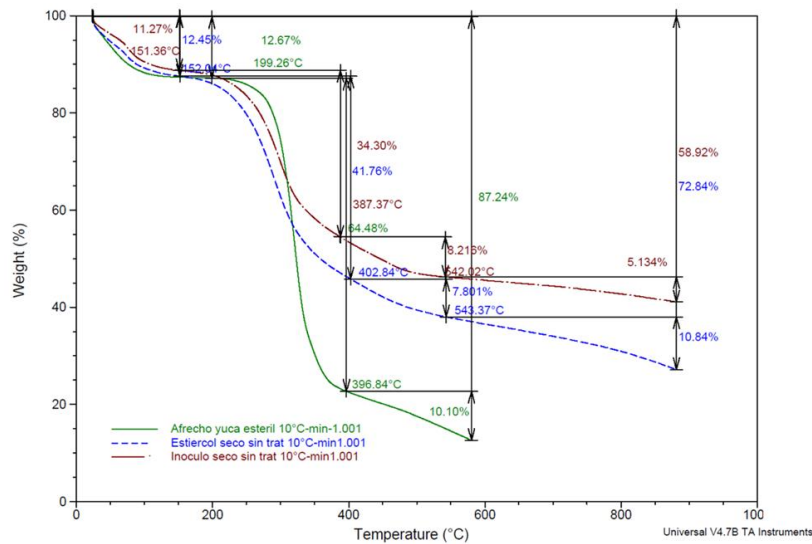


Fig. 44. Análisis Termogravimétrico TGA, inóculo, estiércol de cerdo seco sin tratamiento y afrecho de yuca. [79].

La tabla XI. Consolida las temperaturas y los porcentajes de pérdida de peso para cada una de las muestras de biomasa analizadas. Se observa que alrededor de los 150°C, el inóculo y el estiércol pierden un 11,27% y un 12,45% en peso respectivamente, posiblemente asociados a la pérdida de humedad. Debido a que tanto el inóculo como el estiércol son materiales previamente digeridos no se observa claramente los rangos en que se degrada la celulosa y la hemicelulosa, solo aquellos en los que se degradan sus fracciones, que en su mayor parte están cerca a los 286°C para el estiércol seco y a los 330°C para el inóculo seco, donde se pierden el 47% y el 82% de la biomasa total respectivamente. Para el afrecho de la yuca se encontró que este fue muy estable hasta los 200°C cuando inició su proceso de descomposición térmica. La temperatura de máxima descomposición se dio a los 311.5°C, cuando se perdió el 63.8% de la biomasa, el 73% de la biomasa total, que puede corresponder a la degradación de las moléculas de almidón y celulosa contenidas en el residuo.

Finalmente, a una temperatura de 542°C, el inóculo perdió un 8% de peso; mientras que el estiércol un 7,8% y el afrecho de yuca un 10%, es decir que a esta temperatura se presentaron los valores más bajos de pérdida de peso, que pueden corresponder a la lignina.

TABLA XII.
Pérdida de Peso en Porcentaje de las muestras de Biomasa

Análisis Termogravimétrico o TGA	Temp. 1 (°C)	Pérdida Peso 1	Temp. 2 (°C)	Pérdida Peso 2	Temp. 3 (°C)	Pérdida Peso 3	Temp. 4 (°C)	Pérdida Peso 4	Pérdida Peso Total
Inóculo	151,36	11,27	387,37	34,30	542,02	8,22	870	5,13	58,92
Estiércol	152,04	12,45	402,84	41,76	543,37	7,80	870	10,83	72,84
A. Yuca	199,26	12,67	396,84	64,48	543,37	10,10	870	0	87,25

La mayor pérdida de peso se presentó en el afrecho de yuca con un 87,25%, seguida del estiércol con un 72,84% y finalmente el inóculo con un 58,92%. Esto indica nuevamente que el residuo que más aporta material volátil obtenido por vía térmica es el afrecho de la yuca, comparado con los otros dos.

El afrecho de yuca, el estiércol y el inóculo presentan diferentes composiciones químicas y propiedades físicas, lo que influye significativamente en las pérdidas de peso durante el proceso térmico. [93].

El afrecho de yuca está compuesto principalmente por carbohidratos (celulosa, hemicelulosa, almidón), y debido a su alto contenido de compuestos orgánicos volátiles principalmente derivados del almidón y otros azúcares, experimenta una mayor pérdida de peso cuando se somete a procesos térmicos. Esto se debe a que estos materiales se descomponen con facilidad a temperaturas elevadas. [94].

El estiércol de cerdo, por su parte, contiene materia orgánica más compleja, como fibras, proteínas y grasas. Estos compuestos no se volatilizan con la misma facilidad que los carbohidratos presentes en el afrecho de yuca. Además, el estiércol contiene minerales como calcio, fósforo y nitrógeno que no se descomponen fácilmente, lo que podría generar menores pérdidas de peso durante el proceso térmico. [95].

El inóculo, que está compuesto por microorganismos y otros compuestos más estructurados, como humus o lignina, presenta una volatilización menor a temperaturas elevadas. Aunque los microorganismos del inóculo contribuyen al proceso de descomposición bajo condiciones anaeróbicas, este proceso no ocurre durante el calentamiento térmico. [96].

Cabe destacar que, dado que cada tipo de residuo presenta características distintas, se someten a temperaturas diferentes durante la evaluación térmica. El afrecho de yuca, al tener una mayor cantidad de compuestos volátiles, experimenta una mayor pérdida de peso en comparación con el estiércol o el inóculo. [93].

El análisis de las pérdidas de peso está relacionado con la cantidad de material volátil presente en cada tipo de residuo. Los carbohidratos y lípidos, que son más abundantes en el afrecho de yuca, son altamente volátiles cuando se calientan. En contraste, el estiércol y el inóculo contienen menos material volátil, lo que explica las diferencias en la pérdida de peso observadas. [97].

En el contexto de un reactor, la mayor pérdida de peso del afrecho de yuca indica que este material tiene un mayor potencial para generar biogás durante la digestión anaeróbica, debido a su alto contenido de material volátil. Esto puede resultar ventajoso para la eficiencia del reactor, ya que los materiales con mayor contenido volátil suelen producir más biogás. Por su parte, el estiércol, aunque presenta menores pérdidas térmicas, sigue siendo útil en la mezcla por su contenido nutritivo y su capacidad para equilibrar los nutrientes necesarios para los microorganismos. El inóculo, por su parte, es esencial para iniciar y estabilizar el proceso de digestión anaeróbica. [95]. [96].

En el anexo F, se presenta la pérdida de peso por cada uno de las biomásas analizadas de manera independiente

6.1.5 Determinación del material volátil de la biomasa utilizada

La tabla XII, presenta la relación de los valores promedio de los sólidos volátiles y los sólidos totales de la biomasa utilizada, los valores detallados de los ST y SV de cada una de las muestras se encuentran en el anexo G.

TABLA XII.
Relación SV/ST de la biomasa utilizada

Biomasa	ST (mg/l)	SV (mg/l)	SV/ST (%)
Inóculo	30,80 %	9,53 +/- 1,2	30,94
Estiércol	34,70 %	20,20 +/- 1,5	58,21
A. Yuca	95,47 %	90,93 +/- 1,5	95,24

Como se observa en la tabla XII, el contenido de sólidos totales en el estiércol, es relativamente bajo, 34,70 %; esto puede depender de su contenido de agua y otros materiales (como arena o tierra), de igual forma, la cantidad de sólidos volátiles, es más baja aún, 20,20 mg/l; reflejando una baja cantidad de materia orgánica, que pueda ser utilizada como materia prima en el proceso de biodigestión. Por ello la relación SV/ST en el estiércol es media, con un valor del 58,21%, lo que indica que un poco más de la mitad del estiércol es materia orgánica.

Por otra parte, la tabla también muestra un valor alto de sólidos totales en el afrecho de yuca, 95,47 %; que refleja la cantidad de fibra vegetal y otros compuestos orgánicos que pueden ser

descompuestos o utilizados en procesos de digestión anaerobia, de igual forma, la cantidad de sólidos volátiles, es alta, 90,93 mg/l; lo que es indicativo de su valor como material orgánico para procesos biológicos o como fuente de energía. Por ello la relación SV/ST en el afrecho de yuca es alta, con un valor del 95,24%, lo que indica la calidad orgánica de la muestra de afrecho.

6.1.6 Determinación del contenido de carbono fijo y cenizas de la biomasa utilizada

La tabla XIII, presenta el cálculo del porcentaje de cenizas de la biomasa utilizada

TABLA XIII.
Porcentaje de cenizas de la biomasa utilizada

Biomasa	Peso muestra inicial + Cápsula (g) A	Peso muestra final + Cápsula (g) A	% Cenizas
Inóculo 1	82,2902	82,2542	3,60
Inóculo 2	72,8492	72,8138	3,54
Inóculo 3	90,1480	90,1135	3,55
Valor Medio del % de cenizas del inóculo			3,56
Desviación Estándar del % de cenizas del inóculo			0,032
Estiércol 1	80,9780	80,9634	1,46
Estiércol 2	83,4272	83,4125	1,47
Estiércol 3	82,4040	82,3879	1,61
Valor Medio del % de cenizas del estiércol			1,51
Desviación Estándar del % de cenizas del estiércol			0,084
Afrecho de Yuca1	80,9126	80,9059	0,67
Afrecho de Yuca 2	80,5374	80,5299	0,75
Afrecho de Yuca 3	80,8943	80,8869	0,74
Valor Medio del % de cenizas del afrecho de yuca			0,72
Desviación Estándar del % de cenizas del afrecho de yuca			0,044

Nota: Se observa el contenido de sólidos totales en el estiércol

Como se observa en la Tabla XIII, el porcentaje de cenizas en el estiércol es bastante bajo, 1,51 +/- 0,08, lo que indica un mayor contenido de materia orgánica, deseable en el aprovechamiento de los nutrientes orgánicos, al mismo tiempo refleja el bajo contenido de nutrientes minerales en la muestra.

De igual forma el porcentaje de cenizas en el inóculo es bajo, 3,56 +/- 0,03, lo que indica que el material orgánico disponible es más abundante, lo que es favorable para el proceso de DA, en el que se requiere materia orgánica para el crecimiento y multiplicación de los microorganismos.

El porcentaje de cenizas en el afrecho de yuca es el más bajo de las muestras, 0,72 +/- 0,04, lo que indica que el material tiene una mayor cantidad de fibra orgánica o almidón, aprovechable como fuente de energía.

TABLA XIV.
Porcentaje de Carbono Fijo de la biomasa utilizada

Biomasa	% Humedad	% Materia Volátil	% Cenizas	% Carbono Fijo
Inóculo 1	71,0	8,2	3,60	17,20
Inóculo 2	74,6	9,8	3,54	12,06
Inóculo 3	73,8	10,6	3,55	12,05
Valor Medio del % de carbono fijo del inóculo				13,77
Desviación Estándar del % de carbono fijo del inóculo				2,97
Estiércol 1	64,0	21,8	1,46	12,74
Estiércol 2	66,8	18,8	1,47	12,93
Estiércol 3	65,2	20,0	1,61	13,19
Valor Medio del % de carbono fijo del estiércol				12,95
Desviación Estándar del % de carbono fijo del estiércol				0,23
Yuca 1	5,0	92,0	0,67	2,33
Yuca 2	5,2	91,6	0,75	2,45
Yuca 3	5,1	89,2	0,74	4,96
Valor Medio del % de carbono fijo del afrecho de yuca				3,25
Desviación Estándar del % de carbono fijo del afrecho de yuca				1,49

Como se observa en la Tabla XIV, el estiércol presenta un bajo porcentaje de carbono fijo, 12,95 +/- 0,2, lo que muestra que el mayor porcentaje de carbono es orgánico, lo que favorece el proceso de DA.

De igual forma, el porcentaje de carbono fijo en el inóculo es bajo, 13,77 +/- 3, que indica la mayor cantidad de carbono orgánico en la muestra, que favorece la capacidad de mantener la actividad microbiana a largo plazo.

Finalmente, se observa en la tabla XIII, que el porcentaje más bajo de carbono fijo se encuentra en el afrecho de yuca, 3,35 +/- 1,5, indicando una baja calidad de esta biomasa como fuente de carbono en el proceso de DA.

6.1.7 Determinación de la carga de alimentación de los reactores.

Para determinar la mezcla de alimentación de los reactores, se procedió de la siguiente manera:

➤ **Paso 1:** se definió la cantidad de masa para alimentar el reactor, teniendo en cuenta los porcentajes y pesos de alimentación. Como se observa en la tabla XIV, se alimentó con la mezcla de inóculo, estiércol de cerdo y afrecho de yuca.

TABLA XV.
Porcentajes de alimentación de la mezcla

Masa Mezcla g/día	% Inóculo	% Afrecho	% Estiércol	Total
	40%	25%	35%	100%
0,155	0,06	0,04	0,05	0,15
Masa Mezcla para 5 días				
0,77	0,31	0,19	0,27	0,77

Paso 2: con el volumen de alimentación de la masa, la densidad y el contenido de humedad de cada sustrato determinado en la Tabla V, se calculó la cantidad de biomasa fresca diaria, teniendo en cuenta el valor de los ST y SV diarios.

**TABLA XVII.
Porcentajes de Alimentación de la Mezcla**

DENSIDAD		
Biomasa	Densidad (gr/l)	Densidad (Kg/l)
Afrecho	276,67	0,28
Estiércol	536,67	0,54
Inóculo	1.243,33	1,24

Nota: Se calculó la cantidad de biomasa fresca diaria, teniendo en cuenta el valor de los ST y SV diarios

➤ **Paso 3:** Con el volumen y la densidad, se calculó la cantidad de masa fresca diaria con la caracterización físico química, se calculó la cantidad de ST y SV diarios

Para lo cual se utilizó la ecuación 14.

Ecuación. 1. $ST = \%ST * \text{masa fresca} - SV = ST * \%SV$

**TABLA XVII.
Porcentaje de ST y SV en los sustratos**

Biomasa	Masa (g/día)	Densidad (g/l)	Volumen (l/día)	ST (%)	ST (g/día)	SV (%)	SV (g/día)	C/N Sustratos	C/N Mezcla
Afrecho	0,0387	276,67	1,4 exp ⁻⁴	95,50	0,037	91	0,0336	45,90	11,48
Estiércol	0,0542	536,67	1.02 exp ⁻⁴	34,70	0,019	20	0,0038	6,97	2,44
Inóculo	0,0620	1.243,33	4,99 exp ⁻⁵	30,80	0,019	10	0,0018	10,35	4,14
Total	0,1549		2,91 exp⁻⁴		0,075		0,0392		

➤ **Paso 4:** Como se observa en la tabla XVII, con los % de carbono y nitrógeno de cada material, determinados en la tabla VIII, se calculó la relación C/N de toda la mezcla

➤ **Paso 5:** Representado en la producción diaria de estiércol y los demás sustratos primero se calculó la concentración del sustrato con los sólidos volátiles.

TABLA XVIII.
Cálculo de la carga orgánica de alimentación

Entradas		
Sustrato de entrada	0,15	g/día
ST (materia seca)	10%	%
SV (materia seca volátil)	80%	%
Volumen Útil	0,00232	m ³
Salidas		
OLR	5,3414	g/m ³ *día
OLR	5341,38	Kg/m ³ *día

Nota: Se calcula la concentración del sustrato con los sólidos volátiles

➤ **Paso 6:** con el valor de la concentración del sustrato obtenido en la tabla XVII, se calculó la carga orgánica de entrada.

➤ **Paso 7:** La cantidad de agua para la mezcla, se calculó a partir del porcentaje de sólidos totales ST, la mezcla de agua se calculó con un 10% de los sólidos totales, los sólidos totales se definieron como la suma del total del estiércol diario y la cantidad de mezcla de agua.

TABLA XIX.
Cantidad de Agua para la Mezcla

Entradas		
Masa fresca	0,15	g
ST del Sustrato	10	%
ST diluido	8	%
Salidas		
W agua	0,04	g/l (excreta fresca)

TABLA XX.
Cálculo de agua en cada sustrato

Entradas				
	Inóculo	Estiércol	Afrecho	
ST diluidos	8,00	8,00	8,00	%
Masa fresca	0,0620	0,0542	0,0387	g
ST sustrato	30,80	35	95,50	%
Salidas				
H ₂ O (ml)	1,060888889	0,728968992	0,894878935	l/g masa fresca

TABLA XXII.
Adición de Agua a la Mezcla

H₂O (ml)	2,684736816	l/g	masa fresca
----------------------------	--------------------	------------	--------------------

➤ **Paso 8:** se calculó la alimentación diaria del reactor sumando la cantidad de agua y el agua para la mezcla.

TABLA XXII.
Alimentación diaria del reactor

Agua en la mezcla (l/día)	18,05
Total, masa fresca diaria (g/día)	0,15
Mezcla (Wagua + sólidos totales)	2,68
Total, alimentación diaria (g/día)	20,89

6.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 2: EVALUAR LA CONDICIÓN DEL SISTEMA EXISTENTE Y DEFINIR LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN PARA LA PUESTA EN MARCHA

6.2.1 Medición de la estructura física de los reactores de dos etapas

Antes de la correspondiente instalación, se realizó la medición de los parámetros geométricos de los reactores en cada una de sus fases. El anexo B, muestra el valor de las alturas (h); diámetros internos (Θ); áreas de flujo y el volumen efectivo y disponible considerando un 80% del volumen efectivo.

6.2.2 Cálculo de la tasa de carga orgánica (OLR), tiempo de retención hidráulico (TRH)

La tasa de carga orgánica (OLR) se calculó dividiendo la cantidad de sólidos volátiles (VS) en el sustrato determinados en el ítem 1.6 del objetivo anterior, entre el volumen del reactor.

$$OLR = \frac{SV}{Volumen\ reactor}$$

Como se observa en la tabla XXIII, la tasa de carga orgánica, es diez veces mayor para el afrecho de yuca con un valor promedio de $506,19 \frac{KgSv}{m^3 \cdot dia}$ en comparación con el inóculo que es de $53,07 \frac{KgSv}{m^3 \cdot dia}$; mientras que para el estiércol es de $112,44 \frac{KgSv}{m^3 \cdot dia}$

TABLA XXIII.
Cálculo de la Tasa de Carga Orgánica OLR

<i>Biomasa</i>	<i>SV gsv/día</i>	<i>SC gsv/m3día</i>	<i>Sustrato g/día</i>	<i>Volumen m3</i>	<i>OLR gSv/m3*día</i>	<i>OLR KgSv/m3*día</i>
Inóculo 1	0,0820	537,87	0,15	0,001768	45645,86	45,65
Inóculo 2	0,0980	642,82	0,15	0,001768	54552,37	54,55
Inóculo 3	0,1060	695,29	0,15	0,001768	59005,62	59,01
Valor Promedio de OLR para Inóculo						53,07
Valor de la desviación Estandar para el inóculo						6,80
Estiércol 1	0,2180	1429,95	0,15	0,001768	121351,19	121,35
Estiércol 2	0,1880	1233,16	0,15	0,001768	104651,48	104,65
Estiércol 3	0,2000	1311,88	0,15	0,001768	111331,37	111,33
Valor Promedio de OLR para el estiércol						112,44
Valor de la desviación Estandar para el estiércol						8,41
A. Yuca 1	0,9200	6034,63	0,15	0,001768	512124,28	512,12
A. Yuca 2	0,9160	6008,40	0,15	0,001768	509897,65	509,90
A. Yuca 3	0,8920	5850,97	0,15	0,001768	496537,89	496,54
Valor Promedio de OLR para el Afrecho de Yuca						506,19
Valor de la desviación Estandar para el Afrecho de Yuca						8,43

Teniendo en cuenta la mezcla la tasa de carga orgánica fue de $223,9 \frac{\text{KgSv}}{\text{m}^3 \cdot \text{dia}}$

La OLR de la mezcla es un valor extremadamente alto, generando una sobrecarga en los reactores, lo que conlleva a graves problemas operativos, como: la inhibición del proceso de DA por acidificación, disminución de la producción de biogás debido a la acumulación de productos intermedios tóxicos para los microorganismos.

6.3 OBJETIVO ESPECÍFICO 3: DISEÑAR E IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO DE LOS FACTORES DE OPERACIÓN PRIORIZADOS.

Como se observa en la fig. 47, el sistema contó con dos digestores: D₁, el cual tenía el sistema de monitoreo en cada fase y el D₂, o control, sin el sistema de monitoreo; cada digestor tenía dos fases F₁ y F₂, por lo tanto, la alimentación de la carga, se realizó por la fase 1 así, D₁F₁ o D₂F₁ respectivamente, y la descarga por las fases D₁F₂ o D₂F₂, y de esta manera se registró en la bitácora de seguimiento Anexo C, los valores reportados de las variables pH, T y concentración de metano.

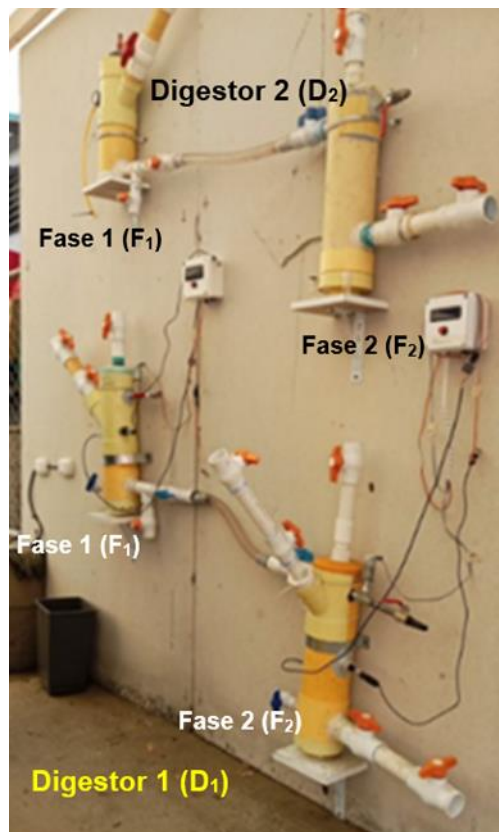


Fig. 45. Fases de los digestores con el sistema de monitoreo D₁ y control D₂

6.3.1 Análisis de la serie temporal de las variables de proceso en las fases del reactor

- **Análisis de la serie temporal de la primera fase**

El análisis de la serie temporal de las mediciones del proceso en cada fase del reactor, proporcionó una visión del comportamiento del sistema en relación con la concentración, la temperatura y el pH a lo largo del proceso de toma de mediciones.

En las fig. 48 y 49 de ambas fases, se destaca la saturación en la medición de la concentración del gas a 1000 ppm, un fenómeno explicado por el rango máximo de medición del sensor MQ4 para el gas metano. Generalmente, cuando se observó este evento, las mediciones de concentración de gas metano son superiores a 10000 ppm. Además, se de las variaciones de pH y su correlación con la concentración.

En cuanto a la temperatura, se observó un comportamiento periódico a lo largo del tiempo, en algunos tramos de la toma de mediciones, se identificó ciertas inconsistencias, derivadas de interrupciones en el equipo debido a mantenimientos y cambios de sensores, las cuales proporcionan pistas importantes para comprender mejor el funcionamiento del sistema y realizar acciones de mantenimiento y mejora.

- **Análisis de la serie temporal de la segunda fase**

En la fig. 49 de la serie temporal de la segunda fase, se observa una situación similar a la de la primera fase en cuanto a la saturación del sensor MQ4 en varias ocasiones. Sin embargo, se notó una menor detección de concentración de gas metano en comparación con la primera fase. Esto sugiere posibles diferencias en la concentración de gas entre ambas fases.

Asimismo, se aprecia una menor variabilidad en el pH en comparación con la primera fase. Esta diferencia indica una estabilidad diferente en las condiciones del digestor durante la segunda fase. Al igual que en la primera fase, se observó un comportamiento periódico en la temperatura a lo largo del tiempo, lo que sugiere una influencia constante en el proceso de concentración.

Se destaca la falta de datos desde finales de junio hasta principios de julio de 2023, período durante el cual el sistema de monitoreo experimentó fallas debido a daños en los sensores y en el ESP32. Durante este intervalo de tiempo, el sistema no registró mediciones y volvió a registrar datos hasta el final del período de medición. Estas observaciones resaltan la importancia de mantener el funcionamiento adecuado del sistema de monitoreo para garantizar la fiabilidad de los datos recopilados y la calidad de los análisis.

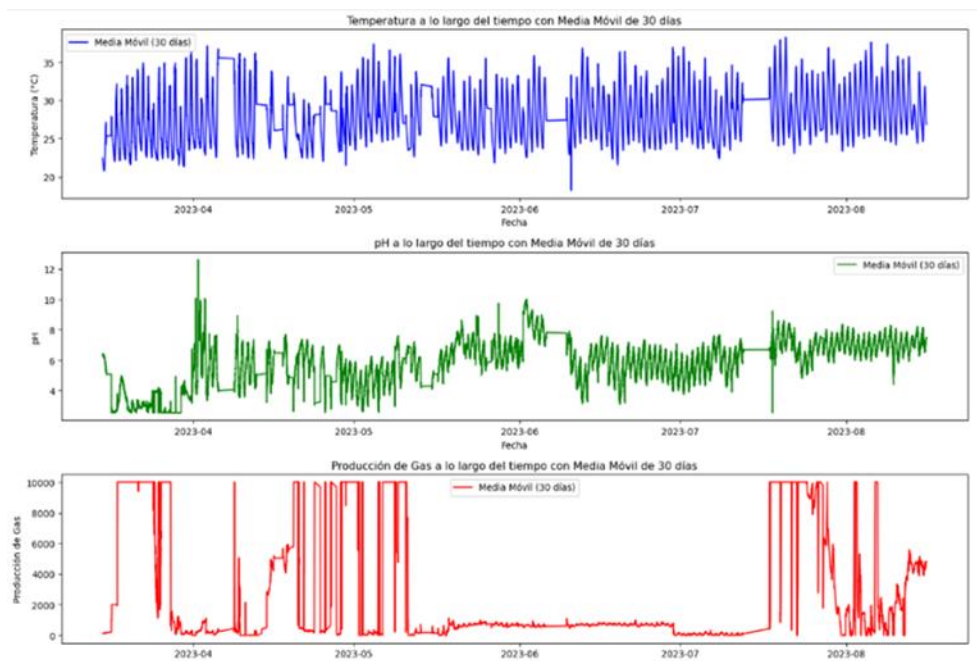


Fig. 46. Serie temporal de variables medidas del reactor fase 1.

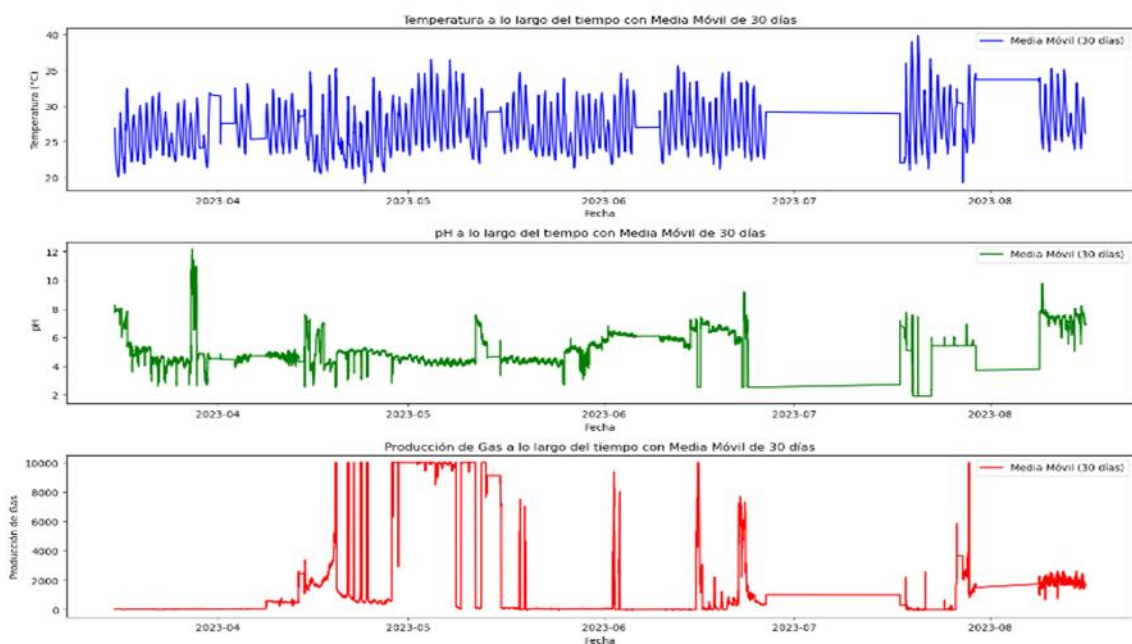


Fig. 47. Serie temporal de variables medidas del reactor fase 2

- **Uso de la técnica de la media móvil para las gráficas de las series temporales.**

La media móvil es una técnica estadística utilizada para suavizar una serie temporal al calcular el promedio de un conjunto de puntos adyacentes en la serie, esta técnica, reduce el ruido o las fluctuaciones aleatorias presentes en los datos y resalta tendencias o patrones subyacentes. En el código, se aplicó la media móvil a la serie temporal de las mediciones de

temperatura, pH y concentración de gas, se utilizó la función Rolling () de pandas, que calcula la media de un determinado número de puntos adyacentes definidos por el parámetro Windows. En este caso, se definió Windows=60, lo que significa que se calculó la media móvil utilizando los últimos 60 puntos de datos.

Esto permitió visualizar de manera clara cómo evolucionan estas variables a lo largo del tiempo, eliminando el ruido o las fluctuaciones aleatorias que dificultan la interpretación de los datos.

6.3.2 Análisis cuantitativo de la serie temporal de ambas fases

En la tabla XXIV, se presenta un análisis cuantitativo de las variables monitoreadas en ambas fases del reactor presentadas en la fig. 50, en particular la temperatura y la concentración de gas, con el objetivo de entender su comportamiento y variabilidad en el tiempo y determinar su impacto en el rendimiento del sistema.

- **Análisis de temperatura**

En la fase 1, la temperatura media registrada fue de 28.07°C con una desviación estándar de 3.61°C, que indicó una variabilidad moderada en esta fase. El rango de temperatura durante este periodo osciló entre 16.69°C y 38.25°C, mostrando fluctuaciones que respondían a factores externos o cambios en la operación del sistema.

En la fase 2, la temperatura media fue de 27°C, con una desviación estándar de 3.47°C. El rango de temperatura en esta fase fue algo más amplio, variando entre 18.81°C y 39.88°C. Esta amplitud sugiere una mayor variabilidad ambiental o ajustes operativos durante esta fase. El mantenimiento de una temperatura estable es crítico para la eficiencia de la DA, y las variaciones observadas pueden impactar en el rendimiento del reactor.

- **Análisis de concentración de gas**

La concentración media diaria de gas en la fase 1 alcanzó los 2937.39 ppm, con un máximo de concentración registrada en 10.000 ppm. El primer día en que se registró una concentración de gas superior a 10.000 ppm fue el 17 de marzo de 2023 a las 17:54. Estos datos sugieren que durante la fase 1 se alcanzaron niveles óptimos de concentración, relacionados con condiciones de temperatura favorables y estabilidad del sistema.

En comparación, en la fase 2 la concentración media diaria de gas fue de 1830.13 ppm, lo cual representó una disminución en relación con la fase 1. La concentración máxima también llegó a 10.000 ppm, registrándose el 19 de abril de 2023 a las 19:58. La reducción en la concentración media está asociada a cambios en las condiciones operativas, variabilidad en la temperatura, o alteraciones en la composición de la biomasa.

- **Interpretación y relevancia de los resultados**

Los resultados cuantitativos muestran diferencias en el comportamiento de la temperatura y la concentración de gas entre ambas fases, lo que permite inferir que el rendimiento del reactor está directamente influenciado por estas variables. Las fluctuaciones de temperatura afectan la actividad de los microorganismos encargados de la DA, mientras que los picos de concentración de gas sugieren momentos de alta actividad metabólica. Estos datos no solo respaldan la importancia de monitorear en tiempo real estas variables, sino que también proporcionan información valiosa para realizar ajustes operativos que optimicen el rendimiento del sistema.

TABLA XXIV.
Análisis cuantitativo de la serie temporal

Métrica	Fase 1	Fase 2
Temperatura Media (°C)	28.07	27.00
Desviación de Temperatura	3.61	3.47
Rango de Temperatura (°C)	16.69 - 38.25	18.81 - 39.88
Producción Media Diaria (ppm)	2937.39	1830.13
Producción Máxima (ppm)	10000	10000
Primer Día con Producción > 10000 ppm	17/03/2023 17:54	19/04/2023 19:58

Nota: Se presenta un análisis cuantitativo de las variables monitoreadas en ambas fases del reactor

6.3.3 Gráficas y análisis de las correlaciones antes de la estabilización fase 1

La fig. 50 en la imagen superior muestra la correlación entre la temperatura y la concentración de gas en función del tiempo, se observa una tendencia constante hacia una correlación positiva, esta relación sugiere una influencia directa de la temperatura en la concentración de gas.

En la imagen del medio de la fig. 50, se presenta la correlación entre el pH y la concentración de gas, se evidencia una correlación inversa, opuesta a la observada en la relación entre la temperatura y la concentración de gas, indicando un comportamiento distintivo y complementario entre las variables.

En un análisis más detallado, se observa un comportamiento similar en el tiempo, pero inverso. Este fenómeno constituye un aporte importante en el proceso de investigación del comportamiento de las variables en estos procesos biológicos de la digestión, ofreciendo nuevas perspectivas sobre su dinámica e interacción.

Finalmente, en la imagen inferior de la fig. 50, se analiza la correlación entre la temperatura y el pH a lo largo del tiempo, se destaca una correlación altamente negativa y marcada entre ambas variables, esta situación resalta un aspecto novedoso en el análisis de la DA, donde las variables principales de estudio muestran una relación inversa significativa, proporcionando una nueva perspectiva sobre su interacción en el proceso de concentración de gas.

En la fig. 50, se representa la serie temporal de Spearman en azul y la de Pearson en naranja. Este enfoque permite analizar las correlaciones a lo largo del tiempo sin necesidad de presentar aún los valores numéricos, ya que el objetivo principal es observar las tendencias y patrones de correlación a lo largo de la serie temporal.

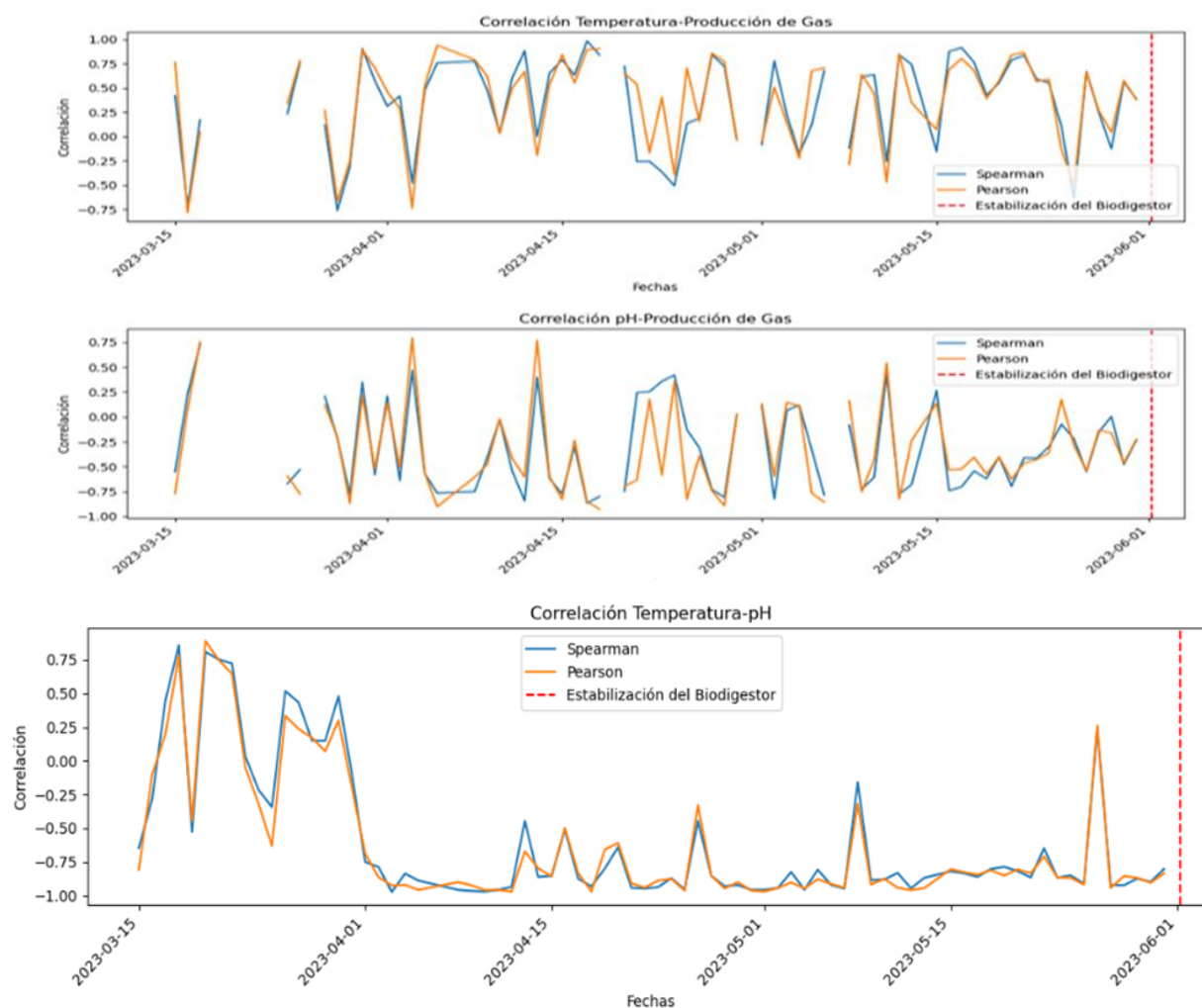


Fig. 48. Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 1 antes de la estabilización.

6.3.4 Gráficas y análisis de las correlaciones después de la estabilización fase 1

El análisis de las correlaciones después de la estabilización mostró cambios respecto con el período anterior a la estabilización en la primera fase del digestor.

En la imagen superior de la fig. 51, se aprecia que la correlación entre la temperatura y la concentración de gas en función del tiempo sigue siendo positiva, sin embargo, la correlación tiende a mantenerse más cerca de 1, lo que indica una mayor dependencia entre ambas variables, este cambio sugiere una relación más estrecha entre la temperatura y la concentración de gas después de la estabilización del digestor.

También se observa cambios en las correlaciones entre el pH y la concentración de gas, aunque la correlación continúa siendo negativa después de la estabilización, se mantiene más cercana a -1 en comparación con el período anterior a la estabilización, esto indica una mayor dependencia entre el pH y la concentración de gas, pero en sentido inverso, los cambios en el pH influyen de manera más pronunciada en la concentración de gas después de la estabilización.

Por último, la correlación entre la temperatura y el pH conserva las mismas características que antes de la estabilización, mostrando una correlación negativa alta entre ambas variables, lo que sugiere que la relación entre la temperatura y el pH no se ve significativamente afectada por la estabilización del digestor.

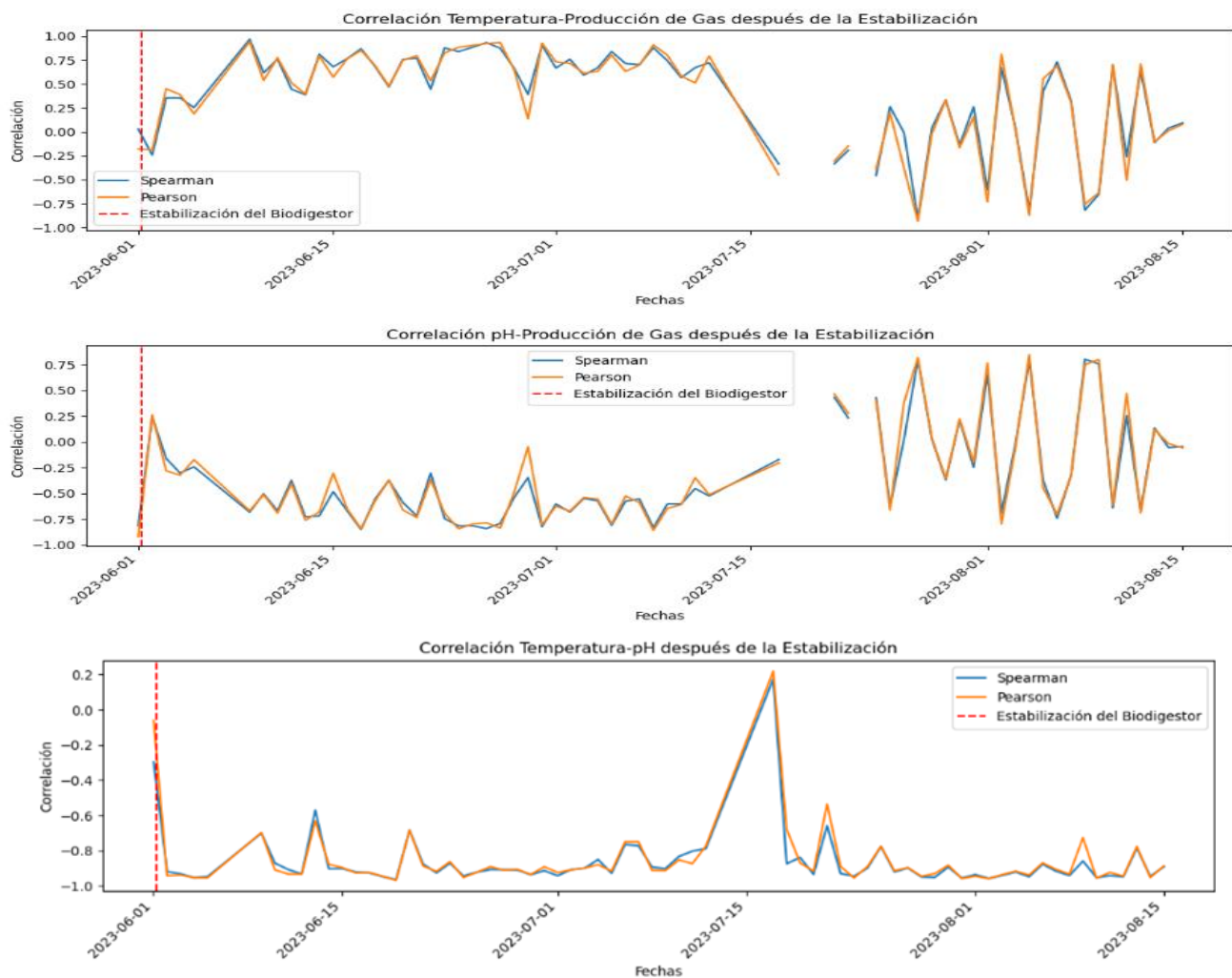


Fig. 49 . Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 1 después de la estabilización.

6.3.5 Análisis cuantitativo de las correlaciones de la fase 1 antes y después de la estabilización.

**TABLA XXV.
Análisis de correlaciones antes de la estabilización**

Fase 1. Antes de la estabilización			
Variables	Correlación Pearson	Correlación Spearman	
Temp - Concentración	0,07508357206883394	0,067883420504867	Pearson
pH - Concentración	-0,47580216120445307	-0,3531837883893804	Pearson
Temp - pH	-0,2908210841630067	-0,2897446953604868	Pearson

TABLA XXVII.
Análisis de correlaciones después de la estabilización.

Fase 1. Después de la estabilización			
Variables	Correlación Pearson	Correlación Spearman	
Temp - Concentración	0,12640709880809192	0,17222323796060204	Spearman
pH - Concentración	0,22813750390144147	0,22499106778784278	Pearson
Temp - pH	-0,5032725348495696	-0,49154280421038066	Pearson

Las tablas XXV y XXVI, presentan los valores de las correlaciones de Pearson y Spearman de las variables medidas en el proceso, tanto antes como después de la estabilización, estos valores ofrecen un análisis comparativo sobre qué modelo de correlación se ajusta mejor al comportamiento dinámico del digestor en la fase 1, tanto antes como después de la estabilización.

En la tabla XXV, se observa un predominio de la correlación de Pearson a lo largo del periodo de toma de datos en todas las correlaciones analizadas, en la tabla XXIV, después de la estabilización, la correlación entre las variables temperatura y concentración de gas pasa a ser predominante la correlación de Spearman.

Es importante señalar que, si se examinan detenidamente las correlaciones, estas resultan ser muy bajas, aunque se evidencie la predominancia de una sobre la otra. Es posible que los cambios continuos en la carga orgánica realizados durante todo el proceso experimental tengan influencia en la escasa correlación entre las variables de forma global, tanto antes como después de la estabilización. No obstante, se destaca que, al realizar un análisis más detallado por días, se observa correlaciones más relevantes que brindan información sobre el comportamiento dinámico de estas variables en función del tiempo.

6.3.6 Gráficas y análisis de las correlaciones antes de la estabilización fase 2

En la fase 2 antes de la estabilización, se observa que la correlación entre la temperatura y la concentración de gas sigue un comportamiento similar al de la fase 1 antes de la estabilización, ambas muestran una correlación positiva, indicando una relación directa entre estas variables. Sin embargo, en la fase 2 antes de la estabilización, esta correlación es ligeramente mayor que en la fase 1, como se evidencia en la fig. 52. Además, se observa una ligera disminución en la variabilidad temporal de la señal.

En cuanto a la correlación entre el pH y la concentración de gas en la fase 2 antes de la estabilización también es negativa, al igual que en la fase 1 antes de la estabilización. No obstante, se aprecia que en la fase 2, esta correlación es ligeramente superior a la de la fase 1 antes de la estabilización.

Finalmente, el análisis más relevante se centra en la correlación entre la temperatura y el pH, en esta correlación, se observa una mayor variabilidad temporal en la fase 2 antes de la estabilización, aunque la tendencia es negativa, indicando una relación inversa entre la temperatura y el pH, esta correlación tiende a ser más fluctuante y cambiante en el tiempo en comparación con la fase 1 antes de la estabilización. Además, se destaca la predominancia de la correlación de Spearman en la fase 2 antes de la estabilización, a diferencia de la fase 1 antes de la estabilización, donde predominaba la correlación de Pearson.

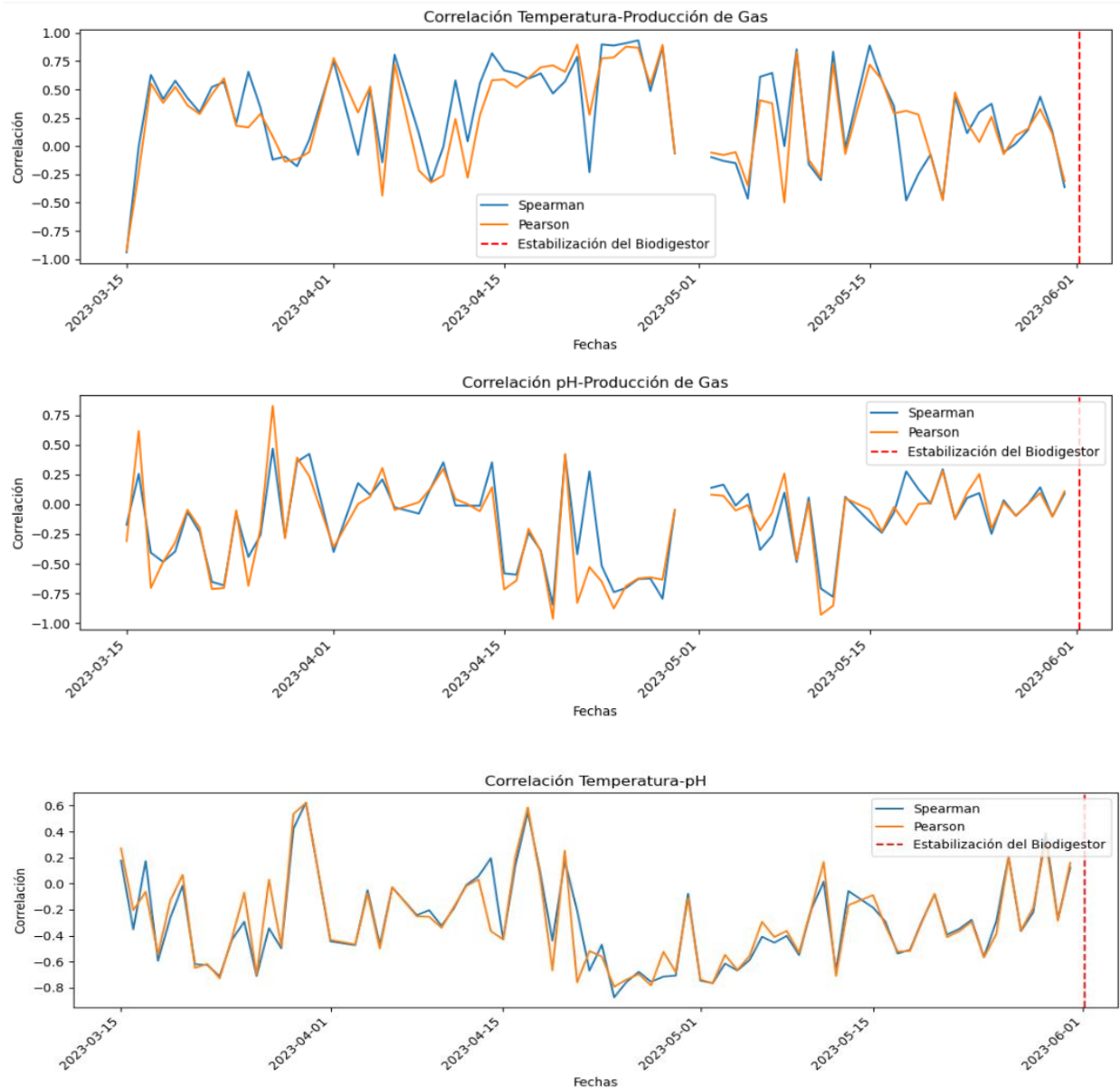


Fig. 50. Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 2 antes de la estabilización.

6.3.7 Gráficas y análisis de las correlaciones después de la estabilización fase 2

El análisis de la fase 2, representado en la fig. 53 posterior a la estabilización, revela una interrupción en las mediciones que se extiende durante un mes, desde el 26 de junio de 2023

hasta el 5 de agosto de 2023, debido a fallas en el equipo de monitoreo. La necesidad de reemplazar componentes, adquirir nuevos sensores y reprogramar el dispositivo ESP32 resultó en una significativa pérdida de datos.

En primer lugar, es evidente la alta variabilidad de las correlaciones de la fase 2 después de la estabilización, no se observa una estabilidad o tendencia clara en ninguna de las tres correlaciones analizadas, tanto la correlación de Pearson como la de Spearman muestran valores cercanos a cero.

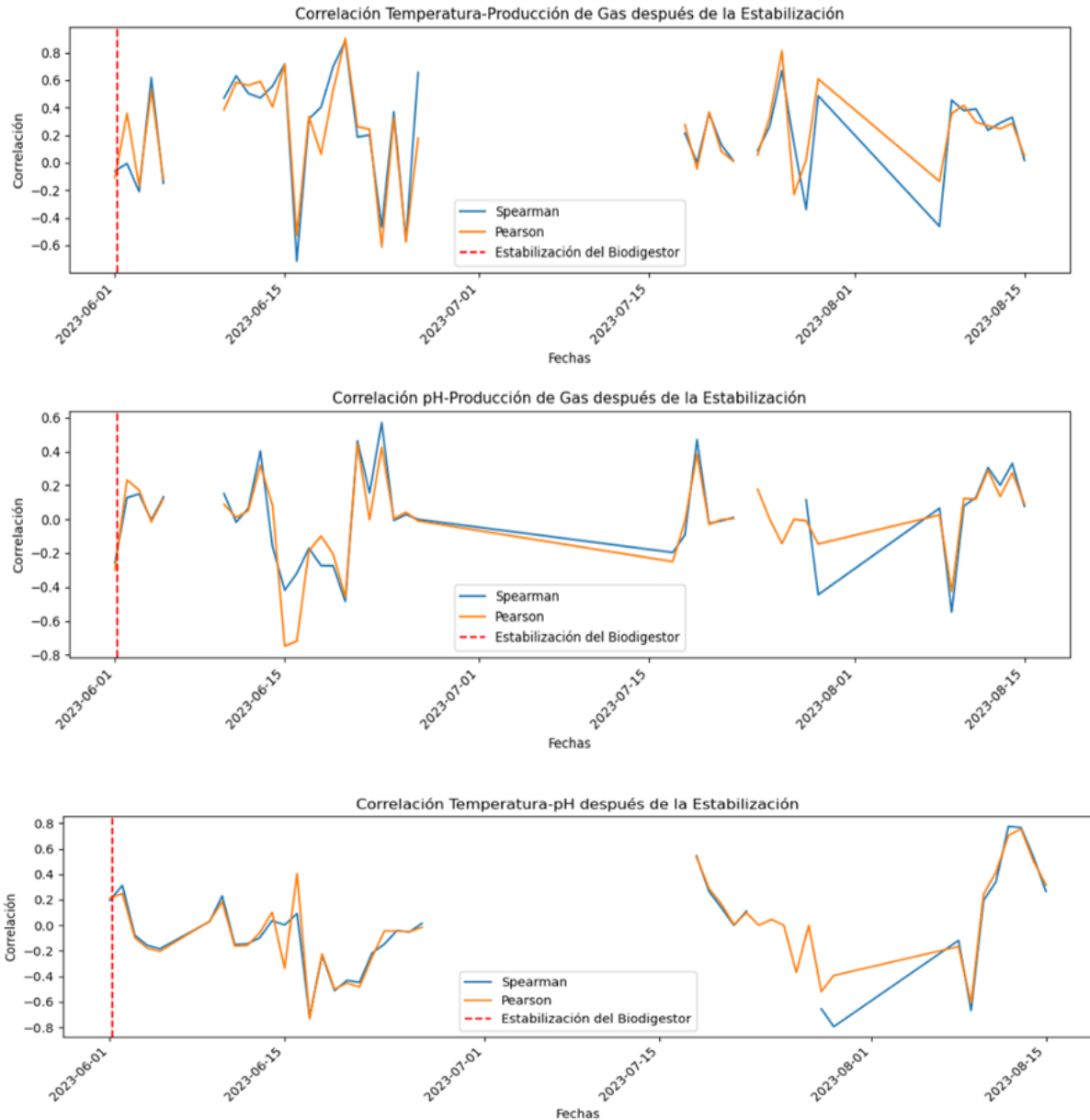


Fig. 51. Serie temporal de correlaciones de Pearson y Spearman en la fase 2 después de la estabilización.

Algunas causas de la variabilidad en las correlaciones en la fase 2 después de la estabilización se deben posiblemente aspectos como:

- Después de la estabilización, es posible que haya ocurrido un cambio en la composición de la población microbiana en el digestor, estos cambios podrían deberse a factores como fluctuaciones en la carga orgánica, cambios en la temperatura o pH, que influyen en las relaciones entre las variables medidas, como la temperatura, el pH y la concentración de gas.
- Los microorganismos en el digestor pueden haberse adaptado a las condiciones estabilizadas de manera diferente, lo que influye en su capacidad para metabolizar sustratos y producir gas, esta adaptación afecta las relaciones entre las variables medidas, ya que los microorganismos pueden responder de manera diferente a los cambios en las condiciones ambientales.
- La variabilidad en las correlaciones también se atribuye a fallas en la alimentación, cambios en las condiciones operativas del digestor, problemas con el suministro de nutrientes o problemas mecánicos en el equipo de monitoreo.

En conclusión, las diferencias en las correlaciones durante la fase 2, después de que se alcanzó la estabilización, se deben a cambios en la composición de los microorganismos, adaptaciones de estos mismos o incluso a posibles fallos en el proceso de alimentación.

6.3.8 Análisis cuantitativo de las correlaciones de la fase 2 antes y después de la estabilización.

El análisis de las correlaciones antes y después de la estabilización en la fase 2 muestra cambios en su comportamiento a lo largo del tiempo como se ve en las tablas XXVII y XXVIII. Inicialmente, en la fase 2, se observa una correlación de Pearson entre la temperatura y la concentración de gas, así como entre el pH y la concentración de gas, sin embargo, la correlación entre la temperatura y el pH se basa en Spearman.

Después de la estabilización, tanto la correlación entre la temperatura y la concentración de gas como la del pH y la concentración de gas cambian a Spearman, además, la correlación entre la temperatura y el pH muestra un comportamiento afín con la correlación de Spearman. La variabilidad en las correlaciones a lo largo del tiempo sugiere que la fase 2 tiende a adoptar valores que se correlacionan más estrechamente con Spearman. Estas correlaciones, son consistentemente bajas en todo el periodo de medición estudiado.

En consecuencia, no se puede afirmar que, las variables estén correlacionadas en la fase 1 y en la fase 2, no obstante, al analizar las variables en días específicos, es posible identificar correlaciones más altas, ya sea con dependencia lineal (Pearson) o cambios de dirección y fuerza en las relaciones entre las variables (Spearman), incluso en ausencia de linealidad.

TABLA XXVII.
Análisis de correlación de Pearson

Fase 2. Antes de la estabilización			
Variabes	Correlación Pearson	Correlación Spearman	
Temp - Concentración	0,2697620101294742	0,14590835415183262	Pearson
pH - Concentración	-0,21900366718729905	-0,1113086984470557	Pearson
Temp - pH	-0,24650013689824293	-0,32588359243501847	Spearman

TABLA XXVIII.
Análisis de correlación de Pearson después de la estabilización

Fase 2. Después de la estabilización			
Variabes	Correlación Pearson	Correlación Spearman	
Temp - Concentración	0,0872283719478985	0,13341105394488245	Spearman
pH - Concentración	0,08990643565615278	0,31027080975002647	Spearman
Temp - pH	0,06527349927573901	0,0817680980871638	Spearman

6.3.9 Análisis de correlaciones diarias

Se buscó identificar el modelo matemático que mejor se adapte a la dinámica temporal del digestor, lo cual permite comprender su eficiencia y rendimiento. Sin embargo, los datos recolectados de manera global antes y después de la estabilización del digestor no proporcionan una visión detallada de la tendencia del comportamiento dinámico, esto se debe a diversos factores experimentales, como fluctuaciones en las cargas orgánicas, fallos en el proceso o ajustes en la actividad microbiana.

A pesar de estas limitaciones, se encontró información al analizar los datos diarios, esta aproximación permitió observar eventos específicos y analizarlos en detalle. Uno de los aspectos más relevantes de este análisis fue la identificación de correlaciones significativas entre las variables medidas. Es importante destacar que, a pesar de las fluctuaciones y la complejidad del proceso, se encontró correlaciones altas en la data diaria. Estas correlaciones brindan insights importantes sobre cómo las variables medidas interrelacionadas en diferentes momentos del proceso. Además, permiten entender mejor bajo qué condiciones el digestor tiende a mostrar una mayor correlación, ya sea de Pearson o Spearman.

En conclusión, el análisis de la data diaria proporcionó una mayor comprensión del comportamiento dinámico del digestor. A través de la identificación de correlaciones

significativas, se puede mejorar la comprensión del proceso y optimizar su rendimiento en ambas fases. Se resalta que para este análisis se usó herramientas computacionales para análisis de datos y ciencia de datos como Power Bi y Python, con las dos herramientas se calculó las correlaciones y gráficos importantes que dieron una visión más específica de los eventos analizados.

6.3.10 Análisis de la serie temporal correspondiente a los días analizados, para la fase 1 del reactor de dos etapas.

- **Análisis para el 18 de abril de 2023:** el 18 de abril de 2023, registraron variaciones en los valores la temperatura, pH y concentración de gas metano, siendo el momento más destacado un pico máximo de concentración de gas metano de 6000 ppm a las 4:36 p.m., acompañado de una temperatura máxima de 33°C, paralelamente, el pH inició con un valor de 7.88 a las 6:08 a.m., descendiendo hasta alcanzar un mínimo de 4.31 durante el pico de concentración de gas, este comportamiento sugiere una influencia positiva de la temperatura sobre la concentración de metano y la relación inversa entre el pH y la concentración de gas.

Es importante aclarar que el uso del sensor MQ4 para monitorear metano CH_4 , atiende el requerimiento de emplear componentes de bajo costo, aunque inicialmente se diseñó para detectar concentraciones relativamente bajas de CH_4 (en el rango de partes por millón), su integración con plataformas de adquisición de datos —como ESP32 o Arduino— y la posibilidad de ajustarlo mediante calibraciones para abarcar niveles mayores de concentración justifican plenamente su uso en este estudio [98], en vista de que los ensayos se llevaron a cabo con reactores a escala piloto, no se esperaba altos porcentajes de metano, en consecuencia, el MQ4 proporciona datos adecuados para correlacionar variables como pH y temperatura, resultando en un seguimiento continuo y económico de la DA, sobre todo en contextos de laboratorio donde la simplicidad y el presupuesto son factores clave [99].

En la fig. 54, se presenta la evolución temporal de las tres variables medidas el 18 de abril de 2023 en la fase 1 del reactor.



Fig. 52. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 18 de abril

En cuanto al análisis de las correlaciones, se identificó relaciones significativas entre las variables estudiadas, calculadas a través de los métodos de Pearson y Spearman. La correlación de Pearson mostró valores elevados, con un coeficiente de 0.90 entre la temperatura y la concentración de gas metano, indicando una fuerte relación lineal directa, asimismo, se encontró una correlación de -0.93 entre el pH y la concentración de gas, lo que resalta una relación inversa consistente. Los coeficientes de Spearman reafirmaron las tendencias generales y destacaron la capacidad de este método para captar relaciones monotónicas en el sistema.

En la fig. 55, se presenta el cálculo de la correlación de Pearson realizado en Power BI.

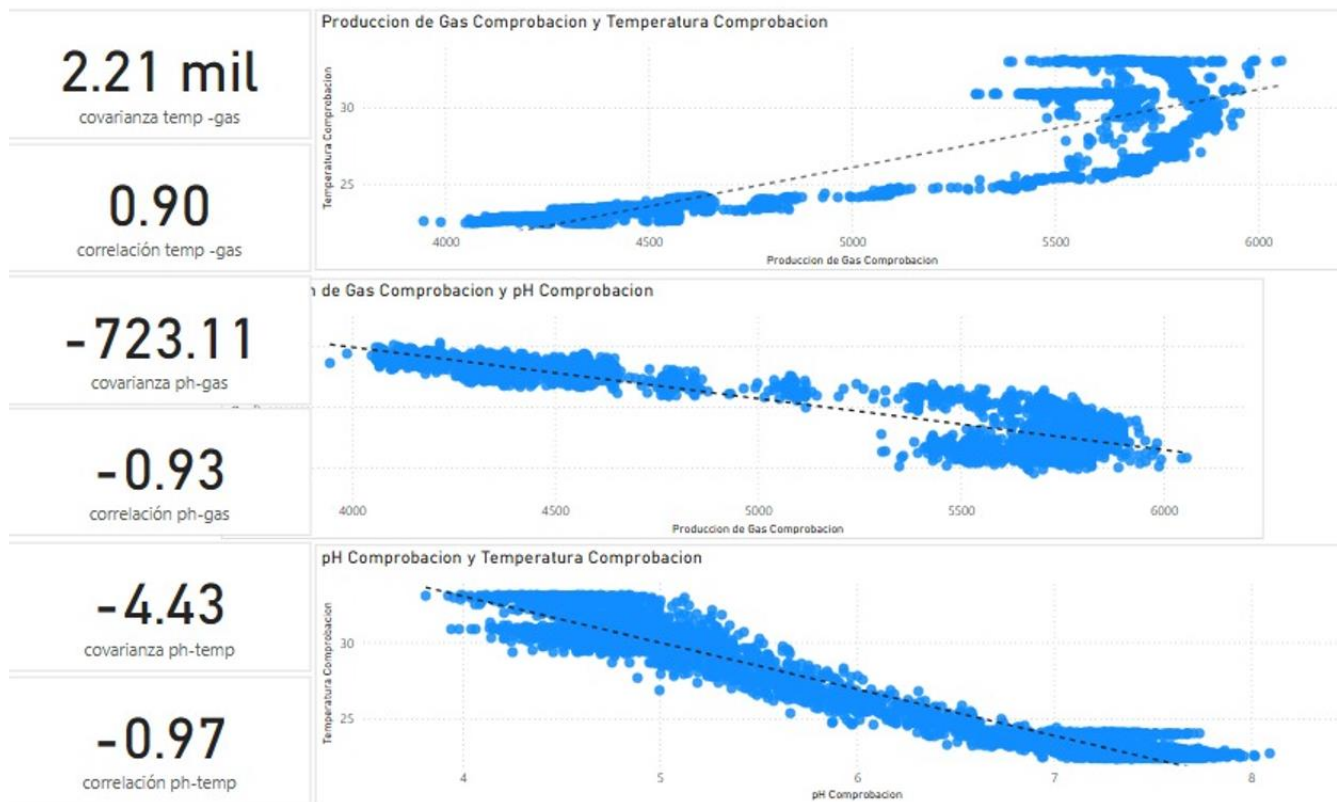


Fig. 53. Correlación de Pearson en Power Bi 18 de abril fase 1.

Finalmente, el análisis de los diagramas de dispersión proporcionó una visualización clara de la relación entre las variables medidas, destacando una fuerte linealidad entre la temperatura y la concentración de gas metano, mientras que la relación entre el pH y la concentración de gas se manifiesta como inversa y también lineal. En conjunto, los diagramas de dispersión y las correlaciones cuantitativas refuerzan la comprensión de las interacciones que rigen el rendimiento del reactor en este día de operación.

En la fig. 56 se observa la correlación de Spearman calculada en Python

```

Correlación de Spearman entre Temperatura y Producción de Gas (2023-04-18): 0.8390243560966896
Correlación de Spearman entre Ph y Producción de Gas (2023-04-18): -0.8005079754404636
Correlación de Spearman entre Ph y Temperatura (2023-04-18): -0.931886807668597

```

Fig. 54. Correlación de Spearman en Python.

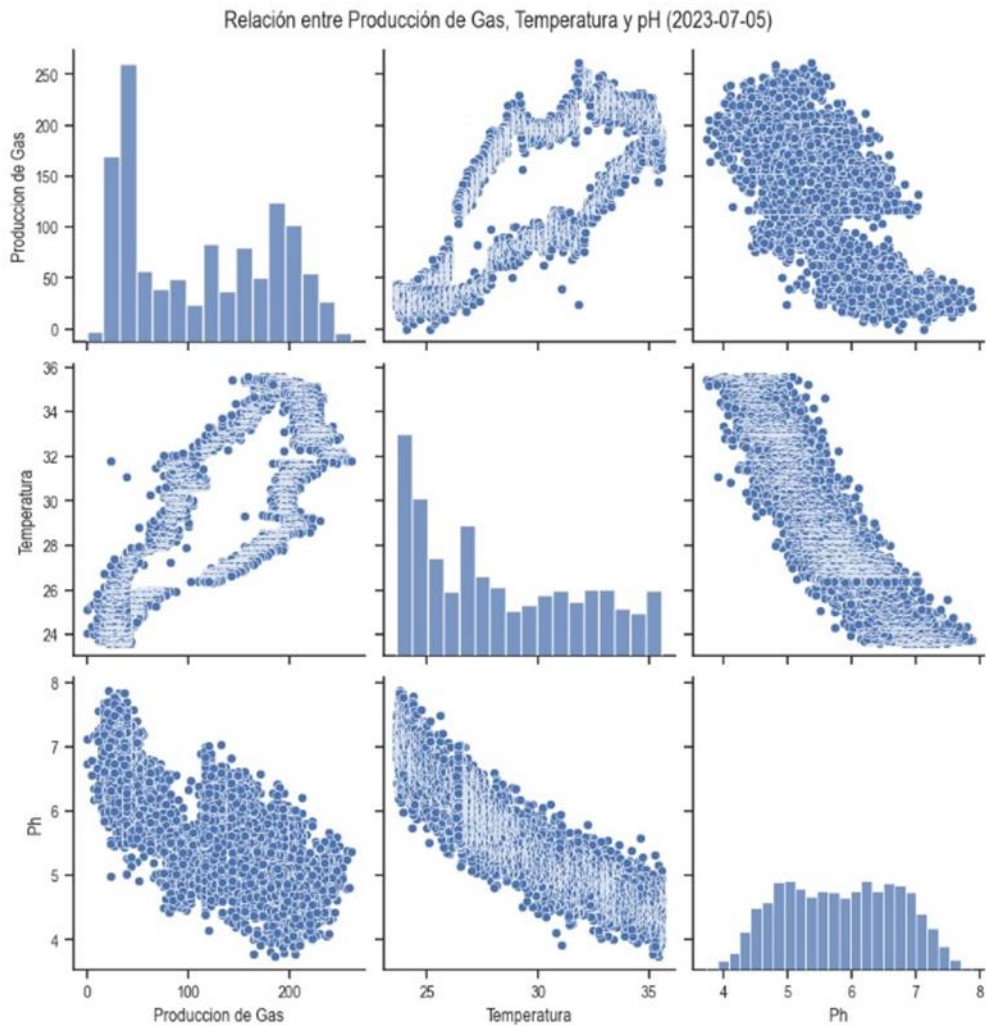


Fig. 55. Gráficos de dispersión del 18 de abril del 2023 en la fase 1.

La fig. 57, realizada a través de un código en Python de las variables de estudio, muestra claramente la linealidad de las variables pH y temperatura en función de la concentración de gas.

- **Análisis para el 17 de junio de 2023**

El 17 de junio de 2023, permitió observar cambios en las variables estudiadas: temperatura, pH y concentración de gas metano, durante este día, se registró un pico máximo de concentración de gas metano de 822 ppm a las 6:22 p.m., mientras que la temperatura alcanzó un valor máximo de 31°C a la 1:22 p.m., antes de descender levemente a 30.19°C en el momento de mayor concentración de gas. El pH, por su parte, comenzó el día con un valor de 7.54 a las 8:09 a.m., experimentando un descenso hasta alcanzar un mínimo de 4.68 durante el pico de concentración.

En la fig. 58 se observa el comportamiento temporal el 17 de junio realizada en Power Bi:

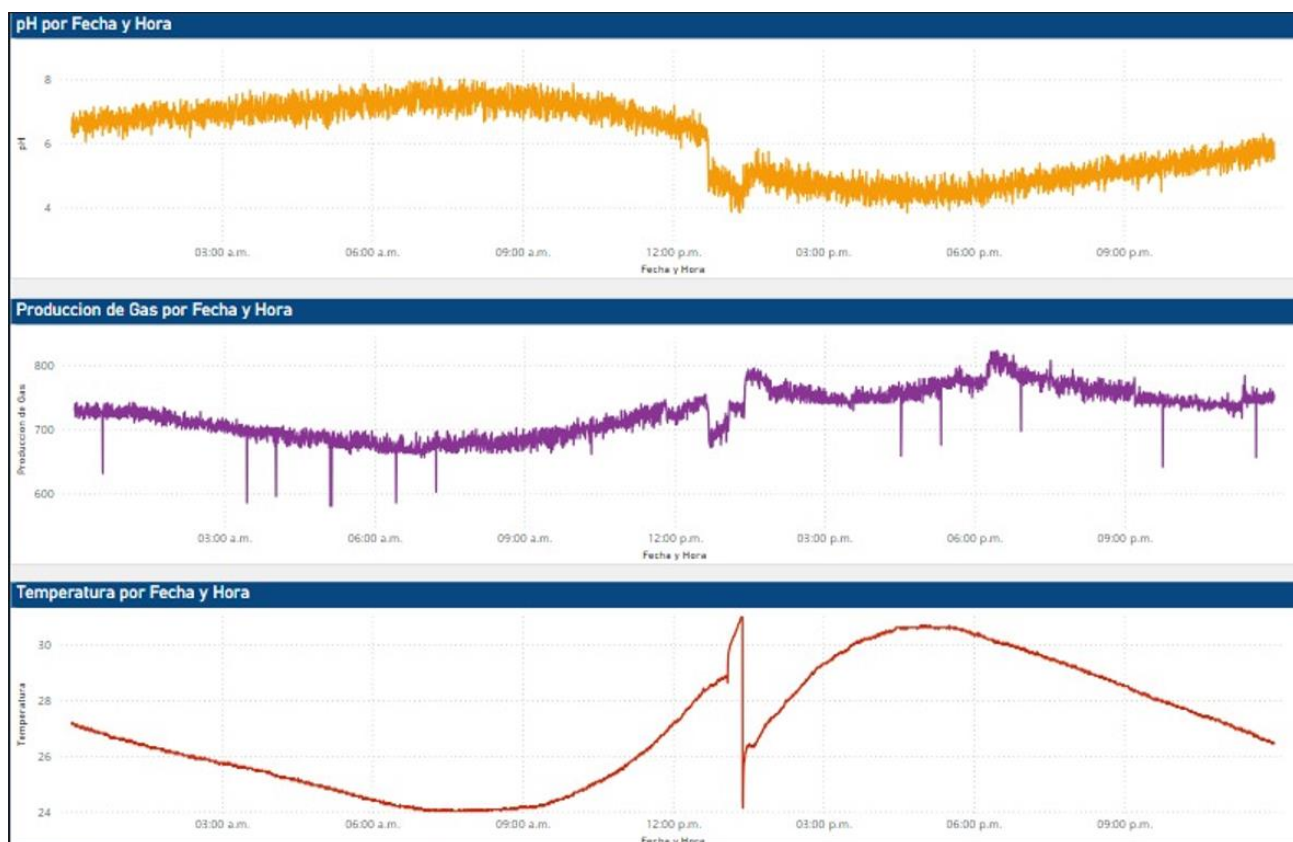


Fig. 56. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 17 de junio fase 1.

En el análisis de las correlaciones, se identificaron relaciones estrechas entre las variables, calculadas mediante los métodos de Pearson y Spearman. Pearson reveló una correlación positiva moderadamente alta ($r = 0.85$) entre la temperatura y la concentración de gas metano, así como una correlación negativa significativa ($r = -0.84$) entre el pH y la concentración de gas. Los coeficientes de Spearman mostraron valores ligeramente superiores, lo que sugiere que este método captó mejor los cambios no lineales asociados con las variaciones observadas en la operación del reactor.

En la fig. 59 se observa la correlación de Pearson correspondiente al 17 de junio de 2023

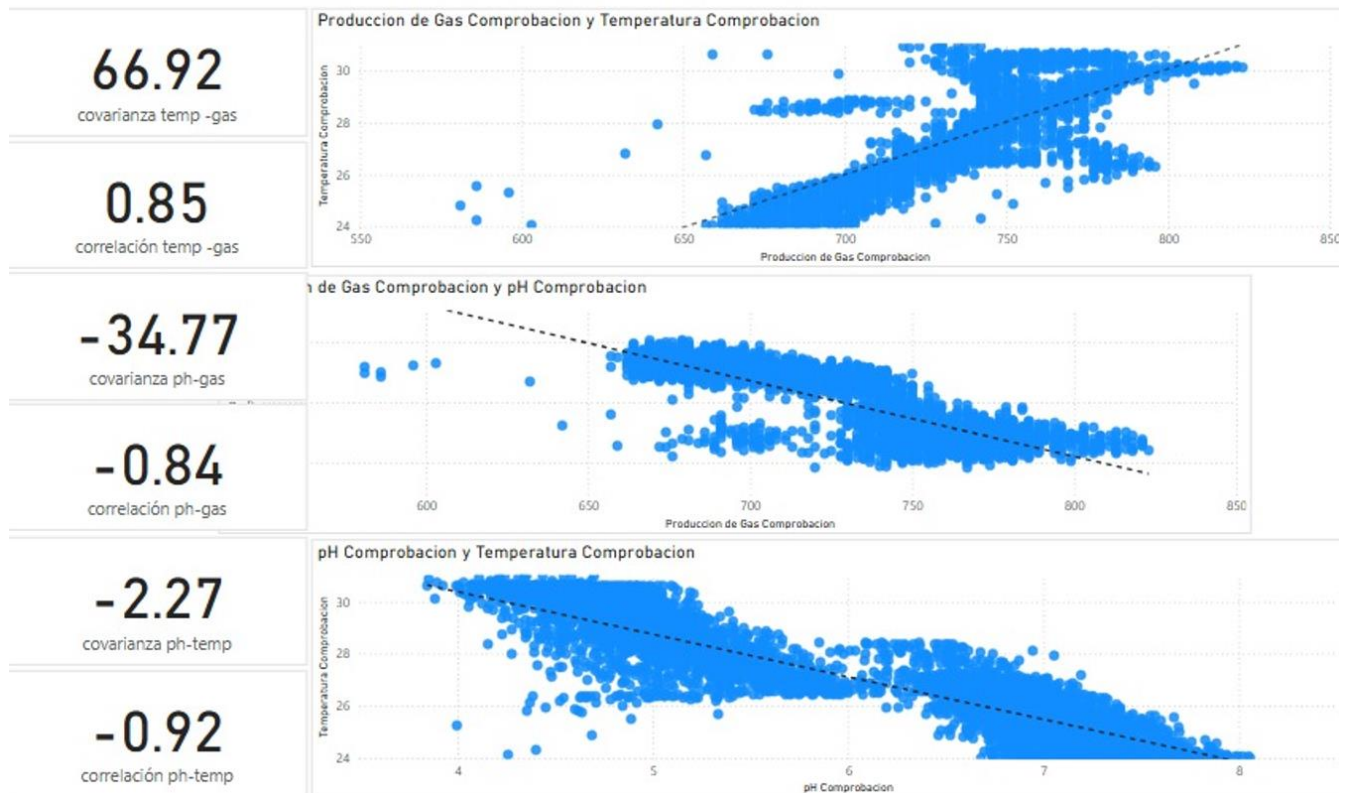


Fig. 57. Correlación de Pearson en Power Bi 17 de junio

En cuanto a los diagramas de dispersión, las gráficas reflejaron la presencia de valores atípicos que influyen en las relaciones lineales, pero que el método de Spearman logró atenuar de manera más efectiva. Además, se observó que los datos presentaron una distribución menos uniforme, con cambios que afectaron la dinámica general del sistema. Estas representaciones complementan los análisis cuantitativos, proporcionando una visión más detallada de cómo las variables interactúan en condiciones dinámicas.

En la fig. 60 que las correlaciones de Spearman fueron mayores que las de Pearson.

```

Correlación de Spearman entre Temperatura y Producción de Gas (2023-06-17): 0.8681457512469333
Correlación de Spearman entre Ph y Producción de Gas (2023-06-17): -0.8506251564278302
Correlación de Spearman entre Ph y Temperatura (2023-06-17): -0.9247729059556103

```

Fig. 58. Correlación de Spearman en Python 17 de junio.

En el gráfico de dispersiones de la fig. 61 se observa las dispersiones entre las variables.

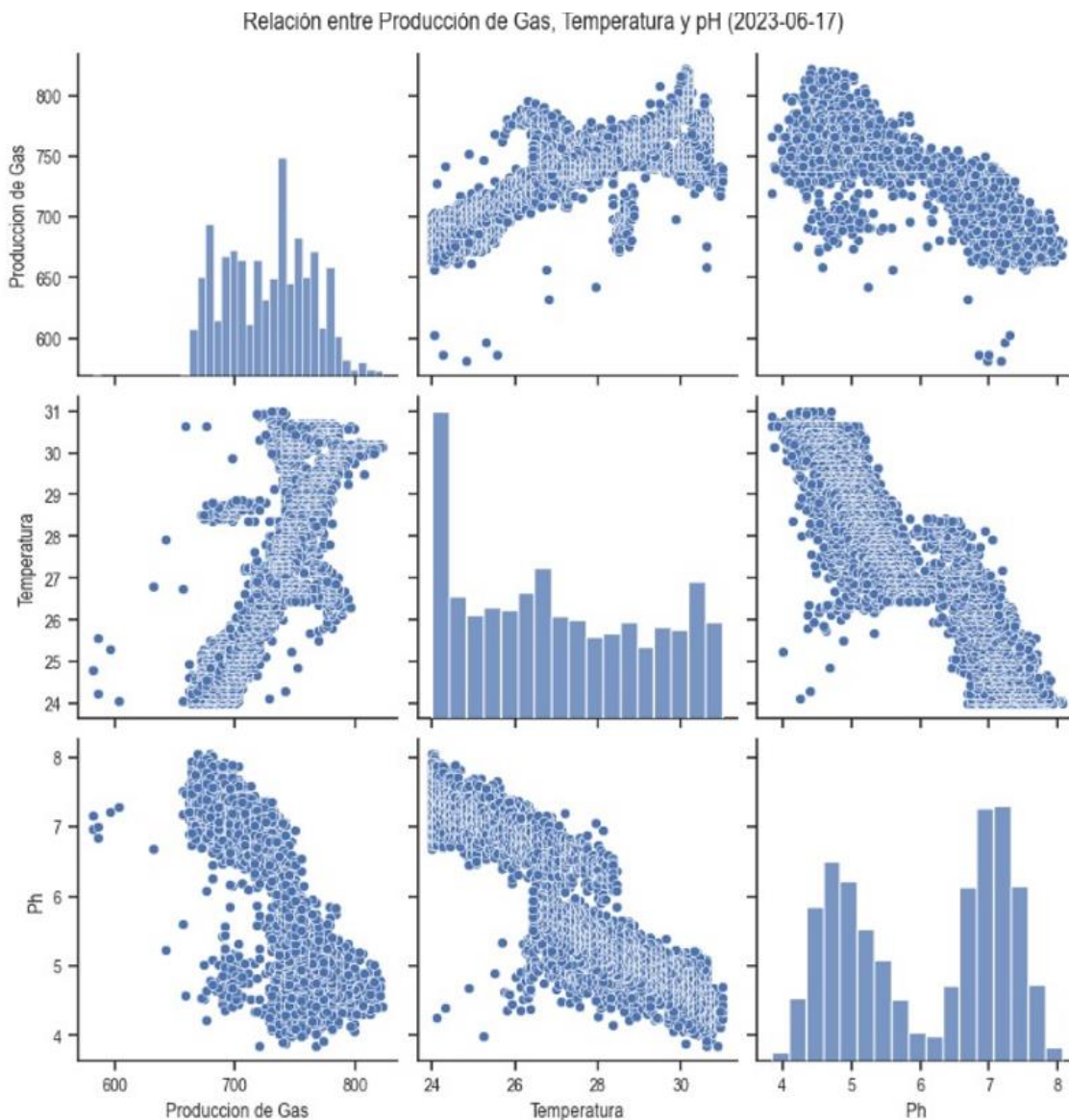


Fig. 59. Gráficos de dispersión del día 17 de junio del 2023 en la fase 1.

- **Análisis para el 5 de Julio de 2023**

El 5 de julio de 2023, permitió identificar comportamientos distintivos en las variables monitoreadas: temperatura, pH y concentración de gas metano, durante este día, se registró un pico máximo de concentración de gas metano de 244 ppm a las 5:12 p.m., acompañado por un incremento de la temperatura, que alcanzó un valor máximo de 35.05°C, y un descenso del pH hasta 5.23 en el momento de mayor concentración de gas.

En la fig. 62 se observa el comportamiento temporal el 5 de julio realizada en Power Bi:



Fig. 60. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 5 de julio fase1.

En el análisis de las correlaciones, los coeficientes de Pearson indicaron relaciones significativas entre las variables. La correlación entre temperatura y concentración de gas fue positiva y moderadamente alta ($r = 0.79$), mientras que la correlación entre pH y gas fue negativa ($r = -0.81$). Spearman presentó valores similares, lo que evidenció que este método captó mejor las fluctuaciones abruptas en las variables.

En la fig. 63, se observa las correlaciones de Pearson realizadas en Power Bi.

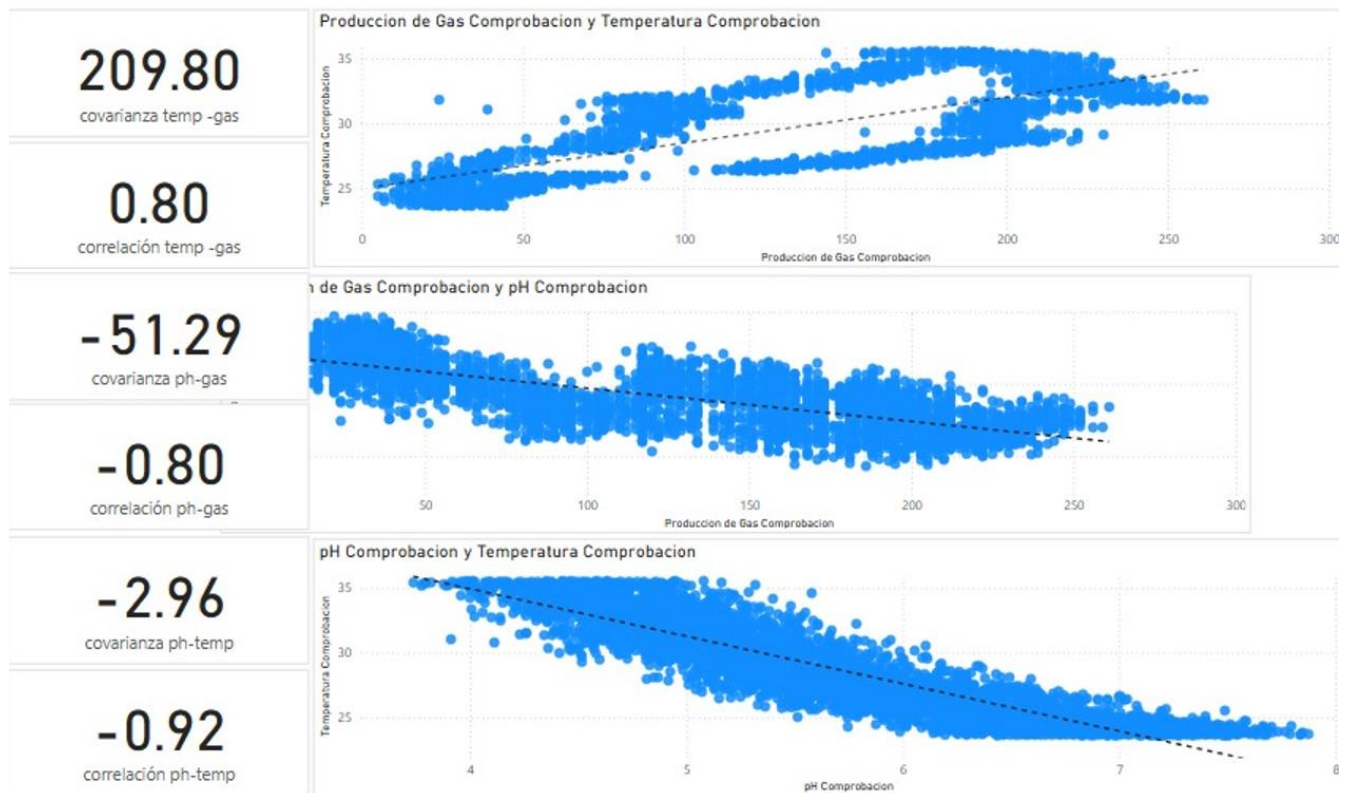


Fig. 61. Correlación de Pearson en Power Bi 5 de julio.

Los diagramas de dispersión proporcionaron información visual complementaria. Las gráficas mostraron una relación más monótonica que lineal entre el pH y la concentración de gas, y entre la temperatura y la concentración de gas. Estos resultados destacan que las variaciones en las condiciones del sistema generaron datos dispersos, pero las correlaciones de Spearman lograron identificarlas de manera más efectiva.

En la fig. 64 se observa la correlación de Spearman realizada en Python.

```

Correlación de Spearman entre Temperatura y Producción de Gas (2023-07-05): 0.8381501807669339
Correlación de Spearman entre Ph y Producción de Gas (2023-07-05): -0.8092651534414017
Correlación de Spearman entre Ph y Temperatura (2023-07-05): -0.9277009074722996

```

Fig. 62. Correlación de Spearman en Python 5 de julio.

En el gráfico de dispersiones de la fig. 65 se observa las dispersiones entre las variables.

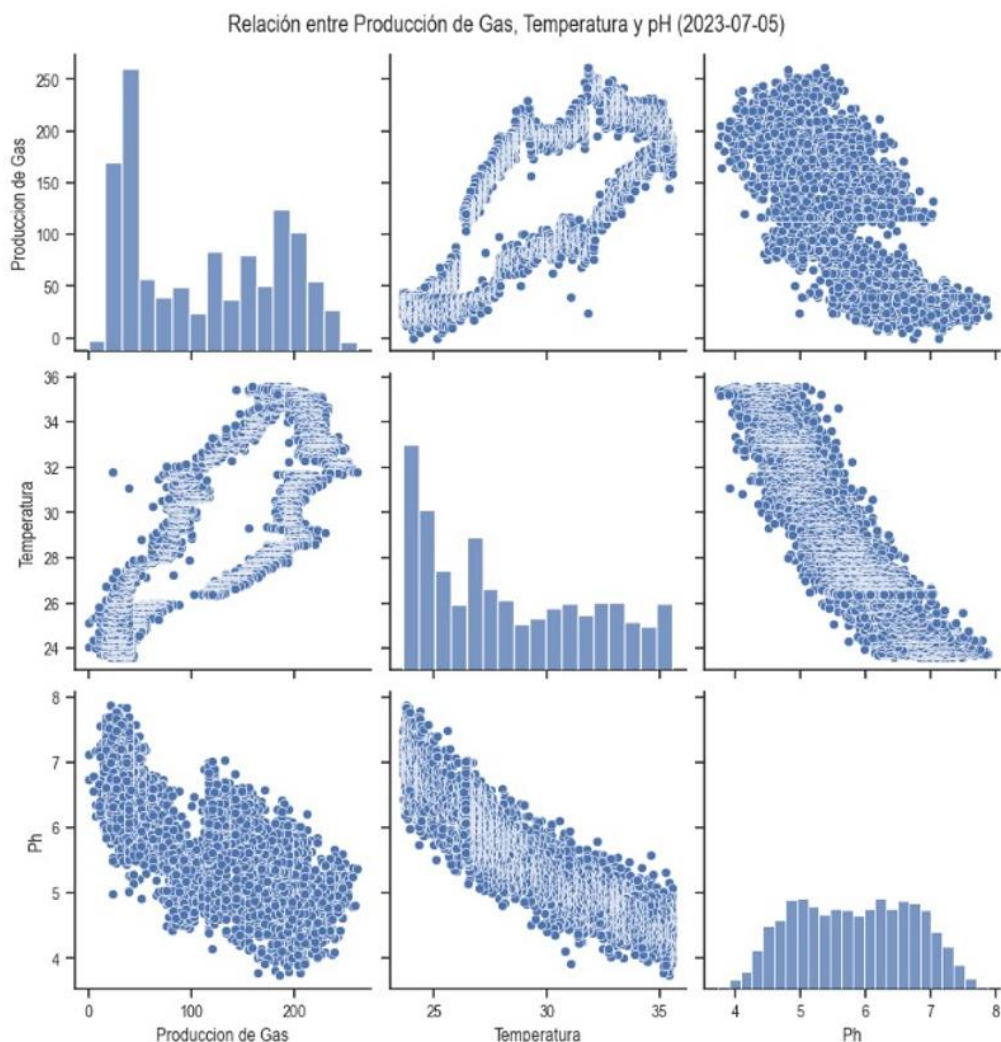


Fig. 63. Gráficos de dispersión del día 5 de julio del 2023 en la fase 1.

- **Análisis para el 8 de Julio de 2023**

El 8 de julio de 2023, mostró un comportamiento estable en las variables monitoreadas: temperatura, pH y concentración de gas metano, durante este día, se registró un pico máximo de concentración de gas metano de 212 ppm a las 6:47 p.m., acompañado de una temperatura máxima de 30.56°C. El pH, por su parte, descendió hasta alcanzar un mínimo de 5.54 en el momento de mayor concentración de gas.

En la fig. 66 se observa la evolución temporal de las variables del 8 de julio



Fig. 64. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 8 de julio

El análisis de las correlaciones indicó relaciones significativas entre las variables, con valores altos tanto en Pearson como en Spearman. La correlación entre temperatura y concentración de gas ($r = 0.91$) consolidó la influencia directa de la temperatura en el rendimiento del sistema, mientras que la correlación entre pH y gas (-0.86) validó la interacción inversa entre estos parámetros.

En la fig. 67 se observa la correlación de Pearson en Power Bi

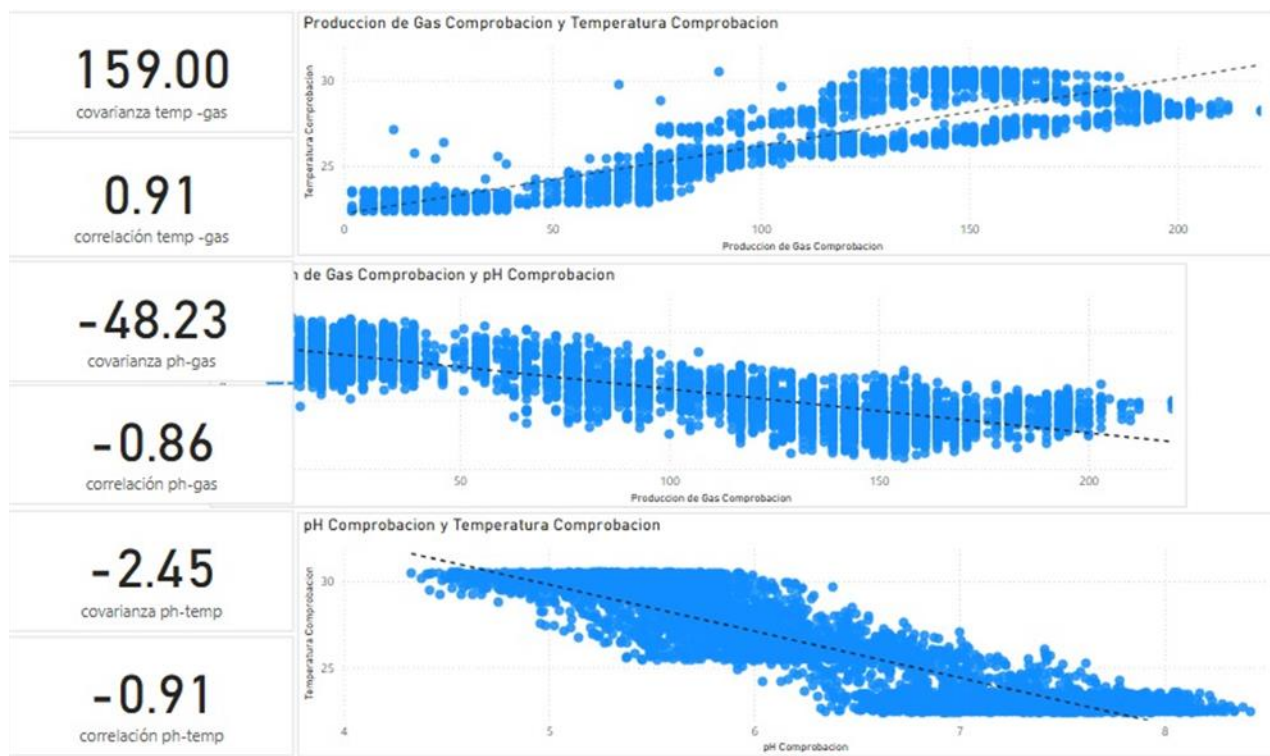


Fig. 65. Correlación de Pearson en Power Bi 8 de julio.

Los diagramas de dispersión confirmaron la fuerte dependencia lineal entre las variables temperatura y gas, mientras que la relación entre el pH y el gas fue inversa. Estas representaciones visuales permitieron comprender mejor las interacciones entre las variables y reforzaron las conclusiones cuantitativas obtenidas.

En la fig. 68 se observa el cálculo de la correlación de Spearman en Python para 8 de julio

```

Correlación de Spearman entre Temperatura y Producción de Gas (2023-07-08): 0.879564684811755
Correlación de Spearman entre Ph y Producción de Gas (2023-07-08): -0.8331492747249188
Correlación de Spearman entre Ph y Temperatura (2023-07-08): -0.8923207435674907

```

Fig. 66. Correlación de Spearman en Python 8 de julio.

La fig. 69, muestra una gran dependencia lineal entre las variables

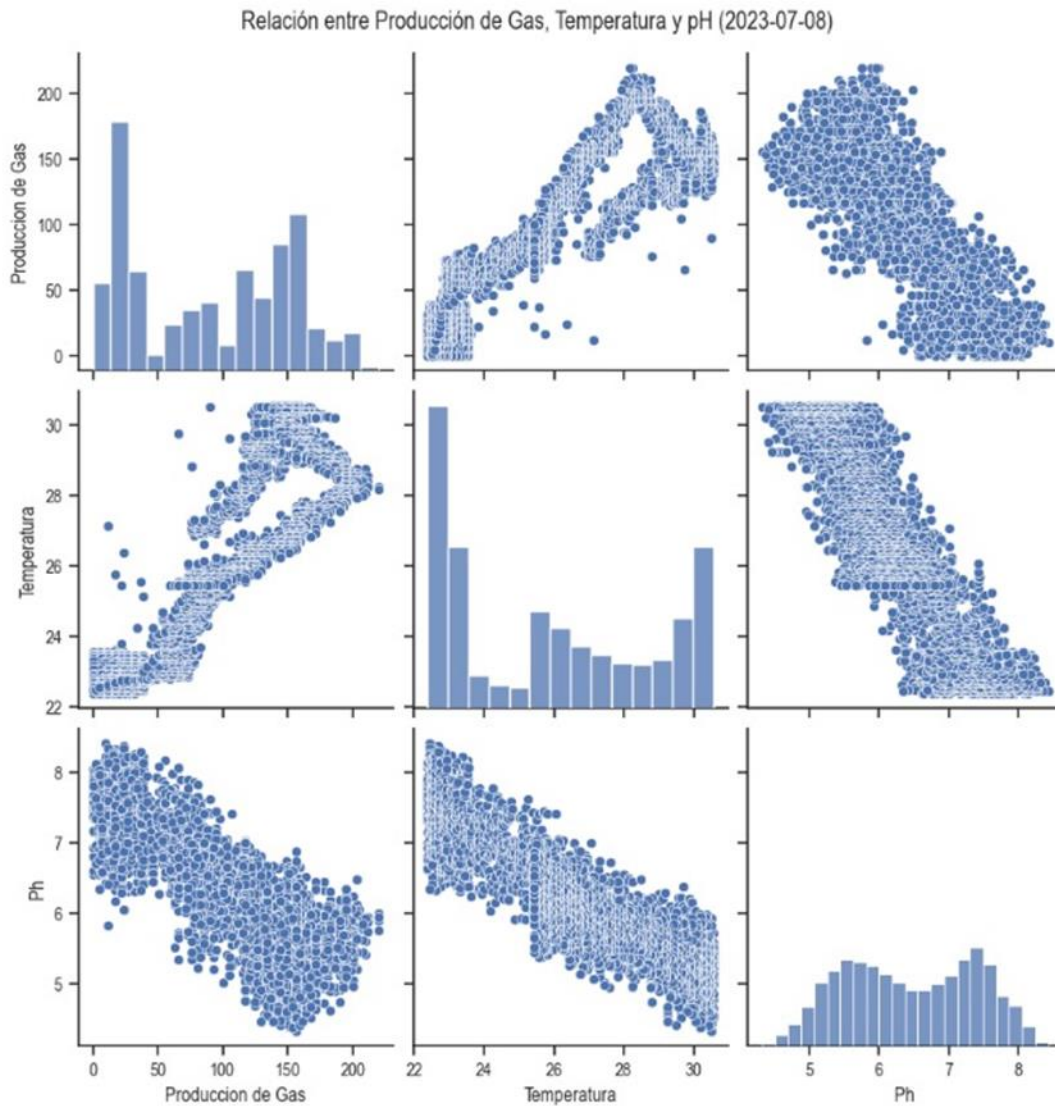


Fig. 67. Gráficos de dispersión del 8 de julio del 2023 en la fase 1.

- **Análisis temporal 24 de abril de 2023 en la fase 2**

El único día en los 154 días de análisis y tomas de medidas donde en las dos correlaciones hay valores superiores a 0.7 para temperatura y concentración de gas, inferiores a -0.7 para pH y concentración de gas y temperatura y concentración de gas fue el 24 de abril para la fase 2, este es el día donde se describió una mejor correlación entre las variables de procesos por eso se escogió este último día para hacer análisis de la fase 2, como se expresó anteriormente.

En la fig. 70, se observa la serie temporal del día 24 de abril.

Desde las 12 de la madrugada hasta aproximadamente las 10 de la mañana, los sensores MQ4 detectaron una concentración de gas metano promedio entre 500 a 1000 ppm, pero

exactamente a las 10:10 de la mañana se tiene un cambio abrupto saturándose y llegando a los 10000 ppm a las 10:15, cuando sucede ese fenómeno la temperatura está en 26,6°C, este cambio en el censado de gas metano del sensor MQ4 hace que se pueda detectar cambios en el pH también, la sonda de pH registró un valor entre 5 y 5.3 entre las 12 de la madrugada y las 11:20 del día, inmediatamente el pH descendió entre 3.1 y 3.3 a las 12:10. Vale la pena resaltar que la caída del pH sucedió después de la saturación del sensor MQ4 por consiguiente se infiere que el aumento del nivel de concentración de metano, produce un aumento en el pH.

Posteriormente la medición de gas metano a las 5:09 de la tarde cae abruptamente perdiendo la saturación el sensor y vuelve a tener valores similares anteriores a la saturación entre 500 ppm y 700 ppm, esta caída en la medición de gas metano sucede cuando la temperatura registra 28,19°C descendiendo pues ya está llegando el final de la tarde, el pH también sufre un cambio drástico a las 5:09 volviendo a sus valores iniciales antes de la saturación del sensor de gas.



Fig. 68. Comportamiento en el tiempo de las variables medidas el 24 de abril, fase 2.

- **Análisis de las correlaciones de Pearson y Spearman en Power Bi y Phyton para el 24 de abril del 2023**

Como se mencionó anteriormente el 24 de abril fue el único día de la fase 2 donde se presentaron correlaciones muy buenas tanto de Spearman como de Pearson, fueron más de

100 días de mediciones continuas encontrando este día como el único donde hay unas correlaciones relevantes.

Como se observa en la fig. 71 la correlación de Spearman es preponderante en 2 de las 3 correlaciones, en este caso temperatura-concentración de gas, pH-temperatura, la correlación de Pearson es preponderante en pH- concentración de gas, se observa que temperatura y concentración de gas tanto en Pearson como Spearman tienen valores a 0,7 y la correlación de pH y concentración de gas, temperatura y pH son inferiores a -0,7. Este día es el mejor día en la fase 2 de las mediciones realizadas a diario donde las variables están mejor correlacionada entre sí.

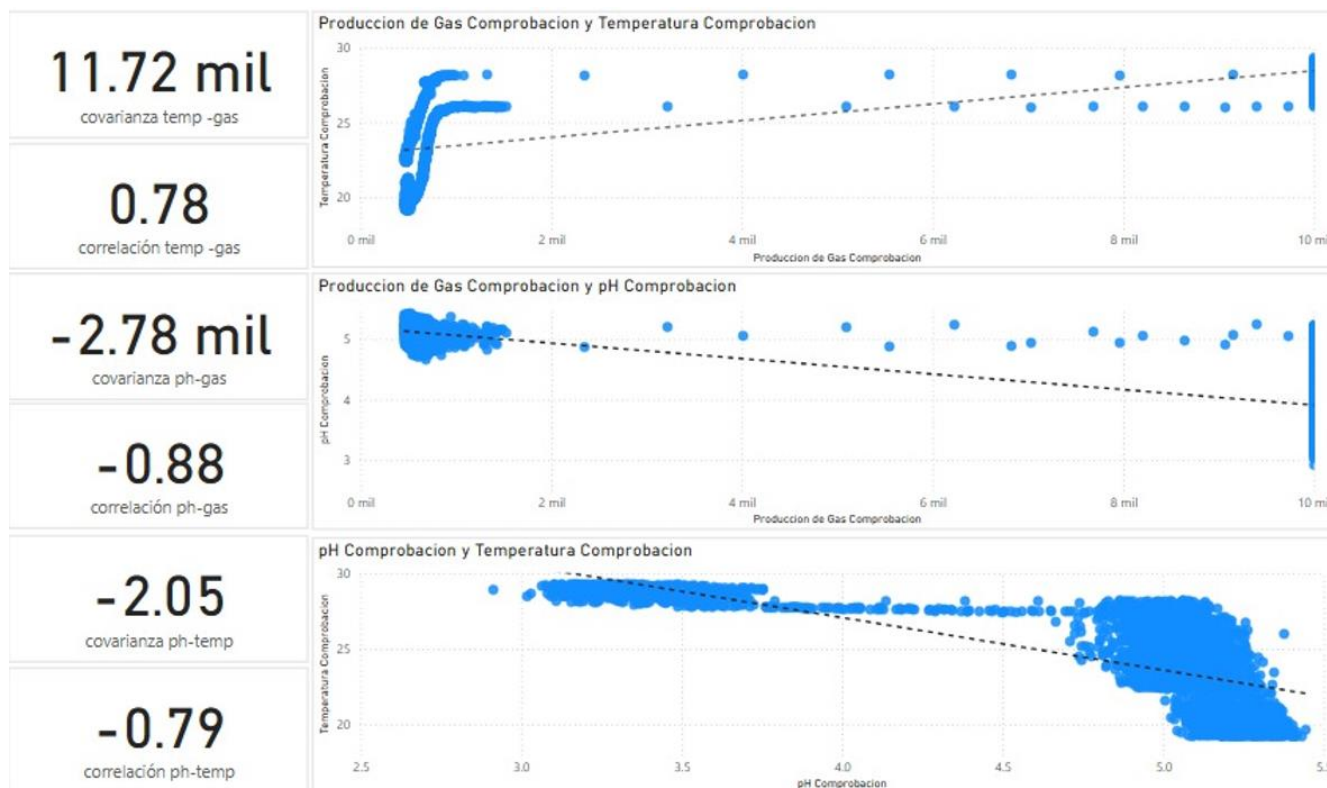


Fig. 69. Correlación de Pearson en Power Bi y Spearman en Python, abril 24 fase 2.

- **Análisis de los gráficos de dispersión del 24 de abril del 2023 en la fase 2**

El grafico de dispersiones muestra en la fig. 72, valores más irregulares sobre todo en las correlaciones donde Spearman es predominante como temperatura-pH. Aunque también claramente se ve una relación lineal entre pH-concentración de gas, esto indica que los datos en este día para estas variables son pocos irregulares.

Relación entre Producción de Gas, Temperatura y pH (2023-04-24)

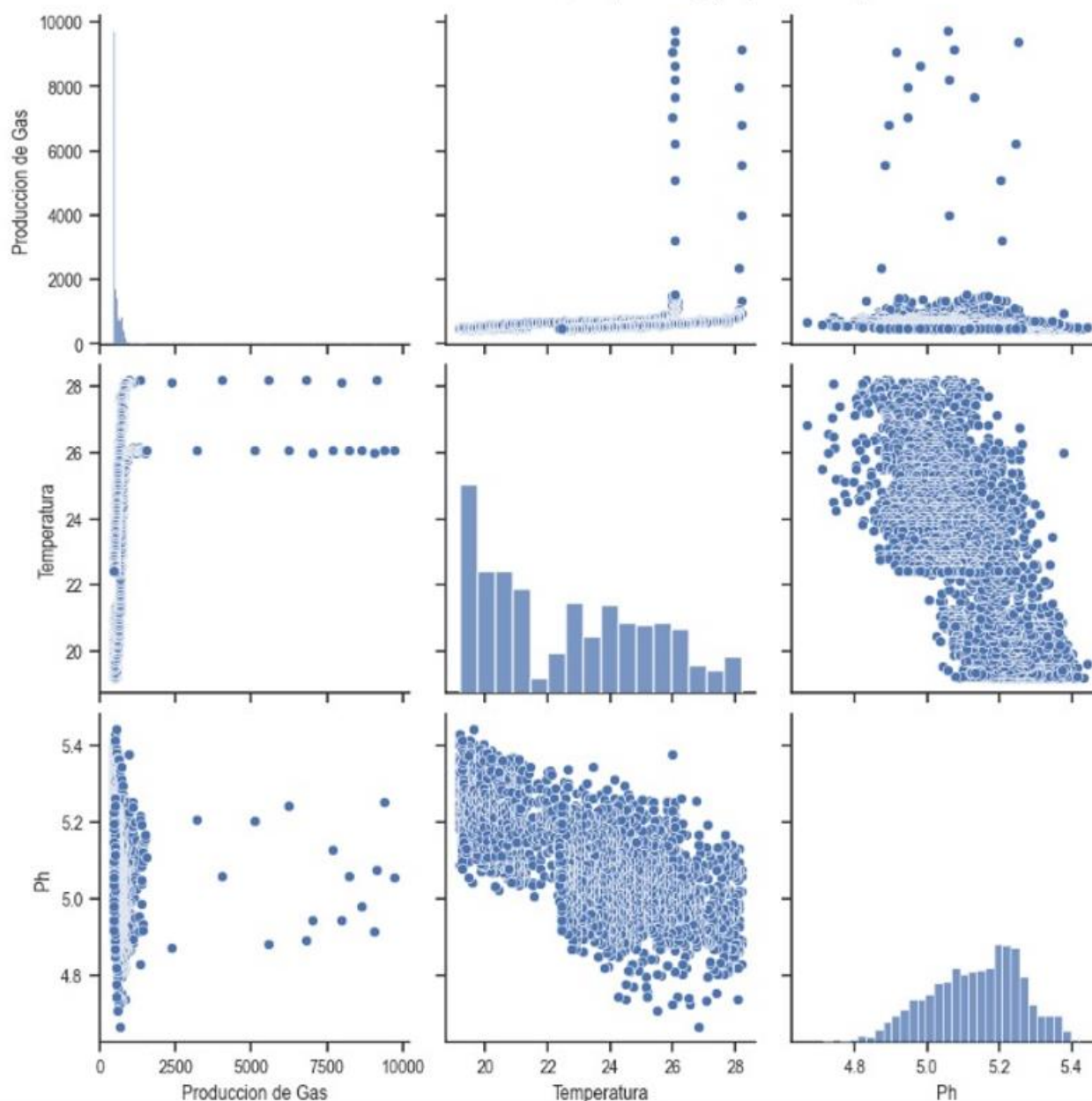


Fig. 70. Gráficos de dispersión del día 24 de abril del 2023 en la fase 2.

6.3.11 Correlaciones relevantes de Pearson y Spearman del reactor en ambas fases.

Con el análisis de las correlaciones y su comportamiento temporal en el transcurso de las mediciones tanto para la primera y segunda fase del reactor, se tiene una visión amplia de las dependencias en función de la concentración de las variables monitoreadas, se observa que las fechas principales donde las correlaciones tienen altos valores son específicas independientemente de si sucedieron antes o después de la estabilización del digestor, es importante recalcar, el criterio para definir cuando una correlación es alta:

- Correlación temperatura y concentración de gas: Entre 0.7 y 1
- Correlación pH y concentración de gas: entre -0.7 y -1
- Correlación Temperatura y pH: 0.7 y 1

Se observa que entre los 154 días analizados en la fase 1, se tiene 8 días donde la correlación de Pearson es predominante y 4 días donde la correlación de Spearman es predominante, se tiene 2 días donde la correlación tanto de Pearson como de Spearman muestran predominancia combinada, esto quiere decir que ambas cumplen los rangos establecidos no teniendo una predominancia sobre otra, como conclusión se determina que en los días donde hay más predominancia en correlaciones las variables del digestor en la fase 1 tienen una mayor linealidad.

TABLA XXIX.
Valor de las correlaciones y su dominancia

Dominancia de Pearson						
Fecha	Correlación de Spearman			Correlación de Pearson		
	T° y Concentración gas	pH y Concentración gas	T° y pH	T° y Concentración gas	pH y Concentración gas	T° y pH
15/04/2023	0.7893603593724217	-0.7726917669373662	-0.8531072189114125	0.8432447819724624	-0.8267819343926711	-0.8589171639357913
18/04/2023	0.8390243560966896	-0.8005079754404636	-0.931886807668597	0.9021934149693356	-0.9276792256273191	-0.9702797792973493
28/04/2023	0.7236433313043253	-0.8082867748375587	-0.9302794420212148	0.7722376633283887	-0.89192064428729	-0.9467485505668549
12/05/2023	0.840367603611929	-0.7762017377837914	-0.945690909052655	0.8500748022596345	-0.8254377948156189	-0.9590427938692462
21/06/2023	0.7709080928675361	-0.7184878126282338	-0.8742988337026554	0.7962982529722136	-0.7350860710496008	-0.885582789175199
24/06/2023	0.838561948602411	-0.8153722270700208	-0.9425031880540273	0.8833811668248539	-0.8425824565533384	-0.9510675256381187
27/06/2023	0.8736525019854302	-0.7914561457923269	-0.9069475562926846	0.9325102888718059	-0.8366053271287072	-0.909622845210707
8/07/2023	0.8795646848117555	-0.8331492747249188	-0.8923207435674907	0.9083310690504652	-0.8582514338266719	-0.9106470987199338
Dominancia de Spearman						
Fecha	Correlación de Spearman			Correlación de Pearson		
	T° y Concentración gas	pH y Concentración gas	T° y pH	T° y Concentración gas	pH y Concentración gas	T° y pH
17/04/2023	0.9839137574211042	-0.8654264946116801	-0.874305144236044	0.894736877810522	-0.8498998211099507	-0.8331062637255677
17/06/2023	0.8681457512469333	-0.8506251564278302	-0.9247729059556103	0.850459816633956	-0.8423159458142991	-0.9233258804698423
26/06/2023	0.9318306541740434	-0.8414110804615748	-0.9062509159883367	0.9230411314712251	-0.7853418113402528	-0.8903913807050742
5/07/2023	0.8381501807669339	-0.8092651534414017	-0.9277009074722996	0.8010983516770895	-0.7962354904982485	-0.91542341321659
Dominancia Combinada						
Fecha	Correlación de Spearman			Correlación de Pearson		
	T° y Concentración gas	pH y Concentración gas	T° y pH	T° y Concentración gas	pH y Concentración gas	T° y pH
25/06/2023	0.8835779033638267	-0.8135491067181628	-0.9214706479465181	0.9031646088794112	-0.7982144738233674	-0.9218681504609705
30/06/2023	0.9036702703467258	-0.8237202078907886	-0.9127239299144553	0.9269575048641392	-0.8042901305659664	-0.8907299199797387

Nota: Se observa el valor de las correlaciones y las fechas donde sucedieron estos eventos.

En la fase 2, el 24 de abril de 2023 fue el único día donde se cumplió esta premisa y los límites de las correlaciones, pero no hay predominancia de una sobre otra, se observa que es combinada y que ambas correlaciones, aunque cumplen los límites, no hay una correlación que se superior a otra, es claro observar en este punto la falta de orden lineal en esta fase.

6.4 OBJETIVO ESPECÍFICO 4: IMPLEMENTAR UNA HERRAMIENTA DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS.

6.4.1 Simulación del sistema de medición mediante software electrónico

La plataforma Tinkercad, ilustrada en la fig. 73, es una herramienta esencial en el desarrollo y planificación de sistemas electrónicos, como el de monitoreo de digestores. Tinkercad, es una plataforma en línea de simulación y diseño de circuitos electrónicos, permite a los diseñadores y desarrolladores crear prototipos virtuales antes de materializarlos físicamente. En el contexto del proyecto de monitoreo de reactores, esta plataforma juega un rol fundamental, ofreciendo una serie de beneficios y aportes invaluableles en el proceso de desarrollo y optimización.

La simulación de circuitos electrónicos y sistemas mediante Tinkercad ofrece una serie de ventajas para la eficiencia, efectividad y el éxito general del proyecto:

- **Análisis riguroso y validación previa:** Tinkercad posibilita un análisis minucioso y una validación previa de los circuitos y sistemas electrónicos. Antes de implementar cualquier componente físicamente, se pueden verificar las funcionalidades, interacciones y resultados esperados. Para este proyecto, se traduce en asegurar que los sensores de pH, temperatura y concentración de gas interactúen de manera coherente y que las mediciones sean precisas y confiables.
- **Reducción de tiempo y costos:** la simulación en Tinkercad evita el costoso proceso de construcción de prototipos físicos para cada iteración del diseño. Los posibles errores, conflictos o incompatibilidades se pueden identificar y corregir en la etapa virtual, esto se traduce en un ahorro significativo de tiempo y recursos.
- **Exploración de escenarios y adaptación flexible:** la plataforma permite explorar diferentes configuraciones y escenarios de funcionamiento, se puede ajustar parámetros como los intervalos de muestreo, umbrales de alarma y otros factores. Esto facilita el análisis del comportamiento del sistema en diversas condiciones y cómo reaccionará ante cambios en el ambiente del digestor.
- **Depuración y mejora de la robustez:** la capacidad para detectar problemas y conflictos en la etapa de simulación es esencial para lograr un sistema robusto y confiable. Al anticipar posibles desafíos y depurarlos en el entorno virtual, se aumenta la confiabilidad y la eficacia del sistema en operación.
- **Refinamiento iterativo del diseño:** mediante Tinkercad, se pueden realizar ajustes y refinamientos en el diseño de manera ágil y eficiente. Esto permite explorar diferentes enfoques y encontrar la configuración óptima para el monitoreo de reactores, contribuyendo a la mejora continua del proyecto.

La plataforma Tinkercad desempeña un papel fundamental en el desarrollo del sistema de monitoreo de digestores, al facilitar la simulación y optimización de sistemas antes de su prototipado. Su relevancia se debe a la capacidad de analizar, validar y perfeccionar el diseño de manera virtual, lo que contribuye a mejorar la eficiencia, la confiabilidad y el éxito global del proyecto.

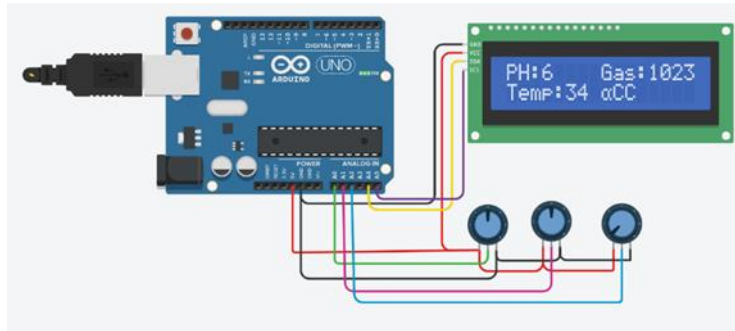


Fig. 71. Diagrama simulado de sistema de monitoreo reactores de dos etapas.[80]

6.4.2 Desarrollo del código para el monitoreo de digestores con ESP32

El desarrollo del código surgió como parte del objetivo diseñar e implementar una herramienta de adquisición y visualización de datos para reactores de dos etapas, basado en el microcontrolador ESP32, este sistema combina tecnologías de sensores, conectividad IoT y procesamiento en tiempo real para abordar las limitaciones tradicionales en la monitorización de variables críticas del proceso de DA.

El diseño del código fue guiado por la necesidad de obtener datos precisos y confiables de variables como el pH, la temperatura y la concentración de gas metano. Estas variables son esenciales para garantizar la estabilidad del proceso biológico dentro del reactor y maximizar la concentración de biogás.

El ESP32 fue seleccionado como núcleo del sistema debido a sus capacidades avanzadas, que incluyen conectividad Wi-Fi integrada y potencia de procesamiento suficiente para manejar múltiples sensores y protocolos de comunicación. El código implementó una estructura modular que facilitó la interacción con sensores específicos, la validación de datos y la transmisión de estos a plataformas de análisis en la nube como Thing Speak.

Con este enfoque, el proyecto no solo abordó necesidades técnicas específicas, sino que también contribuye al avance de tecnologías sostenibles en el manejo de desechos orgánicos y producción de energías renovables.

En la fig. 74 se observa la estructura lógica de ejecución del código dentro del ESP32 desde su lectura de las variables principales, su visualización y también su envío a la plataforma Thing Speak.

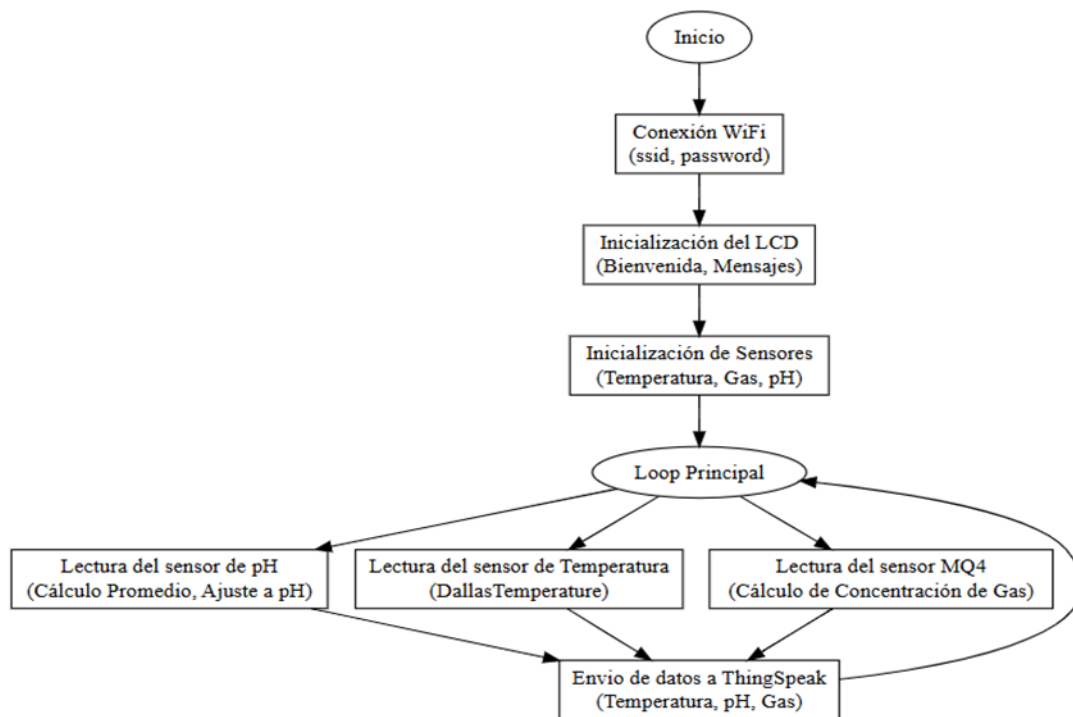


Fig. 72. Diagrama de bloques de ejecución del código en el ESP 32

6.4.3 Componentes principales del código.

El código incluye funciones específicas para interactuar con sensores clave:

- Sensor de Temperatura: este módulo mide la temperatura interna del digestor, asegurando que se mantenga dentro del rango óptimo para la actividad microbiana.
- Sensor de Gas MQ4: determina la concentración de metano en el biogás producido, lo que permite evaluar la eficiencia del proceso.
- Sensor de pH: realiza lecturas precisas del nivel de acidez o alcalinidad del medio, una variable crítica para la estabilidad del sistema.

6.4.4 Estructura del sistema

El código sigue un enfoque modular que simplifica su mantenimiento y ampliación:

- Inicialización: configura los sensores y establece la conexión Wi-Fi.
- Adquisición de datos: captura lecturas de los sensores, utilizando algoritmos de filtrado y promedio para mejorar la precisión.
- Procesamiento: convierte señales analógicas en valores significativos (pH, °C, ppm).
- Transmisión de datos: envía las lecturas procesadas a Thing Speak para su almacenamiento y análisis.
- Visualización local: muestra en tiempo real las lecturas en una pantalla LCD, facilitando el monitoreo inmediato por parte de los operadores.

El uso del ESP32 destaca por su capacidad de integrar múltiples funciones en un único dispositivo compacto. Su conectividad integrada elimina la necesidad de hardware adicional para la transmisión de datos, mientras que su potencia de procesamiento permite implementar algoritmos avanzados de filtrado y cálculo en tiempo real.

El sistema, además, es escalable, con ajustes mínimos, puede incorporar nuevos sensores o integrarse con otras plataformas de análisis.

6.4.5 Implementación del prototipo en laboratorio

- **Ubicación y calibración de los sensores:**

Los sensores de pH se instalaron en puntos del digestor donde la muestra fue representativa. Se evitó la ubicación en áreas de alta turbulencia o en lugares donde se acumulen residuos. La calibración del sensor de pH fue esencial para traducir la señal eléctrica en valores óptimos de pH. Esto se logró mediante soluciones de calibración estándar con valores conocidos.

La ubicación de los sensores de temperatura fue estratégica para captar la variación térmica en diferentes áreas del digestor. Se consideró zonas donde se esperaba un mayor cambio de temperatura. La calibración se realizó comparando las mediciones del sensor con termómetros de referencia confiables.

La ubicación de los sensores de gas MQ-4, se seleccionó cuidadosamente para capturar la concentración real de metano en el digestor. Se evitó ubicarlos en áreas de alta humedad o en lugares donde la concentración de gas podría estar distorsionada. La calibración se realizó exponiendo el sensor a concentraciones conocidas de gas metano y ajustando los valores.

- **Organización del cableado y corrección de posibles ruidos eléctricos:**

La organización y gestión del cableado fueron fundamentales para garantizar una operación confiable y libre de interferencias electromagnéticas en el sistema de monitoreo de digestores.

Se evitó la instalación de cables de alimentación junto a cables de señal, ya que esto podría generar interferencias y ruido eléctrico en las mediciones. Mantener una separación adecuada entre los cables reduce la posibilidad de distorsiones en las señales.

Un adecuado aterrizaje y puesta a tierra de los componentes electrónicos y del sistema en su conjunto fue crucial para minimizar los ruidos eléctricos. Una conexión a tierra efectiva disipa cargas estáticas y evita acumulaciones de voltaje que podrían afectar las mediciones.

En caso de detectar ruidos eléctricos en las mediciones, se puede implementar filtros y supresores de ruido para eliminar las interferencias no deseadas y mejorar la calidad de las señales.

La ubicación precisa y la calibración adecuada de los sensores, como se ilustra en la fig. 75, junto con una correcta organización del cableado y la reducción de ruidos eléctricos, son aspectos esenciales para asegurar mediciones confiables y un funcionamiento eficiente del sistema de monitoreo de digestores. Estos factores constituyen elementos clave del proyecto y su implementación práctica en la optimización de la eficiencia del reactor.



Fig. 73. Ubicación de sensores y cableado de reactores.

6.4.6 Pruebas preliminares del sistema

Fue esencial llevar a cabo pruebas preliminares antes de poner en marcha el sistema de monitoreo de digestores. Estas pruebas garantizaron la fiabilidad, precisión y efectividad del sistema antes de su implementación completa. Se presenta una descripción detallada de las pruebas preliminares realizadas, junto con los análisis considerados.

- **Pruebas preliminares del sistema de monitoreo de digestores:**

Antes de implementar el sistema en el digestor, es esencial verificar que los sensores de pH, temperatura y gas (MQ4) funcionen correctamente. Se deben realizar mediciones de calibración con soluciones estándar para confirmar la precisión y la confiabilidad de las lecturas.

Integración del sistema: en esta fase, se ensamblan todos los componentes electrónicos y se verifica la comunicación entre ellos, se debe garantizar que los sensores estén conectados correctamente al ESP32, que la pantalla LCD muestre información coherente y que la plataforma Thing Speak reciba y registre los datos correctamente.

Se realizó una calibración global del sistema, ajustando los parámetros y valores de calibración de los sensores según las especificaciones del proyecto y las características del digestor.

Monitoreo de estabilidad: el sistema se prueba durante un período prolongado en condiciones estables para verificar su capacidad de mantener mediciones consistentes y confiables a lo largo del tiempo.

- **Análisis a considerar durante las pruebas:**

Precisión y calibración: se analizó la precisión de las mediciones realizadas por los sensores en comparación con valores de referencia, se realizó ajustes de calibración y se documentó las correcciones realizadas.

Tiempo de respuesta: se analizó el tiempo que tarda el sistema en detectar y reportar cambios en las variables monitoreadas, como fluctuaciones de pH o temperatura.

Estabilidad y repetibilidad: se evaluó la estabilidad y repetibilidad de las mediciones durante un período de tiempo, se analizó si las mediciones fueron coherentes y constantes bajo condiciones estables.

Capacidad de alarma: se verificó la capacidad del sistema para detectar y activar alarmas en situaciones críticas, como cambios bruscos de pH o concentración de gas.

Interferencias y ruido: se analizó la presencia de posibles interferencias electromagnéticas o ruido en las mediciones y se implementó las correcciones necesarias.

Fiabilidad de la comunicación: se evaluó la fiabilidad de la transmisión de datos desde el ESP32 a la plataforma Thing Speak, se verifica si los datos registraban de manera precisa y sin pérdidas.

Integración con la plataforma de monitoreo: se verificó la correcta visualización y registro de los datos en la plataforma Thing Speak, asegurando que la información se presente de manera coherente y comprensible.

Análisis de tendencias: se analizó las tendencias y patrones en los datos recopilados durante las pruebas preliminares para identificar cualquier comportamiento inusual.

Las pruebas preliminares del sistema de monitoreo de digestores constituyen un componente esencial en el desarrollo del proyecto. Estas pruebas facilitaron la detección y corrección de posibles inconvenientes antes de la puesta en marcha, garantizando la confiabilidad y la efectividad del sistema en un entorno real.

6.4.7 Resultados cuantificables del sistema de monitoreo

La implementación del sistema de monitoreo basado en el ESP32 permitió la recopilación y análisis de datos cuantificables relacionados con el rendimiento de los reactores de dos etapas, estos resultados destacan la capacidad del sistema para adquirir y visualizar datos en tiempo real, cumpliendo con los objetivos establecidos en esta investigación.

- **Cantidad de datos recolectados**

Durante las pruebas operativas del sistema, se observó que cada ciclo del microcontrolador ESP32, configurado para registrar datos de pH, temperatura y concentración de gas, generaba una nueva entrada cada 15 segundos en la plataforma Thing Speak, esto se traduce en un total de 5,760 datos por día* por cada sensor, considerando un período de operación continua de 24 horas. En un período de una semana, el sistema generó aproximadamente 40,320 datos por sensor, ofreciendo un volumen considerable para análisis detallados. Esta densidad de datos asegura que cualquier variabilidad en las condiciones del reactor pueda ser detectada y registrada, proporcionando una base sólida para la optimización del proceso de DA.

- **Tiempo promedio para adquirir y visualizar los datos**

El sistema presentó un tiempo promedio de 1.5 segundos para adquirir cada lectura de los sensores, incluyendo el procesamiento de señales y su conversión a valores significativos (como pH, °C o ppm). Posteriormente, el ESP32 agrupó estas lecturas y las transmitió a la plataforma Thing Speak en un promedio de 2 segundos por conjunto de variables, garantizando una actualización eficiente de los datos en la nube. Adicionalmente, las lecturas fueron reflejadas en la pantalla LCD en menos de 1 segundo, permitiendo un monitoreo local inmediato. En total, el proceso desde la adquisición de los datos hasta su visualización en la nube y local se completó en aproximadamente 3.5 segundos, asegurando un flujo continuo y preciso dentro del intervalo de 15 segundos configurado para cada transmisión. [81][82].

Estos resultados destacan la eficiencia del sistema en términos de recolección y transmisión de datos. La capacidad de recopilar más de 5,700 puntos de datos diarios asegura un monitoreo granular, mientras que el tiempo reducido para la adquisición y visualización permite una respuesta rápida a cualquier cambio en las condiciones del digestor.

Esta combinación de velocidad y volumen de datos respalda el uso del sistema no solo para el monitoreo pasivo, sino también para la implementación futura de estrategias de control automatizado en digestores.

6.5 OBJETIVO ESPECÍFICO 5: EVALUAR EL RENDIMIENTO DE LOS REACTORES HACIENDO USO DEL SISTEMA MONITOREO PROPUESTO.

6.5.1 Análisis de los ácidos grasos en el reactor

En el proyecto, la recolección de muestras para el análisis de ácidos grasos volátiles (AGV) es fundamental para entender la complejidad y el bienestar del ecosistema microbiológico que participa en la DA. Los AGV, son intermediarios en la descomposición de materia orgánica, mediante la actividad metabólica de los microorganismos en el digestor.

6.5.2 Presentación de datos de los AGV y correlaciones

La tabla XXX recoge una serie de mediciones correspondientes a los AGV, concentración de gas metano, temperatura y pH, así como las correlaciones de Pearson y Spearman entre la temperatura y concentración de gas, y entre el pH y la concentración de gas. Estos datos se registraron en siete ocasiones distintas durante la fase inicial de operación del digestor, desde el 23 de junio de 2023 hasta el 8 de agosto de 2024. Los valores de las variables se han calculado del promedio de concentración de gas, temperatura y pH en estos días específicos.

TABLA XXX.
Análisis de ácidos grasos, variables y correlaciones.

D1F1	AGV & XOH	Concentración de Gas	Temperatura	pH	Correlación Temperatura-concentración de Gas (Pearson)	Correlación Temperatura-concentración de Gas (Spearman)	Correlación pH-concentración de Gas (Pearson)	Correlación pH-concentración de Gas (Spearman)
Fecha	mg/L	ppm	°C	pH	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
23/06/2023	297	628	27,94	5,87	0,82	0,88	-0,69	-0,74
23/06/2023	679	628	27,94	5,87	0,82	0,88	-0,69	-0,74
26/06/2023	650	662,5	27,09	5,82	0,92	0,93	-0,79	-0,84
3/07/2023	225	85,5	28,37	5,4	0,61	0,59	-0,53	-0,54
26/07/2023	292	8800,8	28,82	7,1	-0,38	-0,09	0,38	0,021
8/08/2023	315	365,9	30,3	7,17	-0,76	-0,82	0,75	0,8

Las concentraciones de AGV expresadas en miligramos por litro ($\frac{mg}{l}$), junto con las concentraciones de metano, medidas en partes por millón (ppm), proporcionan una visión cuantitativa de los subproductos de la DA y su conversión en metano, respectivamente. Estos datos son útiles para entender la eficiencia de la digestión y la estabilidad del sistema.

La tabla XXX recopila datos cruciales medidos durante la fase inicial de operación de un reactor, incluyendo las concentraciones de AGV, la concentración de metano, la temperatura, el pH, y varias correlaciones estadísticas. Esta tabla es fundamental para comprender cómo los parámetros operacionales afectan la concentración de gas y la estabilidad del sistema.

La temperatura es un factor decisivo en la actividad microbológica del reactor, afectando directamente la descomposición de la materia orgánica y la concentración de metano. La correlación de Pearson entre la temperatura y la concentración de gas varía significativamente, desde un valor positivo de 0.92 en la muestra 3, hasta uno negativo de -0.76 en la muestra 7. Esta variación indica que mientras que en general temperaturas más altas favorecen la concentración de gas, existen puntos en los que un incremento en la temperatura la inhibe, probablemente debido a efectos adversos sobre la población microbiana o la cinética de las reacciones bioquímicas.

El pH es otro parámetro crítico que influye en la eficacia del digestor. Las correlaciones entre el pH y la concentración de gas muestran una diversidad notable. Las correlaciones de Pearson varían desde -0.79 en la muestra 3, indicando que un aumento en el pH se asocia con una disminución en la concentración de gas, hasta 0.75 en la muestra 7, sugiriendo que, bajo ciertas condiciones, un pH más elevado puede ser beneficioso. Esta variabilidad se refleja también en las correlaciones de Spearman, con valores que oscilan entre -0.84 y 0.80, resaltando la importancia del control preciso del pH dentro de rangos específicos para optimizar la concentración de gas.

Los datos presentados en la tabla XXX, subrayan la importancia de monitorear y ajustar cuidadosamente la temperatura y el pH dentro del digestor para mantener una concentración

óptima de metano. Las correlaciones significativas tanto de Pearson como de Spearman entre estos parámetros y la concentración de gas ofrecen una visión valiosa de cómo las condiciones operativas pueden ser manipuladas para mejorar la estabilidad y eficiencia del sistema.

Estos hallazgos son vitales no solo para la operación práctica de digestores sino también para la fundamentación teórica de los procesos biológicos y químicos que regulan la DA. Comprender estos vínculos es esencial para el diseño y operación de proyectos de digestión.

6.5.3 Análisis de las variables relevantes del proceso en función de los AGV y la concentración de gas metano.

A continuación, se presenta un análisis detallado basado en la fig. 76, que ilustra la relación entre las concentraciones de AGV y la concentración de gas metano en un digestor a lo largo del tiempo.

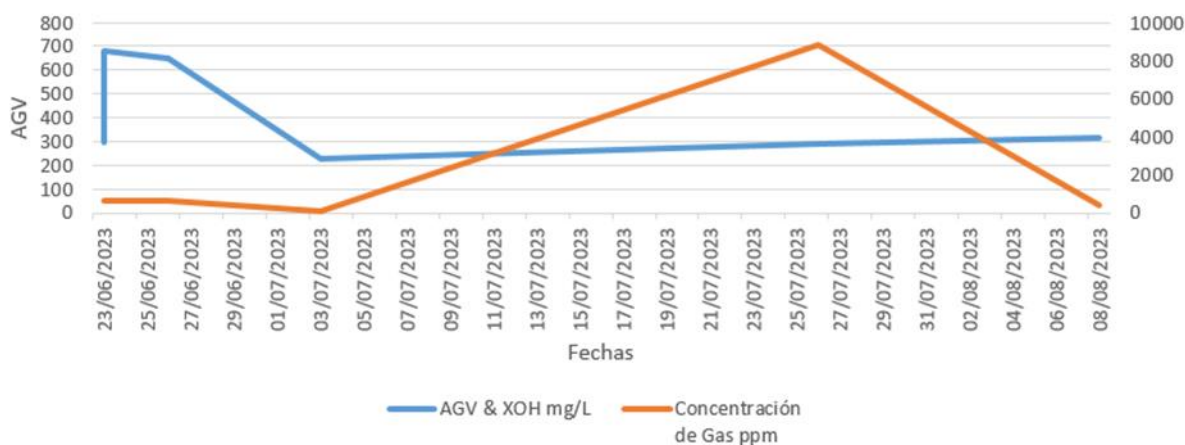


Fig. 74. Concentración Gas Vs AGV.

La alta concentración de AGV, es un indicador de que el proceso de DA se encuentra en fase acidogénesis. En la DA, los AGV son producidos principalmente durante la fase de acidogénesis como resultado de la descomposición de compuestos intermedios, como azúcares y aminoácidos, por parte de las bacterias acidogénicas [83]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la acumulación de AGV puede deberse a un desequilibrio en el proceso causado por una baja actividad de las bacterias metanogénicas, que son responsables de consumir los AGV y transformarlos en metano durante la metanogénesis [84].

Por lo tanto, una alta concentración de AGV podría ser un reflejo de un sistema que está activo en la fase acidogénesis, pero también podría indicar un problema en el balance microbiano. Este desequilibrio puede deberse a factores como variaciones en el pH, carga orgánica excesiva, o inhibición de las bacterias metanogénicas por la presencia de compuestos tóxicos como el amonio o el sulfuro de hidrógeno [85]. Para confirmar que está en la fase acidogénesis, se debe medir el pH, que suele ser más bajo durante esta fase (entre 5.0 y 6.5), y la relación

AGV/Alcalinidad, que puede indicar si el sistema está entrando en un estado de inestabilidad [86].

En conclusión, aunque una alta concentración de AGV puede ser un fuerte indicativo de la fase acidogénesis, es fundamental interpretar este dato en conjunto con otras variables del proceso para garantizar un diagnóstico correcto del estado del digestor [87]. Los AGV producidos en la acidogénesis pasan a la fase de acetogénesis, donde son transformados en acetato, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2) por bacterias acetogénicas. En condiciones óptimas, estos productos son consumidos rápidamente en la metanogénesis, reduciendo la concentración de AGV en el sistema [88]. Este comportamiento es esencial para el equilibrio del proceso de DA y evitar la acumulación excesiva de AGV, que causa la disminución del pH y compromete la actividad de las bacterias metanogénicas [89].

La relación entre estas fases explica porque la concentración de AGV disminuye a medida que el proceso avanza. Durante la metanogénesis, el acetato es convertido en metano (CH_4) y CO_2 por las arqueas metanogénicas acetoclásticas, mientras que el H_2 y el CO_2 son utilizados por las arqueas metanogénicas hidrogenotróficas para producir CH_4 [90]. Por lo tanto, un sistema anaerobio saludable presenta un equilibrio entre la producción y el consumo de AGV, reflejado en concentraciones relativamente bajas de estos compuestos en las fases avanzadas del proceso [91].

Es importante señalar que la disminución de AGV depende de factores como la actividad microbiana, el tiempo de retención hidráulico (TRH), la carga orgánica y el pH. Si alguno de estos parámetros está fuera de los rangos óptimos, los AGV pueden acumularse, indicando un desequilibrio en el sistema. Este tipo de análisis destaca la importancia de monitorear las concentraciones de AGV y otros parámetros para garantizar el funcionamiento adecuado del biodigestor [92].

- **Tendencias observadas en las gráficas**

La curva de AGV muestra una tendencia decreciente inicialmente, lo que sugiere una activa conversión de estos compuestos en metano por parte de la microbiota del reactor. Después de este descenso, los niveles de AGV se estabilizan y luego muestran un leve incremento antes de estabilizarse nuevamente.

En contraste, la curva que representa la concentración de gas muestra un aumento significativo, alcanzando un pico antes de descender abruptamente. Esta tendencia indica una fase de alta eficiencia en la conversión de AGV a metano, seguida por una posible disminución en la actividad metabólica o en la disponibilidad de sustrato.

- **Correlación entre AGV y concentración de gas.**

Inicialmente, la reducción de AGV coincide con un aumento en la concentración de gas, evidenciando una eficaz conversión de AGV en metano. Esta correlación destaca la eficiencia del proceso de DA durante esta fase.

Sin embargo, tras el pico de concentración de gas, la concentración disminuye a pesar de que los niveles de AGV no aumentan proporcionalmente. Este fenómeno está influenciado por factores limitantes no directamente relacionados con la concentración de AGV, como la acumulación de inhibidores o condiciones subóptimas dentro del digestor.

- **Análisis de la estabilidad del sistema.**

La estabilidad observada en los niveles de AGV hacia el final del período de estudio sugiere que el sistema alcanzó un equilibrio en el cual la concentración de metano se estabilizó. Esta fase de estabilidad es crucial para determinar el manejo óptimo y sostenible del digestor.

6.5.4 Implicaciones para la operación del reactor

El monitoreo constante de AGV y la concentración de gas es esencial para optimizar el rendimiento del reactor. La adaptación de la alimentación, el ajuste de parámetros operativos como la temperatura y el pH, y el manejo adecuado de la carga orgánica contribuyen significativamente a mejorar la conversión de AGV en metano.

Es importante investigar las causas de la caída repentina en la concentración de gas después de su pico, como se muestra en la fig. 77, para identificar posibles áreas de mejora en la operación y mantenimiento del sistema.

Este análisis basado en la fig. 81, demuestra la importancia de comprender la dinámica entre los AGV y la concentración de gas para la gestión efectiva y la optimización de los procesos en un digestor.

6.5.5 Análisis de variables relevantes en función de los Ácidos Grasos y pH

La fig. 77 ilustra la evolución de las concentraciones de AVG y los valores de pH a lo largo de un período específico en la operación de un reactor. Este análisis detalla cómo estos dos parámetros interactúan y las posibles implicaciones para la gestión del proceso de DA.

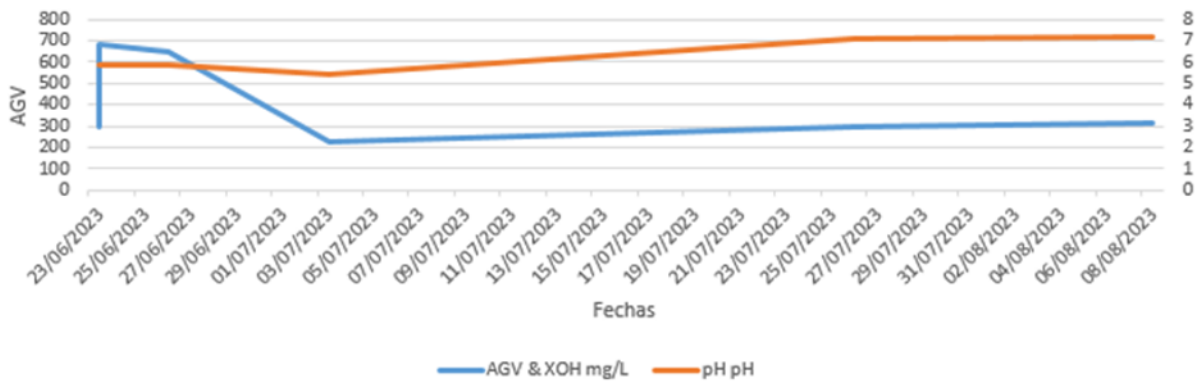


Fig. 75. Concentración pH Vs AGV

Se observa una disminución inicial rápida en las concentraciones de AGV, que luego se estabilizan a un nivel más bajo. Este patrón indica una alta actividad biológica inicial que consume eficazmente los AGV presentes, transformándolos en metano y otros gases, por ello el pH aumenta levemente.

Paralelamente, el gráfico muestra un incremento gradual y constante del pH, estabilizándose alrededor de 7.5, un valor generalmente óptimo para la metanogénesis en procesos de DA.

- **Interacción entre AGV y pH.**

La disminución de los AGV sugiere una conversión efectiva de estos ácidos en metano, un indicativo de la salud y eficiencia del digester. Esta reducción en los AGV contribuye al aumento del pH, ya que disminuye la carga ácida en el sistema.

El aumento en el pH está asociado con esta menor producción de ácidos, lo que facilita las condiciones más favorables para algunos microorganismos metanogénicos, siempre que el pH no exceda los límites que podrían inhibir otras comunidades microbianas esenciales.

Un pH que se mantiene dentro de un rango óptimo es crucial para la estabilidad y eficiencia del digester. El aumento gradual observado en el pH en la fig. 77 indica un equilibrio estable que favorece la metanogénesis continua.

Es esencial realizar un seguimiento continuo de los niveles de AGV y pH para asegurar que se mantengan dentro de los rangos ideales para no comprometer la eficacia del proceso de DA.

6.5.6 Consideraciones para la operación y optimización del reactor.

Los datos de la tabla XXIX, subrayan la importancia de una gestión integrada de los parámetros químicos en el digestor. Ajustes en la alimentación, la dosificación de co-sustratos, o la recirculación de digestato son necesarios para ajustar el pH y los niveles de AGV para mantener una operación óptima.

En resumen, la fig. 77, proporciona una visión clara de la interacción entre los AGV y el pH, destacando la necesidad de una gestión cuidadosa para asegurar que el digestor funcione de manera eficiente y estable. Estos ajustes son fundamentales para maximizar la concentración de biogás y asegurar la sostenibilidad del proceso a largo plazo.

6.5.7 Análisis de datos de AGV respecto a las correlaciones

La fig. 78 a la 82, son mapas de calor que ofrecen una visión integral y detallada del comportamiento de las variables críticas en el proceso de DA: temperatura, pH y concentración de gas. Estos datos fueron recopilados en fechas específicas —23/06/2023, 26/06/2023, 03/07/2023, 26/07/2023 y 08/08/2023— que coinciden con los días en que se tomaron muestras para el análisis de AGV en un estudio de la eficiencia y dinámica del reactor.

Análisis de variables en el tiempo: Cada uno de los gráficos ilustra el comportamiento diario de la temperatura, pH y concentración de gas, respectivamente. Estas variables son fundamentales para entender el estado y la eficacia del proceso de DA. La temperatura afecta directamente la tasa de reacciones bioquímicas dentro del digestor, siendo crucial para el óptimo crecimiento y actividad de los microorganismos. El pH, por su parte, influye en la solubilidad y disponibilidad de los iones de hidrógeno, afectando directamente la salud y la eficiencia de los microorganismos metanogénicos. Finalmente, la concentración de gas es un indicador directo del rendimiento del reactor, reflejando la efectividad con la que los sustratos orgánicos son convertidos en biogás.

Correlaciones entre variables: Los mapas de calor de cada gráfico de línea muestran las correlaciones de Pearson y Spearman para las fechas correspondientes, proporcionando una cuantificación estadística de cómo estas variables interactúan. Las correlaciones de Pearson miden la relación lineal, mientras que las de Spearman detectan relaciones monotónicas, sean lineales o no. Estas herramientas son indispensables para identificar y comprender las interdependencias entre las variables, permitiendo ajustar las condiciones operativas para optimizar la concentración de gas y la estabilidad del sistema.

Importancia de la visualización y análisis de datos: La capacidad de visualizar y analizar estas relaciones es crucial para la gestión efectiva del digestor, una correlación positiva fuerte entre el pH y la concentración de gas en una fecha específica indica que un ajuste en el manejo del pH mejora la concentración de gas. De manera similar, las variaciones en la correlación entre la temperatura y la concentración de gas señalan la necesidad de ajustes en el control térmico del digestor para mantener un ambiente óptimo para la digestión.

Este conjunto de gráficos y mapas de calor no solo sirven como una herramienta de diagnóstico para evaluar el estado actual del digestor, sino también como un medio para proyectar ajustes y mejoras en su operación. Al entender cómo estas variables interactúan entre sí a lo largo del tiempo, se puede implementar estrategias más informadas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los procesos de digestión.

Los días donde se hacen los análisis de correlaciones son los mismos días donde se hicieron las muestras de los AGV. Esto con el fin de estudiar cómo se comportan las correlaciones en función de la dinámica de los AGV

-Día 23/06/2023: Las correlaciones son generalmente bajas entre las variables, lo que puede indicar una menor interacción directa entre temperatura y el pH, lo mismo sucede entre la concentración de gas y el pH, al contrario, en la correlación entre temperatura y concentración de gas la cual es altamente positiva mostrando una gran relación lineal.

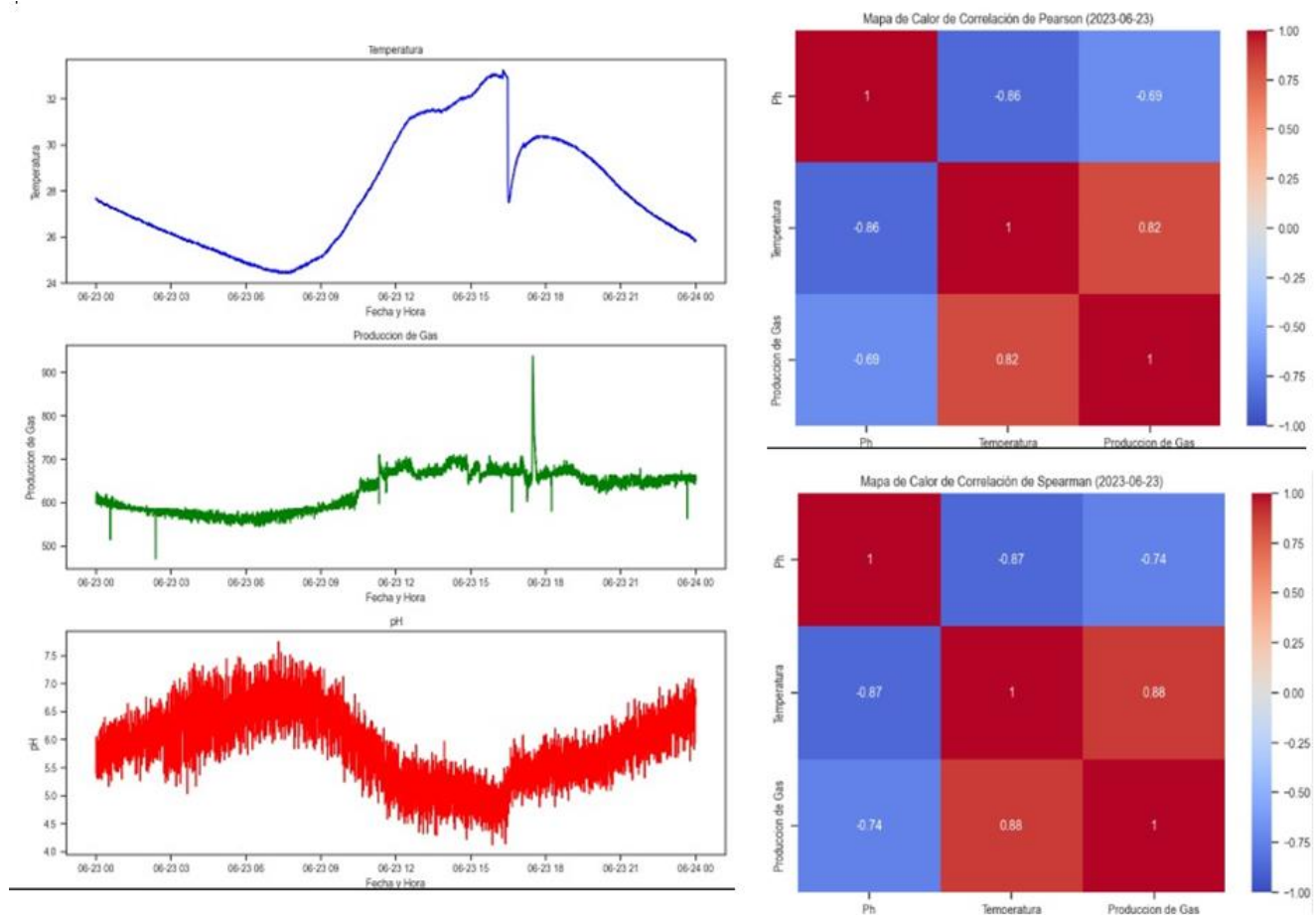


Fig. 76. Análisis temporal del día 23/06/2023 y mapas de calor de las correlaciones.

-Día 26/06/2023: Las correlaciones muestran una relación negativa más fuerte entre pH y temperatura y pH y concentración de gas tanto para Pearson como para Spearman, igualmente muestran positiva más fuerte entre la concentración de gas y la temperatura.

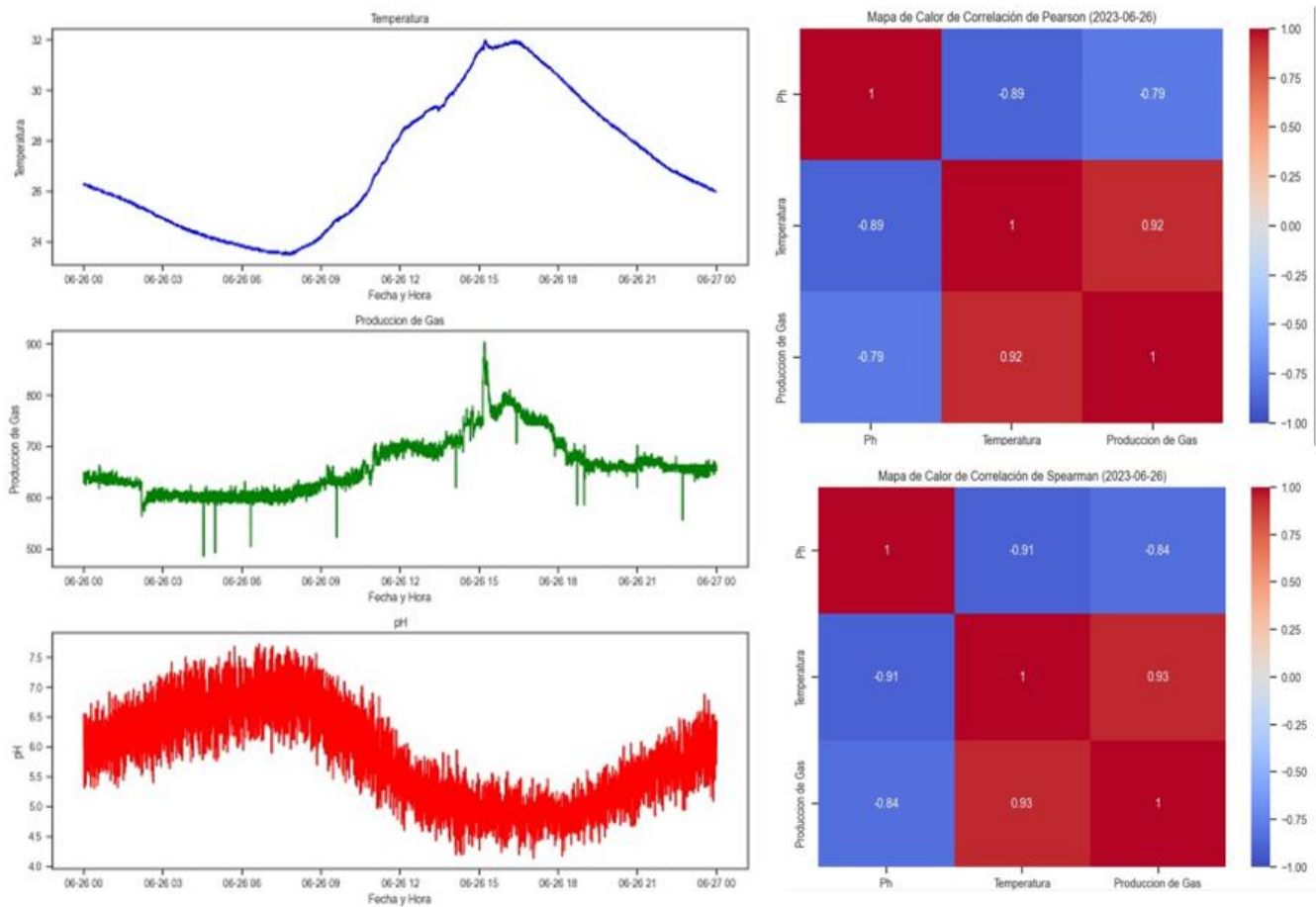


Fig. 77. Análisis temporal del día 26/06/2023 y mapas de calor de las correlaciones.

-Día 03/07/2023: La caída en los valores de los AGV para estas fechas muestran unos cambios muy interesantes en las correlaciones, pues la relación negativa entre el pH y la temperatura y el pH y la concentración de metano empieza a disminuir, igualmente sucede con la relación positiva entre la temperatura y la concentración de gas, esta disminuye notablemente. Estos fenómenos suceden igual para la correlación de Pearson como Spearman.

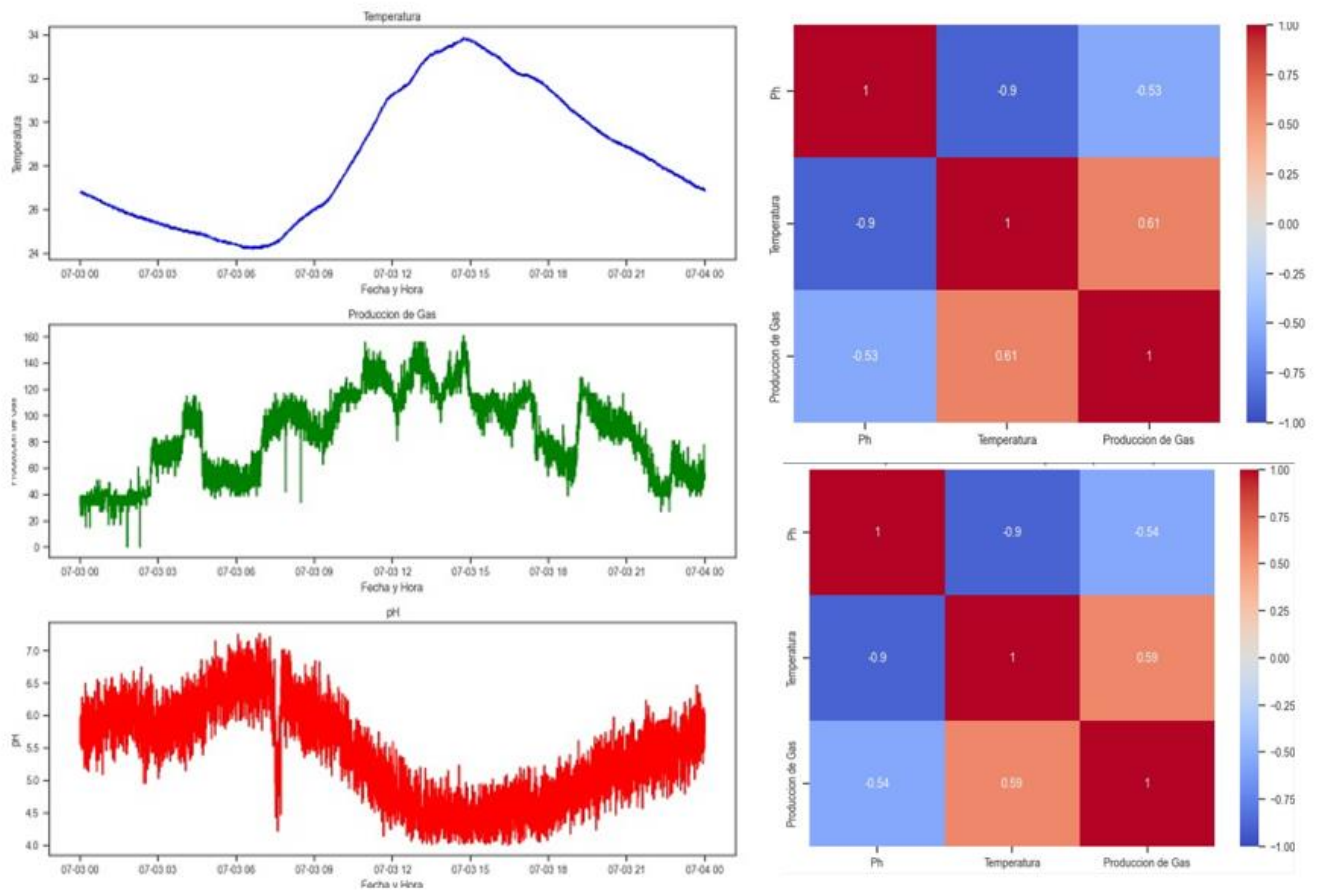


Fig. 78. Análisis temporal del día 03/07/2023 y mapas de calor de las correlaciones.

-Dia 26/07/2023: En este día específico donde la caída de los AGV es notable no existen correlaciones positivas ni negativas en todas las variables de análisis, las correlaciones son nulas y no existe dependencia lineal entre el pH y la temperatura, el pH y la concentración de gas y la concentración de gas y la temperatura.

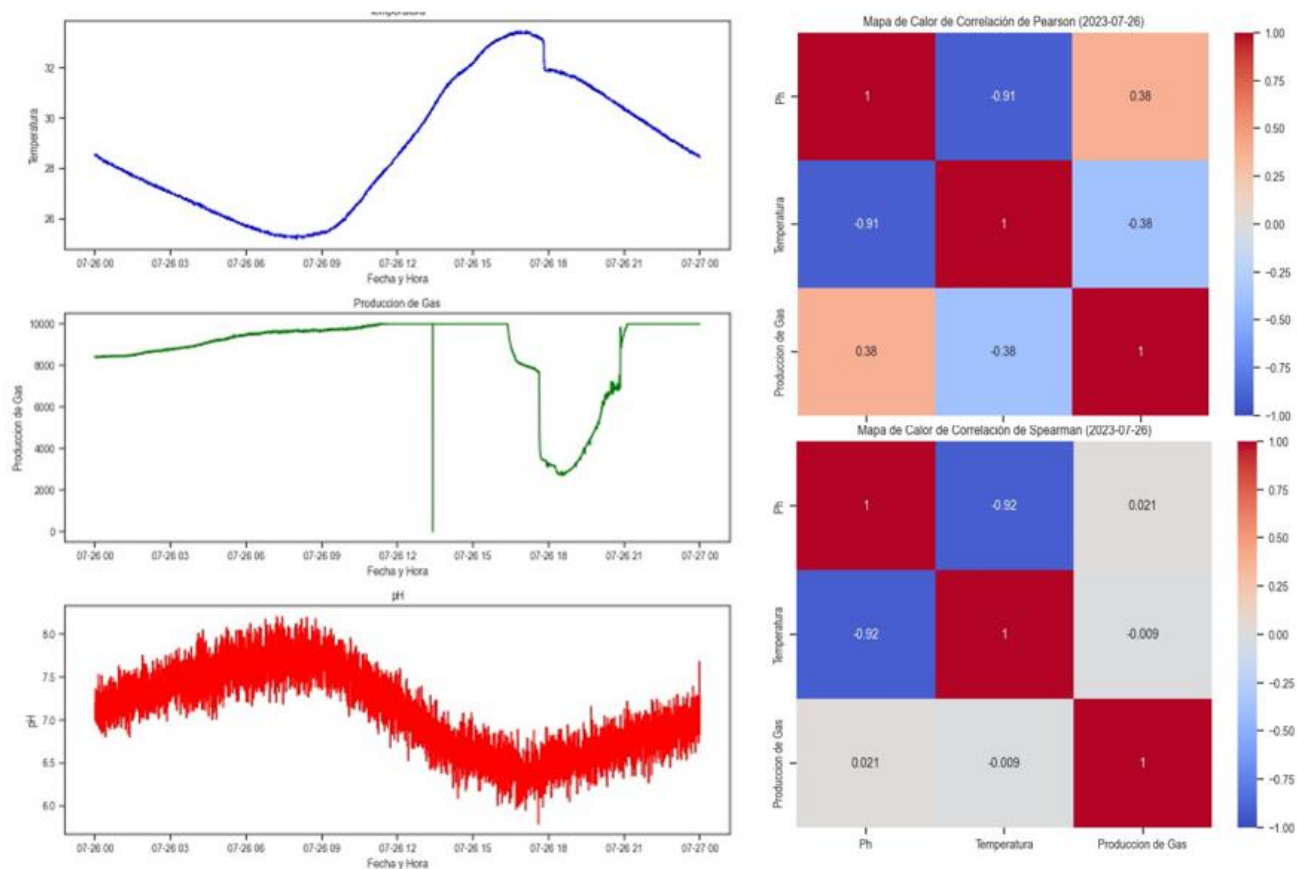


Fig. 79. Análisis temporal del día 26/07/2023 y mapas de calor de las correlaciones.

-Día 08/08/2023: Estando el digestor ya estabilizado y en sus AGV en mínimos, las correlaciones respectivas entre el pH y concentración de gas pasa a ser positiva mientras la correlación de temperatura y concentración de gas pasan a ser negativas tanto para Pearson como para Spearman.

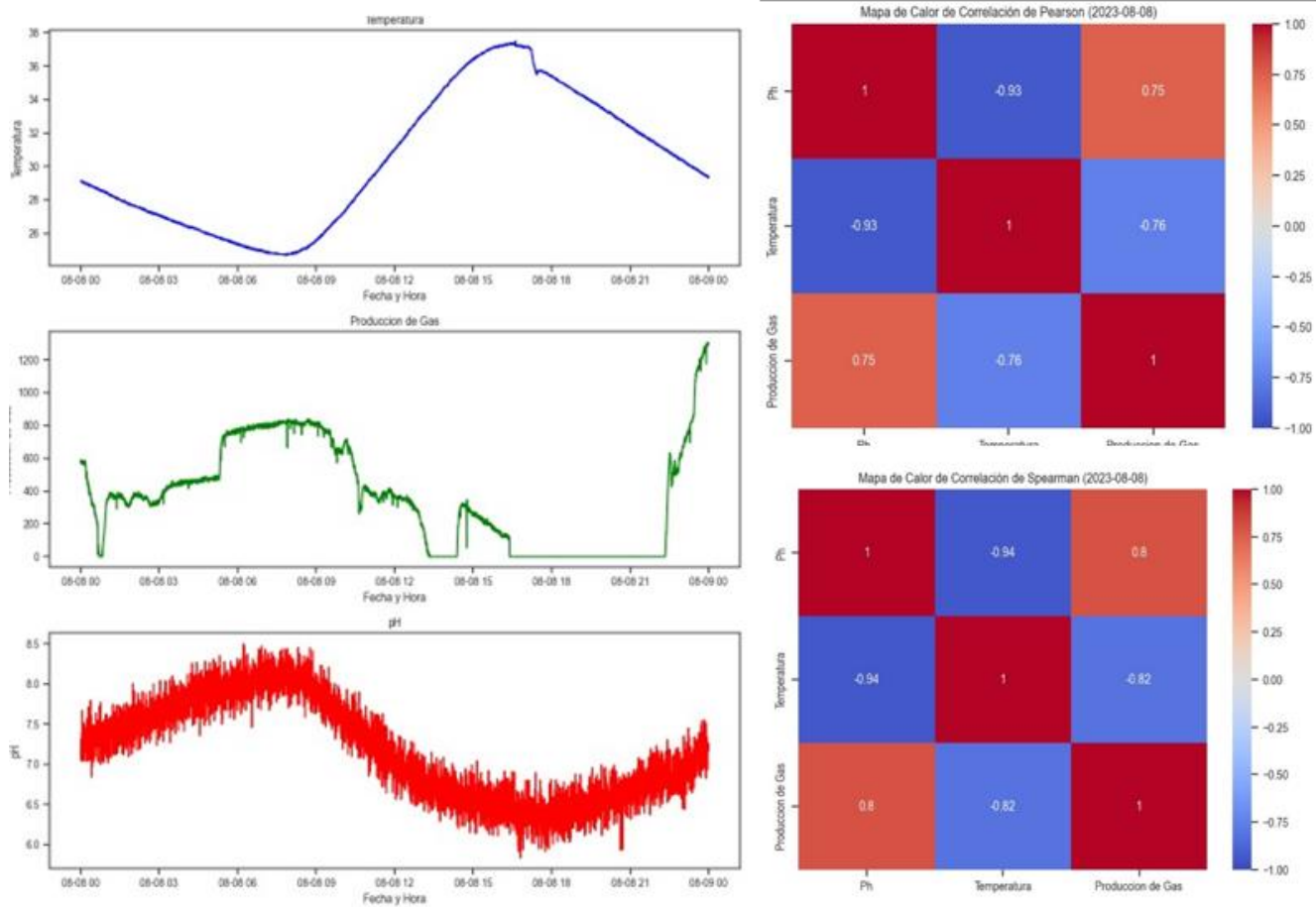


Fig. 80. Análisis temporal del día 8/08/2023 y mapas de calor de las correlaciones.

Este análisis detallado de cada gráfico y mapa de calor enfatiza la importancia de monitorear continuamente las variables clave del digestor. Resalta el hecho de que los mapas de calor dan una visión y una conclusión clara para entender la dinámica de las variables de análisis en función de los AGV y es que cuando los AGV son altos en el proceso de DA, las correlaciones entre temperatura y pH y pH concentración de gas son altamente negativas, así mismo sucede entre la temperatura y la concentración de gas la cual cuando los AGV están altos estas correlaciones son altamente positivas.

La dinámica cambia cuando bajan los AGV en el proceso biológico y cuando el digestor tiende a una estabilización mayor en la concentración de biogás, y es que esta cambia radicalmente pasando el pH y la temperatura, y el pH y la concentración de gas a tener correlaciones positivas y la temperatura y la concentración gas a tener correlaciones negativas. Este proceso sucede tanto en la correlación de Pearson como de Spearman.

6.5.8 Análisis general de correlaciones temperatura – concentración de gas Vs. AGV

La fig. 83 y 84, ilustran la correlación de Pearson y Spearman entre la temperatura, la concentración de gas, y las concentraciones de AVG en un digester durante los días específicos de toma de muestras. Estos días son cruciales, ya que representan puntos de datos significativos para evaluar la eficiencia y la dinámica del proceso de DA. Las gráficas muestran tanto las concentraciones de AGV (mg/L) como las correlaciones correspondientes entre la temperatura y la concentración de gas con los AVG a lo largo de varias fechas clave.

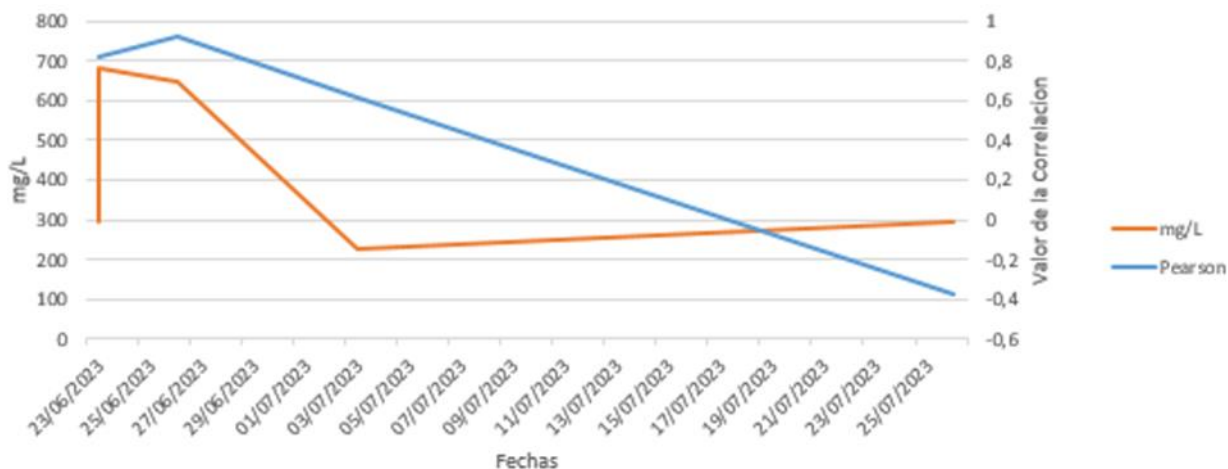


Fig. 81. Correlación Pearson Temperatura–concentración de gas en función de los AGV.

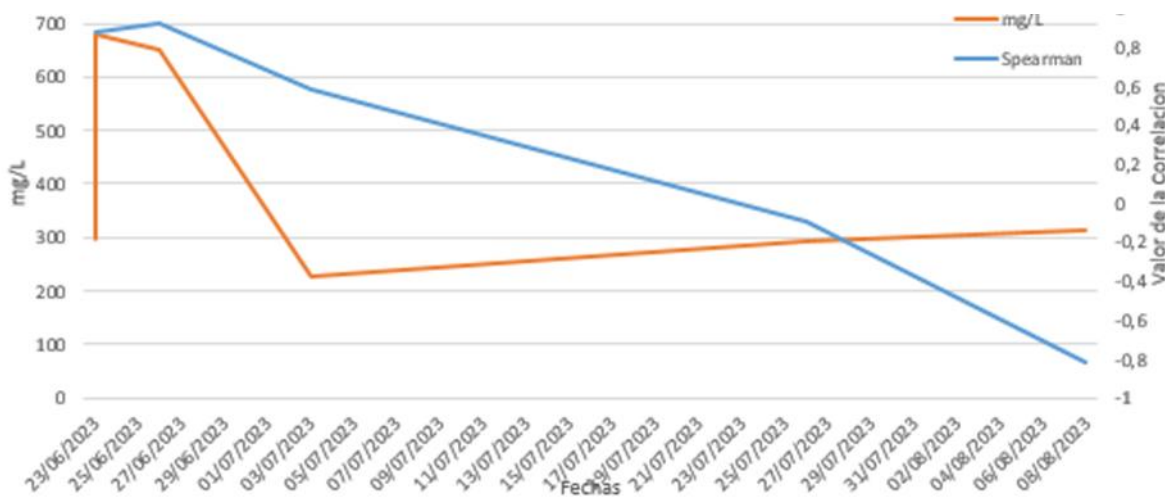


Fig. 82. Correlación de Spearman de Temperatura – concentración de gas Vs los AGV.

6.5.9 Análisis detallado del comportamiento de AGV y correlación temperatura-concentración de gas

- **Comportamiento de los AVG:**

Las concentraciones de AVG muestran una tendencia descendente a lo largo del período estudiado. Este descenso es indicativo de la descomposición eficiente de los AGV en el digestor, lo que sugiere una actividad microbiana efectiva que convierte estos compuestos en metano y otros gases.

La reducción progresiva en los niveles de AGV puede estar relacionada con la optimización del proceso y la adaptación de la microbiota a las condiciones del reactor, lo que facilita una mayor tasa de conversión de la materia orgánica en biogás.

- **Correlación de Pearson (Temperatura- concentración de Gas vs. AVG):**

Inicialmente, la correlación de Pearson muestra valores positivos, lo que indica una asociación directa entre un aumento en la temperatura y la concentración de gas con altas concentraciones de AGV. Esto puede reflejar que las condiciones más cálidas favorecen la actividad de descomposición de los AGV.

Con el tiempo, la correlación de Pearson disminuye, llegando a ser negativa. Este cambio podría ser una señal de que a medida que los AGV disminuyen, la influencia de la temperatura y la concentración de gas sobre estos compuestos cambia, posiblemente debido a una menor disponibilidad de ácidos para ser convertidos en gas.

- **Correlación de Spearman (Temperatura- concentración de Gas vs. AVG):**

Al igual que Pearson, Spearman inicia con correlaciones positivas. Sin embargo, las correlaciones de Spearman tienden a mantenerse ligeramente más estables antes de declinar. Esto sugiere que la relación no lineal entre las variables es más robusta inicialmente, antes de disminuir con el tiempo.

El análisis de Spearman puede estar capturando tendencias más generales en los datos que no son estrictamente lineales, lo que es útil para entender cómo las variaciones en la temperatura y la concentración de gas afectan los niveles de AGV bajo diferentes condiciones operativas.

Las gráficas proporcionan una visión clara de cómo la temperatura y la concentración de gas interactúan con los niveles de AGV en un digestor a lo largo del tiempo. La observación de que las correlaciones entre estas variables disminuyen a medida que los AGV se reducen es

significativa, ya que subraya la necesidad de ajustar continuamente los parámetros operativos del digester para mantener su eficiencia a medida que cambian las condiciones internas y la carga de entrada. Esta información es crucial para optimizar la concentración de biogás y asegurar la estabilidad del proceso de DA.

- **Análisis general de correlaciones pH – concentración de gas Vs AGV.**

La fig. 85 y 86, presentan la correlación de Pearson y Spearman entre el pH y la concentración de gas versus las concentraciones de AGV en un reactor. Estos datos, capturados durante días específicos de toma de muestras, son clave para entender la influencia del pH en la descomposición de los AGV y la consiguiente concentración de gas. Se observa que las correlaciones inician en valores negativos y tienden a ser más positivas a medida que los AGV se descomponen, lo cual sugiere cambios significativos en la dinámica del digester a lo largo del tiempo.

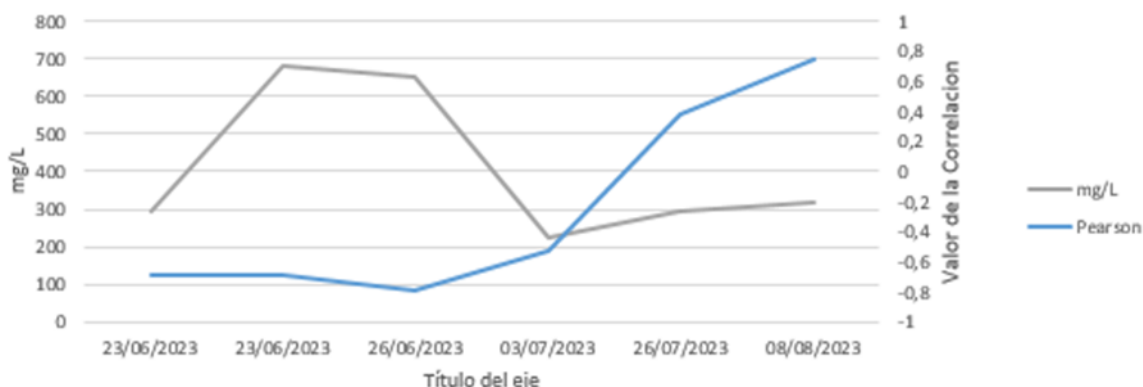


Fig. 83. Correlación de Pearson del pH – concentración de Gas Vs AGV.

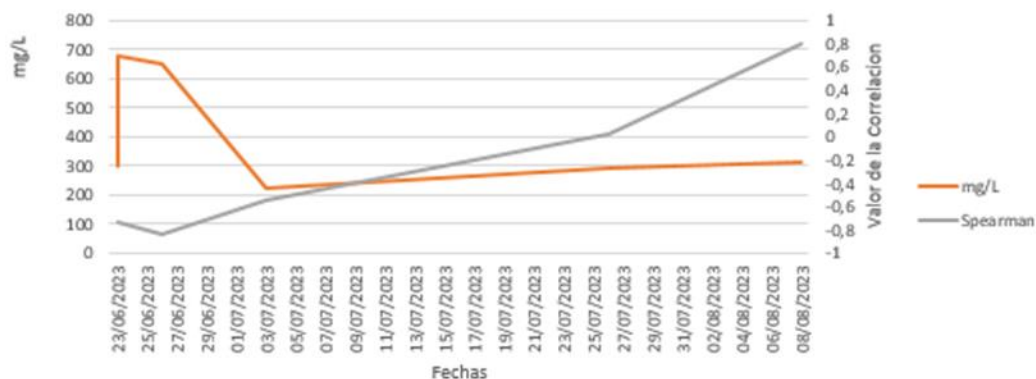


Fig. 84. Correlación de Spearman del pH y concentración de gas en función de los AGV.

6.5.10 Análisis detallado del comportamiento de AGV y correlación pH- concentración Gas

- **Comportamiento de los AGV:**

Los AGV muestran un aumento gradual en sus concentraciones al inicio del periodo, lo que puede indicar una acumulación inicial o una descomposición menos eficiente al principio del período analizado.

El aumento en los AGV al inicio del periodo podría reflejar un desequilibrio en el proceso de DA, tal vez debido a una carga orgánica excesiva o condiciones subóptimas que inicialmente inhiben la conversión eficiente de estos compuestos en gas.

- **Correlación de Pearson (pH-Gas vs. AGV):**

La correlación comienza siendo negativa, lo que implica que un pH más alto o muy bajo inicialmente podría estar inhibiendo la concentración de gas o no favoreciendo la descomposición de los AGV. Esta correlación negativa podría estar relacionada con un pH que no es el ideal para las comunidades microbianas responsables de la descomposición de los AGV.

A medida que el tiempo avanza y los AGV se descomponen, la correlación se vuelve menos negativa y tiende a neutralizarse, indicando que ajustes en el pH o en las condiciones operativas podrían estar comenzando a favorecer una mejor descomposición y concentración de gas.

- **Correlación de Spearman (pH-Gas vs. AGV):**

Similar a la correlación de Pearson, la correlación de Spearman también muestra valores negativos iniciales. Esto sugiere que las variaciones en el pH tienen un impacto más directo en las fluctuaciones de la concentración de gas y en los niveles de AGV de manera no lineal.

Conforme los AGV disminuyen, la correlación mejora, volviéndose menos negativa. Esto puede indicar que, a medida que los niveles de AGV se reducen, la influencia del pH en la concentración de gas se vuelve más favorable.

El análisis de las gráficas ilustra un vínculo dinámico entre el pH, la concentración de gas y los niveles de AGV en un digestor. La observación de que las correlaciones evolucionan de negativas a menos negativas conforme los AGV se descomponen es crucial, pues subraya la importancia de un control efectivo del pH en la gestión del proceso de DA.

6.5.11 Análisis de AGV en la fase 2

Por fallas a nivel electrónico del sistema de monitoreo no se pudo tomar datos de las variables principales medidas por tanto es imposible realizar un análisis en el tiempo del comportamiento de la mismas en el momento de la toma de las muestras si no también es muy difícil hacer un análisis de las correlaciones de las mismas en función de las fechas de las tomas de los AGV. Sin embargo, si presenta un análisis detallado del comportamiento del sistema en función de los AGV en la fase 2 y entender la dinámica de esta fase después de la estabilización.

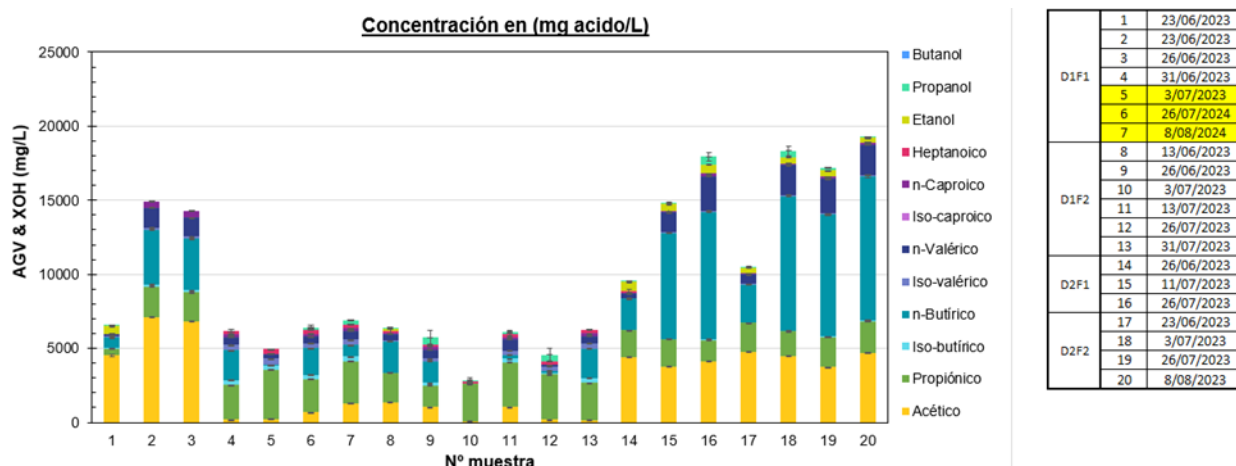
- **Análisis de los datos presentados de la fase 2 del proceso de digestión.**

En la tabla XXXI, se observa las concentraciones de AGV, en esta tabla se ve las muestras del 8 al 13 que corresponden a los valores que toman los AGV en la fase 2, así mismo se ilustra en un diagrama de barras la composición de los AGV en las fechas en referencia.

TABLA XXXII.
Fechas de la toma de muestras de los AGV y los valores de las muestras.

MUESTRAS PROMEDIO Y STD (sin tener en cuenta la dilución)																				
PROMEDIO (mg/L)	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00
Acético	206	323	310	8	11	31	60	62	47	4	48	10	8	200	172	189	217	205	171	214
Propiónico	20	94	90	107	152	103	129	91	67	115	137	138	114	82	83	65	89	75	91	97
Isobutírico	2	6	5	15	13	13	14	0	8	0	12	5	14	0	0	2	0	2	2	3
Butírico	32	167	159	92	2	82	35	96	67	0	12	7	90	97	325	391	117	413	374	442
Isovalérico	4	7	7	17	19	14	17	2	8	2	13	12	16	2	2	4	2	3	4	4
Valérico	5	61	58	23	15	22	27	21	27	0	34	5	23	15	61	106	28	92	106	94
Isocaproico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caproico	2	21	21	8	0	8	8	2	9	0	7	0	8	2	5	8	3	6	7	6
Heptanoico	0	0	0	9	14	13	12	6	4	4	10	10	12	5	0	0	0	0	0	0
Etanol	23	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	27	21	28	19	18	18	14
Propanol	2	0	0	0	0	7	14	2	23	6	6	20	0	3	5	24	2	19	9	4
Butanol	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	297	679	650	280	225	292	315	291	261	130	278	208	286	435	675	815	477	833	782	878

TABLA XXXII.
Valores de los AGV y gráfico de barras de la composición de los AGV.



En la fase 2 de este estudio sobre el proceso de DA, se recopila y analiza datos críticos que reflejan la concentración de AGV en muestras específicas tomadas durante este período. La.,

-Observaciones clave de las figuras y tablas:

- **Estabilidad de los AGV:**

Las concentraciones de AGV en las muestras 8 a 13 de la fase 2 no muestran una disminución significativa, según lo indicado por la gráfica. Esto señala una falta de descomposición efectiva de estos compuestos.

La tabla refleja variaciones en las concentraciones de diferentes tipos de AGV, sin embargo, no se observa una tendencia clara de reducción a lo largo de las muestras. Algunos compuestos incluso muestran aumentos esporádicos o mantenimiento en sus niveles.

- **Posible falla del sistema:**

La falta de reducción notable en los niveles de AGV podría indicar una falla en el sistema de digestión durante esta fase. Factores potenciales incluyen desequilibrios en el pH, temperaturas subóptimas, toxicidad por acumulación de inhibidores, o sobrecarga orgánica, que podrían estar impidiendo la actividad microbiana necesaria para la degradación efectiva de los AGV.

- **Inhibición de la actividad microbiana:**

Es plausible que la actividad microbiana haya sido severamente inhibida, como lo sugiere la falta de actividad de descomposición observada. Condiciones adversas dentro del digestor,

como ambientes anóxicos o tóxicos o deficiencias nutricionales, podrían haber afectado negativamente la viabilidad y funcionalidad de las comunidades microbianas.

6.5.12 Implicaciones y consideraciones adicionales.

- **Monitoreo y control:** este escenario resalta la importancia del monitoreo continuo y del control adecuado de las condiciones dentro del digestor. Detectar problemas de manera temprana permite intervenciones correctivas para restablecer condiciones favorables para la DA.
- **Análisis de fallas:** sería beneficioso realizar un análisis detallado de las condiciones operativas y de los parámetros del proceso durante este periodo para identificar las causas específicas que podrían haber contribuido a la inhibición de la actividad microbiana.
- **Importancia de los datos:** los datos presentados en estas figuras y tablas son fundamentales para entender el comportamiento de los AGV en la fase 2 del reactor y son cruciales para diagnosticar posibles problemas en el proceso de digestión. La falta de una tendencia clara en la disminución de los AGV puede ser indicativa de un fallo en el sistema, lo que requiere una investigación más profunda para identificar y rectificar las causas subyacentes.

6.5.13 Cálculo de la eficiencia del reactor mediante la remoción de AGV en la fase 1

En la evaluación del proceso de digestión, los AGV son uno de los principales indicadores de la eficiencia y estabilidad del sistema. En la tabla XXII se observa las concentraciones de AGV a lo largo de diferentes fechas y muestras tomadas durante el proceso.

- **Concentraciones de AGV:** la tabla XXXII, muestra las concentraciones de AGV en función del número de muestra, se identifica fluctuaciones en los niveles de diferentes ácidos, incluyendo ácido acético, propiónico, butírico, entre otros.

Se observa una alta concentración inicial en las primeras muestras, seguidas de una disminución significativa en las muestras intermedias, lo que podría indicar un proceso de estabilización en el sistema de digestión.

- **Fechas relevantes:** las fechas indicadas en la tabla asociada con cada muestra nos proporcionan un contexto temporal para evaluar cómo varían los AGV a lo largo del tiempo. Estas fechas son cruciales para correlacionar los eventos operativos, como la estabilización del biodigestor y posibles fallos o cambios en las condiciones de operación.
- **Tendencias identificadas:** se observa que las concentraciones de AGV en algunas muestras muestran una tendencia a incrementarse nuevamente hacia las últimas fechas, lo que podría

sugerir problemas de acumulación o cambios en las condiciones operativas que están afectando la eficiencia del sistema en la fase 2.

- **Distribución de Componentes:**

La tabla XXXII de concentraciones, desglosa los diferentes AGV presentes en cada muestra, proporcionando una vista detallada de la composición química en cada etapa del proceso. Esto permite identificar qué compuestos específicos presentan mayores variaciones y podrían estar actuando como indicadores de la eficiencia del sistema.

Este análisis es fundamental para comprender el comportamiento del sistema de biodigestión, identificar posibles fallos en el proceso y plantear hipótesis sobre la dinámica de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica. La correlación entre las concentraciones de AGV y las fechas de operación nos permitirá diagnosticar con mayor precisión las causas de cualquier anomalía observada en el proceso.

6.5.14 Selección de fechas para el cálculo de la eficiencia en función de los AGV

- **Fase 1 (D₁F₁): Muestras 1 a 7**

Muestra 1 (23/06/2023) vs Muestra 5 (03/07/2023):

Justificación: Muestra la evolución del proceso desde el inicio (antes de la estabilización) hasta un punto intermedio en la estabilización del biodigestor. Es útil para evaluar cómo el sistema comenzó a manejar los AGV.

Muestra 3 (26/06/2023) vs Muestra 7 (08/08/2024):

Justificación: Permite observar la remoción de AGV hacia el final de la fase 1, comparando una muestra inicial estabilizada con la última muestra de la fase, lo que refleja la eficiencia del sistema justo antes de la transición a la fase 2.

- **Fase 2 (D₁F₂): Muestras 8 a 13**

Muestra 8 (13/06/2023) vs Muestra 10 (03/07/2023):

Compara el estado del sistema al inicio de la fase 2 con una muestra tomada después de un tiempo considerable, permitiendo evaluar cómo el sistema reaccionó a las condiciones cambiantes en esta fase.

Muestra 9 (26/06/2023) vs Muestra 13 (31/07/2023):

Este cálculo permitirá entender la eficiencia del sistema al final de la fase 2, comparando con un punto medio, lo cual es clave para diagnosticar posibles problemas o fallos en el proceso.

- **Cálculo de la eficiencia reactor D₁F₁ en las fechas respectivas.**

La fase 1 del reactor 1 (D₁F₁) es crítica en el establecimiento de las bases para un proceso eficiente de digestión anaerobia. Durante esta fase inicial, el sistema enfrenta el reto de adaptarse a la carga orgánica inicial y comenzar el proceso de estabilización microbológica necesaria para una descomposición efectiva de los residuos. Este análisis se enfoca en evaluar la eficiencia de remoción de los AGV en D₁F₁, dado que estos compuestos son indicadores significativos de la carga orgánica inicial y de la actividad metabólica inicial de los microorganismos en el reactor.

La monitorización de la eficiencia de remoción de AGV durante la fase 1 no solo es crucial para asegurar que el digestor está comenzando a funcionar según lo previsto, sino también para identificar temprano cualquier desviación que pueda comprometer la estabilidad futura del proceso. Las muestras seleccionadas para este estudio, específicamente las muestras 1, 3, 5 y 7, fueron analizadas para observar las variaciones en la concentración de AGV, proporcionando una visión clara de cómo el sistema se adapta durante los primeros días de operación.

Este estudio tiene como objetivo ilustrar las dinámicas de remoción de AGV en D₁F₁, identificar posibles áreas de preocupación y optimización temprana, y recomendar acciones correctivas para mejorar la eficiencia de la digestión. Al entender la progresión y los resultados de esta fase inicial, podemos establecer estrategias efectivas para optimizar las condiciones operativas y promover un entorno más estable y productivo para la DA.

- **Cálculo de la eficiencia de la muestra 1 (23/06/2023) vs muestra 5 (03/07/2023):**

Las concentraciones de AGV en las fechas respectivas son:

Concentración de AGV en la Muestra 1 (v₁): $297 \frac{mg}{l}$

Concentración de AGV en la Muestra 5 (v₂): $225 \frac{mg}{l}$

Ecuación 15. Eficiencia de remoción

$$Eficiencia\ de\ Remoción\ (\%) = \frac{V_1 - V_2}{V_1} * 100$$

Donde: V₁ = concentración de AGV en la muestra 1.
V₂ = concentración de AGV en la muestra 2

Sustituyendo Valores:

$$Eficiencia\ de\ Remocion\ (\%) = \frac{297 - 225}{297} * 100 = 24,24\%$$

La eficiencia de remoción de AGV entre la muestra 1 (23/06/2023) y la muestra 5 (03/07/2023) es aproximadamente del 24.24%. Esto indica que el proceso de DA ha logrado reducir los AGV en un 24.24% entre estas dos muestras.

- **Cálculo de la eficiencia de la muestra 3 (26/06/2023) vs muestra 7 (08/08/2024):**

Se procede con el cálculo de la eficiencia de remoción de los AGV entre la muestra 3 y la muestra 7 del digestor 1, fase 1 (D₁F₁).

Las concentraciones de AGV en las fechas respectivas son:

Concentración de AGV en la Muestra 3 (v1): $650 \frac{mg}{l}$

Concentración de AGV en la Muestra 7 (v2): $315 \frac{mg}{l}$

$$Eficiencia\ de\ Remocion\ (\%) = \frac{650-315}{650} * 100 = 51,54\%$$

La eficiencia de remoción de AGV entre la muestra 3 (26/06/2023) y la muestra 7 (08/08/2024) es aproximadamente del 51.54%. Este resultado indica que, durante el período entre estas muestras, el proceso de digestión logró reducir más de la mitad de los AGV presentes inicialmente, reflejando una actividad biológica efectiva en la reducción de estos compuestos.

- **Cálculo de la eficiencia reactor D₁F₂ en fechas respectivas.**

En el proceso continuo de mejora y optimización de los sistemas de biodigestión anaerobia, la evaluación detallada de cada fase operativa es crucial para entender la dinámica del sistema y su eficiencia en la transformación de la materia orgánica en biogás. La fase 2 del reactor 1 (D₁F₂) representa un período crítico en el que se espera que el digestor establezca su rendimiento y maximice la degradación de los componentes volátiles. Este análisis se centra en evaluar la eficiencia de remoción de los AGV como un indicador clave de la actividad y salud del proceso anaerobio.

El seguimiento de la eficiencia de remoción de AGV no solo proporciona un indicativo de la capacidad del digestor para procesar y reducir los contaminantes orgánicos, sino que también sirve como un parámetro esencial para prevenir la acumulación de compuestos que podrían inhibir la metanogénesis. Las muestras seleccionadas para este estudio, específicamente las muestras 8, 9, 10 y 13, fueron analizadas para determinar cambios en la concentración de AGV, proporcionando datos cruciales para evaluar la consistencia operativa y la eficacia del digestor durante este período.

Este análisis tiene como objetivo destacar no solo las variaciones en la remoción de AGV sino también identificar posibles causas subyacentes de ineficiencias o mejoras observadas. A través de este estudio, buscamos proporcionar recomendaciones basadas en datos para ajustes operativos que podrían mejorar aún más la eficiencia y estabilidad del proceso de

digestión. Al comprender mejor las dinámicas de D₁F₂, podemos proponer intervenciones precisas y fundamentadas para optimizar el rendimiento del reactor.

- **Cálculo de la eficiencia de remoción: Muestra 8 vs Muestra 10 de D₁F₂**

Se calculó la eficiencia de remoción de los AGV entre la muestra 8 y la muestra 10 del reactor 1, fase 2 (D₁F₂).

Las concentraciones de AGV en las fechas respectivas son:

Concentración de AGV en la Muestra 3 (v1): $291 \frac{mg}{l}$

Concentración de AGV en la Muestra 7 (v2): $130 \frac{mg}{l}$

$$\text{Eficiencia de Remocion (\%)} = \frac{291-130}{291} * 100 = 55,33\%$$

La eficiencia de remoción de AGV entre la muestra 8 y la muestra 10 en D₁F₂ es del 55.33%. Este resultado indica una remoción significativa de los AGV en esta fase del proceso, reflejando un funcionamiento eficiente del digestor durante este período.

Este nivel de eficiencia sugiere que, aunque hay una buena actividad de digestión, aún podría haber espacio para optimización. Es importante considerar factores como la carga orgánica, la temperatura, y el pH, que pueden influir en la actividad microbiana y la eficiencia de remoción.

- **Cálculo de la eficiencia de remoción: Muestra 9 vs Muestra 13 de D₁F₂**

Se procede con el cálculo de la eficiencia de remoción de los AGV entre la muestra 9 y la muestra 13 del reactor 1, fase 2 (D₁F₂).

Las concentraciones de AGV en las fechas respectivas son:

Concentración de AGV en la Muestra 3 (v1): $261 \frac{mg}{l}$

Concentración de AGV en la Muestra 7 (v2): $286 \frac{mg}{l}$

$$\text{Eficiencia de Remocion (\%)} = \frac{261-286}{261} * 100 = -9,58\%$$

El resultado negativo en la eficiencia de remoción de los AGV entre las muestras 9 y 13 de la fase 2 del reactor 1 (D₁F₂) sugiere un colapso o una disfunción significativa en el proceso de digestión. Un aumento en la concentración de AGV indica problemas potencialmente serios que requieren una evaluación detallada para identificar y corregir las causas subyacentes.

6.5.15 Factores potenciales del colapso D₁F₂.

- **Sobrecarga orgánica:**

Descripción: La introducción de una carga orgánica excesiva o un cambio en la composición de la alimentación que excede la capacidad de los microorganismos del digester para descomponer eficientemente el material puede llevar a un aumento en los AGV. Esto puede resultar en una acumulación de AGV, como se observa en el aumento de la concentración de estos compuestos.

- **Desbalance microbiano:**

Alteraciones en la comunidad microbiana, ya sea por cambios en las condiciones ambientales del digester (pH, temperatura, toxicidad) o por inhibición directa de funciones microbianas críticas, pueden disminuir la eficiencia de la digestión anaeróbica. Un desequilibrio puede reducir la capacidad de los microorganismos para procesar y convertir la materia orgánica en biogás y otros productos menos volátiles.

- **Inhibición química:**

La presencia de sustancias tóxicas o inhibidoras en el influente, como antibióticos, metales pesados, o altas concentraciones de sales, puede inhibir la actividad microbiana. Estos compuestos pueden afectar negativamente la salud de la microbiota en los reactores y disminuir la descomposición de los compuestos orgánicos.

- **Problemas operacionales:**

Falla del sistema de monitoreo pudo haber incidido en la oportuna toma de decisiones para la fase 2 pues como ya lo habíamos referenciado el sistema por estas fechas estuvo sin operar, esto puede afectar una gestión adecuada de los parámetros operativos y como consecuencia puede impactar negativamente el proceso. Las condiciones subóptimas pueden llevar a una eficiencia reducida de digestión y, por ende, a un incremento en la concentración de AGV.

6.5.16 Cálculo de la eficiencia global de remoción de AGV para el reactor 1.

Para calcular una eficiencia global de remoción de AGV para el reactor 1, considerando solo las muestras del 1 al 13, es esencial elegir dos puntos que reflejen adecuadamente el rendimiento inicial y final del sistema a lo largo de la fase 1 y la fase 2.

- **Selección de muestras para el cálculo de la eficiencia global.**

Muestra inicial (Muestra 1): Esta muestra proporciona una base para la concentración inicial de AGV al inicio de la fase 1. Utilizar la primera muestra garantiza que estamos evaluando la capacidad total del sistema para procesar y reducir los AGV desde el comienzo hasta el final del período de estudio.

Muestra final (Muestra 13): Esta muestra marca el final de la fase 2. Utilizar la última muestra del digester 1 nos permite evaluar cómo el sistema manejó la carga orgánica a lo largo de ambas fases y cuál fue la eficiencia global de remoción al final del período estudiado.

- **Datos cuantitativos de las muestras seleccionadas.**

Muestra 1: La concentración total de AGV es $297 \frac{mg}{l}$

Muestra 13: La concentración total de AGV es $286 \frac{mg}{l}$

Donde:

$v1 = 297 \frac{mg}{l}$ (concentración inicial)

$v2 = 286 \frac{mg}{l}$ (concentración final)

$$\text{Eficiencia de Remocion (\%)} = \frac{297 - 286}{297} * 100 = 3,7\%$$

La eficiencia de remoción global de AGV entre la muestra 1 y la muestra 13 es de aproximadamente 3.7%. Este valor es sorprendentemente bajo, lo que indica que el sistema no ha sido efectivo en reducir significativamente la concentración de AGV a lo largo del proceso. Esta eficiencia podría deberse a varios factores:

Estabilidad del sistema: El sistema puede haber alcanzado un estado de equilibrio donde los AGV producidos son aproximadamente iguales a los AGV removidos, lo que podría indicar una carga de alimentación continua o repetitiva que mantiene constantes los niveles de AGV.

Ineficiencia en el proceso de digestión: La baja reducción de AGV sugiere posibles problemas en el proceso de digestión que pueden incluir ineficiencia microbiana, condiciones operativas subóptimas o inhibidores presentes que afectan la actividad bacteriana.

6.5.17 Cálculo de la eficiencia del reactor 2 por medio de la remoción de los AGV

El reactor 2 muestra un patrón interesante de aumento en las concentraciones de AGV a lo largo de sus dos fases operativas, tal como se evidencia en la fig. 87 y los datos cuantitativos asociados. Este fenómeno es particularmente notable en ambas fases: desde la muestra 14 a la 16 en la fase 1 y de la muestra 17 a la 20 en la fase 2, con un incremento gradual de los AGV en cada etapa.

TABLA XXXIII.
Concentraciones de AGV del reactor 2.

14	15	16	17	18	19	20
200	172	189	217	205	171	214
82	83	65	89	75	91	97
0	0	2	0	2	2	3
97	325	391	117	413	374	442
2	2	4	2	3	4	4
15	61	106	28	92	106	94
0	0	0	0	0	0	0
2	5	8	3	6	7	6
5	0	0	0	0	0	0
27	21	28	19	18	18	14
3	5	24	2	19	9	4
0	0	0	0	0	0	0
433	674	817	477	833	782	878

Nota: Se muestra un patrón interesante de aumento en las concentraciones de AGV

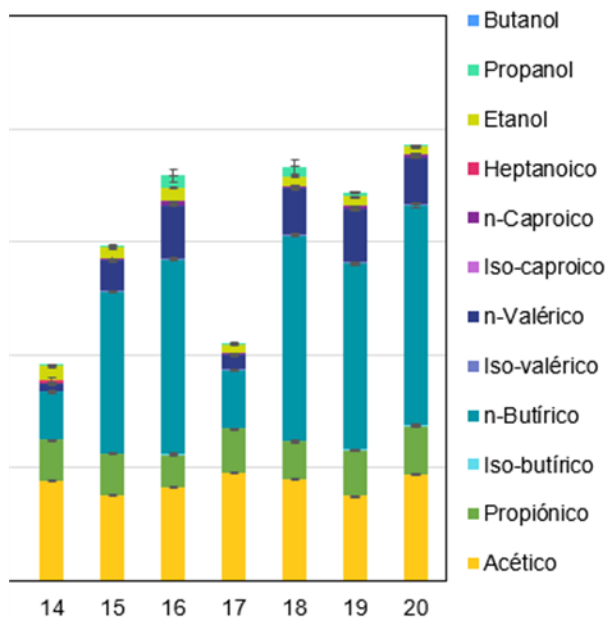


Fig. 85. Concentración de AGV del reactor 2.

- **Explicación de los fenómenos observados.**

- **Fase 1 (Muestras 14 a 16):**

El aumento de $435 \frac{mg}{l}$ a $815 \frac{mg}{l}$ puede ser indicativo de varias dinámicas dentro del reactor.

La fase inicial puede estar caracterizada por una adaptación de la microbiota al sustrato ingresado, donde los microorganismos empiezan a descomponer los componentes orgánicos más accesibles, resultando en un aumento inicial de los AGV como subproductos intermedios.

Es posible que el digestor no esté completamente estabilizado en esta fase inicial, resultando en una acumulación temporal de AGV debido a una descomposición parcial de la materia orgánica.

- **Fase 2 (Muestras 17 a 20):**

El crecimiento de $477 \frac{mg}{l}$ a $878 \frac{mg}{l}$ durante esta fase sugiere que, a pesar de estar en una etapa más avanzada, el digestor enfrenta retos en la reducción eficiente de los AGV.

Si la carga orgánica se incrementa o cambia en su composición sin ajustes operativos correspondientes, puede llevar a una mayor producción de AGV.

Este aumento continuado puede también reflejar una capacidad limitada del digestor para manejar la carga efectivamente, posiblemente debido a limitaciones en la actividad microbiana o en la dinámica de retención del sustrato.

La ausencia de un sistema de monitoreo en el reactor 2, como se evidencia en el análisis de las tendencias de AGV, resalta la necesidad crítica de implementar soluciones de monitoreo continuo y en tiempo real. El monitoreo sistemático de las variables principales en un digestor anaerobio no solo es fundamental para la operación eficiente, sino también esencial para la optimización y resolución de problemas del proceso.

En el contexto de este trabajo de grado, la implementación de un sistema de monitoreo en el reactor 2 es necesaria como una solución integral para abordar los desafíos identificados. La capacidad de monitorear en tiempo real las variaciones en la concentración de AGV y otras variables críticas permitirá:

Asegurando que el digestor opera dentro de los parámetros establecidos para una digestión efectiva.

Permitiendo ajustes operativos en tiempo real para mitigar cualquier impacto negativo debido a cambios no planificados en las cargas de alimentación o la actividad microbiana.

6.5.18 Cálculo de la eficiencia de remoción de los AGV en el reactor 2 fase 1 y fase 2.

Se calculó la eficiencia de remoción de AGV en las dos fases del reactor 2 utilizando las muestras indicadas para cada fase.

- **Fase 1: Muestra 14 a Muestra 16**

Datos:

Muestra 14: 435 mg/L

Muestra 16: 815 mg/L

$$\text{Eficiencia de Remocion (\%)} = \frac{435 - 815}{435} * 100 = -87,36 \%$$

- **Fase 2: Muestra 17 a Muestra 20**

Datos:

Muestra 17: 477 mg/L

Muestra 20: 878 mg/L

$$\text{Eficiencia de Remocion (\%)} = \frac{477 - 878}{477} * 100 = -84,07 \%$$

En ambos casos, se observa una "eficiencia" de remoción negativa, lo que indica que hubo un aumento en la concentración de AGV en lugar de una disminución. Esto sugiere un colapso en el proceso de DA en ambas fases del reactor 2, manifestado por un incremento en los niveles de AGV a lo largo del tiempo.

Esta afirmación de que la acumulación de AGV indica un colapso o inhibición en el proceso de digestión anaerobia (DA), se respalda con el artículo de Chen et al. [100]., donde se discuten en detalle los factores que provocan acumulaciones excesivas de ácidos grasos volátiles y la posterior inhibición de la metanogénesis. En concreto, se describe cómo la sobrecarga orgánica o un desequilibrio en las etapas acidogénica y metanogénica pueden conducir al aumento de los AGV y, por tanto, a la pérdida de rendimiento del reactor.

La fase 2 del reactor 2, que debería estar enfocada en la metanogénesis, muestra un comportamiento contrario a lo esperado. Según los datos reportados, la concentración de AGV aumentó de 477 mg/l a 878 mg/l durante esta fase, lo que resultó en una eficiencia de remoción negativa del -84.07%. Este valor refleja un "colapso" en el proceso, donde los AGV no fueron convertidos eficientemente en metano por las arqueas metanogénicas.

La observación de un aumento en los niveles de AGV en el reactor 2 durante ambas fases es un claro indicativo de problemas en la digestión que requieren atención inmediata. Identificar y corregir las causas subyacentes de este incremento es crucial para restablecer la eficiencia del sistema y evitar futuros "colapsos" operativos. La implementación de un sistema de monitoreo continuo y la optimización de las condiciones operativas son pasos esenciales para mejorar la gestión y el rendimiento del reactor.

6.5.19 Cálculo global de la eficiencia de remoción de los AGV en el reactor 2.

Datos:

Muestra 14 (Inicio de Fase 1): 435 mg/L

Muestra 20 (Fin de Fase 2): 878 mg/L

$$\text{Eficiencia de Remoción (\%)} = \frac{435 - 878}{477435} * 100 = -101,84 \%$$

El resultado de la eficiencia de remoción de -101.84% indica que no solo no hubo una reducción en los niveles de AGV durante el período operativo del digester 2, sino que los niveles aumentaron significativamente. Este resultado es indicativo de un "colapso" en la capacidad del sistema para gestionar y procesar los AGV.

6.5.20 Explicación del aumento global de los AGV.

- Si la capacidad del reactor es insuficiente para manejar la carga orgánica alimentada, esto puede llevar a una acumulación progresiva de AGV, especialmente si el proceso de metanogénesis no se mantiene a la par con la fase de acidogénesis.
- Los desequilibrios en las comunidades microbianas pueden haber impedido la conversión efectiva de los AGV en metano, especialmente si las condiciones operativas no favorecían a los metanógenos.
- Factores como variaciones en pH, temperatura, o presencia de inhibidores en el sustrato pueden haber contribuido a este incremento, limitando la actividad metabólica eficiente.

7. CONCLUSIONES

- La caracterización fisicoquímica de la biomasa reveló que la composición del afrecho de yuca, el estiércol de cerdo y el inóculo, cumplieron con los requisitos necesarios para ser utilizados como sustratos en reactores de dos etapas, proporcionando las condiciones óptimas para un proceso de DA eficiente. Asimismo, el diseño del digestor se ajustó según las características específicas de la biomasa empleada, garantizando así su rendimiento adecuado. Finalmente, el uso de digestores para el tratamiento de los residuos orgánicos contribuye con la implementación de procesos sostenibles y ambientalmente responsables.
- El sistema existente fue evaluado y ajustado con base en parámetros operativos definidos, como la tasa de carga orgánica (OLR) y el tiempo de retención hidráulico (TRH). Estos ajustes permitieron la estabilización inicial de los reactores, creando un entorno propicio para el crecimiento microbiano y el inicio eficiente del proceso de DA. Los resultados mostraron la importancia de monitorear continuamente las variables clave en los reactores, lo que facilitó un control adecuado del proceso. Una de las principales causas del abandono de un digestor es la baja o inexistente producción de biogás en comparación con la estimación inicial. Esto se debe, en gran medida, a la falta de monitoreo de parámetros críticos como el pH, la temperatura y el TRH, entre otros. Un monitoreo constante de estas variables es esencial para evitar la disminución en el volumen de biogás producido. La evaluación demostró que un sistema de monitoreo adecuado facilita ajustes oportunos en el proceso, contribuyendo a la mejora de la estabilidad del pH y la temperatura.
- La implementación de un sistema de monitoreo basado en dispositivos de bajo costo como el ESP32 y sensores específicos (MQ4, DS18B20) demostró ser eficiente para el seguimiento de reactores de dos etapas. Este sistema permitió registrar datos continuos, evaluar el rendimiento de los reactores y tomar decisiones informadas para mejorar la concentración de biogás. La vigilancia constante de variables como pH, temperatura y metano fue clave para mantener la estabilidad del proceso de DA, evitando fluctuaciones que podrían afectar la actividad de los microorganismos metanogénicos. Aunque se identificaron áreas de mejora en la robustez y durabilidad del sistema, este diseño modular es accesible y fácilmente replicable, lo que lo convierte en una solución viable para pequeñas y medianas instalaciones. El sistema no solo facilita el control eficiente de digestores, sino que también abre la puerta a nuevas oportunidades para la sostenibilidad energética, mejorando la accesibilidad a tecnologías avanzadas de monitoreo.
- Se identificaron desafíos en el mantenimiento y operación del sistema de monitoreo, principalmente debido a fallas en los sensores y en el sistema de adquisición de datos, lo que resultó en la pérdida de información. Como recomendación, se sugiere mejorar la robustez del sistema y optimizar la recolección de datos en futuras investigaciones. El uso de herramientas como Tinkercad para simulaciones y ThingSpeak para la visualización de datos fue útil para validar y depurar el diseño antes de su implementación física, reduciendo costos y errores. La recopilación y análisis de datos en tiempo real permitió ajustes operativos efectivos, lo que favoreció una gestión más eficiente del proceso. El proyecto resalta la importancia de capacitar a los usuarios en la interpretación y mantenimiento del sistema para asegurar su uso eficiente

y sostenible. Además, establece una base para futuras investigaciones en la optimización de digestores, incorporando análisis avanzados y aprendizaje automático. La integración de plataformas como Power BI y ThingSpeak mostró que es posible crear herramientas de bajo costo y fáciles de usar, mejorando la toma de decisiones y la eficiencia de los digestores al permitir el monitoreo y análisis de datos en tiempo real.

- Ajustar el pH a niveles que optimicen la actividad microbiana y favorezcan la descomposición eficiente de los AGV es clave para maximizar la concentración de biogás y mejorar la eficiencia operativa del reactor. Se identificaron correlaciones significativas entre la temperatura, el pH y la concentración de metano en diversas fases de operación de los reactores. Estas correlaciones son esenciales para comprender la dinámica del proceso y optimizar la eficiencia del reactor. En la fase 1 del reactor, se observó una predominancia de correlaciones lineales según el coeficiente de Pearson, lo que sugiere una relación lineal entre las variables. En cambio, en la fase 2, no se encontraron correlaciones significativas, lo que indica una dinámica más compleja y menos predecible. El proceso de estabilización de los reactores tuvo un impacto considerable en las correlaciones observadas. Antes de la estabilización, las correlaciones eran más variables, mientras que después se notó una mayor consistencia en las relaciones entre las variables. El sistema demostró su capacidad para monitorear en tiempo real variables críticas como el pH, la temperatura y la concentración de metano, factores determinantes para optimizar la DA y mejorar el rendimiento de los reactores. El sistema no solo mejora la operatividad del reactor, sino que también establece una base sólida para el análisis predictivo y futuras optimizaciones. El monitoreo continuo permitió identificar patrones y optimizar parámetros clave, lo que resultó en un aumento en la eficiencia del reactor. El rendimiento de los reactores fue evaluado con éxito, destacando las correlaciones clave entre las variables monitoreadas y detectando áreas críticas de mejora, como la acumulación de AGV en la fase 2. Estos hallazgos respaldan la implementación futura de estrategias de control automatizado para incrementar la eficiencia del proceso.

8. RECOMENDACIONES

Las pruebas de DQO deben realizarse en periodos definidos durante el proceso de la producción del biogás en el digestor.

El pHmetro se debe calibrar antes de usarse con las tres soluciones reguladoras de pH, como son la de 4, 7, y 10.

Aunque se describe el diseño y la implementación del sistema, incluir gráficos o datos de los resultados operativos sería valioso para validar su eficacia en condiciones reales, esto mejoraría la presentación de resultados.

Extender las pruebas de estabilidad de los reactores a escenarios operativos más diversos, documentando cómo el sistema responde a variaciones significativas.

Evaluar el costo de producción y mantenimiento del sistema para determinar su viabilidad económica en comunidades rurales.

Explorar cómo este sistema de monitoreo podría adaptarse para digestores de diferentes capacidades o para proyectos comunitarios.

Garantizar que la herramienta de adquisición permita la recolección continua de datos desde los sensores y su transmisión a plataformas de visualización en tiempo real, como dashboards interactivos en Power BI o ThingSpeak, permitiendo la integración de datos en tiempo real.

Incluir capturas de pantalla y diagramas del flujo de datos desde los sensores hasta las plataformas de visualización. Esto facilita la comprensión del lector y respalda la replicabilidad del sistema.

Asegurarse de que la herramienta sea compatible con otros sistemas de monitoreo o adquisición de datos, permitiendo futuras integraciones y escalabilidad.

Incluir métricas como la latencia de transmisión de datos y la capacidad del sistema para manejar grandes volúmenes de información, especialmente durante períodos de alta actividad, que permitan la evaluación del rendimiento.

Definir e incluir métricas para evaluar el rendimiento, como la eficiencia en la producción de biogás, la estabilidad del pH y la correlación entre temperatura y concentración de biogás.

Analizar gráficamente cómo las variables monitoreadas interactúan entre sí y cómo afectan la producción de biogás, resaltando los períodos de estabilidad y crisis.

Se recomienda integrar los dispositivos ESP32 para monitorear ambas fases del digestor con un solo dispositivo, lo que simplificaría la infraestructura y reduciría costos.

Utilizar una pantalla LCD más grande y avanzada que permita mostrar datos detallados de ambos inversores en una interfaz más intuitiva y legible.

Fusionar ambos dispositivos en un único sistema para monitorear ambas fases, facilitando la gestión y el mantenimiento.

Utilizar una versión pagada de Thing Speak que ofrece mayores tasas de actualización de datos y capacidad de almacenamiento extendida, optimizando la recopilación y análisis de datos.

Implementar un sistema de energía redundante para garantizar el funcionamiento continuo, incluso en situaciones de pérdida temporal de energía.

Explorar sensores de mayor durabilidad y precisión, especialmente para el monitoreo de pH y concentración de gas metano.

Incorporar capacidades de comunicación bidireccional para facilitar la reconfiguración remota y las actualizaciones de firmware.

Evaluar la viabilidad de la integración con otras plataformas IoT para una mayor flexibilidad y opciones de análisis.

REFERENCIAS

- [1] I. Vélez Torres, *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica*, Bogotá D.C., Upme. 2023.
- [2] A. Rodríguez Hernández, "*Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050 república de Colombia*", Bogotá Ministerio de Minas y Energía. 2015
- [3] J. F. Bustos González, A. L. Sepúlveda, y K. T. Aponte, "*Zonas no interconectadas eléctricamente en Colombia: problemas y perspectiva non electric interconnection zones in Colombia: problems and perspectives*", Consultado en Marzo 15 de 2014. [En línea]. Disponible en: <http://ssrn.com/abstract=2603023>
- [4] N. A. García, *Zonas no interconectadas diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica*. Superintendencia de servicios públicos. 2019.
- [5] I. A. Cruz, L. R. S. Andrade, R. Bharagava, A. Nadda, M. Bilal, R. T. Figueiredo, y L. F. Ferreira, "Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: An updated and comprehensive review," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, p. 100196, 2021.
- [6] I. Noya; X. Aldea; G. Carles M; S. Gonzales Garcia; A. Maróa José J, Colón; S. Poanza; "Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products," *J Environ Manage*, vol. 171, pp. 133–143, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.039.
- [7] Centro Nacional de Producción más Limpia de Honduras. *Evaluación de recursos pecuarios y agro-industriales para la reducción de emisiones de metano en Honduras*. Estados Unidos. USAID. 2009.
- [8] X. Flotats, A. Muñoz Luna, J. Martínez Almela, y G. Ramis, *Actas de la Conferencia Nacional de Gestión de Deyecciones Ganaderas*. Consultado Marzo 24 de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/337498828>
- [9] E. L. Estado, M. De, L. A. Agricultura, y L. A. Alimentación, *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. Consultado Febrero 19 de 2019, [En línea]. <http://www.fao.org/catalog/inter-s.htm>
- [10] J. P. Gutiérrez, *Situación actual y escenarios para el desarrollo del biogás en México hacia 2024 y 2030*," Red mexicana de bioenergía a.c. red temática de bioenergía de conacyt, 2018.

- [11] M. Garfí, L. Castro, N. Montero, H. Escalante, y I. Ferrer, "Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment," *Bioresour Technol*, vol. 274, pp. 541–548, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.007.
- [12] V. Vaitkus, K. Brazauskas, y J. Repšyte, "Soft-sensors based on Black-box Models for Bioreactors Monitoring and State Estimation," in *ACM International Conference Proceeding Series, Association for Computing Machinery*, May 2020, pp. 43–47. doi: 10.1145/3405758.3405780.
- [13] S. Jain, S. Jain, I. T. Wolf, J. Lee, y Y. W. Tong, "A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste," Aug. 12, 2015, *Elsevier Ltd*. oi: 10.1016/j.rser.2015.07.091.
- [14] He World Bank, "Pipeline Projects," World Bank Pipeline Project Database. [En línea]. Consultado 03 de diciembre de 2024 [En línea] Disponible en: <https://pip.worldbank.org/home>.
- [15] R. Saavedra García; Z., Marco Antonio; V. Álamo Viera, M. D. Marcelo Aldana, Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. Perú -Spring-2017.
- [16] Banco Mundial. *Hacia la paz sostenible, la erradicación de la pobreza y la prosperidad compartida Notas de política*: Bogotá Colombia. 2014.
- [17] Accenture, *Alianza global para estufas limpias Evaluación de mercado de Colombia Mapeo del sector de Colombia*. Bogotá. Acceenture. 2012.
- [18] L. Castro, M. Carballo, J. Marti-Herrero, y H. Escalante. *Monitoreo a escala de real de un digestor anaeróbico de bajo costo instalado en una planta de sacrificio animal*. RedBioLAC, 2017.
- [19] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Política Nacional de Bienestar Animal, versión 3, 2022*. Consultado 03 de diciembre de 2024 [En línea].Disponible en: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/08/20220408_Politica-Bienestar-Animal_Vers3-doc-final-ok-16062022.pdf.
- [20] A. A. R. Vanegas, J. E. Vásquez, J. M. Delgado, D. Domínguez-Carvajal, A. M. Mosquera-Mena, F. Molina, y M. Peñuela-Vásquez. "Evaluation of Potential Substrates for Biogas Production in Colombia using Anaerobic Digestion Systems." *Ingeniería e Investigación*, 2023. doi: 10.15446/ing.investig.100834.

[21] Agua Limpia. "Control de proceso en biodigestores", *Biogas - biodigestores - plantas de biogás*, Consultado: 03 de diciembre de 2023 [En Línea]. Disponible en: <https://www.biogas.uno/biodigestores/control-de-proceso/>

[22] Y. Jiang, N. Chu, y R. Zeng, "Submersible probe type microbial electrochemical sensor for volatile fatty acids monitoring," *Journal of Cleaner Production*, vol. 234, 2019. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.041

[23] L. Cepero, V. Savran, D. Blanco, M. R. Díaz Piñón, J. Suárez, y A. Palacios. "Producción de biogás y bioabonos a partir de efluentes de biodigestores Production of biogas and biofertilizers from biodigester effluents". *Pastos y Forrajes*, vol. 35, núm. 2, pp. 219-226 2012, abril-junio, 2012.

[24] J. Nolan. *La importancia de las acciones de medición y monitoreo*. ISO 9001:2015 9001Academy. Consultado: 03 de diciembre de 2023 [En línea]. Disponible en: <https://advisera.com/9001academy/es/knowledgebase/analisis-de-los-requerimientos-de-medicion-y-monitoreo-de-la-iso-90012015/>

[25] Z. Luo *et al.*, "Biogas residue biochar integrated with phosphate from its ash for the effective recovery of nutrients from piggery biogas slurry," *Biochar*, vol. 4, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1007/s42773-022-00151-4.

[26] S. Jain, S. Jain, I. T. Wolf, J. Lee, y Y. W. Tong, "A comprehensive review on operating parameters and different pretreatment methodologies for anaerobic digestion of municipal solid waste," Aug. 12, 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.091.

[27] D. W. Atchike, M. Irfan, M. Ahmad, y M. A. Rehman, "Waste-to-Renewable Energy Transition: Biogas Generation for Sustainable Development," *Front Environ Sci*, vol. 10, Mar. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.840588.

[28] X. Zhai, I. D. Kariyama, y B. Wu, "Investigation of the effect of intermittent minimal mixing intensity on methane production during anaerobic digestion of dairy manure," *Comput Electron Agric*, vol. 155, pp. 121–129, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.10.002.

[29] K. Hagos, J. Zong, D. Li, C. Liu, y X. Lu, "Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives," 2017, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.184.

[30] A. Sikora, A. Detman, A. Chojnacka, y M. Błaszczuk. *Anaerobic digestion: I. A common process ensuring energy flow and the circulation of matter in ecosystems. II. A tool for the production of gaseous biofuels*. Anaerobic Digestion, 2017.

- [31] R. Alvarez y G. Lidén, "The effect of temperature variation on biomethanation at high altitude," *Bioresour Technol*, vol. 99, no. 15, pp. 7278–7284, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.055.
- [32] R. Alvarez, S. Villca, y G. Lidén, "Biogas production from llama and cow manure at high altitude," *Biomass Bioenergy*, vol. 30, no. 1, pp. 66–75, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.biombioe.2005.10.001.
- [33] P. Panichnumsin, A. Nopharatana, B. Ahring, y P. Chaiprasert, "Production of methane by co-digestion of cassava pulp with various concentrations of pig manure," *Biomass & Bioenergy*, vol. 34, pp. 1117–1124, 2010.
- [34] M. Garfí, L. Ferrer-Martí, I. Perez, X. Flotats, y I. Ferrer, "Codigestion of cow and guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude," *Ecol Eng*, vol. 37, no. 12, pp. 2066–2070, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.ecoleng.2011.08.018.
- [35] L. Dong, G. Cao, X. Guo, T. Liu, J. Wu, y N. Ren, "Efficient biogas production from cattle manure in a plug flow reactor: A large scale long term study," *Bioresource Technology*, vol. 278, pp. 450–455, 2019.
- [36] S. Thy et al., "Effect of length: diameter ratio in polyethylene biodigesters on gas production and effluent composition," Nov. 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd17/11/sant17120.htmvan12>
- [37] I. Ferrer, M. Gamiz, M. Almeida, y A. Ruiz, "Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventnilla (Lima, Peru)," *Waste Management*, vol. 29, no. 1, pp. 168–173, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.02.014.
- [38] F. P. T. Co, "Important features of the introduction of biodigesters in small scale dairy farms", Lrrd.org, 09-ago-2001. Consultado 05 de diciembre de -2024 [En línea]. Disponible en: <https://www.lrrd.org/lrrd14/3/Viey143.htm>.
- [39] R. Matulaitis, V. Juškienė, y R. Juška, "Measurement of methane production from pig and cattle manure in Lithuania," *Zemdirbyste-agriculture*, vol. 102, pp. 103–110, 2015.
- [40] S. Thy, T. R. Preston y J. Ly, *Effect of retention time on gas production and fertilizer value of biodigester effluent*. Livestock Research for Rural Development 15, 2003.

- [41] I. A. Ruge Ruge, "Prototipo de biorreactor aeróbico para el monitoreo y control del proceso de co-compostaje, a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos orgánicos de plaza de mercado," *Prospectiva*, vol. 17, no. 1, pp. 17–24, Apr. 2019, doi: 10.15665/rp.v17i1.1673.
- [42] Iswanto, A. Ma'arif, B. Kebenaran, y P. Megantoro, "Design of gas concentration measurement and monitoring system for biogas power plant," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 22, no. 2, pp. 726–732, Apr. 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v22.i2.pp726-732.
- [43] X. Zhai, I. D. Kariyama, y B. Wu, "Investigation of the effect of intermittent minimal mixing intensity on methane production during anaerobic digestion of dairy manure," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 155, pp. 121-129, 2018
- [44] Y. Kūçūkağa, A. Facchin, C. Torri, y S. Kara, "An original Arduino-controlled anaerobic bioreactor packed with biochar as a porous filter media," *MethodsX*, vol. 9, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.mex.2021.101615.
- [45] N. E. Faedo, M. Lucero, V. Mazzone, M. Suarez, y N. L. Rojas, "Low cost SCADA for a laboratory-scale bioreactor," *2XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, pp. 1-6, 2015. Disponible en: https://consensus.app/papers/low-cost-scada-for-a-laboratoryscale-bioreactor-faedo-lucero/c63f82a0e4d05de78f3080985af857f0/?utm_source=chatgpt.
- [46] L. G. Ortega-Bucio, F. Hernández-Hernández, J. M. Zea-Pérez, y A. Becerra-Chavez, "Biodigestor con variables monitoreadas," *Revista de Energía Química y Física*, pp. 37–47, Mar. 2019, doi: 10.35429/jcpe.2019.18.6.37.47.
- [47] P. F. S. Teixeira, L. F. Moura, S. W. S. Lima, D. Albiero, F. A. Gondim, y A. R. de Alexandria, "Development of a Low-Cost Data Acquisition System for Biodigester," *J Sustain Bioenergy Syst*, vol. 07, no. 03, pp. 117–137, 2017, doi: 10.4236/jsbs.2017.73009.
- [48] C. de Souza Guimarães y D. R. da Silva Maia, "Development of Anaerobic Biodigester for the Production of Biogas Used in Semi-Continuous System Bioprocesses: An Efficient Alternative for Co-Digestion of Low Biodegradability Biomass," *Biomass*, vol. 3, pp. 18–30, 2023, doi: 10.3390/biomass3010002.
- [49] V. S. Kshirsagar, P. M. Pawar, y S. T. Mehetre, "Holistic Approach for Biogas Technology Implementation to Improve Sustainability," *Current Science*, vol. 116, no. 2, pp. 249-255, Jan. 2019, doi: 10.18520/cs/v116/i2/249-255.

[50] F. P. H. de Andrade, J. H. da S. Félix, F. H. L. Andrade, D. A. C. Paz, J. C. A. Alcócer, y O. R. de O. Pinto, "Monitoring of biodigesters through a computerized system integrated to IoT platform," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 9, no. 2, pp. 270-276, Feb. 2022. doi: 10.22161/ijaers.92.31

[51] Microsoft. *Power BI Documentation*. Consultado 07- Jul- 2024 [En línea]. Disponibles en: <https://docs.microsoft.com/en-us/power-bi/>.

[52] R. Jia, Y. C. Song, D. M. Piao, K. Kim, C. Y. Lee, y J. Park, "Exploration of deep learning models for real-time monitoring of state and performance of anaerobic digestion with online sensors," *Bioresour Technol*, vol. 363, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127908.

[53] M. C. Tomei, C. M. Braguglia, G. Cento, y G. Mininni, "Modeling of Anaerobic digestion of sludge," *El Servier Dec*. 2009. doi: 10.1080/10643380801977818.

[54] J. Wei, X. Hao, M. C. M. van Loosdrecht, y J. Li, "Feasibility analysis of anaerobic digestion of excess sludge enhanced by iron: A review," Jun. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2018.02.042.

[55] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, y É. Duchesnay, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *Journal of Machine Learning Research*, vol. 12, pp. 2825-2830, 2011.

[56] C. V. Dang, K. D. Nguyen, H. Dao, y L. T. Nguyen, "Apply Matlab in ThingSpeak Server to build the system measure and analyze data using IoT Gateway technology," *Journal of Mining and Earth Sciences*, vol. 61, no. 5, pp. 88-95, 2020, doi: 10.46326/JMES.2020.61(5).10.

[57] M. Westerholm, B. Müller, S. Isaksson, y A. Schnürer, "Trace element and temperature effects on microbial communities and links to biogas digester performance at high ammonia levels," *Biotechnol Biofuels*, vol. 8, no. 1, Sep. 2015, doi: 10.1186/s13068-015-0328-6.

[58] L. R. R. Fröner-Lacerda et al., "Design, fabrication, automation, and scaleup of anaerobic reactors for waste management and bioenergy recovery," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2024. DOI: 10.1002/bbb.2609.

[59] D. Suarez et al., "Data Processing Reactor for Anaerobic Digestion (Instrumentation, Acquisition)," 2016 11th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 2016. DOI: 10.1109/CISTI.2016.7521443.

- [60] E. Echiegu y A. Ghaly, "An In-House Computer-Based Data Acquisition and Control System for Anaerobic Fermentation Processes," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2014. DOI: 10.3844/AJEASSP.2014.316.326.
- [61] W. Leite et al., "Monitoring and Control Improvement of Single and Two Stage Thermophilic Sludge Digestion Through Multivariate Analysis," *Waste and Biomass Valorization*, 2018. DOI: 10.1007/S12649-016-9758-Z.
- [62] M. Carballa et al., "Microbial management of anaerobic digestion: exploiting the microbiome-functionality nexus," *Current Opinion in Biotechnology*, 2015. DOI: 10.1016/j.copbio.2015.01.008.
- [63] L. G. Cortés et al., "Full-Scale Digesters: Model Predictive Control with Online Kinetic Parameter Identification Strategy," *Energies*, 2022. DOI: 10.3390/en15228594.
- [64] V. M. Vanti et al., "Monitoring and Control of the Processes Involved in the Capture and Filtering of Biogas Using FPGA Embedded Fuzzy Logic," *IEEE Latin America Transactions*, 2015. DOI: 10.1109/TLA.2015.7273782.
- [65] T. Radu et al., "The Design, Development and Assessment of a Novel Decentralised IoT-Based Remote Monitoring of a Small-Scale Anaerobic Digester Network," *Journal of Energy and Power Technology*, 2022. DOI: 10.21926/jept.2204039.
- [66] D. Röhlen et al., "Toward a Hybrid Biosensor System for Analysis of Organic and Volatile Fatty Acids in Fermentation Processes," *Frontiers in Chemistry*, 2018. DOI: 10.3389/fchem.2018.00284.
- [67] I. Tryhuba, A. Tryhuba, T. Hutsol, A. Cieszewska, O. Andrushkiv, S. Głowacki, A. Bryś, S. Slobodian, W. Tulej, and M. Sojak, "Prediction of Biogas Production Volumes from Household Organic Waste Based on Machine Learning," *Energies*, vol. 17, no. 7, 2024.
- [68] Iswanto, A. Ma'arif, B. Kebenaran, y P. Megantoro, "Design of gas concentration measurement and monitoring system for biogas power plant," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 22, no. 2, pp. 726–732, Apr. 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v22.i2.pp726-732.
- [69]. Yusuf Küçükağa, MScun,b, Andrea Facchin, MScun, Cristian Torri, PhDun, Serdar Kara. *Un biorreactor anaeróbico original controlado por Arduino lleno de biocarbón como medio filtrante poroso.*

[70]. Google Earth. *Imagen satelital de El Tamboral, Padilla, Cauca* [Imagen satelital]. Consultado 23 de diciembre de 2024 [En línea] Disponible en: <https://earth.google.com/web/search/El+Tamboral,+Padilla,+Cauca/@3.2749914,76.22212241,1122.95353893a,2178.95077678d,35y,0h,60t,0r/data=CigiJgokCTJVSib3ZAxAEezU2jqf1QpAGRgKjaASFFPAIZeJShUOL1PAKAI6AwoBMA>

[71]. Sensor de Gas MQ4," *Ferretronica*. Consultado 09 de diciembre de 2024 [En línea]. Disponible en: <https://ferretronica.com/products/sensor-de-gas-mq4?variant=15364340842589>.

[72]. Módulo Sensor de Temperatura Ref. DHT22. *Selectop*, Consultado 09 de diciembre Dec. 9, 2024 [En línea]. Disponible en: <https://www.selectop.com.co/products/modulo-sensor-de-temperatura-ref-dht22-copia>.

[73]. Sensor de pH para Arduino E201-BNC. *Innovatronics*. Consultado 09 de diciembre de 2024 [En línea]. Disponible en: https://www.innovatronics.com.co/MCO-1001835105-sensor-de-ph-para-arduino-e201-bnc-_JM. [Accessed: Dec. 9, 2024

[74]. *Descripción general del microcontrolador NodeMCU ESP32*. AranaCorp, Consultado 09 de diciembre de 2024 [En línea]. Disponible en: <https://www.aranacorp.com/es/descripcion-general-del-microcontrolador-nodemcu-esp32/>.

[75]. ESP8266 y ESP32: Tutoriales y Proyectos. *Programar Fácil*, Consultado 09 de diciembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://programarfacil.com/esp8266/esp32/>. [].

[76] K. Sarvestani, O. Ahmadi, S. B. Mortazavi, y H. A. Mahabadi, "Development of a predictive accident model for dynamic risk assessment of propane storage tanks," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 148, pp. 1217–1232, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.02.018.

[77] Guías de Instalación. *Instalación de Python," Programación ESPOL*. Consultado 05 de Enero de 2025 [En línea]. Disponible en: <http://programacion.espol.edu.ec/#/guías-de-instalación/instalación-de-python/>.

[78]. Corantioquia. *Agroecología*. Consultado 23 de diciembre de 2024. [En línea] Disponible en: https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/AGROECOLOGIA/GC_CN_4586_2003_PORQUINA_ZA_COMPOST.pdf

[79]. O, Iván Mauricio. *Energías renovables y eficiencia energética- Aprovechamiento de la biomasa*. Trabajo de investigación Facultad de ingenierías, Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali.2012

[80]. 3D Design: Tinkercad. *Tinkercad*, Consultado 099, de diciembre de 2024 [En línea]. Disponible en <https://www.tinkercad.com/things/9t01XUjsgy>

[81] Espressif Systems. *LCD Interface (API Reference)*, "ESP-IDF Programming Guide, Consultado 31 de diciembre de 2024]. [En línea]. Disponible en: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/lcd/index.html>. [

[82] Random Nerd Tutorials. *ESP32 Publish Sensor Readings to ThingSpeak*. Consultado 31 de diciembre de 2024 [En línea]. Disponible en: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-thingspeak-publish-arduino/>.

[83] X. Jin, I. Angelidaki, y Y. Zhang, "Microbial Electrochemical Monitoring of Volatile Fatty Acids during Anaerobic Digestion," *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 8, pp. 4422–4429, 2016. DOI: 10.1021/acs.est.5b05267.

[84] H. Sun et al., "Development and validation of a simplified titration method for monitoring volatile fatty acids in anaerobic digestion," *Waste Management*, vol. 67, pp. 43–50, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.05.015.

[85] M. Vargas-Muñoz et al., "Automated method for volatile fatty acids determination in anaerobic processes," *Journal of Chromatography A*, vol. 1643, 2021. DOI: 10.1016/j.chroma.2021.462034.

[86] H. Sun et al., "Innovative air-cathode bioelectrochemical sensor for monitoring of total volatile fatty acids," *Chemosphere*, vol. 273, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129660.

[87] P. Kazemi et al., "Robust Data-Driven Soft Sensors for Online Monitoring of Volatile Fatty Acids," *Processes*, vol. 8, no. 1, pp. 67, 2020. DOI: 10.3390/pr8010067.

[88] H. Jin et al., "Bio-electrolytic sensor for rapid monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion process," *Water Research*, vol. 111, pp. 74–80, 2017. DOI: 10.1016/j.watres.2016.12.045.

[89] A. Schievano et al., "Single-chamber microbial fuel cells as on-line shock-sensors for volatile fatty acids in anaerobic digesters," *Waste Management*, vol. 71, pp. 785–791, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.06.012.

[90] F. Zan et al., "A novel approach for rapidly measuring volatile fatty acids in anaerobic processes," *Water Research*, vol. 182, 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115960.

- [91] T. Amani et al., "Analysis of the Syntrophic Anaerobic Digestion of Volatile Fatty Acids Using Enriched Cultures in a Fixed-Bed Reactor," *Water Environment Research*, vol. 84, 2012. DOI: 10.2175/106143012X13347678384882.
- [92] Y. Jiang, N. Chu, y R. Zeng, "Submersible probe type microbial electrochemical sensor for volatile fatty acids monitoring," *Journal of Cleaner Production*, vol. 234, 2019. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.041.
- [93]. J. Zhao y S. Zhang. *Biogas production from agricultural residues in a two-stage anaerobic digestion process: Evaluation and optimization*. *Bioresource Technology*. 2021. 319, 124200. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124200>
- [94]. J. Cheng y G. Liu. *Thermal decomposition of biomass: Kinetic analysis and characterization of pyrolysis products*. *Renewable Energy*. 2019 130, 472-481. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.075>
- [95]. J. Mata-Álvarez y J. Dosta. *Anaerobic digestion of organic solid waste: A review*. *Bioresource Technology*. 2014. 168, 19-30. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.025>
- [96]. A. Elbeltagi y A. Elsheikh. *Effect of feedstock composition on biogas production from anaerobic digestion of agricultural residues*. 2017. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 3376-3383. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0200-5>
- [97]. P. Kumar y S. Sharma, S. *Effect of feedstock composition on biogas production during anaerobic digestion of organic waste*. 2016 *Journal of Environmental Management*, 182, 74-84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.030>
- [98] MQ4 Semiconductor Sensor for Combustible Gas, Winsen Electronics, 2020.
- [99] A. R. Jani, C. López, y S. Li, "Low-Cost Sensor Integration for Real-Time Biogas Characterization," *Renewable Energy Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 33–41, 2022.
- [100] Y. Chen, J. J. Cheng, y K. S. Creamer, "Inhibition of anaerobic digestion process: A review," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 4, pp. 4044–4064, 2008.

ANEXOS

Anexo A. Análisis de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno por combustión a las muestras de Biomasa

CIAT- Centro Internacional de Agricultura Tropical *Informe de Análisis de la Solicitud*

Laboratorio de Servicios Analíticos

Análisis de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno por combustión a las muestras de Biomasa

CIAT- Centro Internacional de Agricultura Tropical
Laboratorio de Servicios Analíticos

Informe de Análisis de la Solicitud

Análisis de Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno por combustión a las muestras de Biomasa

Solicitante	Andrés Felipe Valencia Vidal	Fecha Muestreo	2022-10-21 00:00:00.0	Centro de Costo	S107AE15E13
No Serial	O2022-28	Entrega Muestras	2022-11-28 00:00:00.0	Observaciones	
No Muestras	3	Fecha Solicitud	2022-11-28 00:00:00.0		
Procedencia	Florida Valle del Cauca	Entrega Resultados	2022-12-21 00:00:00.0		andres.valencia_@uao.edu.co

Muestra	LCM	Descripcion	C Comb (%)	H Comb (%)	N Comb (%)
1		Afrecho de Yuca	43,15	0,02	0,04
2		Estiercol de Cerdo	12,89	0,00	1,85
3		Inóculo del estiercol de Cerdo	32,88	0,00	3,18

- Notas:
1. Los resultados presentes en este informe, se refieren unicamente a las muestras analizadas.
 2. Este informe no debe ser alterado ni total ni parcialmente.
 3. Los resultados de los presentes análisis se obtuvieron en el Laboratorio a la temperatura 22 +/- 3 oC y humedad relativa 60 +/- 5 %.
 4. El laboratorio de servicios analíticos, no efectúa ningún tipo de muestreo de campo ya que el usuario es quien suministra las muestras.
 5. Los valores iguales a cero corresponden a resultados que se encuentran por debajo de los límites de cuantificación del método

C Comb (%)	Carbono por Combustion
H Comb (%)	Hidrógeno por Combustión
N Comb (%)	Nitrógeno Por Combustión

Anexo B. Dimensiones de los digestores y sus correspondientes fases

DIGESTOR 1 FASE 1								
	<i>h</i> <i>(cm)</i>	Θ <i>(cm)</i>	<i>A</i> <i>(cm²)</i>	<i>V</i> <i>(cm³)</i>	<i>V (cm³)</i> <i>mezclador</i>	<i>V (cm³)</i> <i>disponible</i>	<i>V (cm³)</i> <i>efectivo</i>	<i>Altura según el plano del digestor</i>
1	43,5	10,77	91,1	3963	330	3633	2906,28	Altura total
2	36,5	10,77	91,1	3325	330	2995	2396,12	Altura al eje de salida de gas
3	30	10,77	91,1	2733	330	2403	1922,4	Altura entre el eje de salida de gas y de la mezcla

DIGESTOR 1 FASE 2								
	<i>h</i> <i>(cm)</i>	Θ <i>(cm)</i>	<i>A</i> <i>(cm²)</i>	<i>V</i> <i>(cm³)</i>	<i>V (cm³)</i> <i>mezclador</i>	<i>V (cm³)</i> <i>disponible</i>	<i>V (cm³)</i> <i>efectivo</i>	<i>Altura según el plano del digestor</i>
1	43,5	10,77	91,1	3963	330	3633	2906,28	Altura total
2	39	10,77	91,1	3553	330	3223	2578,32	Altura al eje de salida de gas
3	32	10,77	91,1	2915	330	2585	2068,16	Altura entre el eje de salida de gas y de la mezcla

DIGESTOR 2 FASE 1								
	<i>h</i> <i>(cm)</i>	Θ <i>(cm)</i>	<i>A</i> <i>(cm²)</i>	<i>V</i> <i>(cm³)</i>	<i>V (cm³)</i> <i>mezclador</i>	<i>V (cm³)</i> <i>disponible</i>	<i>V (cm³)</i> <i>efectivo</i>	<i>Altura según el plano del digestor</i>
1	36	10,77	91,1	3280	330	2950	2359,68	Altura total
2	27	10,77	91,1	2460	330	2130	1703,76	Altura al eje de salida de gas
3	23	10,77	91,1	2095	330	1765	1412,24	Altura entre el eje de salida de gas y de la mezcla

DIGESTOR 2 FASE 2								
	<i>h</i> <i>(cm)</i>	Θ <i>(cm)</i>	<i>A</i> <i>(cm²)</i>	<i>V</i> <i>(cm³)</i>	<i>V (cm³)</i> <i>mezclador</i>	<i>V (cm³)</i> <i>disponible</i>	<i>V (cm³)</i> <i>efectivo</i>	<i>Altura según el plano del digestor</i>
1	41	10,77	91,1	3735	330	3405	2724,08	Altura total
2	37,5	10,77	91,1	3416	330	3086	2469	Altura al eje de salida de gas
3	26,5	10,77	91,1	2414	330	2084	1667,32	Altura entre el eje de salida de gas y de la mezcla

Anexo C. Bitácora de seguimiento Digestores

Fecha	Ci	Tipo car	OLR (gSV/lt)	Carga Mez (gr)	E (gr)	AY (gr)	H2O Adición (gr)	Carga día Mez+H2O (gr)	%ST	C/i	%i	%E	%i	HRT (d)	Ajuste	pH me	pH Sen	T*
9/03/2023	1	Ino	8,37	205,47			0,54	745,47	4,0%	10,3	100%	0%	0%					
10/03/2023	2	Ino	8,37	205,47					4,0%									
11/03/2023	3	Ino	8,37	205,47					4,0%					5				
12/03/2023	4	Ino	8,37	205,47					4,0%									
13/03/2023	5	Ino	8,37	205,47					104,0%									
14/03/2023	6	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			6,6		24
15/03/2023	7	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			6,49		27
16/03/2023	8	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			2,58		26
17/03/2023	9	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,90		32
18/03/2023	10	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%	9		4,90		32
19/03/2023	11	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,90		32
20/03/2023	12	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,90		32
21/03/2023	13	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,36		30
22/03/2023	14	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,36		30
23/03/2023	15	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,42		30
24/03/2023	16	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,54		25,5
25/03/2023	17	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,45		26,5
26/03/2023	18	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%					
27/03/2023	19	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,6		28
28/03/2023	20	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%	9		4,83		32
29/03/2023	21	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,73		26,5
30/03/2023	22	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,83		31
31/03/2023	23	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,78		30
1/04/2023	24	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,78		30
2/04/2023	25	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,96		27,5
3/04/2023	26	Mez 1	8,53	48	35	13	170	218	10,0%	21,8	0%	73%	27%			4,79		32
4/04/2023	27	Mez 1	8,53	54	43	11	164	218	10,0%	21,8	0%	80%	20%			4,81		30
5/04/2023	28	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%	10		4,88		34
6/04/2023	29	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			5,3		28,5
7/04/2023	30	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			4		31
8/04/2023	31	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
9/04/2023	32	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
10/04/2023	33	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
11/04/2023	34	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
12/04/2023	35	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
13/04/2023	36	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
14/04/2023	37	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%					
15/04/2023	38	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			5	4,8	31
16/04/2023	39	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%	10				
17/04/2023	40	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			5	5,66	28
18/04/2023	41	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			5	4,7	32
19/04/2023	42	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			4	4,7	32
20/04/2023	43	Mez 2	8,27	54	43	11	164	218	10,0%	18,23	0%	80%	20%			4,54	4,36	25,1

Anexo D. Características del Hardware utilizado

- **SENSOR MQ4**



Características Clave:

- Sensibilidad específica: el sensor MQ-4 está diseñado específicamente para detectar gas metano con alta sensibilidad a este gas en concentraciones específicas.
- Rango de detección: por lo general, tiene un rango de detección de concentración de gas metano desde varios ppm (partes por millón) hasta alrededor de 10000 ppm, lo que lo hace adecuado para detectar concentraciones tanto en entornos de bajo como de alto contenido de metano.
- Rápida respuesta: el sensor puede proporcionar respuestas rápidas a cambios en la concentración de gas, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en tiempo real.
- Salida analógica: proporciona una salida analógica que varía en función de la concentración de gas metano. Esta salida se puede medir y convertir en una lectura cuantitativa.

Aplicaciones:

- Se utiliza en sistemas de seguridad para detectar fugas de gas metano en instalaciones industriales, comerciales y domésticas.
- Puede ser utilizado para medir la concentración de metano en el aire en áreas cercanas a vertederos, estaciones de gas, y otros lugares potencialmente contaminados.
- En entornos industriales donde el gas metano puede ser un riesgo, se utiliza para monitorear y controlar las concentraciones en tiempo real.
- Puede integrarse en sistemas de control de calidad del aire y sistemas de automatización para activar dispositivos o alarmas en función de la concentración de gas metano detectada.

- **SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20**



Características del DS18B20:

- El sensor DS18B20 es conocido por su alta precisión en la medición de temperatura. Puede proporcionar mediciones confiables con una precisión de hasta 0.5°C.
- Utiliza el protocolo One Wire para la comunicación, lo que significa que varios sensores DS18B20 pueden conectarse a un solo pin del microcontrolador, lo que ahorra pines y simplifica la conexión.
- El sensor DS18B20 puede medir temperaturas en un rango amplio, generalmente desde -55°C hasta 125°C.
- Es posible calibrar el sensor para mejorar aún más la precisión de las mediciones en ciertos rangos de temperatura.
- El sensor puede configurarse para generar una alarma cuando la temperatura alcanza ciertos umbrales predefinidos.

- **SENSOR DE pH ARDUINO E201 BNC**



Características del sensor E201 BNC:

- El sensor de pH utiliza un electrodo de vidrio o combinado para medir el pH, este electrodo es sensible a los cambios en la concentración de iones de hidrógeno (pH) en una solución.
- El conector BNC es un tipo común de conector utilizado en instrumentación electrónica, permite una conexión rápida y segura del sensor a dispositivos como osciloscopios, multímetros y placas de desarrollo como Arduino.
- Los sensores de pH generalmente tienen un rango de medición específico. Puede variar según el modelo, pero es común que el rango sea de aproximadamente entre 0 a 14.
- La resolución del sensor, se refiere a la mínima diferencia en pH que puede detectar el sensor, mientras que la precisión se refiere a la capacidad del sensor para proporcionar mediciones precisas. Estos valores pueden variar según el modelo y la calidad del sensor.
- El sensor de pH requiere calibración periódica para garantizar mediciones precisas. Por lo general, se calibra utilizando soluciones de pH conocidas, como 4.01, 7.00 y 10.01.
- Algunos sensores de pH pueden tener interfaces analógicas (como voltaje analógico) o digitales (como I2C o UART) para comunicarse con dispositivos externos, como placas de desarrollo.
- Los electrodos de vidrio son sensibles y pueden dañarse con el tiempo. Es importante mantener y almacenar el electrodo adecuadamente según las recomendaciones del fabricante.
- Los sensores de pH se utilizan en una variedad de aplicaciones, como monitoreo de calidad del agua, acuicultura, control de procesos químicos, control de pH en laboratorios, entre otros.

- **MÓDULO ESP32**

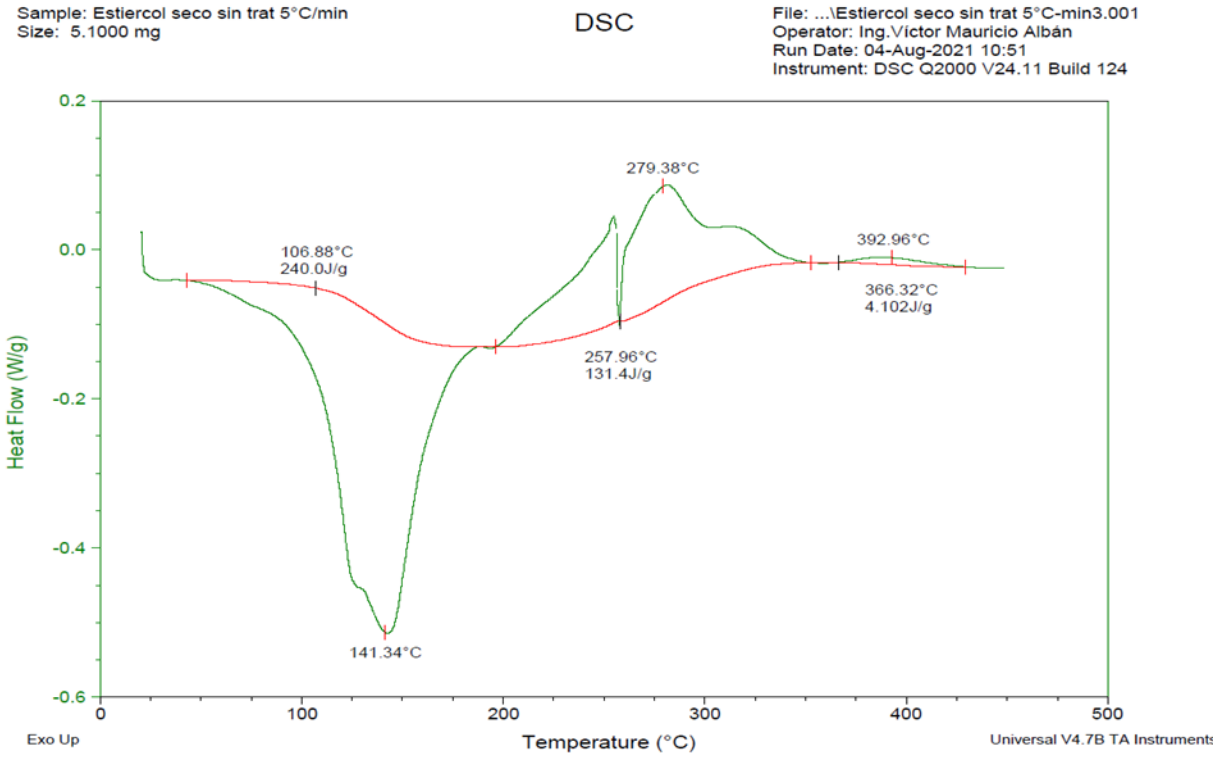


Características del ESP32:

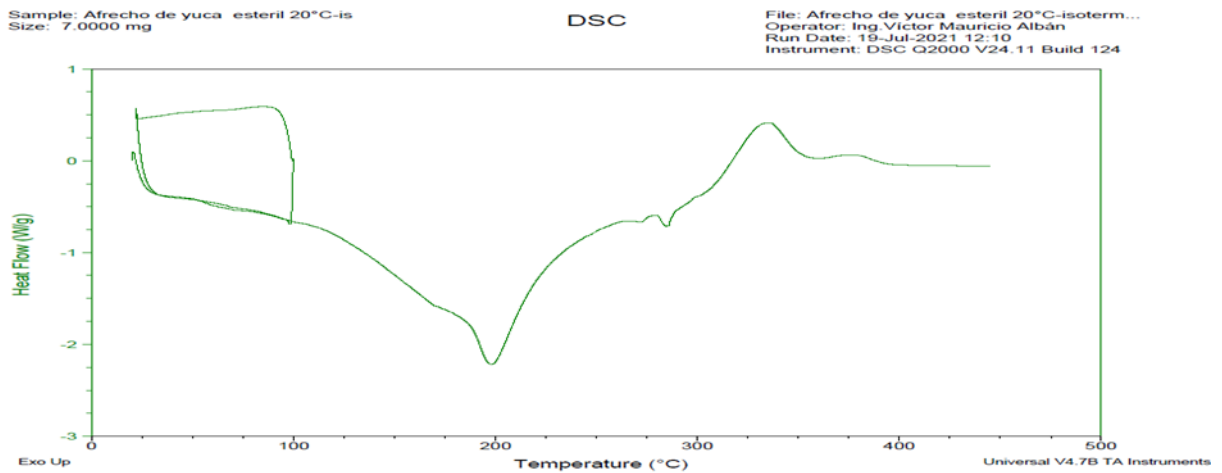
- Uno de los puntos fuertes del ESP32 es su arquitectura de doble núcleo, permitiendo ejecutar tareas en paralelo. Esto se traduce en una eficiencia mejorada y una capacidad de respuesta más rápida, ideal para aplicaciones que requieren manejo simultáneo de múltiples funciones.
- Equipado con módulos Wi-Fi y Bluetooth integrados, el ESP32 facilita la comunicación inalámbrica, esta conectividad es esencial para la transmisión de datos a plataformas en la nube, como Thing Speak, utilizados para almacenar y visualizar los datos del digestor.
- El ESP32 cuenta con una variedad de periféricos, desde interfaces analógicas y digitales hasta UART, I2C y SPI. Esta versatilidad facilita la integración de sensores y dispositivos externos, como el sensor de pH y el sensor de gas MQ4.
- Incluye memoria flash integrada que se utiliza para almacenar el programa y los datos persistentes. Esto fue esencial para el proyecto, ya que permitió almacenar de manera confiable el código de monitoreo y los registros de datos.
- Diseñado con eficiencia energética en mente, el ESP32 es capaz de operar en modos de bajo consumo, crucial para proyectos alimentados por batería o paneles solares.

Anexo E. Análisis Calorimétrico DSC del estiércol y el afrecho de yuca

Análisis Calorimétrico DSC estiércol seco sin tratamiento

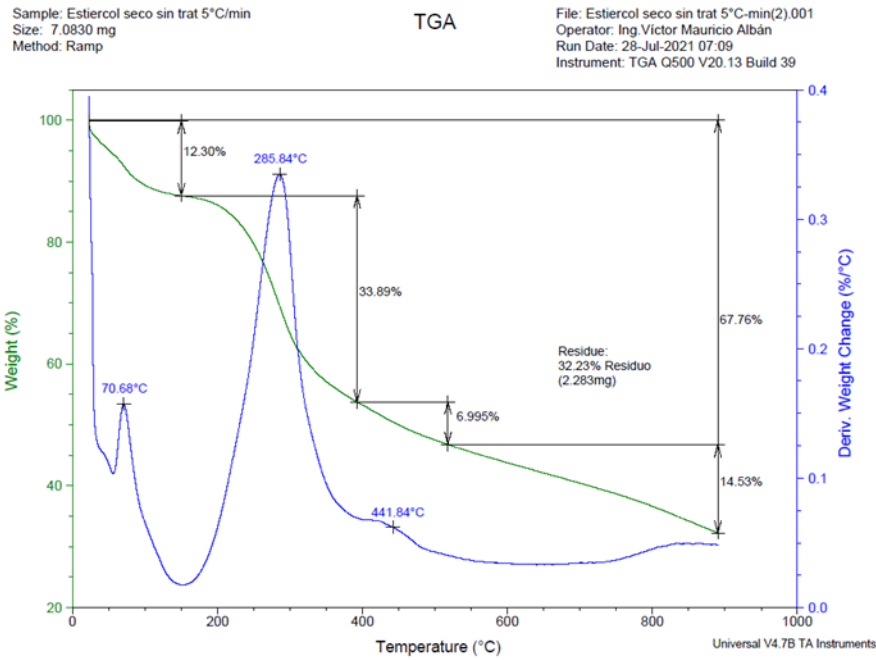


Análisis Calorimétrico DSC afrecho de yuca estéril

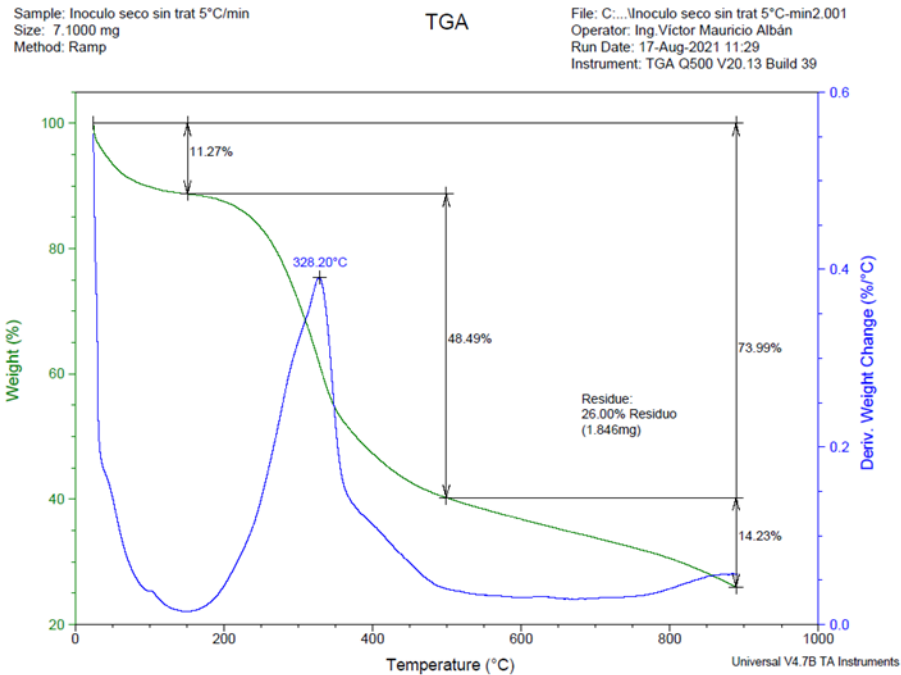


Anexo F. Análisis termográfico TGA de la biomasa utilizada

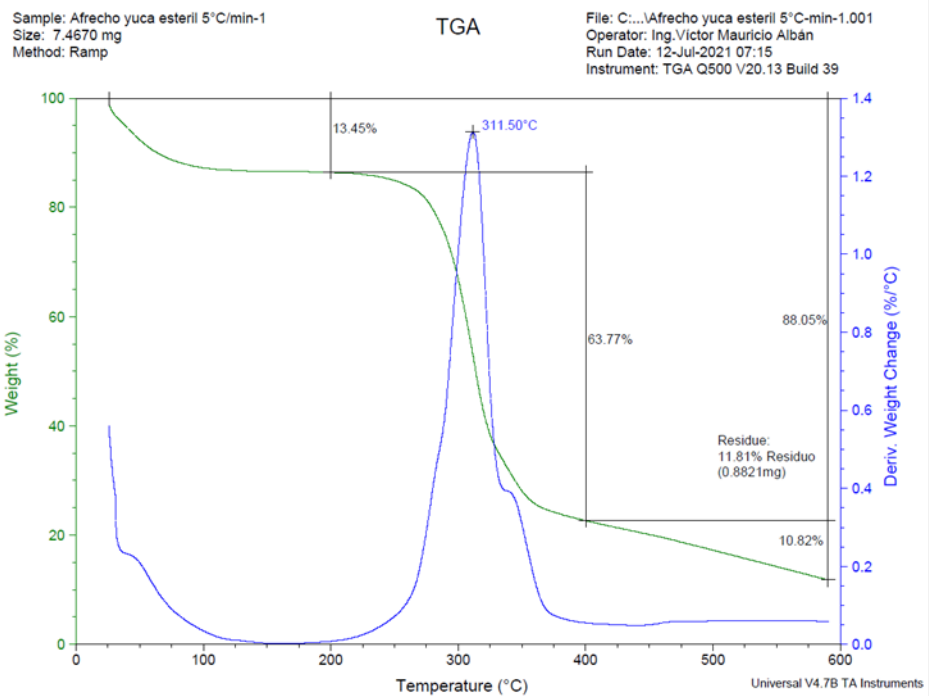
Análisis Termogravimétrico TGA, estiércol seco sin tratamiento



Análisis Termogravimétrico TGA, inóculo seco sin tratamiento



Análisis Termogravimétrico TGA afrecho de yuca estéril



Anexo G. Determinación Sólidos Totales y Sólidos Volátiles de la biomasa utilizada

Sólidos totales de la biomasa utilizada

Biomasa	Cápsula + muestra húmeda (g)	A	B	Y	ST (mg/l)
Inóculo 1	86,25	82,70	81,25	5	29,00
Inóculo 2	77,07	73,34	72,07	5	25,40
Inóculo 3	93,78	90,68	88,78	5	38,00
Valor Medio de los ST inóculo					30,80
Desviación Estándar de los ST inóculo					6,49
Estiércol 1	85,31	82,11	80,31	5	36,00
Estiércol 2	87,77	84,43	82,77	5	33,20
Estiércol 3	86,72	83,46	81,72	5	34,80
Valor Medio de los ST estiércol					34,70
Desviación Estándar de los ST estiércol					1,40
A. Yuca 1	85,75	85,58	80,75	5	96,60
A. Yuca 2	85,40	85,15	80,40	5	95,00
A. Yuca 3	85,58	85,32	80,58	5	94,80
Valor Medio de los ST A. Yuca					95,47
Desviación Estándar de los ST A. Yuca					0,99

Sólidos volátiles de la biomasa utilizada

Biomasa	Cápsula + muestra húmeda (g)	A	C	Y	SV (mg/l)
Inóculo 1	86,25	82,70	82,29	5	8,20
Inóculo 2	77,07	73,34	72,85	5	9,80
Inóculo 3	93,78	90,68	90,15	5	10,60
<i>Valor Medio de los SV inóculo</i>					9,53
<i>Desviación Estándar de los SV inóculo</i>					1,22
Estiércol 1	85,31	82,11	81,02	5	21,80
Estiércol 2	87,77	84,43	83,49	5	18,80
Estiércol 3	86,72	83,46	82,46	5	20,00
<i>Valor Medio de los SV estiércol</i>					20,20
<i>Desviación Estándar de los SV estiércol</i>					1,51
A. Yuca 1	85,75	85,58	80,98	5	92,00
A. Yuca 2	85,40	85,15	80,57	5	91,60
A. Yuca 3	85,58	85,32	80,86	5	89,20
<i>Valor Medio de los SV A. Yuca</i>					90,93
<i>Desviación Estándar de los SV A. Yuca</i>					1,51