



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

INSTITUTO DE CIENCIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES

“Producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos domésticos para uso como combustible autosustentable en un quemador residencial”

Puebla, Pue, noviembre 2025

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:
Maestro en ciencias en Energías Renovables

PRESENTA:

Ing. Christian Alexis Carmona Guerra

Matrícula:

223470228

CVU:

1296281

Directora de tesis:

Dra. Esmeralda Vidal Robles

Asesor de tesis 1:

Dr. Ricardo Dario Peña Moreno

Asesor de tesis 2:

Dra. Griselda Corro Hernández

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | iv |
| PALABRAS CLAVE..... | iv |
| ÍNDICE DE FIGURAS | v |
| ÍNDICE DE TABLAS | xv |
| ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS..... | xvi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Planteamiento del problema y pregunta de investigación | 2 |
| Justificación | 3 |
| Objetivos | 4 |
| Objetivo general | 4 |
| Objetivos particulares o específicos | 4 |
| Hipótesis | 5 |
| 1. CAPÍTULO I – ANTECEDENTES | 6 |
| 1.1. Antecedentes generales..... | 11 |
| 1.2. Antecedentes específicos | 12 |
| 1.3. Digestión anaerobia | 15 |
| 1.3.1. Relación C/N..... | 16 |
| 1.3.2. Rutas metanogénicas | 17 |
| 1.3.3. Producción de producción del metano..... | 19 |
| 2. CAPÍTULO II – METODOLOGÍA..... | 23 |
| 2.1. Adecuación del biodigestor | 26 |
| 2.2. Sistema de transporte del biogás (tuberías)..... | 30 |
| 2.3. Instrumentación del biorreactor (sensores) | 32 |
| 2.3.1. Sensor de temperatura | 32 |
| 2.3.2. Sensor de pH | 33 |
| 2.3.3. Sensor de gas metano | 34 |
| 2.3.4. Sensor de presión | 35 |
| 2.3.5. Sistema Arduino IDE..... | 36 |
| 2.3.5.1. Módulo de tarjeta micro SD..... | 38 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 2.3.5.2. | Tarjeta de memoria micro SD | 39 |
| 2.3.5.3. | Alimentación de corriente del sistema | 40 |
| 2.3.5.4. | Programa en Arduino IDE | 40 |
| 2.3.5.5. | Pinout..... | 48 |
| 2.3.6. | Sistema de agitación..... | 50 |
| 2.3.7. | Sistema de filtrado | 50 |
| 2.3.7.1. | Filtro de carbón activado..... | 50 |
| 2.3.7.2. | Filtro de cloruro de calcio (CaCl)..... | 52 |
| 2.3.8. | Almacenamiento del biogás | 53 |
| 2.4. | Costos | 55 |
| 2.5. | Ensamblaje y layout | 57 |
| 2.6. | Purificación..... | 64 |
| 2.7. | Productos esperados | 64 |
| 3. | CAPÍTULO III – EXPERIMENTACIÓN, RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 65 |
| 3.1. | Experimentación..... | 66 |
| 3.1.1. | 1° carga de estudio | 68 |
| 3.1.2. | 2° carga de estudio | 71 |
| 3.1.3. | 3° carga de estudio | 73 |
| 3.1.4. | 4° carga de estudio | 77 |
| 3.2. | Resultados | 78 |
| 3.2.1. | Técnicas de análisis cualitativo..... | 78 |
| 3.2.2. | Resultados obtenidos | 78 |
| 3.2.2.1. | Resultados obtenidos de la 1° carga de estudio | 79 |
| 3.2.2.2. | Resultados obtenidos de la 2° carga de estudio | 87 |
| 3.2.2.3. | Resultados obtenidos de la 3° carga de estudio | 97 |
| 3.2.2.4. | Resultados obtenidos de la 4° carga de estudio | 101 |
| 3.3. | Principales problemas en la experimentación | 115 |
| 3.4. | Catalizadores | 121 |
| | DISCUSIÓN | 132 |
| | CONCLUSIONES..... | 136 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 139 |
| | CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES | 143 |
| | ANEXOS | 144 |

| | |
|--|-----|
| Hojas de datos de los sensores | 145 |
| Sensor de temperatura | 145 |
| Sensor de pH | 172 |
| Sensor de gas metano | 177 |
| Sensor de presión | 184 |
| Hoja de datos de la placa Arduino UNO..... | 193 |

RESUMEN

Esta investigación aborda la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos domésticos mediante digestión anaerobia, con el objetivo de evaluar su viabilidad como combustible en quemadores residenciales y reducir la dependencia de gas LP y natural. El estudio surge ante el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero y el alto costo de combustibles fósiles, proponiendo una alternativa sostenible que aproveche los residuos orgánicos generados en hogares.

Se diseñó y construyó un biodigestor tipo Batch instrumentado con sensores para monitorear temperatura, pH, presión y concentración de metano, controlados mediante Arduino IDE. El sistema incluyó filtrado con carbón activado y cloruro de calcio, y almacenamiento en una cámara de llanta. El costo total del prototipo fue de \$6,413.79 MXN, lo que lo hace accesible para aplicaciones domésticas.

Durante la experimentación, se realizaron cargas con estiércol vacuno, cáscaras de papa y basura orgánica. Los resultados mostraron una producción creciente de metano, alcanzando concentraciones superiores a 10,000 ppm, suficientes para uso en quemadores residenciales. El pH inicial (10.7) descendió y se estabilizó en torno a 5.5, condición que favoreció la digestión anaerobia. El análisis cromatográfico confirmó la presencia de metano y CO₂ como componentes principales del biogás.

Se concluye que la propuesta es técnicamente viable, contribuye a la reducción de emisiones de GEI y permite el aprovechamiento de residuos orgánicos para generar energía y fertilizantes. Este sistema representa una alternativa económica y sustentable para hogares, con potencial para escalarse a nivel comunitario.

PALABRAS CLAVE

Biogás, energía renovable, residuos sólidos, metano, CH₄, estiércol, basura doméstica, biomasa, emisiones, GEI, biodigestor, sustrato orgánico, digestión anaerobia.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Precio promedio ponderado al público del gas LP y gas natural a nivel nacional | 13 |
| Figura 2 Distribución del proceso de digestión anaerobia entre los grupos microbianos contemplados: visión general del principio de cinco etapas de la reacción: hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis, y sulfidogénesis en proceso de digestión anaeróbica..... | 20 |
| Figura 3 Recipiente para convertir en un biodigestor tipo Batch para producir biogás para consumo doméstico | 27 |
| Figura 4 Barrenado en el recipiente con una broca de 1" tipo "sacabocados" | 28 |
| Figura 5 Barrenado en el recipiente con una broca de 3/8" HSS..... | 29 |
| Figura 6 Barrenado en la tapa del recipiente con una broca de 1/2" HSS | 29 |
| Figura 7 Conexiones de CPVC 4120 de 1/2" clase C para el sistema de transporte del biogás..... | 31 |
| Figura 8 Conexiones de CPVC 4120 de 1/2" clase C para biodigestor de producción de biogás..... | 31 |
| Figura 9 3 sensores DS18B20 con sus respectivos subcontroladores | 33 |
| Figura 10 Sensor Hilitandguom 9aed8f322 marca Hilitand con su respectivo subcontrolador | 34 |
| Figura 11 Módulo de sensor de metano MQ-4 | 35 |
| Figura 12 Sensor de presión integrado absoluto MPX5700AP | 36 |
| Figura 13 Tarjeta Arduino UNO..... | 37 |
| Figura 14 Módulo micro SD para Arduino | 38 |
| Figura 15 Tarjeta de memoria micro SD..... | 39 |
| Figura 16 Adaptador de corriente DC 5V a 1A..... | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 17 Diagrama de conexiones (Pinout) | 49 |
| Figura 18 Agitador de 2 palas y 2 capas insertado en tapa de biodigestor | 50 |
| Figura 19 Filtro de carbón activado | 51 |
| Figura 20 Enmallados plásticos en filtros | 52 |
| Figura 21 Filtro de cloruro de calcio | 53 |
| Figura 22 Cámara de llanta de 13" marca Galgo, modelo Radial F R-13 | 54 |
| Figura 23 Biorreactor con tuberías de transporte de biogás de CPVC | 57 |
| Figura 24 Biorreactor con tuberías de transporte de biogás de CPVC conectados a depósito de almacenamiento de biogás (cámara de llanta) | 58 |
| Figura 25 Vista parcial del programa principal para producción de biogás | 59 |
| Figura 26 Parametrización de sensor de pH con "Búfer pH 4" | 60 |
| Figura 27 Mediciones observadas durante la parametrización de sensor de pH con "Búfer pH 4" en el software Arduino IDE | 60 |
| Figura 28 Construcción del agitador de paletas en taller de herrería..... | 61 |
| Figura 29 Instrumentación de sensores de pH y de temperatura en biodigestor | 62 |
| Figura 30 Placa de control de la instrumentación de sensores en biodigestor | 62 |
| Figura 31 Sistema de producción y monitoreo de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos domésticos para uso como combustible en un quemador residencial..... | 63 |
| Figura 32 1° carga de estudio (referencia) 03/10/2024: 26kg de estiércol vacuno fresco (80%) + 4kg de agua (20%) | 68 |
| Figura 33 Sistema 1 con la primera carga de estudio, puesto en marcha el 03/10/2024, 17:00h en la azotea del edificio VAL 4 del Ecocampus Valsequillo - BUAP | 69 |
| Figura 34 Sistema 2 con la primera carga de estudio, puesto en marcha el 06/10/2024, 19:00h en el domicilio del tesista. | 70 |

| | |
|---|----|
| Figura 35 Cáscara de papa blanca (<i>Solanum tuberosum</i>) fresca | 71 |
| Figura 36 Sistema 1 con la segunda carga de estudio, puesto en marcha el 16/02/2025, 10:00h en el domicilio del tesista | 72 |
| Figura 37 Sistema 2 con la segunda carga de estudio, puesto en marcha el 16/02/2025, 10:00h en el domicilio del tesista | 72 |
| Figura 38 Sistema 1 con la tercera carga de estudio, puesto en marcha el 20/05/2025, 10:00h en el domicilio del tesista | 73 |
| Figura 39 Sistema 2 con la tercera carga de estudio, puesto en marcha el 20/05/2025, 10:00h en el domicilio del tesista | 74 |
| Figura 40 Sólidos orgánicos domésticos contenidos por masa en la tercera carga de estudio | 76 |
| Figura 41 Biodigestores tipo garrafón en la azotea del laboratorio de catálisis avanzada del ICUAP Variante 1 (derecha): 18kg de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) Variante 2 (izquierda): 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “ <i>Solanum tuberosum</i> ” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) | 77 |
| Figura 42 Cromatógrafo de gases de marca Shimadzu, modelo GC-14B equipado con columna de gases Porapak..... | 78 |
| Figura 43 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 1 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 18/10/2024 | 80 |
| Figura 44 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 1 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 18/10/2024..... | 80 |
| Figura 45 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 2 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 18/10/2024 - 07/11/2024 | 81 |
| Figura 46 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 2 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 18/10/2024 - 07/11/2024..... | 81 |
| Figura 47 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024 | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 48 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 2 sensores de pH en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024 | 83 |
| Figura 49 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 3 sensores de temperatura en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024..... | 84 |
| Figura 50 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el resultado del sensor de presión en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024 | 85 |
| Figura 51 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 3 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 06/10/2024 - 10/12/2024 | 86 |
| Figura 52 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 3 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 06/10/2024 - 10/12/2024..... | 86 |
| Figura 53 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 4 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 01/03/2025 | 88 |
| Figura 54 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 4 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 01/03/2025..... | 88 |
| Figura 55 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 5 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 01/03/2025 - 03/04/2025 | 89 |
| Figura 56 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 5 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 01/03/2025 - 03/04/2025..... | 89 |
| Figura 57 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 6 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 03/04/2025 - 03/05/2025 | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 58 Cromatograma presentado cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 6 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 03/04/2025 - 03/05/2025 | 90 |
| Figura 59 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo en la muestra de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025..... | 91 |
| Figura 60 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 2 sensores de pH en la muestra de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%)+ agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025.... | 92 |
| Figura 61 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 3 sensores de temperatura en la muestra de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025..... | 93 |
| Figura 62 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el resultado del sensor de presión en la muestra de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025 | 94 |
| Figura 63 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 7 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025, incorporando el sistema de filtros | 95 |
| Figura 64 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 7 de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025, incorporando el sistema de filtros | 95 |
| Figura 65 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 8 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025..... | 98 |
| Figura 66 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 8 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025 | 98 |
| Figura 67 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 9 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025, incorporando el sistema de filtros..... | 100 |

| | |
|--|-----|
| Figura 68 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 9 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025, incorporando el sistema de filtros | 100 |
| Figura 69 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, sin sensores de monitoreo | 102 |
| Figura 70 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, sin sensores de monitoreo | 102 |
| Figura 71 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, sin sensores de monitoreo | 103 |
| Figura 72 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, sin sensores de monitoreo | 103 |
| Figura 73 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, sin sensores de monitoreo | 104 |
| Figura 74 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, sin sensores de monitoreo | 104 |
| Figura 75 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, sin sensores de monitoreo | 105 |
| Figura 76 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, sin sensores de monitoreo | 105 |

| | |
|---|-----|
| Figura 77 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, sin sensores de monitoreo | 106 |
| Figura 78 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, sin sensores de monitoreo | 106 |
| Figura 79 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, sin sensores de monitoreo | 107 |
| Figura 80 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, sin sensores de monitoreo | 107 |
| Figura 81 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, con sensores de monitoreo..... | 108 |
| Figura 82 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, con sensores de monitoreo | 108 |
| Figura 83 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, con sensores de monitoreo..... | 109 |
| Figura 84 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, con sensores de monitoreo | 109 |

Figura 85 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, con sensores de monitoreo..... 110

Figura 86 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, con sensores de monitoreo 110

Figura 87 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, con sensores de monitoreo..... 111

Figura 88 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, con sensores de monitoreo 111

Figura 89 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, con sensores de monitoreo..... 112

Figura 90 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, con sensores de monitoreo 112

Figura 91 Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, con sensores de monitoreo..... 113

Figura 92 Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) +

| | |
|---|-----|
| 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, con sensores de monitoreo | 113 |
| Figura 93 Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo con los resultados del sensor de temperatura en la muestra de 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “Solanum tuberosum” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%)..... | 114 |
| Figura 94 Fugas presentadas en la tapa del biodigestor | 115 |
| Figura 95 Ubicación espacial equivocada de los dispositivos de almacenamiento del biogás..... | 117 |
| Figura 96 Transferencia de biogás de cámara de llanta a bolsa para alícuotas | 118 |
| Figura 97 Derivación en el sistema de transporte de biogás (mangueras) | 119 |
| Figura 98 Bolsa para diálisis peritoneal de la marca PiSA, modelo Pisatek Biosafe..... | 119 |
| Figura 99 Preparación de catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO ₂ | 122 |
| Figura 100 Catalizador en crisol para calcinación dentro de mufla..... | 123 |
| Figura 101 Catalizador envasado..... | 123 |
| Figura 102 Catalizador reaccionando con metano en horno tubular previo a su evaluación en cromatógrafo de gases Shimadzu GC-14B..... | 124 |
| Figura 103 Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra 1 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO ₂ | 125 |
| Figura 104 Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra 2 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO ₂ | 126 |
| Figura 105 Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra 3 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO ₂ | 127 |
| Figura 106 Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO ₂ | 128 |

| | |
|---|-----|
| Figura 107 Gráfica parcial de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 | 129 |
| Figura 108 Gráfica parcial reescalada de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 . | 130 |
| Figura 109 Gráfica parcial reescalada de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 interpolada para hallar el Light-off 50..... | 131 |
| Figura 110 Comparativo de muestras de la investigación enfocadas en la producción de metano | 132 |
| Figura 111 Porcentaje de producción de metano en la 4° carga de estudio: 80% estiércol + 20% de agua | 133 |
| Figura 112 Porcentaje de producción de metano en la 4° carga de estudio: 40% Papa + 40% Estiércol + 20% Agua | 134 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Ejemplos de conversión de compuestos seleccionados durante la digestión anaerobia..... | 18 |
| Tabla 2 Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de la materia orgánica..... | 22 |
| Tabla 3 Lista de los insumos empleados y sus costos..... | 55 |
| Tabla 4 Relaciones C/N de varios productos residuales..... | 66 |
| Tabla 5 Sólidos orgánicos domésticos contenidos por masa en la tercera carga de estudio..... | 75 |
| Tabla 6 Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra 1 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2 | 125 |
| Tabla 7 Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra 2 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2 | 126 |
| Tabla 8 Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra 3 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2 | 127 |
| Tabla 9 Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 | 128 |
| Tabla 10 Valores parciales de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 | 129 |
| Tabla 11 Valores parciales reescalados de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 | 130 |
| Tabla 12 Valores parciales reescalados de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 , con interpolación en 50% de valor de conversión..... | 131 |

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

| Abreviatura | Significado |
|-----------------|--|
| CH ₄ | Metano |
| IEA | Agencia Internacional de Energía |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| CO ₂ | Bióxido de carbono |
| °C | Grados Celsius, grados centígrados |
| CRE | Comisión Reguladora de Energía |
| Gas LP | Gas licuado de petróleo |
| Mxp | Pesos mexicanos |
| JG | Jiga Joules |
| CSTR | Continuous stirred tank reactor / Reactor de tanque con agitación continua |
| pH | Potencial de hidrógeno |
| EDAR | Estaciones depuradoras de aguas residuales |
| IDE | Entorno de desarrollo integrado |
| CPVC | Policloruro de vinilo clorado |
| PVC | Policloruro de vinilo |
| ppm | Partes por millón |
| V | Volt |
| CaCl | Cloruro de calcio |

INTRODUCCIÓN

Actualmente el 80% de la demanda global de energía se satisface utilizando combustibles fósiles, de acuerdo con los datos reportados por la agencia internacional de energía (IEA). Estudios recientes han mostrado que la demanda energética se duplicará para 2050. Al mismo tiempo las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera están creciendo a un ritmo acelerado, siendo las emisiones de CO₂ provenientes de los combustibles fósiles la principal fuente de este aumento. Si continúan las tendencias en las emisiones de carbono excederán ampliamente el límite necesario para mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C, lo que provocará consecuencias climáticas catastróficas para el planeta (Foster Scott, s.f.).

En este contexto, el biogás generado a partir de desechos urbanos, residuos ganaderos y agroindustriales jugará un papel crucial en el futuro. Como fuente de energía renovable versátil, el biogás puede reemplazar a los combustibles fósiles en la generación de energía y calor, además de servir como combustible gaseoso para vehículos. El biogás rico en metano (biometano) también puede sustituir al gas natural como materia prima en la producción de productos químicos y materiales (Weiland, 2010).

La producción de biogás ha generado un gran interés en los últimos años, siendo una de las tecnologías más accesibles y de fácil implementación especialmente en áreas rurales. El biogás no se limita únicamente a su uso como combustible, sino que también como medio para obtener biofertilizantes. Esto lo convierte en una buena opción para su aplicación en regiones con abundante materia orgánica de desecho.

El biogás se produce por la descomposición de la materia orgánica. Se estima que, en promedio, casi el 50% de los residuos sólidos generados diariamente en Puebla son materia orgánica, lo que representa una excelente oportunidad para aprovechar y transformar estos materiales en productos con valor agregado. Esta conversión no solo ayuda a resolver problemas de contaminación ambiental, también es una alternativa para obtener energía y cubrir las necesidades de combustible en los hogares en especial en zonas rurales de nuestro país.

Planteamiento del problema y pregunta de investigación

En los últimos años, en México ha aumentado la preocupación por la eliminación de residuos orgánicos; anualmente se generan cerca de 76 millones de toneladas de residuos provenientes de actividades agroindustriales. La generación de estos residuos es considerada como uno de los problemas más importantes de impacto ambiental; sin embargo, existen diferentes mecanismos para su aprovechamiento, siendo uno de ellos la tecnología de la digestión anaerobia para evitar su mala gestión, acumulación y sobre todo evitar la contaminación ambiental (Suhartini, 2020).

Una alternativa es el proceso de digestión anaerobia, el cual consiste en un proceso que conlleva la degradación de residuos orgánicos en ausencia total de oxígeno. En este proceso se genera gas combustible, debido a la eliminación o depuración orgánica causada por múltiples microorganismos encargados de la descomposición de residuos orgánicos. De este modo, el proceso resultará ser óptimo debido a que la mezcla entre biomasa y población microbiana es considerada una fuente valiosa para la producción de biogás (Flotats, Campos, Palatsi, & Bonmatí, 2001).

Se propone realizar diversas cargas de biomasa de diferentes residuos orgánicos generados en las cocinas domésticas y depositarles en un biodigestor / biorreactor tipo Batch con agitación semicontinua esperando obtener biogás (gas metano).

El análisis cuantitativo del biogás producido, así como las condiciones cualitativas del reactor, serán monitoreadas de forma constante y automatizada mediante el programa informático Arduino IDE, éste proporcionará datos como pH, temperatura en grados Celsius, gas metano producido y cuantificado en partes por millón (ppm) en el reactor y también monitoreará la presión en bares contenida en el depósito que albergará el gas metano producido en el biodigestor. Dichos parámetros serán medidos con sensores instrumentados a lo largo del sistema de producción (biodigestor), transporte y dispositivo de almacenamiento.

Se caracterizará el gas metano producido y se determinará la calidad de este, para que, en caso de ser viable, pueda ser empleado en los quemadores de uso doméstico, tales como: estufas, bóileres y calefacción. La producción de dicho gas metano se espera que sea a costo neutral o al menos más barata que la compra de gas LP o gas natural, según sea la necesidad del usuario.

Justificación

Una de las principales motivaciones para el desarrollo del presente trabajo de investigación, si bien es la reducción del consumo de gas LP o gas natural y las emisiones de gases de efecto invernadero que este provoca, es también tener hogares autosustentables que no dependan del consumo de un combustible fósil.

Ante la constante alza de los precios de los combustibles fósiles, el agotamiento de éstos, el incremento de los compuestos nocivos para la salud y gases de efecto invernadero que éstos provocan, se propone que la población de cualquier comunidad sin importar su tamaño, sean capaces de producir su propio combustible aprovechando los residuos orgánicos generados en su vida cotidiana, así como reducir su impacto ambiental y su huella de carbono, de igual manera resolver problemas como la disposición final de desechos, malos olores, fauna nociva, transmisión de enfermedades y contaminación de mantos freáticos, además, la obtención de fertilizante natural para sus jardines.

A reserva de los datos obtenidos a partir de esta investigación, se considera poder diseñar un sistema de tres etapas de biodigestores trabajando desfasados, con una construcción más robusta para que el sistema pueda ser utilizado por todo el público, tal y como se emplean hoy en día los calentadores solares que ya son parte de la vida cotidiana.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la producción de biogás a escala laboratorio a partir de residuos orgánicos domésticos utilizando un sistema de biodigestión y su implementación como combustible.

Objetivos particulares o específicos

1. Diseñar y construir un biodigestor a escala laboratorio para la producción de biogás.
2. Seleccionar y acondicionar los residuos orgánicos domésticos.
3. Analizar el comportamiento de las variables: temperatura, presión, pH y tiempo de retención durante el proceso de producción de biogás.
4. Analizar cuantitativamente el biogás producido utilizando el sistema Arduino IDE.
5. Analizar cualitativamente el biogás producido utilizando técnicas espectroscópicas como la cromatografía de gases.
6. Purificar el biogás obtenido utilizando columnas con carbón activado y cloruro de calcio (CaCl₂).
7. Utilizar del biogás producido en un quemador residencial.
8. Utilizar los desechos sólidos orgánicos como abono para jardines domésticos.
9. Contribuir con el abatimiento de la contaminación atmosférica por medio de la sustitución en parte del gas natural por biogás.
10. Obtención de resultados nuevos, aplicables en la industria y en estudios científicos posteriores.
11. Presentación de resultados en foros de divulgación científica.

Hipótesis

Si se utiliza un sistema de biodigestión anaerobia en un biorreactor tipo "Batch" de agitación semi continua (*semi CSTR, por sus siglas en inglés*), empleando residuos orgánicos domésticos, controlando y monitoreando:

- Carga orgánica
- Temperatura
- Agitación
- pH

se podrá producir biogás con un rendimiento óptimo para el consumo propio.

Si se implementa un adecuado sistema de purificación del biogás utilizando columnas de óxido de zinc (ZnO) y óxido de hierro (Fe_2O_3), se eliminará el ácido sulfhídrico (H_2S) presente y se podrá utilizar como combustible en un quemador residencial.



Capítulo 1

ANTECEDENTES



El biogás se obtiene por tres vías principales: el que se recupera directamente de los vertederos (rellenos sanitarios), proceso que se describe como la digestión anaerobia pasiva; el proveniente de las aguas residuales urbanas y de efluentes industriales tratados en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) (fase de fermentación) y, por último, el producido con propósitos energéticos en plantas de digestión anaerobia, tanto mesófilas (35 °C) como termófilas (55 °C), especialmente diseñadas para granjas, que incluyen digestores de residuos de procesamiento de la industria agroalimentaria, como cultivos intermedios y energéticos agrícolas, y de la basura doméstica (Sierra, 2017).

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un substrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores: por ejemplo, peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Utilizando el proceso de digestión anaerobia, es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.

En la digestión anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás que abandona el sistema. Sin embargo, el biogás generado suele estar contaminado con diferentes componentes, que pueden complicar el manejo y aprovechamiento de este.

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaerobia. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que

nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1.

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaerobia, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, $C/N = 30/1$. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas.

Existen diversas opciones para la utilización del biogás. Dentro de éstas destacan la producción de calor o vapor, generación de electricidad y su uso como combustible.

Los principales componentes de un digestor anaeróbico lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas.

El reactor corresponde al dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. Los reactores de digestión pueden tener forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, aunque la mayor parte de los tanques que se construyen en la actualidad son cilíndricos. El suelo del reactor está inclinado, para que la arena, el material inorgánico sedimentable y la fracción pesada del afluente puedan ser extraídos del tanque. Los digestores modernos tienen cubiertas, fijas o flotantes, cuya misión es impedir que escapen olores, conservar la temperatura, evitar la entrada de oxígeno y recoger el gas producido. Pueden estar contruidos de distintos materiales desde una piscina cubierta de polímero de alta densidad (HDPE), concreto hasta acero inoxidable.

El proceso de digestión anaerobia produce de 400 a 700 litros de gas por cada kilogramo de materia orgánica degradada, según las características del influente. El gas se compone fundamentalmente de metano y anhídrido carbónico. El contenido en metano del gas de un digestor que funcione adecuadamente variará del 65% al 70% en volumen, con

una oscilación en el anhídrido carbónico del 30% al 35%. Uno o dos por ciento del gas del digestor se compone de otros gases.

Debido a la presencia de metano (60%), el gas del digestor posee un poder calorífico aproximado de 500 a 600 kilocalorías por litro.

El biodigestor tipo Batch (discontinuo o de régimen estacionario) consiste en una batería de tanques o depósitos herméticos (digestores) con una salida de gas conectada con un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás (Mandujano, Félix, & Martínez, 1981).

El objetivo de disponer de más un digestor es tener siempre uno de ellos en carga o en descarga, mientras el resto se encuentra en producción de biogás.

La alimentación o carga del digestor con la materia prima, sólida, seca, se realiza por lotes (discontinuamente) y la carga de los residuos estabilizados se efectúa una vez que ha finalizado la producción de biogás.

Este sistema discontinuo es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materias primas que presentan problemas de manejo en un sistema semi continuo y continuo, o materiales difíciles de digerir metanogénicamente o cuando las materias primas a procesar están disponibles en forma intermitente, como es el caso de los rastrojos de cosecha (Varnero Moreno, 2011).

México tiene potencial para generar entre 7.500 y 11.200 toneladas de metano a partir de residuos sólidos, el 20% de los cuales corresponde a basura depositada en rellenos sanitarios (vertederos) y el 80% restante a estiércol porcino y bovino. Dicha cantidad de metano serviría para producir un potencial eléctrico de entre 4.400 y 6.500MW ((SENER), Estrategia nacional para la transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía, 2011) y podría aumentar bastante al considerar el potencial de generación de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. No obstante, en 2012 la capacidad instalada para la producción eléctrica a partir de biogás fue de alrededor de 45MW, a partir de la cual se producían 137GWh/año, aprovechando el biogás producido por la digestión de lodos residuales, residuos agroindustriales y residuos sólidos urbanos ((SENER), Prospectiva de Energías Renovables 2013–2027, 2012).

Actualmente, uno de los sectores más explorados para el aprovechamiento de biogás en México es la captación de gases emitidos en rellenos sanitarios. Sin embargo,

son pocos los estudios de factibilidad que se han realizado (Arvizu & Huacuz, 2003) y aún menos las plantas que se encuentran en funcionamiento debido a diversos obstáculos, entre los cuales se encuentran:

- Los limitados tiempos políticos y de gestión de los gobiernos municipales.
- La falta de leyes de protección al medioambiente en materia de emisiones de rellenos sanitarios.
- El desconocimiento de las oportunidades y de los beneficios de la generación eléctrica con el biogás de los rellenos sanitarios.
- La poca claridad en los esquemas de asociación entre los municipios y los inversionistas privados para formar sociedades de autogeneración, y la falta de incentivos para propiciar su asociación.
- La poca financiación para efectuar los estudios anteriores a la inversión.
- La información limitada sobre la cantidad y las características de los rellenos sanitarios y sitios de disposición final.
- La resistencia de empresas concesionarias que gestionan los rellenos sanitarios.
- La gran complejidad asociada a los trámites para la formalización de los proyectos.
- La incertidumbre de los inversionistas para recuperar su capital.
- La falta de un programa oficial que facilite la implantación de los proyectos.

En el año 2000, del total de 85 estaciones depuradoras anaerobias de aguas residuales, sólo 13 de ellas (cerveceras y procesadoras de alimentos) trataban agua residual industrial y aprovechaban el biogás producido durante el tratamiento. De ellas, 11 lo utilizaban en calderas, una para secadores y dos para procesos de cocimiento de alimentos. Del resto de EDAR, más del 50% venteaban el biogás al ambiente sin quemarlo, debido, entre otros motivos, al coste de la inversión para instalar sistemas de almacenamiento de gas o quemadores (Monroy, Famá, Meraz, Montoya, & Macarie, 2000).

En el año 2012 se contabilizaron en México 966 digestores que se construyeron con algún tipo de incentivo nacional o internacional, de los cuales 400 fueron apoyados por el Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), que condujo a la reducción de emisiones en 680.000 toneladas de CO₂ ((Rembio), 2012).

1.1. Antecedentes generales

Desde que el hombre aprendió a emplear el fuego, la cocción de alimentos ha llegado a ser una de las actividades fundamentales para su subsistencia. Para esto se han utilizado diferentes combustibles, entre ellos la biomasa vegetal. Desde hace muchos siglos, la producción de biogás se ha generado en países como China y la India (Werner, 1983).

Ya lo define (Sierra, 2017): el biogás es una mezcla de metano, dióxido de carbono y otros compuestos, que se genera por la degradación microbiana de materiales orgánicos de origen vegetal o animal en ausencia de aire, denominada digestión anaerobia. La digestión anaerobia es el medio más eficiente de generar energía a partir de residuos con contenido de materia seca inferior al 30 % (idealmente en el rango 5 – 12,5 %), tales como estiércoles, lodos de aguas residuales, alimentos y otros desechos orgánicos húmedos. El metano producido a través de la aplicación de la tecnología básica de la digestión anaerobia de residuos orgánicos húmedos se utiliza como insumo energético para calefacción, generación de electricidad o combustible para el transporte.

El uso del biogás se remonta a la antigüedad. Se cree que los chinos y los indios fueron los primeros en utilizar el biogás hace más de 2000 años utilizando fosas sépticas primitivas para producir biogás, el cual se empleaba para calefacción y cocina (Karki, Shrestha, & Bajgain, 2005). En la década de 1600, se documentó la observación de que la materia orgánica en descomposición produce gases inflamables. Sin embargo, el desarrollo sistemático del biogás como fuente de energía comenzó en el siglo XIX, cuando científicos europeos empezaron a estudiar los procesos de fermentación anaerobia.

El primer digester anaeróbico moderno fue construido en India en 1859. Desde entonces, el uso de biogás se expandió a otras partes del mundo. En el siglo XX, especialmente durante las guerras mundiales y las crisis energéticas, se impulsaron tecnologías de biogás debido a la necesidad de fuentes alternativas de energía.

Durante las décadas de 1970 y 1980, la crisis del petróleo llevó a un renovado interés y a la mejora de las tecnologías de biogás en Europa y América del Norte. Se desarrollaron digestores más eficientes y técnicas avanzadas para la producción de biogás, mejorando la eficiencia de la digestión anaerobia y la calidad del biogás producido.

1.2. Antecedentes específicos

La producción de biogás ha despertado un gran interés por tratarse de una tecnología de fácil implementación; sin embargo, para el proceso de digestión anaerobia es necesario considerar las características fisicoquímicas de los residuos orgánicos, ya que deben favorecer el proceso microbiológico involucrado en la fermentación anaerobia para producir metano (Rural, 2021).

Como lo menciona (Reyes Aguilera, 2016) con la constante alza de los precios de los combustibles fósiles, unido a la crisis medioambiental que se genera, se vuelve a valorar la utilidad de los desechos orgánicos y su aprovechamiento para obtener combustibles de ellos. De esta manera empieza a entenderse así lo poco sensato que resulta importar o extraer combustibles fósiles de zonas remotas para obtener una energía la cual puede conseguirse en buena medida de los materiales que desechamos habitualmente.

La producción de biogás a partir de biomasa residual tiene como propósito coadyuvar a la reducción de gases que provocan el efecto invernadero del planeta, principalmente los generados en vertederos, basureros y rellenos sanitarios, pero también es una alternativa que permite obtener energía para cubrir las necesidades de combustible en los hogares, sobre todo de las zonas rurales de nuestro país, en granjas agropecuarias y resolver problemas como la disposición final de desechos, malos olores, fauna nociva, transmisión de enfermedades y contaminación de mantos freáticos. Además de que se puede obtener biofertilizantes a partir de digestatos residuales (Reyes Aguilera, 2016).

Al mes de junio de 2025, los precios actualizados del gas LP en México (08 de julio de 2025), que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) publica, son conocidos como precios mínimos y máximos del gas LP y gas natural e incluyen tanto el precio por litro como por kilo que los distribuidores de gas LP deberán presentar a los consumidores, así como los precios de referencia del gas natural para la región V (Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Guanajuato, Guerrero, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí y Tlaxcala). Estos precios se van actualizando cada quincena y varían dependiendo del estado y el municipio.

En la figura 1 se presenta el precio promedio ponderado al público del gas LP a nivel nacional, así como los precios de referencia del gas natural para la región V, los precios se reportaron a partir de los precios vigentes al 15 de junio de 2025 reportados por los

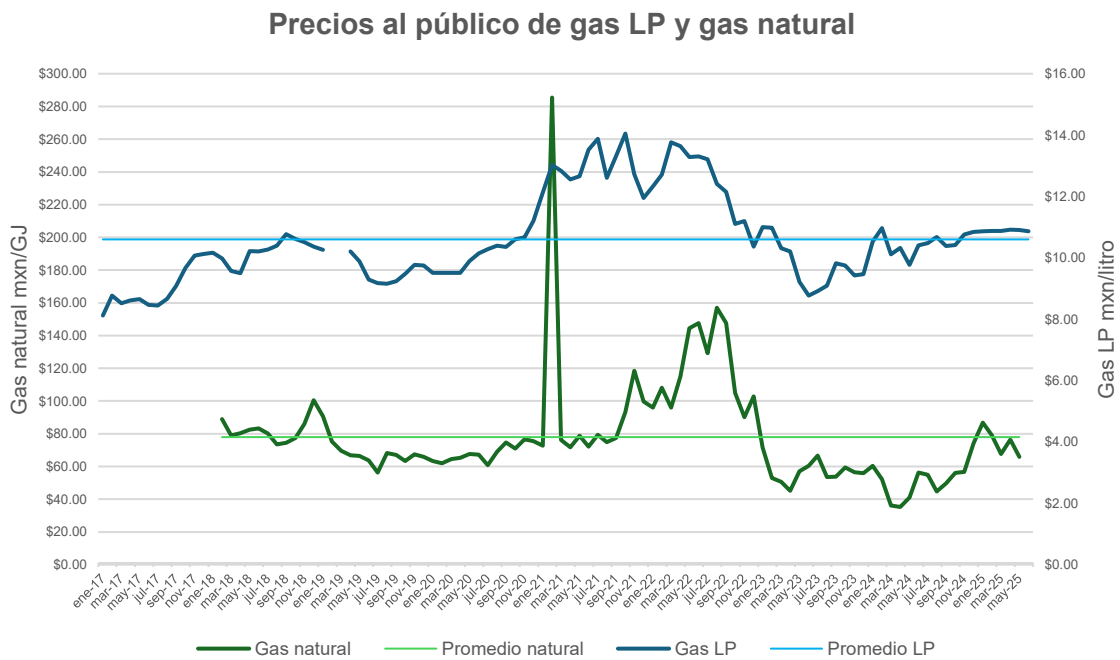
distribuidores de gas LP, proporcionados cada quince días por la CRE y que tienen que ser respetados por las compañías distribuidoras de gas LP (Energía, 2025), así como los índices de referencia de precios del gas natural.

Los precios para el gas natural son mostrados en pesos mexicanos por litro. En ella se observa que en promedio en el territorio nacional el precio litro del gas LP es de \$10.60 mxp.

Mientras que, para el gas natural, el índice de referencia para la región V refleja un promedio de \$77.94 mxp/GJ, cabe hacer mención que el gas natural se estima principalmente por su contenido energético, no por volumen.

Figura 1

Precio promedio ponderado al público del gas LP y gas natural a nivel nacional



Nota: Adaptado de Energía, C. R. (2025). Gobierno de México

<https://www.gob.mx/cre/documentos/historial-de-precios-promedio-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>

Ante esto, podemos observar que, el biogás ofrece varias ventajas significativas en términos de sostenibilidad, economía y eficiencia energética:

- El biogás se produce a partir de la descomposición anaerobia de la materia orgánica, lo que lo convierte en una fuente de energía renovable y sostenible.
- La producción de biogás ayuda a gestionar los residuos orgánicos de manera eficiente, reduciendo la cantidad de desechos que van a los vertederos.
- El biogás captura metano, un potente gas de efecto invernadero, que de otro modo se liberaría a la atmósfera desde los residuos orgánicos en descomposición.
- El digestato, un subproducto del proceso de producción de biogás puede utilizarse como un fertilizante rico en nutrientes para la agricultura.
- Las comunidades rurales y las granjas pueden generar su propia energía a partir de residuos agrícolas y ganaderos, reduciendo su dependencia de combustibles fósiles y la red eléctrica.
- El biogás puede utilizarse para generar electricidad, calor o como combustible en un quemador residencial y para vehículos, ofreciendo múltiples aplicaciones energéticas.
- La producción de biogás puede crear empleos en la construcción, operación y mantenimiento de plantas de biogás, además de ofrecer ingresos adicionales a las granjas y comunidades rurales.
- Al reducir la quema de residuos agrícolas y el uso de combustibles fósiles, el biogás contribuye a mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación atmosférica.

Estas ventajas hacen del biogás una opción atractiva para una transición hacia sistemas energéticos más sostenibles y ecológicos.

1.3. Digestión anaerobia

La producción de biogás es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en un entorno anaerobio, es decir, carente de oxígeno. Dicho proceso lo realizan microorganismos como parte del ciclo biológico de la materia orgánica, el cual involucra la fermentación o digestión de materiales orgánicos para obtener el biogás (Rivas Solano, Faith Vargas, & Guillén Watson, 2010).

La digestión anaerobia es un proceso microbiano en el que bacterias fermentativas y acetogénicas, junto con arqueas metanogénicas, convierten la materia orgánica en dióxido de carbono y metano (Ershad & Martin, 2016). Este proceso se puede dividir en cuatro fases de degradación: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Los procesos de metabolismo microbiano dependen de diversos parámetros, los cuales deben ser controlados para tener un proceso de digestión anaerobia óptimo. Entre estos parámetros destacan el pH, tiempos de residencia, demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales, sólidos volátiles, temperatura, concentración de sustrato, biomasa, tamaño de partícula del sustrato y relación sustrato/inóculo (Esposito, Frunzo, Giordano, Liotta, & Panico, 2012). Se han utilizado diversos sustratos para producir biogás, como estiércol, lodos de plantas de tratamiento de aguas, residuos orgánicos en los tiraderos de basura, residuos industriales y municipales, y residuos agrícolas (Teniza-García, Solís-Oba, Pérez-López, González-Prieto, & Valencia-Vázquez, 2015).

El principal producto de la digestión anaeróbica es el biogás, que se compone principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene impurezas como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3) (Deubleien & Steinhauser, 2008). Si el biogás contiene al menos 45 % de metano se considera combustible y por lo tanto es una fuente de energía limpia y renovable (Ershad & Martin, 2016). Además del biogás se obtiene un subproducto llamado digestato, que es una mezcla de materia orgánica parcialmente degradada, biomasa microbiana y componentes inorgánicos. Por ser un producto rico en nutrientes, el digestato se ha utilizado como fertilizante (Alburquerque, y otros, 2012) y ha demostrado incrementar la producción agrícola aplicado directamente a semillas, de manera foliar o por fertirrigación (Oh, Shinogi, Lee, & Choi, 2014).

En la mayor parte de los reportes donde se busca obtener metano por digestión anaeróbica, se usa estiércol de diferentes orígenes; sin embargo, se han reportado diversos trabajos en los que se ha evaluado la codigestión, que es la adición de otro sustrato (del 10 al 50 % en peso seco) para mejorar los rendimientos de metano en la digestión anaeróbica,

ya que coadyuva suministrando nutrientes esenciales, diluyendo el potencial tóxico de compuestos inhibidores, ajustando el contenido de humedad y pH e incrementando el contenido de microorganismos que participan en el proceso (Budyono, Nyoman, Seno, & Sunarso, 2014). Para la codigestión se han utilizado diversos residuos tanto cárnicos como domésticos o agrícolas, lodos de aguas residuales y estiércoles (Teniza-García, Solís-Oba, Pérez-López, González-Prieto, & Valencia-Vázquez, 2015).

En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico (FAO, 2011).

1.3.1. Relación C/N

Para poder garantizar un crecimiento significativo de microorganismos, es indispensable la presencia de nutrientes en el medio, los cuales en la mayoría de los casos son aportados por el sustrato. Sin embargo, es aún más importante la relación entre las masas de carbono y nitrógeno en el sustrato. Esta relación tiende a disminuir durante la digestión debido a la remoción del carbono, mejorando de esa manera la calidad de los residuos para su uso como fertilizante, debido a su contenido nitrogenado y de otros minerales (Weber, 2012).

Los microorganismos necesitan de nitrógeno para el metabolismo, sin embargo, en las proporciones adecuadas: los microorganismos asimilan amoníaco para la producción de una nueva masa de células, cuya proporción de los elementos nutrientes C: N: P: S; se considera suficiente para la metanización: 600: 15: 5: 3. En la forma de amoníaco, el nitrógeno contribuye a estabilizar el pH del sistema. Sin embargo, en altas concentraciones, puede conducir a la inhibición del proceso biológico que conduce a una inhibición de la metanogénesis (Khalid, Muhammad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011).

La proporción Carbono/Nitrógeno (C/N) ha sido reportada como óptima en el rango de 20 a 30 (Khalid, Muhammad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011), (Li, Park, & Zhu, 2011), (Barros, 2013). También se ha reportado que las mayores tasas de producción de metano se producen con una humedad de 60 a 80% (Khalid, Muhammad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011), los residuos sólidos urbanos y los lodos de aguas residuales pueden proporcionar dichos niveles. Para residuos como abono u otro utilizados en biodigestores, se recomiendan su dilución para que sea efectiva la biometanización (Barros, 2013).

Además, productos tóxicos, metales pesados, sustancias recalcitrantes, y los antibióticos pueden inhibir la digestión anaeróbica. Finalmente, es de destacar que el propio oxígeno es letal para los microorganismos anaerobios estrictos.

1.3.2. Rutas metanogénicas

El conocimiento y aprovechamiento de los procesos naturales de producción de biogás, a través del desarrollo de tecnologías prácticas, han permitido desarrollar un método probado para la conversión de materia orgánica compleja mediante digestión anaerobia con fines de obtener un gas con un alto poder calorífico ((Rembio), 2012).

El proceso anaerobio involucra una compleja serie de reacciones bioquímicas y se puede dividir en cuatro etapas que se desarrollan de manera simultánea y secuencial: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Batstone, y otros, 2002). La digestión anaerobia es una interacción compleja y especializada de una comunidad microbiana constituida por los dominios *Bacteria* y *Archaea*, unidos en una red alimenticia sintrófica y simbiótica en dos procesos muy importantes: la acidogénesis y metanogénesis (Nielsen, Mladenovska, Westerman, & Ahring, 2004).

La hidrólisis convierte la materia orgánica compleja usando enzimas extracelulares e intracelulares de los microorganismos en componentes monoméricos o diméricos, como aminoácidos, azúcares simples y ácidos grasos de cadena larga (LCFA).

Durante la acidogénesis, los productos de hidrólisis son convertidos por bacterias acidógenas en moléculas más pequeñas como ácidos grasos volátiles (VFA), alcoholes, hidrógeno y NH_3 .

Durante la acetogénesis, los alcoholes y VFA (distintos del acetato) se convierten en ácido acético o hidrógeno y CO_2 . Las bacterias acidógenas y acetogénicas son un grupo diverso de microorganismos anaerobios facultativos y obligatorios, incluyendo *Clostridium*, *Peptococcus*, *Bifidobacterium*, *Corynebacterium*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Desulfomonas*, *Pseudomonas*, *Selemonas*, *Micrococcus* y *Escherichia coli* (Kosaric y Blaszczyk, 1992).

Durante la metanogénesis, el ácido acético y el metanol (un alcohol) se convierten en CH_4 y CO_2 . Además, el CO_2 y el hidrógeno se convierten en CH_4 . Las arqueas metanogénicas incluyen un grupo diverso de anaerobios obligados como *Methanobacterium formicicum*, *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanococcus vannielli*,

Methanomicrobium mobile, *Methanogenium cariaci*, *Methanospirillum hungatei*, y *Methanosarcina barkei*.

En la tabla 1 podemos observar ejemplos de conversión de compuestos seleccionados durante la digestión anaerobia.

Tabla 1

Ejemplos de conversión de compuestos seleccionados durante la digestión anaerobia.

| Subprocesos | Ejemplos |
|--|---|
| Hidrólisis | Conversión de carbohidratos y proteínas: |
| | Celulosa + H ₂ O → Monosacáridos celulosa + H ₂ O → Monosacáridos |
| | Proteínas + H ₂ O → Aminoácidos Proteínas + H ₂ O → Aminoácidos |
| Acidogénesis | Conversión de glucosa en ácido acético y propiónico: |
| | C ₆ H ₁₂ O ₆ → 3CH ₃ COOH C ₆ H ₁₂ O ₆ → 3CH ₃ COOH (Glucólisis + fermentación) |
| | Glucosa → ... → Ácido acético |
| | C ₆ H ₁₂ O ₆ + 2H ₂ → 2CH ₃ CH ₂ COOH + 2H ₂ O C ₆ H ₁₂ O ₆ + 2H ₂ → 2CH ₃ CH ₂ COOH + 2H ₂ O (Propionogénesis) |
| Glucosa + Hidrógeno → ... → Ácido propiónico + Agua | |
| Acetogénesis | Conversión de ácido propiónico (propionato) y ácido butírico (butirato) en acetato e hidrógeno como sigue: |
| | CH ₃ CH ₂ COO ⁻ + 3H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + HCO ⁻³ + H ⁺ + 3H ₂ 3H ₂ CH ₃ CH ₂ COO ⁻ + 3H ₂ O → 3CH ₃ COO ⁻ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + 3H ₂ |
| | Ácido propiónico + Agua → Ácido acético (Acetato) + Bicarbonato + Protones + ... + Agua → Ácido acético + Bicarbonato + Protones + Hidrógeno |
| | CH ₃ CH ₂ CH ₂ COO ⁻ + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + 2H ₂ CH ₃ CH ₂ CH ₂ COO ⁻ + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + 2H ₂ |
| Butirato + Agua → Ácido acético (Acetato) + Protones + ... + Agua → Ácido acético (Acetato) + Protones + Hidrógeno | |
| 4H ₂ + 2HCO ⁻³ + H ⁺ → CH ₃ COO ⁻ + 4H ₂ O 4H ₂ + 2HCO ⁻³ + H ⁺ → CH ₃ COO ⁻ + 4H ₂ O | |
| Hidrógeno + Bicarbonato + Protones → ...Reducción... → Ácido acético (Acetato) + Agua | |

| | |
|----------------------|---|
| Metanogénesis | Conversión de ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, y metanol a metano: |
| | $4\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 4\text{CO}_2 + 4\text{CH}_4$ $4\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 4\text{CO}_2 + 4\text{CH}_4$ (Respiración anaerobia: Metanogénesis acetotrófica, 30%) Ácido acético (Acetato) → Bióxido de carbono + ... → Bióxido de carbono + Metano |
| | $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (Respiración anaerobia: Metanogénesis hidrogenotófica, 70%) Bióxido de carbono + Hidrógeno → ... → Metano + Agua |
| | $4\text{CH}_3\text{OH} + 6\text{H}_2 \rightarrow 3\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ Metanol + Hidrógeno → Metano + Agua |

Nota: Adaptado de: (El Mashad & Zhang, s.f.)

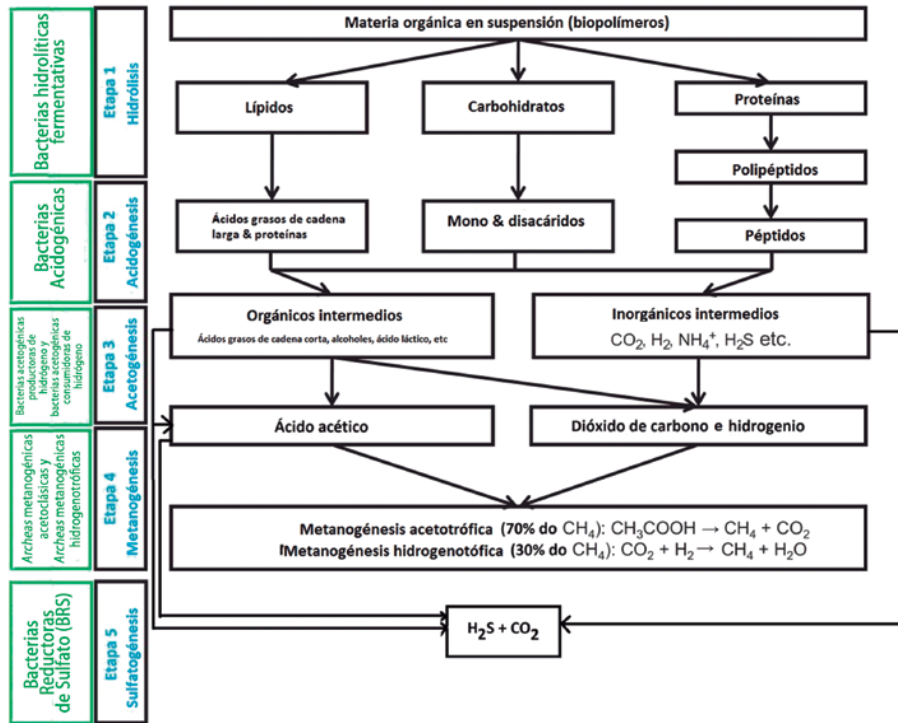
1.3.3. Producción de producción del metano

La digestión anaerobia es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea.

Por simplicidad la digestión anaeróbica se puede dividir en cuatro etapas, y si se tiene en cuenta la reducción de sulfato, puede dividirse en cinco etapas que son: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis y sulfidogénesis (reducción de sulfato), tal como se muestra en la figura 2 (Khalid, Muhammad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011) (Madsen, J., & Esbensen, 2011) (Barros, 2013).

Figura 2

Distribución del proceso de digestión anaerobia entre los grupos microbianos contemplados: visión general del principio de cinco etapas de la reacción: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis, metanogénesis, y sulfidogénesis en proceso de digestión anaeróbica



Nota: Traducido y adaptado de: (Madsen, J., & Esbensen, 2011)

En la hidrólisis ocurre el rompimiento de las sustancias orgánicas más complejas en compuestos más simples, por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Este proceso consiste en una transformación de carbohidratos, lípidos y proteínas en productos metabólicos tales como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga capaces de atravesar la membrana de las bacterias ácido génicas. Se observa en esta secuencia que el producto metabólico de los microorganismos de una determinada etapa sirve como sustrato para los microorganismos de la etapa posterior. Algunos factores son relevantes para el rendimiento en esta etapa, por ejemplo, el pH del medio, Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) el tamaño de las partículas, la temperatura y de acuerdo con autores como (Khalid, Muhammad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011), la concentración de amoníaco y los niveles de lignina (que es difícil de degradar). De acuerdo con (Raposo, De La Rubia, Fernández-Cegrí, & Borja,

2012), pueden presentarse casos donde parte de la materia orgánica sea inaccesible a los microorganismos debido a la conexión de partículas o materia orgánica estructural, así como también puede presentarse que algunos compuestos sean poco degradados o no degradados anaeróbicamente. Para que la hidrólisis sea posible debe ser obtenido un tamaño de partícula adecuado. Este tamaño no debe ser muy pequeño ya que podría haber una producción excesiva de ácidos que causan la disminución del pH del sistema. En este sentido, (Raposo, De La Rubia, Fernández-Cegrí, & Borja, 2012) sugieren un tamaño de partícula inferior a 10 mm.

En la acidogénesis, los productos metabólicos de la hidrólisis son metabolizados por las bacterias acidogénicas, cuyos productos metabólicos son los ácidos grasos volátiles, AGV (en mayor cantidad y de ahí el nombre, acidogénesis), dióxido de carbono, hidrogeno, ácido láctico, amoníaco y sulfuro de hidrogeno. De acuerdo con (Madsen, J., & Esbensen, 2011), los niveles de AGV y amoníaco fueron significativamente mayores para las plantas de digestión anaerobias que trataron con estiércol, en comparación con aquellas, que trataron con lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales. El uso de un cosustrato con residuos lipídicos y un bajo contenido de nitrógeno aumenta la producción de biogás, dependiendo de las características complementarias de ambos tipos de residuos, reduciendo de este modo los problemas relacionados con la acumulación de compuestos volátiles y concentraciones intermedias de amoníaco (Khalid, Muhammad, Anjum, Mahmood, & Dawson, 2011). El tamaño de las partículas debe ser el adecuado para que no haya una fermentación excesiva, porque el exceso de AGV en el sistema puede tener lugar en la caída del valor del pH, si la alcalinidad no es suficiente para mantener el pH del sistema.

La generación de metano puede ocurrir de dos maneras, a saber: metanogénesis acetoclástica, que es responsable de aproximadamente el 70% del metano formado y es realizada por Archaeas acetoclásticas a partir del acetato; y la ya citada metanogénesis hidrogenotrófica, realizada por Archaeas hidrogenotróficas, a partir de hidrógeno y del dióxido de carbono. A pesar de que representa aproximadamente el 30% de la producción de metano, la metanogénesis hidrogenotrófica consume hidrógeno, así como la metanogénesis acetoclástica. Este consumo permite el mantenimiento del equilibrio del pH en un valor adecuado para el sistema. Un parámetro importante que debe ser monitoreado durante el proceso de digestión anaerobia es la Actividad Metanogénica del Lodo (SMA), que estima la cantidad de metano producida por unidad de sustrato orgánico.

La cantidad de sulfuro de hidrógeno producido en la segunda etapa (acidogénesis) puede resultar peligrosa para el equilibrio general de la digestión anaerobia, ya que las bacterias reductoras de sulfato (BRS) usarán el precursor del metano (acetato) en la metanogénesis acetoclástica para la reducción del sulfato y la producción de H₂S. La relación entre la demanda química de oxígeno (COD) y sulfato (SO₄²⁻) determinará la prevalencia de la etapa de sulfidogénesis a expensas de la producción de metano, lo que sería perjudicial para el sistema (Escobar, Rúa, Silva, Venturini, & Mambeli, 2015).

En la tabla 2 se resumen las ecuaciones que representan diferentes reacciones que se producen durante la degradación anaerobia. No se reflejan las reacciones de hidrólisis.

Tabla 2

Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de la materia orgánica

| Tipo de reacción | Ecuación |
|---|---|
| Fermentación de glucosa a acetato | Glucosa + 4H ₂ O → CH ₃ COO ⁻ + 4H ⁺ + 4H ₂ |
| Fermentación de glucosa a butirato | Glucosa + 2H ₂ O → C ₄ H ₇ O ₂ + 2HCO ₃ ⁻ + 3H ⁺ + 2H ₂ |
| Fermentación del butirato a acetato e H ₂ | Butirato + 2H ₂ O → 2CH ₃ COO ⁻ + H ⁺ + H ₂ |
| Fermentación del propionato a acetato | Propionato + 3H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + H ₂ |
| Acetogénesis a partir de H ₂ y CO ₂ | HCO ₃ ⁻ + H ⁺ + 4H ₂ → CH ₃ COO ⁻ + 2H ₂ O |
| Metanogénesis a partir del CO ₂ e H ₂ | CO ₂ + 4H ₂ → CH ₄ + 2H ₂ O |
| Metanogénesis a partir del acetato | Acetato + H ₂ O → CH ₄ + HCO ₃ ⁻ + H ⁺ |

Nota: Adaptado de: (Escobar, Rúa, Silva, Venturini, & Mambeli, 2015)



Capítulo 2

METODOLOGÍA



Numerosos estudios han demostrado la viabilidad de la producción de biogás a partir de diversos tipos de residuos orgánicos. Por ejemplo, (Kusch, Oechsner, & Jungbluth, 2011) evaluaron la producción de biogás a partir de residuos agrícolas y estiércol, encontrando que la codigestión de estos materiales mejora la eficiencia del proceso.

El desarrollo de esta investigación requirió la implementación de un enfoque orientado a la construcción de un sistema experimental capaz de producir biogás a partir de residuos orgánicos domésticos, bajo condiciones controladas que permitieran evaluar su viabilidad técnica y operativa. Este capítulo describe las etapas fundamentales que guiaron el diseño del biodigestor, la selección y adquisición de materiales, así como la instrumentación necesaria para el monitoreo de variables críticas del proceso de digestión anaerobia.

La elección del diseño del biodigestor se basó en criterios de simplicidad, bajo costo y funcionalidad, considerando que el objetivo principal era demostrar la factibilidad de implementar esta tecnología en entornos domésticos. Se optó por un sistema tipo Batch, caracterizado por su operación en cargas únicas y su facilidad de construcción, lo que lo convierte en una alternativa adecuada para estudios experimentales y aplicaciones a pequeña escala. Este diseño permite mantener el sustrato en condiciones anaerobias durante todo el ciclo de digestión, reduciendo la complejidad del manejo y control del proceso.

La adquisición de materiales se realizó con base en la disponibilidad local y la resistencia requerida para soportar las condiciones del proceso. Se seleccionaron recipientes plásticos de alta densidad para la cámara de digestión, tuberías y conexiones de PVC y CPVC para el transporte del gas, así como válvulas y sellos que garantizaran la hermeticidad del sistema. Además, se incorporó un mecanismo de agitación semicontinua para favorecer la homogeneidad del sustrato y evitar la formación de costras que pudieran limitar la producción de biogás.

Un aspecto crucial en la metodología fue la instrumentación del biodigestor, orientada a garantizar el monitoreo preciso de las variables que influyen en la producción de biogás. Se instalaron sensores de temperatura, pH, presión y concentración de metano, conectados a un sistema de adquisición de datos basado en Arduino IDE, lo que permitió registrar el comportamiento del proceso. La calibración de los sensores se realizó siguiendo protocolos específicos para cada dispositivo, asegurando la confiabilidad de las mediciones.

La colocación estratégica de los sensores dentro del sistema respondió a la necesidad de obtener datos representativos del proceso. Los sensores de temperatura se ubicaron en la zona central del biodigestor para reflejar las condiciones internas del sustrato, mientras que el sensor de presión se instaló en la línea de salida del gas para monitorear la acumulación en la cámara de almacenamiento. El sensor de metano, por su parte, se integró en el conducto de salida antes del sistema de filtrado, permitiendo evaluar la calidad del biogás producido antes de su purificación.

Este capítulo también aborda los procedimientos de verificación y ajuste del sistema, incluyendo pruebas de hermeticidad en las conexiones y validación del software de control. Estas acciones fueron esenciales para garantizar la seguridad del prototipo y la confiabilidad de los datos obtenidos durante la fase experimental.

En síntesis, la metodología se fundamenta en la integración de diseño estructural, selección de materiales, instrumentación avanzada y calibración precisa, elementos que en conjunto permitieron desarrollar un sistema funcional para la producción de biogás en condiciones controladas. La metodología aplicada no solo asegura la reproducibilidad del experimento, sino que sienta las bases para futuras mejoras orientadas a la optimización del proceso y la escalabilidad del sistema hacia aplicaciones domésticas y comunitarias.

2.1. Adecuación del biodigestor

Se propuso adecuar y reutilizar un recipiente de 60 litros de geometría definida por su diseñador para convertirlo en un biodigestor tipo Batch (discontinuo o de régimen estacionario), similar al de la figura 3, pero con diferencias colorimétricas para producir biogás para consumo doméstico, dicho sistema se instrumentó para monitorear, medir y controlar parámetros que recomiendan algunos autores tales como (Varnero Moreno, 2011):

- Temperatura
- pH
- Producción de gas metano
- Presión en el depósito de almacenamiento
- Generación de vacío inicial

Figura 3

Recipiente para convertir en un biodigestor tipo Batch para producir biogás para consumo doméstico



Nota: Adaptado de <https://sl.bing.net/WVpCUlvdUi>

El recipiente fue acondicionado para utilizarse como un biodigestor, las adecuaciones realizadas fueron:

- Barrenado en el recipiente con una broca de 1" tipo "sacabocados".

Este barreno funcionó para conectar el sistema de recolección y transporte del biogás producido en el mismo, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Barrenado en el recipiente con una broca de 1" tipo "sacabocados"



- Barrenado en el recipiente con una broca de $\frac{3}{8}$ " HSS.

Este barrenó funcionó para hacer pasar el cableado de los sensores que se alojaron en el biodigestor para ser conectados al centro de control, así como se muestra en la figura 5.

Figura 5

Barrenado en el recipiente con una broca de 3/8" HSS



- Barrenado en la tapa del recipiente con una broca de 1/2" HSS.

Este barrenado se realizó en la tapa del recipiente para introducir el agitador en el recipiente, tal como se muestra en la figura 6.

Figura 6

Barrenado en la tapa del recipiente con una broca de 1/2" HSS



2.2. Sistema de transporte del biogás (tuberías)

El biogás producido en el biodigestor fue conducido por un sistema de tuberías de policloruro de vinilo clorado (CPVC), las cuales fueron adecuadas para albergar un sensor de producción de metano, tal cual se observa en las figuras 7 y 8.

Las tuberías empleadas fueron:

- 0.5m de tubería de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 1 conexión tipo "T" de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 1 conexión con rosca tipo macho de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 1 conexión con rosca tipo hembra de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 2 conexiones de 45° de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 2 conexiones reductoras de 1" a ½" de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 1m de tubería de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 2 conexiones de 90° de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 5 conexiones tipo hembra de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 3 conexiones tipo macho de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 2 conexiones adaptador tipo macho de ½" de bronce a manguera de gas 3/8".
- 2 conexiones tipo "T" de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 2 válvulas esféricas de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 1 conexión tipo tapón de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 1 cinta Teflón de 20mm.
- 2 empaques de caucho de fabricación propia de 1" ϕ interno y 4" ϕ externo.

Figura 7

Conexiones de CPVC 4120 de ½" clase C para el sistema de transporte del biogás

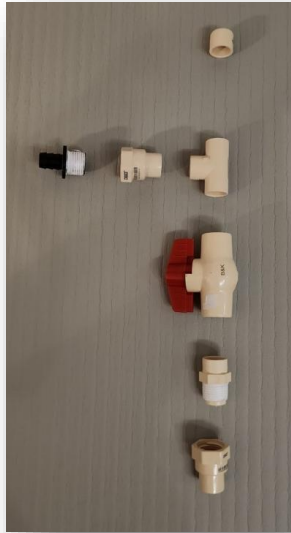


Figura 8

Conexiones de CPVC 4120 de ½" clase C para biodigestor de producción de biogás



Todas las uniones / tuberías del sistema de transporte del biogás, fueron pegadas de forma mecánica empleando pegamento amarillo para CPVC marca Tangit.

2.3. Instrumentación del biorreactor (sensores)

El control y monitoreo de la temperatura (en grados Celsius), el pH, la producción del biogás (gas metano, en partes por millón) en el biorreactor y la presión en el depósito de almacenamiento (en bares), serán monitoreados utilizando el software Arduino IDE, para ello se utilizarán diversos sensores, dichos valores serán almacenados en una memoria SD conectada a la tarjeta Arduino UNO para su posterior extracción, análisis y generación de curvas cinéticas del biorreactor.

Los sensores de temperatura y los sensores de pH serán colocados dentro del biodigestor para monitorear la mezcla depositada en él.

El sensor de gas metano se dispondrá sobre las tuberías del sistema de transporte del biogás para realizar la detección de este.

El sensor de presión se instalará en el depósito de almacenamiento del biogás.

2.3.1. Sensor de temperatura

La temperatura en grados Celsius será monitoreada mediante 3 sensores DS18B20 y un subcontrolador, referidos en la figura 9. El fabricante indica que es fácil de conectar y se puede utilizar en una variedad de entornos.

Posee un rango de medición: -55 ~ 125 °C.

Figura 9

3 sensores DS18B20 con sus respectivos subcontroladores



Nota: Adaptado de: [Gikfun DS18B20 - Sensor de temperatura digital impermeable con módulo adaptador para Arduino \(paquete de 3 juegos\) EK1183 : Amazon.com.mx: Electrónicos](#)

La hoja de datos de este sensor se puede identificar en la sección de Anexos >> Hojas de datos de los sensores >> Sensor de temperatura.

2.3.2. Sensor de pH

El pH será monitoreado mediante 2 sensores Hilitandguom 9aed8f322 marca Hilitand referidos en la figura 10.

El fabricante indica que el valor de prueba de pH de la sonda del módulo sensor es muy amplio, que el rango de medición es 0-14 pH y la temperatura de prueba es 0°-80° Celsius.

Figura 10

Sensor Hilitandguom 9aed8f322 marca Hilitand con su respectivo subcontrolador



Nota: Adaptado de [Amazon.com: Hilitand PH Module Probe Kit, PH0-14 Value Detect Sensor Module + PH Electrode Probe BNC : Industrial & Scientific](https://www.amazon.com/Hilitand-PH-Module-Probe-Kit-Value-Detect-Sensor-Module-PH-Electrode-Probe-BNC-Industrial-Scientific/dp/B078888888)

La hoja de datos de este sensor se puede identificar en la sección de Anexos >> Hojas de datos de los sensores >> Sensor de pH.

2.3.3. Sensor de gas metano

La producción de gas metano será detectada por el incremento de su presencia en el medio mediante unidades de partes por millón (ppm), a través de un módulo de sensor de metano MQ4 para Arduino referido en la figura 11.

El proveedor indica que el MQ-4 detector de gas metano es un sensor electroquímico que varía su resistencia al estar en contacto con el gas metano / gas natural y gas LP, su módulo contiene un circuito electrónico que le permite realizar la conexión con alguna tarjeta de desarrollo, y cuenta con salidas analógica y digital.

Es ideal para aplicaciones que buscan detectar o medir la concentración de gas metano (CH₄) en un rango de 200 a 10000 ppm en el ambiente, que tiene una salida analógica que permite medir el cambio progresivo en la concentración de gases y una salida digital cuyo umbral de detección puede ser ajustado. Es usado con frecuencia en equipos de detección de fugas de gas metano o gas LP en aplicaciones particulares o en la industria.

Figura 11

Módulo de sensor de metano MQ-4



Nota: Adaptado de [MQ-4 Detector de Gas Metano - UNIT Electronics](#)

La hoja de datos de este sensor se puede identificar en la sección de Anexos >> Hojas de datos de los sensores >> Sensor de gas metano.

2.3.4. Sensor de presión

La presión contenida en el depósito del almacenamiento del biogás será monitoreada y controlada mediante el sensor de presión integrado absoluto MPX5700AP referido en la figura 12.

Éste posee una capacidad de medir de 15 a 700KPa, mediante conversiones programables en el código del programa en Arduino IDE, los valores reflejados podrán ser identificados en bares.

Figura 12

Sensor de presión integrado absoluto MPX5700AP



Nota: Adaptado de [\(1PCS\) MPX5700AP IC Pressure Sensor ABS 6-SIP 5700 MPX5700: Amazon.com: Industrial & Scientific](#)

La hoja de datos de este sensor se puede identificar en la sección de Anexos >> Hojas de datos de los sensores >> Sensor de presión.

2.3.5. Sistema Arduino IDE

Los sensores serán programados con base al lenguaje de programación propio del sistema Arduino IDE en un programa fuente que considera las partes de cada uno y los integra en uno principal.

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas (luz en un sensor, un dedo en un botón o un mensaje de Twitter) y convertirlas en una salida: activar un motor, encender un LED o publicar algo en línea. Se le puede decir a una placa qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador de la placa. Para ello se utiliza el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring), y el Software Arduino (IDE), basado en Processing.

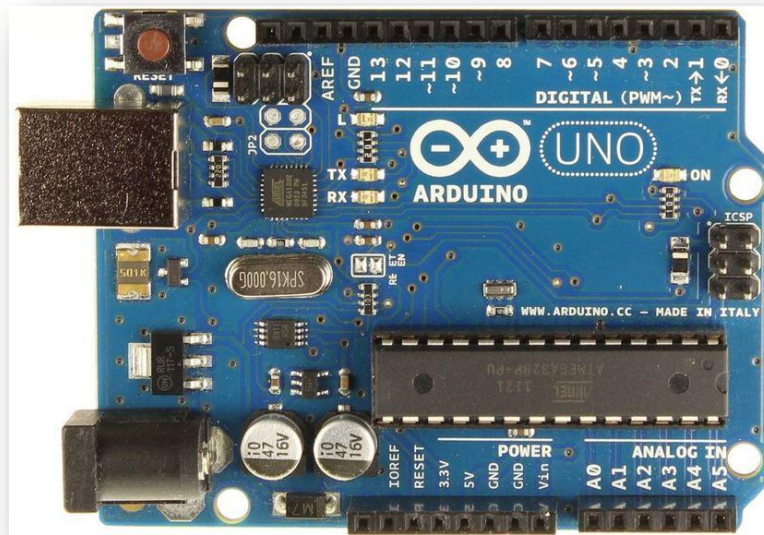
A lo largo de los años, Arduino ha sido el cerebro de miles de proyectos, desde objetos cotidianos hasta complejos instrumentos científicos. Una comunidad mundial de

creadores (estudiantes, aficionados, artistas, programadores y profesionales) se ha reunido en torno a esta plataforma de código abierto; sus contribuciones han sumado una increíble cantidad de conocimiento accesible que puede ser de gran ayuda tanto para principiantes como para expertos (Arduino, 2018).

Para la utilización del sistema Arduino IDE se empleará una tarjeta Arduino UNO referida en la figura 13.

Figura 13

Tarjeta Arduino UNO



Nota: Adaptado de [Alimentación arduino por conector no funciona - International / Español - Arduino Forum](#)

La hoja de datos de este sensor se puede identificar en la sección de Anexos >> Hojas de datos de los sensores >> Hoja de datos de la placa Arduino UNO.

2.3.5.1. Módulo de tarjeta micro SD

Los datos recopilados por los sensores se almacenaron en una tarjeta de memoria micro SD con ayuda de un módulo micro SD, mismo que se conectó a la tarjeta Arduino UNO referido en la figura 14.

Figura 14

Módulo micro SD para Arduino



Nota: Adaptado de [Módulo SD para Arduino: ¿cómo usar tarjetas de memoria en Arduino?](#)

2.3.5.2. Tarjeta de memoria micro SD

Tal como se mencionó previamente, los datos recopilados por los sensores se almacenaron en una tarjeta de memoria micro SD, referida en la figura 15, dicha tarjeta fue extraída posterior a cada fin de ciclo para el vaciado de su información y posterior procesamiento, análisis y evaluación de los datos recopilados.

Figura 15

Tarjeta de memoria micro SD



Nota: Adaptado de [micro-sd-card.jpg \(1920x1280\)](#)

2.3.5.3. Alimentación de corriente del sistema

Los sensores fueron alimentados a través de la placa Arduino UNO y ésta a su vez se energizó por medio de un adaptador de corriente DC 5V a 1A, referido en la figura 16.

Figura 16

Adaptador de corriente DC 5V a 1A



Nota: Adaptado de [Eliminador regulado de 12 Vcc, 1 A para cámaras CCTV St](#)

2.3.5.4. Programa en Arduino IDE

El programa fue creado a partir del lenguaje de programación de C/C++ para Arduino, mismo que facilita su uso y comprensión de este.

El programa se creó inicialmente para cada uno de los sensores, es decir, se creó uno para:

- 3 sensores de temperatura
- 2 sensores de pH
- 1 sensor de metano
- 1 sensor de presión

Así como se crearon las líneas de código para recabar y registrar los valores cada 10 segundos de todos los sensores y para almacenar dicha información en la tarjeta SD.

Y posteriormente se integraron todos los programas en un programa principal, el programa es:

```
//PROGRAMA PRINCIPAL
include <SD.h> //Memoria SD
#include <Wire.h> //instalar desde Tools->Manage Libraries
#include <SPI.h> // Comunicación SPI necesaria para la SD
#include "OneWire.h" //LIBRERIA POR TOM POLLARD
#include "DallasTemperature.h" //BY MILES BURTON

// Definir pin de Chip Select (CS) de la tarjeta SD
const int pinSD = 10;

// MPX5700 pressure sensor (700kPa)
int rawValue; // A/D readings
int offset = 0; // Ajuste de presión a cero
int fullScale = 9630; // Ajuste de presión máxima (span)
float pressure; // final pressure
File myFile; //Crea archivo para SD
//SENSOR DE GAS METANO
const int MQ_PIN = A0; // Pin del sensor
const float RL_VALUE = 20; // Resistencia RL del modulo en Kilo
ohms
const float R0 = 0.55555555; // Resistencia R0 del sensor
en Kilo ohms

//SENSORES DE PH
const int PUERTOph_1 = A1; //Puerto análogo A1 será para medir el
pH de zona 1
const int PUERTOph_2 = A2; //Puerto análogo A2 será para medir el
pH de zona 2
int varios_ph1[10]; // Matriz donde se guardarán valores
int varios_ph2[10]; //Matriz donde se guardarán valores
int temp_1=0; //Un entero temporal para usar en cálculos
int temp_2=0; //Un entero temporal para usar en cálculos
```

```
unsigned long int sumatoria_pH1; //Entero sin signo para guardar
la sumatoria de pH
unsigned long int sumatoria_pH2; //Entero sin signo para guardar
la sumatoria de pH

// Datos para lectura multiple
const int READ_SAMPLE_INTERVAL = 1000; // Tiempo entre muestras
const int READ_SAMPLE_TIMES = 5; // Numero muestras

// Obtener la resistencia promedio en N muestras
float readMQ(int mq_pin)
{
    float rs = 0;
    for (int i = 0;i<READ_SAMPLE_TIMES;i++) {
        rs += getMQResistance(analogRead(mq_pin));
        delay(READ_SAMPLE_INTERVAL);
    }
    return rs / READ_SAMPLE_TIMES;
}

// Obtener resistencia a partir de la lectura analogica
float getMQResistance(int raw_adc)
{
    return ((RL_VALUE / 1000.0*(1023 - raw_adc) / raw_adc));
}

// Obtener concentracion 10^(coord + scope * log (rs/r0)
float getConcentration(float rs_ro_ratio)
{
    const float a = -0.347646217;
    const float b = 3.641939991;
    float resultado = (rs_ro_ratio - b)/a;
    return exp(resultado);
}
```

```
//SENSORES DE TEMPERATURA
const int pinDatosDQ1 = 3;// Puerto digital 3 será para medir la
temperatura de zona 1
const int pinDatosDQ2 = 4;// Puerto digital 4 será para medir la
temperatura de zona 2
const int pinDatosDQ3 = 5;// Puerto digital 5 será para medir la
temperatura de zona 3
OneWire oneWireObjeto_1(pinDatosDQ1);// Configuración Onewire
OneWire oneWireObjeto_2(pinDatosDQ2);// Configuración Onewire
OneWire oneWireObjeto_3(pinDatosDQ3);// Configuración Onewire
DallasTemperature sensorDS18B20_1(&oneWireObjeto_1);//
Configuración del sensor
DallasTemperature sensorDS18B20_2(&oneWireObjeto_2);//
Configuración del sensor
DallasTemperature sensorDS18B20_3(&oneWireObjeto_3);//
Configuración del sensor

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Comunicación con PC
  sensorDS18B20_1.begin(); //Inicializando sensor
  sensorDS18B20_2.begin(); // Inicializando sensor
  sensorDS18B20_3.begin(); // Inicializando sensor

  /*Programa para SD*/
  Serial.print("Iniciando SD ...");
  if (!SD.begin(pinSD)) {
    Serial.println("No se pudo inicializar");
    return;
  }
  Serial.println("inicializacion exitosa");
}

void loop() {
```

```
myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);//abrimos el archivo

    if (!myFile) {
        Serial.println("Error al abrir el archivo en la SD");
        return;
    }

// SENSOR DE PRESIÓN MPX5700 (700kPa)
rawValue = 0;
for (int x = 0; x < 10; x++) rawValue = rawValue + analogRead(A3);
pressure = (rawValue - offset) * 7.0 / (fullScale - offset); //
pressure conversion

Serial.print(" Presión ");
Serial.print(pressure, 2); // dos lugares decimales
Serial.println(" Bar");

// SENSORES DE pH
for(int i=0; i<10;i++)
{ // Diez valores leídos y almacenados en varios pH
    varios_pH1[i]= analogRead(PUERTO_pH_1);
    delay(40);// Se requiere tiempo para leer correctamente
    varios_pH2[i]= analogRead(PUERTO_pH_2);
    delay(50);// Se requiere tiempo para leer correctamente
}
/*posteriormente, se realiza un barrido de los valores leídos
* se descartan los valores demasiado elevados y los valores
menores*/
for(int i=0; i<9; i++)
{ //i=0,1,2,3,4,5,6,7,8
    for(int j=i+1;j<10;j++)
    {
        temp_1= varios_pH1[i];
        temp_2= varios_pH2[i];
        varios_pH1[i]=varios_pH1[j]; //j=1,2,3,4,5,6,7,8,9
    }
}
```

```
    varios_pH2[i]=varios_pH2[j]; //j=1,2,3,4,5,6,7,8,9
    varios_pH1[j]=temp_1;
    varios_pH2[j]=temp_2;
  }
}

/*Se realiza el cálculo del promedio y la conversión a voltaje en
mv*/
sumatoria_pH1=0; // Promedio
sumatoria_pH2=0; // Promedio
for(int i=2; i<8; i++){
sumatoria_pH1= sumatoria_pH1 + varios_pH1[i];
sumatoria_pH2= sumatoria_pH2 + varios_pH2[i];
}
float pH_en_Voltaje1= (float)sumatoria_pH1*100*5/1024/6;
float pH_en_Voltaje2= (float)sumatoria_pH2*100*5/1024/6;

/*
Serial.print("Voltaje_1 mv =");
Serial.println(pH_en_Voltaje1);
Serial.print("Voltaje_2 mv =");
Serial.println(pH_en_Voltaje2);
*/

/*agregamos la ecuacion encontrada*/
//float PH1= -0.0538*pH_en_Voltaje1 +30;
//float PH2= -0.0552*pH_en_Voltaje2 +31.166;

float PH1= -0.12068966*pH_en_Voltaje1 + 53.07;
float PH2= -0.11666667*pH_en_Voltaje2 + 51.14;

Serial.print(", PH zona 1 = ");
Serial.println(PH1);
Serial.print(", PH zona 2 = ");
```

```
Serial.println(PH2);

/*Sensores temperatura*/
sensorDS18B20_1.requestTemperatures();//RECOGEMOS EL DATO
sensorDS18B20_2.requestTemperatures();//RECOGEMOS EL DATO
sensorDS18B20_3.requestTemperatures();//RECOGEMOS EL DATO

//Serial.print("Temperatura sensor 1: ");//TEXTO
//Serial.print(sensorDS18B20_1.getTempCByIndex(0));//VALOR ENTERO
RECOGIDO
//Serial.println("°C");//TEXTO
//Serial.print("Temperatura sensor 2: ");//TEXTO
//Serial.print(sensorDS18B20_2.getTempCByIndex(0));//VALOR ENTERO
RECOGIDO
//Serial.println("°C");//TEXTO
//Serial.print("Temperatura sensor 3: ");//TEXTO
//Serial.print(sensorDS18B20_3.getTempCByIndex(0));//VALOR ENTERO
RECOGIDO
//Serial.println("°C");//TEXTO

/*Sensor metano*/
float rs_med = readMQ(MQ_PIN); // Obtener la Rs promedio
float concentration = getConcentration(rs_med/R0); // Obtener la
concentración

// Mostrar el valor de la concentración por serial
Serial.print("Concentración CH4: ");
Serial.println(concentration);

if (myFile) {

    Serial.print("Escribiendo SD: ");

/*Sensor de presion SD*/
```

```
    myFile.print("Presion = ");
    myFile.print(pressure, 2); // dos lugares decimales
    myFile.print(" Bar");

/*Sensor de PH SD*/
    myFile.print(", PH zona 1 = ");
    myFile.print(PH1);

    myFile.print(", PH zona 2 = ");
    myFile.print(PH2);

/*Sensor de Temperatura SD*/
    myFile.print(", Temperatura sensor 1 = ");
    myFile.print(sensorDS18B20_1.getTempCByIndex(0));
    myFile.print(" °C");

    myFile.print(", Temperatura sensor 2 = ");
    myFile.print(sensorDS18B20_2.getTempCByIndex(0));
    myFile.print(" °C");

    myFile.print(", Temperatura sensor 3 = ");
    myFile.print(sensorDS18B20_3.getTempCByIndex(0));
    myFile.print(" °C");

/*Sensor de gas Metano SD*/
    myFile.print(", Concentracion CH4 = ");
    myFile.println(concentration);

    myFile.close(); //cerramos el archivo
    Serial.println("Datos guardados en SD correctamente");

    delay(10000);
}
}
```

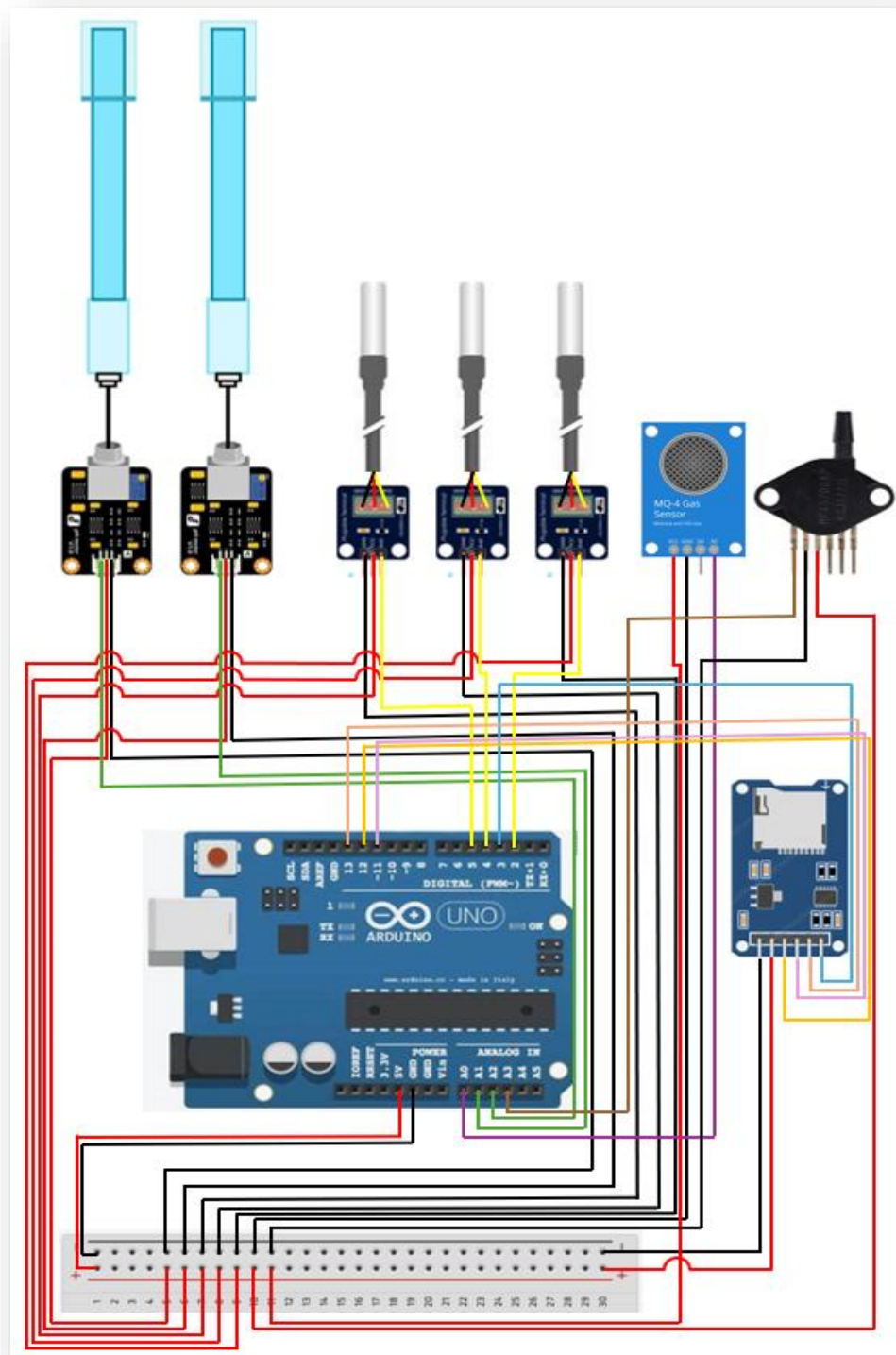
2.3.5.5. Pinout

Para monitorear y controlar el comportamiento de la temperatura, el pH, la producción de gas metano y la presión en el depósito de almacenamiento, se realizó la conexión de los sensores a la placa Arduino Uno, como representa en la figura 17, destacando que:

- La tensión eléctrica de todos los sensores se homologó a 5V, con esta finalidad todos los sensores utilizados funcionaban con 5V.
- La alimentación de todos los sensores convergió en el segmento de buses de una placa de pruebas (+, –) como se representa en la figura en la línea viva (+, color rojo, buses: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 30), en el bus 1, este se conectó en el pin de 5V de la placa Arduino Uno.
- El retorno de la alimentación de todos los sensores convergió en el segmento de buses de una placa de pruebas de (+, –) como se representa en la figura en la línea de tierra (–, color negro buses: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 30), en el bus 1, este se conectó en el pin GND de la placa Arduino Uno.
- Los datos de los 2 sensores de pH se conectaron en los pines análogos A1 y A2 respectivamente de la placa Arduino Uno (color verde).
- Los datos de los 3 sensores de temperatura se conectaron en los pines digitales 3, 4 y 5 respectivamente de la placa Arduino Uno (color amarillo).
- Los datos del sensor de metano se conectaron en el pin análogo A0 de la placa Arduino Uno (color lila).
- Los datos del sensor de presión se conectaron en el pin análogo A3 de la placa Arduino Uno (color café).
- Los datos recopilados por los sensores se almacenaron en una tarjeta de memoria micro SD con ayuda de un módulo micro SD, mismo que se conectó a la tarjeta Arduino UNO.

Figura 17

Diagrama de conexiones (Pinout)



2.3.6. Sistema de agitación

El sistema también contará con un agitador mecánico, el agitador propuesto es un agitador de 2 palas y 2 capas, tal como se representa en la figura 18, mismo que fue impulsado manualmente con ayuda de una llave Stillson.

El agitador fue de elaboración propia y personalizado para esta investigación, fue elaborado con perfil rectangular de hierro de 1" y perfil circular de ¼", posterior a su fabricación fue pintado con pintura de esmalte acrílico en aerosol de color negro.

Figura 18

Agitador de 2 palas y 2 capas insertado en tapa de biodigestor



2.3.7. Sistema de filtrado

Durante el desarrollo de esta investigación se decidió implementar un sistema de filtrado del biogás producido, principalmente para eliminar la humedad (agua) del producto, dicho sistema está compuesto por:

2.3.7.1. Filtro de carbón activado

El filtro de carbón activado fue construido a partir de:

- 0.2m de tubería de CPVC 4120 de 1" clase C.
- 0.2m de tubería de CPVC 4120 de ½" clase C.

- 1 conexión tipo “Tuerca unión” de CPVC 4120 de 1” clase C.
- 2 conexiones tipo “Reducción” de 1” a ½” de CPVC 4120 clase C.
- 1 conexión tipo “Cople” de CPVC 4120 de 1” clase C.
- 1 conexión con rosca tipo macho de CPVC 4120 de ½” clase C.
- 1 conexión con rosca tipo hembra de CPVC 4120 de ½” clase C.

tal como se representa en la figura 19.

Figura 19

Filtro de carbón activado



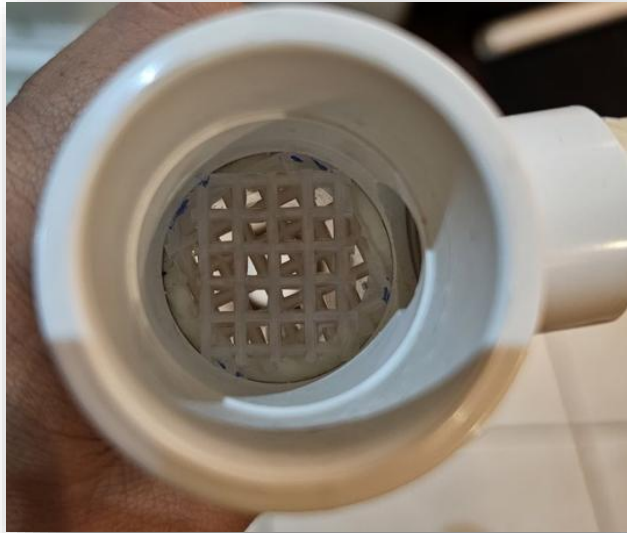
Las uniones / tuberías del filtro de carbón activado, fueron pegadas de forma mecánica empleando pegamento amarillo para CPVC marca Tangit.

En la de tubería de CPVC 4120 de 1” clase C, se colocaron pellets de carbón activado para filtración de pecera de la marca Aqapura.

En el interior del filtro se colocaron enmallados de plástico para evitar el deslizamiento de los pellets de carbón activado, tal como se representa en la figura 20.

Figura 20

Enmallados plásticos en filtros



2.3.7.2. Filtro de cloruro de calcio (CaCl)

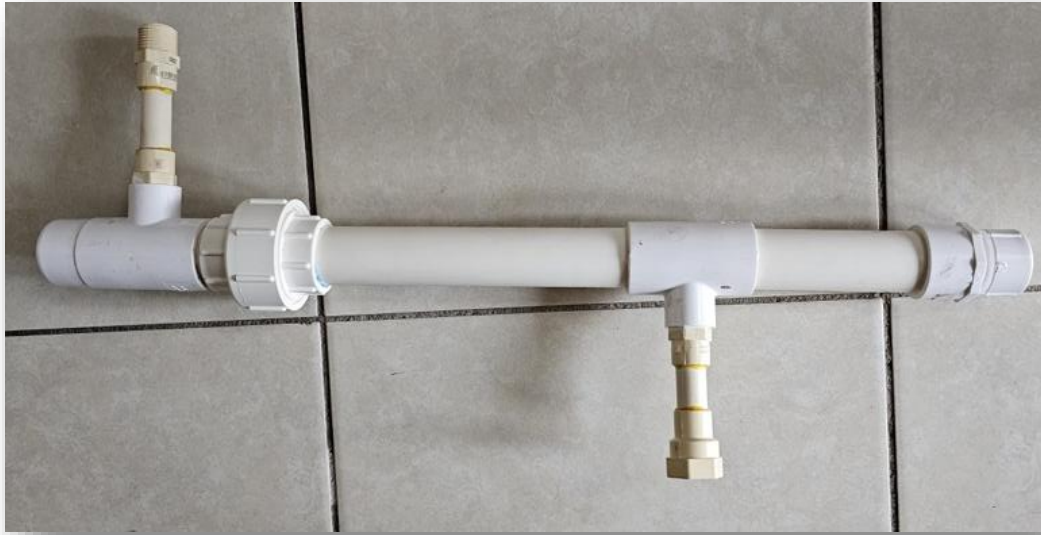
El filtro de cloruro de calcio (CaCl) fue construido a partir de:

- 0.5m de tubería de PVC RD-21 de 1" cédula 40.
- 0.15m de tubería de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 2 conexiones tipo "T" con salida de 1" y ½" de PVC RD-21 de 1" cédula 40.
- 1 conexión tipo "Tuerca unión" de PVC RD-21 de 1" cédula 40.
- 2 conexiones con rosca tipo "macho" de PVC RD-21 de 1" cédula 40.
- 2 tapones con rosca tipo "hembra" de PVC RD-21 de 1" cédula 40.
- 2 conexiones con rosca tipo "macho" de CPVC 4120 de ½" clase C.
- 2 conexiones con rosca tipo "hembra" de CPVC 4120 de ½" clase C.

tal como se representa en la figura 21.

Figura 21

Filtro de cloruro de calcio



Las uniones / tuberías del filtro de cloruro de calcio fueron pegadas de forma mecánica empleando pegamento azul para PVC marca Tangit.

Las uniones / tuberías del filtro de cloruro de calcio fueron pegadas de forma mecánica empleando pegamento amarillo para CPVC marca Tangit.

En la de tubería de PVC RD-21 de 1" cédula 40, se colocaron pellets de cloruro de calcio para control de humedad de la marca Aqapura.

También en el interior de este filtro se colocaron enmallados de plástico para evitar el deslizamiento de los pellets de cloruro de calcio, tal como se representa en la figura 20

2.3.8. Almacenamiento del biogás

El gas producido será almacenado en un depósito de gases no convencional: una cámara de llanta de 13" de diámetro de marca Galgo, modelo Radial F R-13, referida en la figura 22, para el fácil traslado y manipulación de este.

A la cámara de llanta se le adecuará un segundo pivote de inflado, uno de ellos estará conectado a la línea del sistema de transporte de biogás (tuberías) por medio de 1.5m de manguera de $\frac{3}{8}$ " de PVC reforzada con poliéster y el otro pivote de inflado será dispuesto para el sensor de presión.

Figura 22

Cámara de llanta de 13" marca Galgo, modelo Radial F R-13



Nota: Adaptado de [Cámara 12-16.5 Rin 16.5 Kabat Válvula Corta Tr-15 Europea | Meses sin interés](#)

2.4. Costos

Los costos del material empleado, las cantidades del material y los proveedores empleados para el desarrollo de esta investigación se reportan a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3

Lista de los insumos empleados y sus costos

| Material | Proveedor | Costo por unidad | Cantidad empleada | Costo total |
|---|--------------------|------------------|-------------------|-------------|
| Recipiente plástico 60l | Limpieza Dogo | \$250.00 | 1 | \$250.00 |
| Agitador paletas | Elaboración propia | \$200.00 | 1 | \$200.00 |
| Esmalte acrílico en aerosol de color negro. | Home Depot | \$56.00 | 1 | \$56.00 |
| Sensor de temperatura DS18B20 | Amazon | \$354.00 | 3 | \$1,062.00 |
| Sensor de pH Hilitand | Amazon | \$477.00 | 2 | \$954.00 |
| Sensor de Metano MQ4 | Amazon | \$108.00 | 1 | \$108.00 |
| Sensor de presión MPX5700AP | Amazon | \$430.00 | 1 | \$430.00 |
| Placa de desarrollo Arduino UNO | Steren | \$799.00 | 1 | \$799.00 |
| Mini Protoboard de 1 bloque y 2 tiras | Steren | \$69.00 | 1 | \$69.00 |
| Juego de 80 cables de 150mm tipo Dupont | Steren | \$59.00 | 1 | \$59.00 |
| Caja porta proyectos | Steren | \$79.00 | 1 | \$79.00 |
| Modulo tarjeta micro SD | Amazon | \$50.00 | 1 | \$50.00 |
| Tarjeta de memoria micro SD 16Gb | Amazon | \$300.00 | 1 | \$300.00 |
| Adaptador de corriente DC 5V | Steren | \$200.00 | 1 | \$200.00 |
| Cámara de llanta 13" | Llantas y cámaras | \$90.00 | 1 | \$90.00 |
| Pivote de cámara de llanta | Llantas y cámaras | \$15.00 | 1 | \$15.00 |
| Mano de obra pivote extra | Talachería | \$60.00 | 1 | \$60.00 |
| Tubería de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$46.00 | 1 | \$46.00 |
| Conexión con rosca tipo macho de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$10.00 | 1 | \$10.00 |
| Conexión con rosca tipo hembra de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$11.50 | 1 | \$11.50 |
| Conexión de 45° de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$11.50 | 1 | \$11.50 |
| Conexión tipo "T" de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$18.00 | 1 | \$18.00 |
| Conexión reductora de 1" a ½" de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$7.80 | 4 | \$31.20 |
| Tubería de CPVC 4120 de ½" clase C | Home Depot | \$17.00 | 1 | \$17.00 |
| Válvula esférica de CPVC 4120 de ½" clase C | Home Depot | \$61.00 | 2 | \$122.00 |
| Conexión tipo hembra de CPVC 4120 de ½" clase C | Home Depot | \$4.90 | 6 | \$29.40 |
| Conexión tipo macho de CPVC 4120 de ½" clase C | Home Depot | \$2.58 | 5 | \$12.90 |

| Material | Proveedor | Costo por unidad | Cantidad empleada | Costo total |
|--|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| Conexión tipo "T" de CPVC 4120 de ½" clase C | Home Depot | \$2.55 | 1 | \$2.55 |
| Conexión adaptador tipo macho - macho de ½" de bronce | Home Depot | \$75.00 | 2 | \$150.00 |
| Conexión adaptador tipo macho de ½" de bronce a manguera de gas 3/8" | Home Depot | \$23.00 | 2 | \$46.00 |
| Conexión tipo "Tuerca unión" de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$37.00 | 1 | \$37.00 |
| Conexión tipo "Cople" de CPVC 4120 de 1" clase C | Home Depot | \$6.50 | 1 | \$6.50 |
| Tubería de PVC RD-21 de 1" cédula 40 | Home Depot | \$59.50 | 1 | \$59.50 |
| Conexión tipo "T" con salida de 1" y ½" de PVC RD-21 de 1" cédula 40 | Home Depot | \$28.00 | 2 | \$56.00 |
| Conexión tipo "Tuerca unión" de PVC RD-21 de 1" cédula 40 | Home Depot | \$65.00 | 1 | \$65.00 |
| Conexión con rosca tipo "macho" de PVC RD-21 de 1" cédula 40 | Home Depot | \$9.41 | 2 | \$18.82 |
| Tapón con rosca tipo "hembra" de PVC RD-21 de 1" cédula 40 | Home Depot | \$9.66 | 2 | \$19.32 |
| Par de abrazaderas de gas 3/8" | Home Depot | \$18.00 | 2 | \$36.00 |
| Manguera de gas 3/8" | Home Depot | \$26.00 | 2 | \$52.00 |
| Cinta Teflón de 20mm | Home Depot | \$7.60 | 1 | \$7.60 |
| Empaques de caucho de 1" f interno y 4" f externo | Elaboración propia | \$10.00 | 2 | \$20.00 |
| Pellets deshumidificadores 300g | Chedraui | \$55.00 | 1 | \$55.00 |
| Pellets de carbón activado 5mm 1000g | Mercado Libre | \$147.00 | 1 | \$147.00 |
| Sellador transparente cartucho Ceys® Total Tech | Home Depot | \$229.00 | 2 | \$458.00 |
| Pegamento epóxico doble elemento Resistol® Repara Fuerte | Home Depot | \$87.00 | 1 | \$87.00 |
| | | | Total | \$6,413.79 |

Cabe hacer mención que los costos reportados fueron los vigentes al momento de la compra.

2.5. Ensamblaje y layout

La conformación del sistema consistió en la adaptación del recipiente a un biorreactor, realizando los maquinados previamente descritos, así como el montaje de las tuberías de CPVC en el biorreactor, tal como se refiere en la figura 23.

Figura 23

Biorreactor con tuberías de transporte de biogás de CPVC



Posterior a ello se realizó la construcción del sistema de transporte del biogás, mismo que lo dirigirá al depósito de almacenamiento. Así mismo, se adaptó la cámara de llanta para poder ser alimentada y monitoreada al mismo tiempo, estos fueron conectados al sistema de transporte tal como se refiere en la figura 24.

Figura 24

Biorreactor con tuberías de transporte de biogás de CPVC conectados a depósito de almacenamiento de biogás (cámara de llanta)



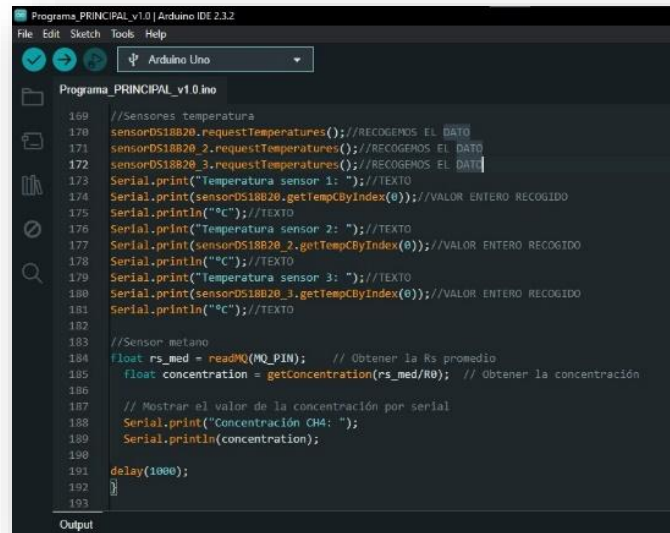
Como se argumenta en el sustento de este proyecto, en el software Arduino IDE se desarrolló un programa para monitorear digitalmente los parámetros que recomiendan diversos autores, tales como:

- Temperatura
- pH
- Producción de gas metano
- Presión en el depósito de almacenamiento

una vista parcial del programa la podemos apreciar tal como se refiere en la figura 25.

Figura 25

Vista parcial del programa principal para producción de biogás



```
Programa_PRINCIPAL_v1.0 | Arduino IDE 2.3.2
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
Programa_PRINCIPAL_v1.0.ino
169 //Sensores temperatura
170 sensorDS18B20.requestTemperatures();//RECOGEMOS EL DATO
171 sensorDS18B20_2.requestTemperatures();//RECOGEMOS EL DATO
172 sensorDS18B20_3.requestTemperatures();//RECOGEMOS EL DATO
173 Serial.print("Temperatura sensor 1: ");//TEXTO
174 Serial.print(sensorDS18B20.getTempCByIndex(0));//VALOR ENTERO RECOGIDO
175 Serial.println("°C");//TEXTO
176 Serial.print("Temperatura sensor 2: ");//TEXTO
177 Serial.print(sensorDS18B20_2.getTempCByIndex(0));//VALOR ENTERO RECOGIDO
178 Serial.println("°C");//TEXTO
179 Serial.print("Temperatura sensor 3: ");//TEXTO
180 Serial.print(sensorDS18B20_3.getTempCByIndex(0));//VALOR ENTERO RECOGIDO
181 Serial.println("°C");//TEXTO
182
183 //Sensor metano
184 float rs_med = readMQ(MQ_PIN); // Obtener la Rs promedio
185 float concentration = getConcentration(rs_med/R0); // Obtener la concentración
186
187 // Mostrar el valor de la concentración por serial
188 Serial.print("Concentración CH4: ");
189 Serial.println(concentration);
190
191 delay(1000);
192
193
Output
```

El programa se creó en el software Arduino IDE, cabe destacar que fue considerado inicialmente como programas independientes para realizar los ajustes, validaciones de funcionamiento y calibraciones a cero, tal como se refiere en las figuras 26 y 27, posteriormente, los programas se unificaron y se ajustaron todos los parámetros para funcionar como un programa único y principal

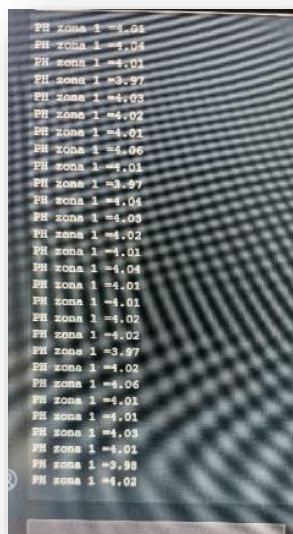
Figura 26

Parametrización de sensor de pH con “Búfer pH 4”



Figura 27

Mediciones observadas durante la parametrización de sensor de pH con “Búfer pH 4” en el software Arduino IDE



Los datos recopilados fueron almacenados en una memoria micro SD, misma que estuvo conectada directamente a la placa de Arduino vía USB 2.0 para el posterior procesamiento y análisis de datos.

Así mismo, se construyó un agitador de paletas, este fue realizado con pedacería y restos industriales de un taller de herrería industrial, tal como se refiere en la figura 28.

Figura 28

Construcción del agitador de paletas en taller de herrería



Posteriormente se procedió a realizar la instrumentación del biodigestor con los sensores tal como se refiere en la figura 29 y programa terminado, así como el ordenamiento de la electrónica en una placa de control, tal como se refiere en la figura 30.

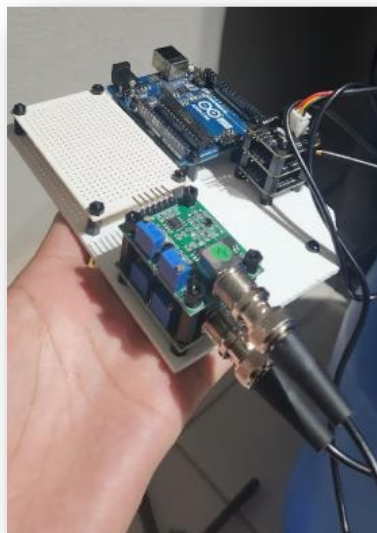
Figura 29

Instrumentación de sensores de pH y de temperatura en biodigestor



Figura 30

Placa de control de la instrumentación de sensores en biodigestor



Una vez instrumentado el biodigestor, se barrenó para extraer los cables de los sensores y poder conectarlos en la caja de control de la placa Arduino.

El biodigestor se cerró y selló con su tapa, misma a la que previamente se le introdujo el agitador de paletas con una junta/sello de goma. La tapa fue sellada

herméticamente con sellador transparente cartucho Ceys Total Tech® para evitar fugas, las fugas serán mencionadas en esta investigación más adelante en el apartado de experimentación.

Las tuberías de transporte de biogás de CPVC fueron acopladas al biorreactor, las cuales también alojaron el sensor de gas metano y 2 válvulas esféricas para control del flujo del gas metano y purga de aire para buscar la inocuidad del sistema.

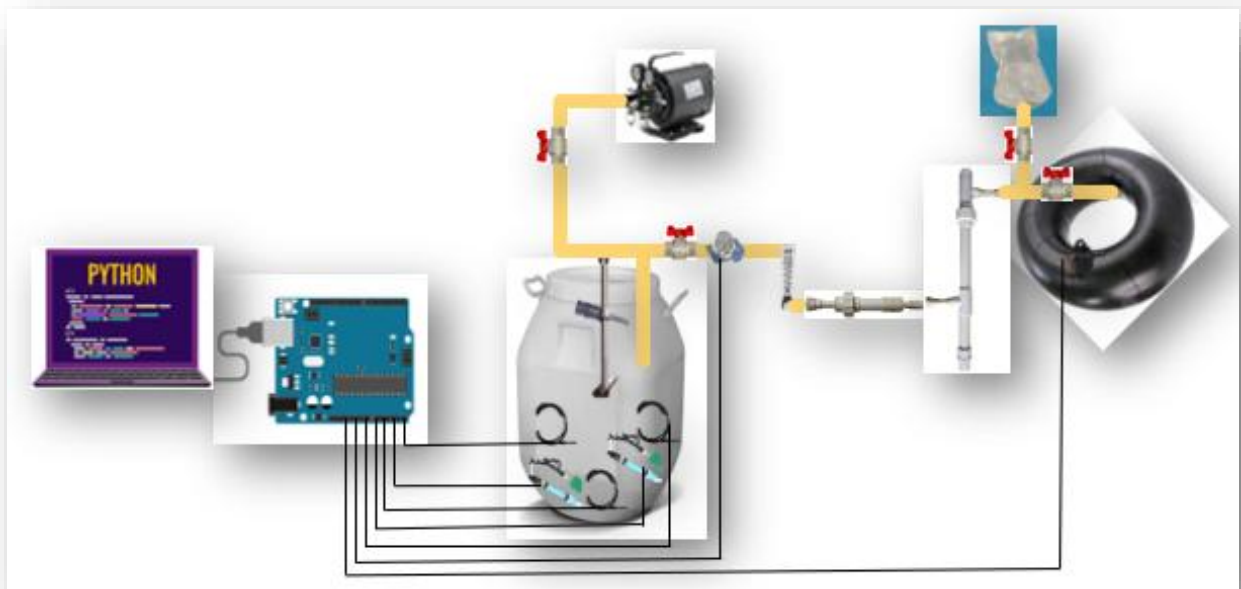
Al sistema de transporte de biogás de CPVC posteriormente le fueron añadidos los filtros de carbón activado y de cloruro de calcio.

Como se mencionó previamente el biogás se almacenó en una cámara de llanta misma que fue instrumentada con el sensor de presión y de forma paralela en una bolsa de diálisis, esta será descrita más adelante en el apartado de experimentación.

El esquema del sistema completo se refiere en la figura 31.

Figura 31

Sistema de producción y monitoreo de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos domésticos para uso como combustible en un quemador residencial



2.6. Purificación

Posterior a la producción del gas y estudio de los resultados obtenidos mediante la espectroscopía y cromatografía de gases se espera poder seleccionar un purificador del biogás obtenido utilizando columnas y/o filtros con óxidos metálicos como óxido de zinc (ZnO) y óxido de hierro (Fe₂O₃).

2.7. Productos esperados

Una vez que el biogás haya sido purificado, éste se propone utilizarse como biocombustible en un quemador residencial.

Los residuos orgánicos del biodigestor: digestato, se propone que sean utilizados como abono para jardines domésticos.



Capítulo 3
**EXPERIMENTACIÓN,
RESULTADOS Y
DISCUSIÓN**



3.1. Experimentación

La experimentación de esta investigación parte desde la definición de parámetros para cargas de estudio pues los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y también contienen nitrógeno (N), entonces se establece la relación entre ellos (C/N), la cual influye sobre la producción de gas (Alcayaga, Glaría, & Guerrero, 1999).

La tabla 4, muestra las relaciones C/N para algunos productos residuales:

Tabla 4

Relaciones C/N de varios productos residuales

| Sustancia | Relación C/N |
|--------------------------|--------------|
| Orina | 0.8 |
| Estiércol equino | 25 |
| Estiércol vacuno | 18 |
| Alfalfa | 16 – 20 |
| Algas marinas | 19 |
| Aserrín | 511 |
| Basura orgánica | 25 |
| Cáscaras de papa | 25 |
| Paja seca de trigo | 87 |
| Paja seca de arroz | 67 |
| Tallo del maíz | 53 |
| Hojas secas | 41 |
| Estiércol de aves | 32 |
| Pasto | 27 |
| Estiércol ovino | 29 |
| Estiércol de cerdos | 13 |
| Excretas frescas humanas | 2.9 |

Nota: Adaptado de (Guevara V., 1996)

Motivo por el cual se decidió elegir cargas de estudio:

- *Estiércol vacuno (por ser el objeto de estudio con mayor cantidad de resultados reportados)*
- *Cáscaras de papa (por tener una relación C/N: 25/1).*
- *Basura orgánica (por ser el objeto de estudio principal de esta investigación).*

El estiércol vacuno fue elegido objeto de estudio de referencia.

Ya que, como menciona (Varnero Moreno, 2011) se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material "fresco o crudo" que se utilice para iniciar la digestión anaerobia, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, $C/N = 30/1$ para poder producir biogás.

Se definieron al menos 60 días para monitoreo y control por cada carga estudiada.

Previo a la 1° carga de estudio se reformuló el experimento y se optó por construir un 2° sistema de producción y monitoreo de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos domésticos para uso como combustible en un quemador residencial, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos entre los dos.

En primera instancia la única diferencia entre ellos sería la forma de almacenar los datos, pues uno los mostraría en tiempo real en una laptop destinada exclusivamente para el sistema, mientras que el otro sistema almacenaría los datos en su memoria micro SD.

Posteriormente, se definió que además de dicha diversidad, también la ubicación geográfica de los sistemas sería diferente, esto con la finalidad de observar la variación de producción de biogás con respecto a su ubicación.

3.1.1. 1° carga de estudio

La primera carga de estudio (referencia) fue realizada el 03/10/2024, la cual contenía 26kg de estiércol vacuno fresco (80%) + 4kg de agua (20%), sumando 30kg de masa total, esto para cada uno de los 2 sistemas, tal como se refiere en la figura 32.

Figura 32

1° carga de estudio (referencia) 03/10/2024: 26kg de estiércol vacuno fresco (80%) + 4kg de agua (20%)



El sistema 1 con la primera carga de estudio fue puesto en marcha el 03/10/2024 a las 17:00h en la azotea del edificio VAL 4 del Ecocampus Valsequillo de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ubicado en Calle Heberto Rodríguez 119, Colonia San Antonio Toluquilla, C.P. 72960, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, tal como se refiere en la figura 33, el registro de los datos de este sistema fue almacenado en una memoria micro SD.

Figura 33

Sistema 1 con la primera carga de estudio, puesto en marcha el 03/10/2024, 17:00h en la azotea del edificio VAL 4 del Ecocampus Valsequillo - BUAP



El sistema 2 con la primera carga de estudio fue puesto en marcha el 06/10/2024 a las 19:00h en el domicilio del tesista ubicado C.P. 72310, Puebla, Puebla, tal como se refiere en la figura 34, el registro de los datos de este sistema debía de ser almacenado en la memoria interna de la computadora, sin embargo, no se contó con dichos registros como se comentará en el apartado de principales problemas en la experimentación.

Figura 34

Sistema 2 con la primera carga de estudio, puesto en marcha el 06/10/2024, 19:00h en el domicilio del tesista.



3.1.2. 2° carga de estudio

La segunda carga de estudio fue realizada el 16/02/2025 a las 10:00h, la cual contenía 18kg de cáscara de papa blanca de la variante “*Solanum tuberosum*” fresca (90%) tal como se refiere en la figura 35 + 2kg de agua (10%), sumando 20kg de masa total, esto para cada uno de los 2 sistemas, tal como se refiere en las figuras 36 y 37.

Figura 35

Cáscara de papa blanca (*Solanum tuberosum*) fresca



Derivado a que en las instalaciones del Ecocampus Valsequillo no se garantizó la continuidad de energía eléctrica durante las noches, tal como se comentará en el apartado de principales problemas en la experimentación, ambos biodigestores se localizaron en la azotea del tesista ubicado C.P. 72310, Puebla, Puebla.

Figura 36

Sistema 1 con la segunda carga de estudio, puesto en marcha el 16/02/2025, 10:00h en el domicilio del tesista



Figura 37

Sistema 2 con la segunda carga de estudio, puesto en marcha el 16/02/2025, 10:00h en el domicilio del tesista



3.1.3. 3° carga de estudio

La tercera carga de estudio fue realizada el 20/05/2025 a las 10:00h, la cual contenía 20kg de basura orgánica (90%) + 2.22kg de agua (10%), sumando 22.22kg de masa total, esto para cada uno de los 2 sistemas, tal como se refiere en las figuras 38 y 39.

Figura 38

Sistema 1 con la tercera carga de estudio, puesto en marcha el 20/05/2025, 10:00h en el domicilio del tesista



Figura 39

Sistema 2 con la tercera carga de estudio, puesto en marcha el 20/05/2025, 10:00h en el domicilio del tesista



Los 20kg de basura orgánica estaban constituidos por sólidos orgánicos domésticos enunciados en la tabla 5 y presentados en mezcla tal como se refiere en la figura 40.

Tabla 5

Sólidos orgánicos domésticos contenidos por masa en la tercera carga de estudio

| Residuo alimenticio | Masa (kg) |
|----------------------------|------------------|
| Col morada | 1.45 |
| Mango | 2.31 |
| Cáscara de elote | 0.91 |
| Mamey | 1.45 |
| Naranja | 1.45 |
| Piña | 3.89 |
| Lechuga | 1.09 |
| Zanahoria | 1.06 |
| Melón | 1.39 |
| Elote | 0.6 |
| Pimientos | 0.6 |
| Jitomate | 1.09 |
| Calabaza | 0.69 |
| Durazno | 0.6 |
| Cáscaras varias | 1.42 |
| Totales | 20 |

Figura 40

Sólidos orgánicos domésticos contenidos por masa en la tercera carga de estudio



3.1.4. 4° carga de estudio

Adicional a las cargas previamente mencionadas, se decidió realizar una cuarta carga de estudio, con 2 variantes el 29/09/2025 a las 17:00h, las cuales contenían:

- Variante 1: 18kg de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%), sumando 20kg de masa total, sin sensores de monitoreo.
- Variante 2: 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "*Solanum tuberosum*" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%), sumando 20kg de masa total, con sensores de monitoreo.

Cabe mencionar que esta carga sólo se monitoreó con los sensores de detección de metano y un sensor de temperatura, así como tampoco se utilizó el biorreactor previamente acondicionado, en su lugar, se utilizó un garrafón de agua de 19l, esto por convenir a la eliminación y prevención de fugas. Los biorreactores tipo garrafón se ubicaron en la azotea del laboratorio de catálisis avanzada del Instituto de Ciencias BUAP, tal como se refiere en la figura 41.

Figura 41

Biodigestores tipo garrafón en la azotea del laboratorio de catálisis avanzada del ICUAP

Variante 1 (derecha): 18kg de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%)

Variante 2 (izquierda): 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "*Solanum tuberosum*" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%)



3.2. Resultados

3.2.1. Técnicas de análisis cualitativo

El gas obtenido fue analizado cualitativamente utilizando técnicas de cromatografía de gases, el equipo empleado fue un cromatógrafo de gases de marca Shimadzu, modelo GC-14B equipado con una columna de gases Porapak tal como se refiere en la figura 42.

Figura 42

Cromatógrafo de gases de marca Shimadzu, modelo GC-14B equipado con columna de gases Porapak



3.2.2. Resultados obtenidos

Los resultados de las diferentes cargas y lotes se presentan a continuación:

3.2.2.1. Resultados obtenidos de la 1° carga de estudio

El sistema 1 con la primera carga de estudio (referencia) fue cargado del 03/10/2024 – 31/10/2024, la cual contenía 26kg de estiércol vacuno fresco (80%) + 4kg de agua (20%), sumando 30kg de masa total, esto para cada uno de los 2 sistemas.

El sistema 1 se monitoreó en 2 periodos:

- Periodo 1 (Muestra 1): 03/10/2024 – 18/10/2024.
- Periodo 2 (Muestra 2): 18/10/2024 – 07/11/2024.

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 1 se obtuvo lo referido en la figura 43 y su cromatograma la figura 44.

Figura 43

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 1 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 18/10/2024

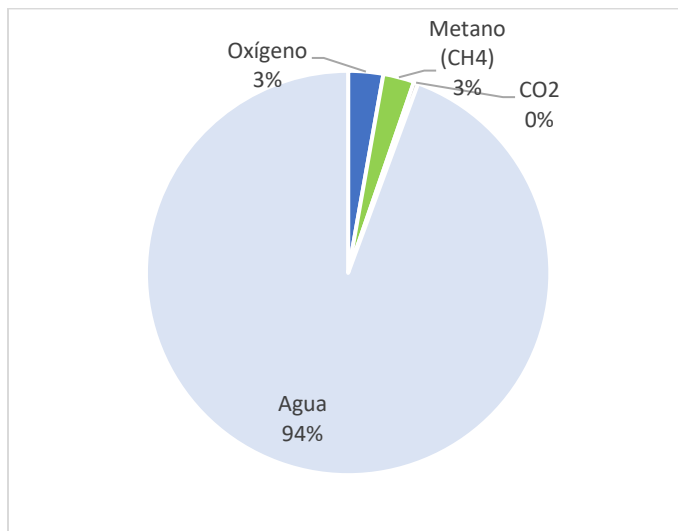
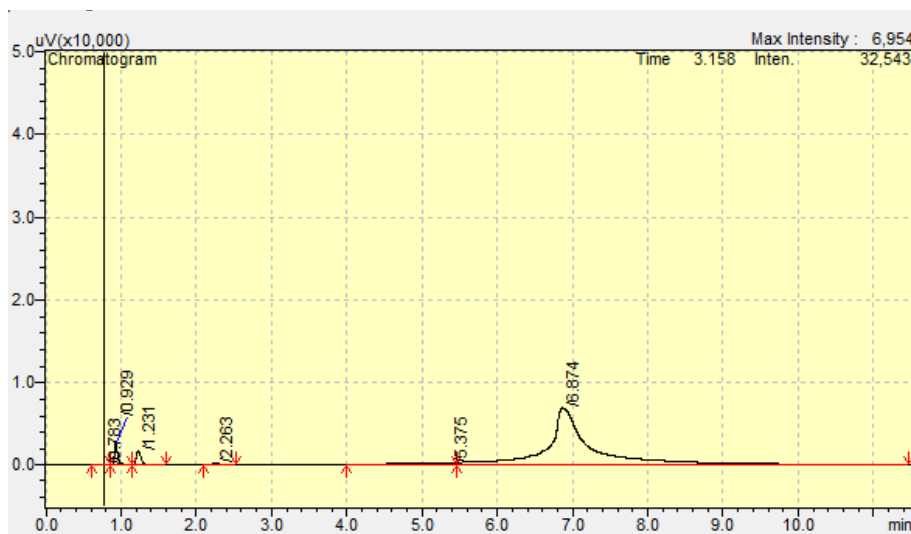


Figura 44

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 1 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 18/10/2024



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el Periodo 2 se obtuvo lo referido en la figura 45 y su cromatograma la figura 46.

Figura 45

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 2 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 18/10/2024 - 07/11/2024

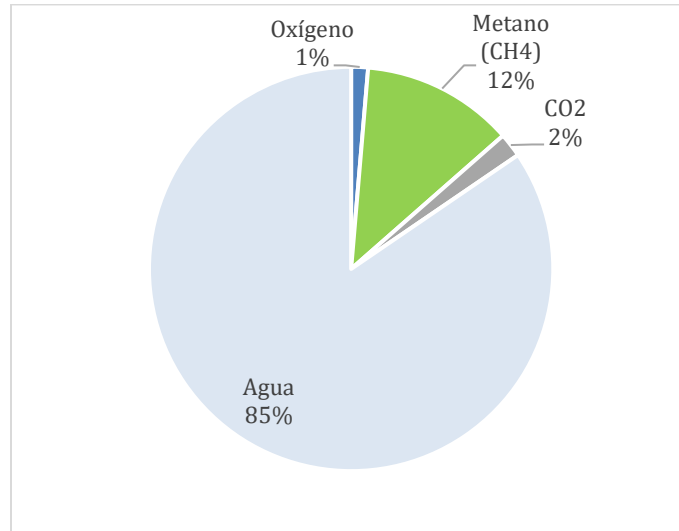
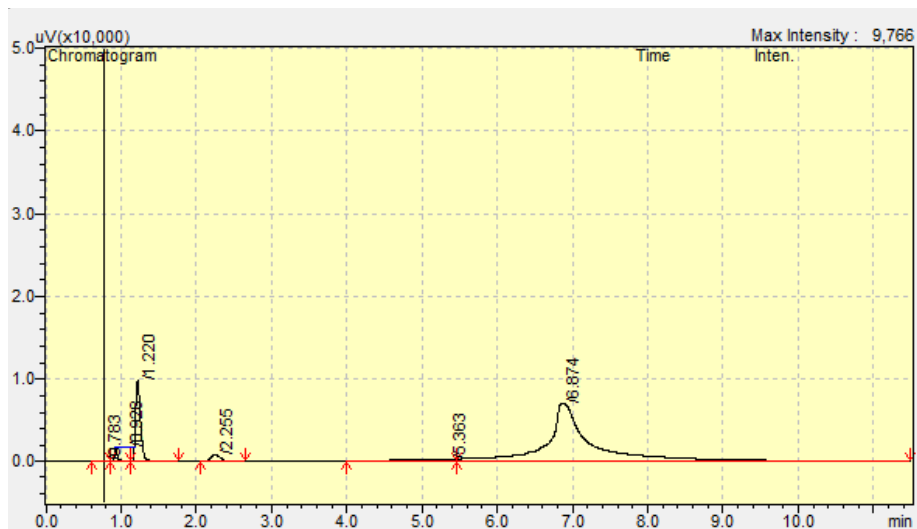


Figura 46

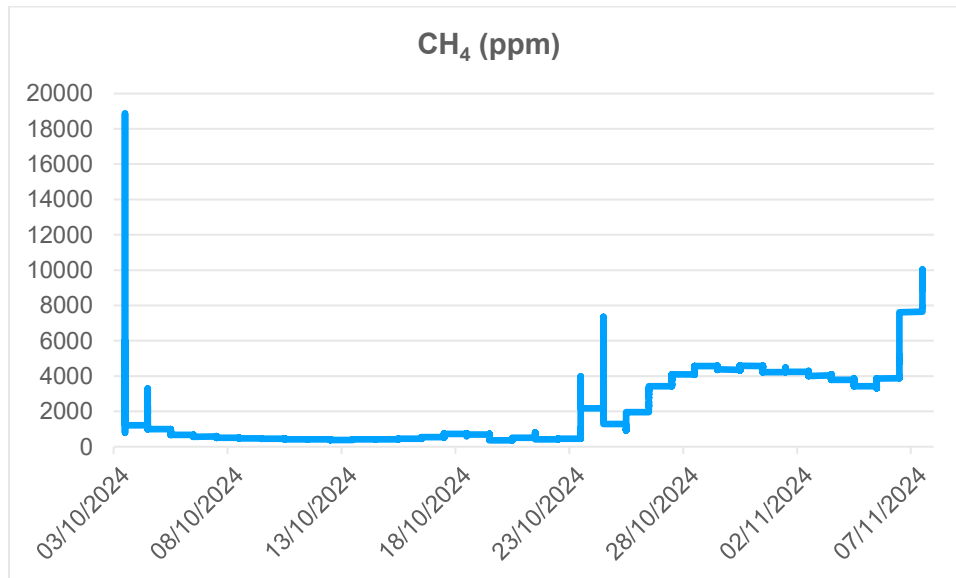
Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 2 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 18/10/2024 - 07/11/2024



Los resultados que mostraron los sensores conforme a la producción de metano con respecto al tiempo se representan en la figura 47.

Figura 47

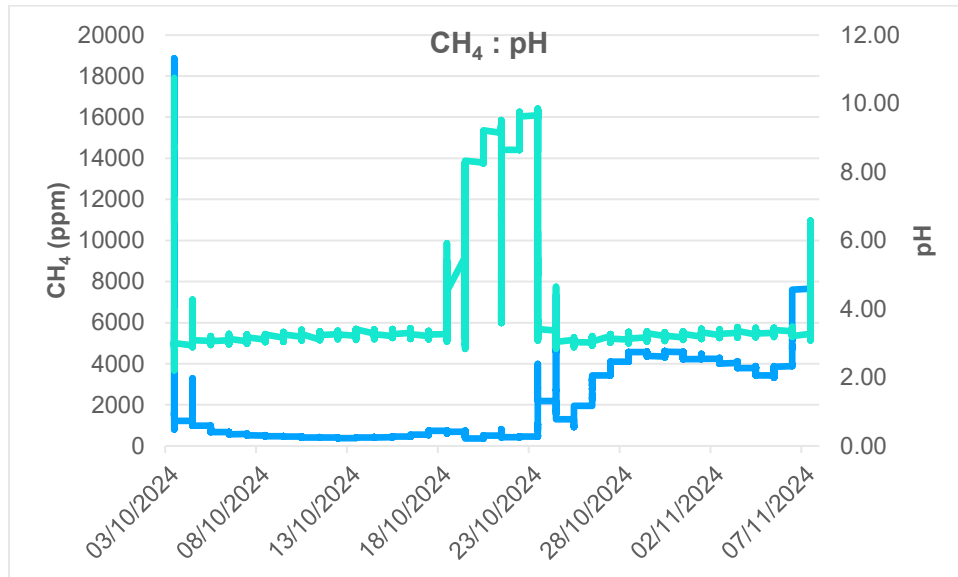
Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con el promedio de los resultados de los 2 sensores de pH y se reportan en la figura 48.

Figura 48

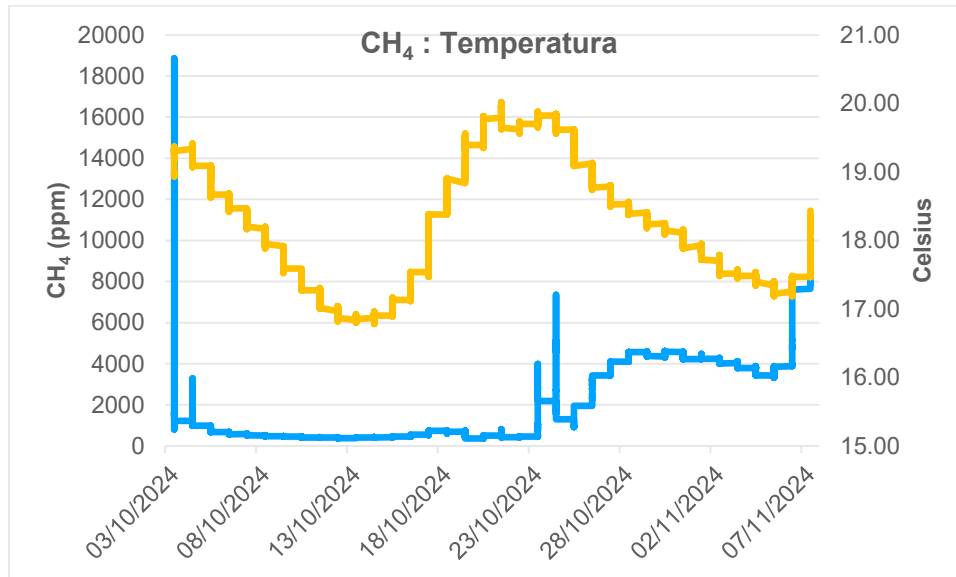
Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 2 sensores de pH en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con el promedio de los resultados de los 3 sensores de temperatura y se reportan en la figura 49.

Figura 49

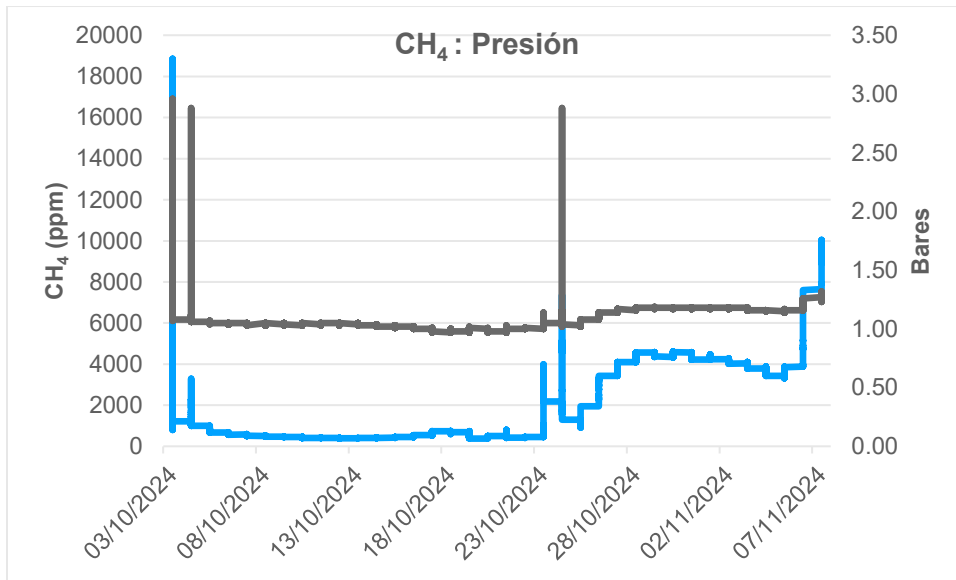
Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 3 sensores de temperatura en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con los resultados del sensor de presión y se reportan en la figura 50.

Figura 50

Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el resultado del sensor de presión en la muestra de estiércol fresco 80% + agua 20% del 03/10/2024 - 07/11/2024



El sistema 2 con la primera carga de estudio fue puesto en marcha el 06/10/2024 a las 19:00h al 10/12/2024, en el domicilio del tesista ubicado C.P. 72310, Puebla, Puebla, el registro de los datos de este sistema debía de ser almacenado en la memoria interna de la computadora, sin embargo, no se contó con dichos registros por no estar configurada la memoria en el modo correspondiente para almacenamiento de datos.

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases del único periodo se obtuvo lo referido en la figura 51 y su cromatograma la figura 52.

Figura 51

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 3 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 06/10/2024 - 10/12/2024

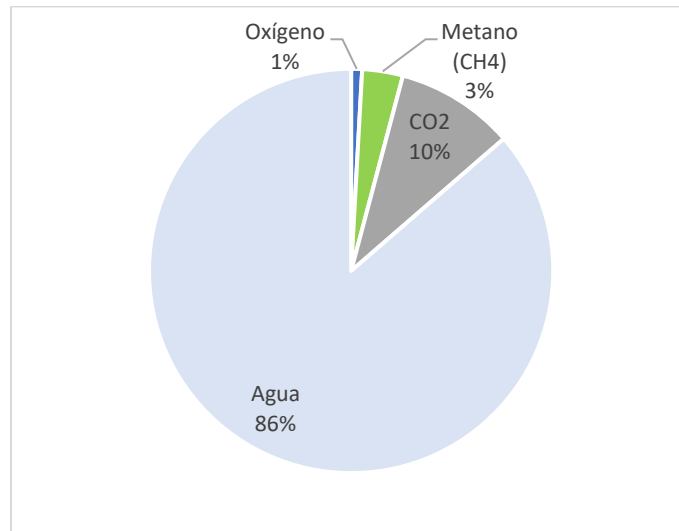
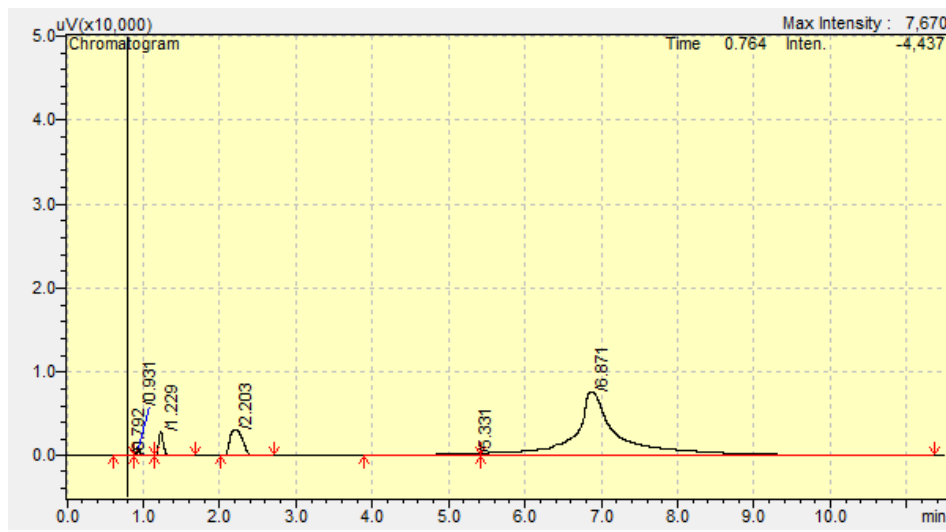


Figura 52

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 3 de estiércol fresco 80% + agua 20% del 06/10/2024 - 10/12/2024



3.2.2.2. Resultados obtenidos de la 2° carga de estudio

Ambos sistemas con la segunda carga de estudio fueron cargados del 16/02/2025 – 03/05/2025 en el domicilio del tesista, los cuales contenían 18kg de cáscara de papa blanca de la variante “*Solanum tuberosum*” fresca (90%) + 2kg de agua (10%), sumando 20kg de masa total, esto para cada uno de los 2 sistemas.

El sistema 1 se monitoreó en 3 periodos:

- Periodo 1 (Muestra 4): 16/02/2025 – 01/03/2025.
- Periodo 2 (Muestra 5): 01/03/2025 – 03/04/2025
- Periodo 3 (Muestra 6): 03/04/2025 – 03/05/2025

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 1 se obtuvo lo referido en la figura 53 y su cromatograma la figura 54.

Figura 53

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 4 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 01/03/2025

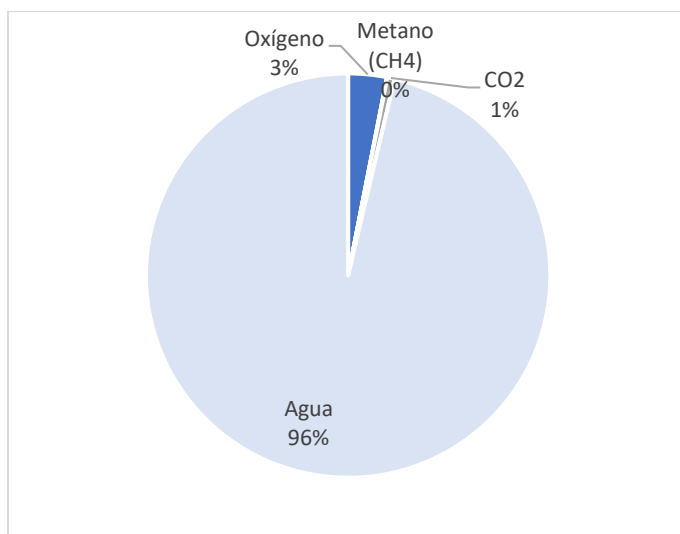
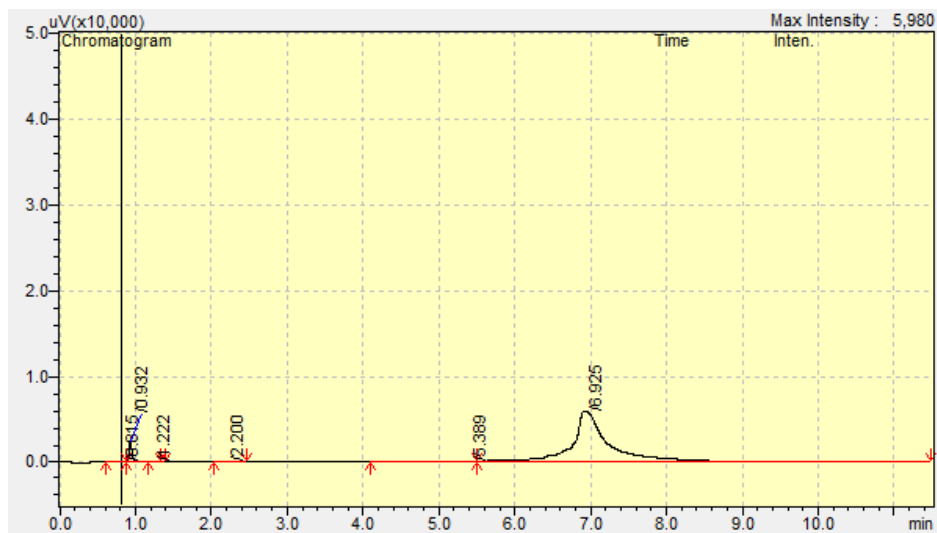


Figura 54

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 4 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 01/03/2025



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 2 se obtuvo lo referido en la figura 55 y su cromatograma la figura 56.

Figura 55

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 5 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 01/03/2025 - 03/04/2025

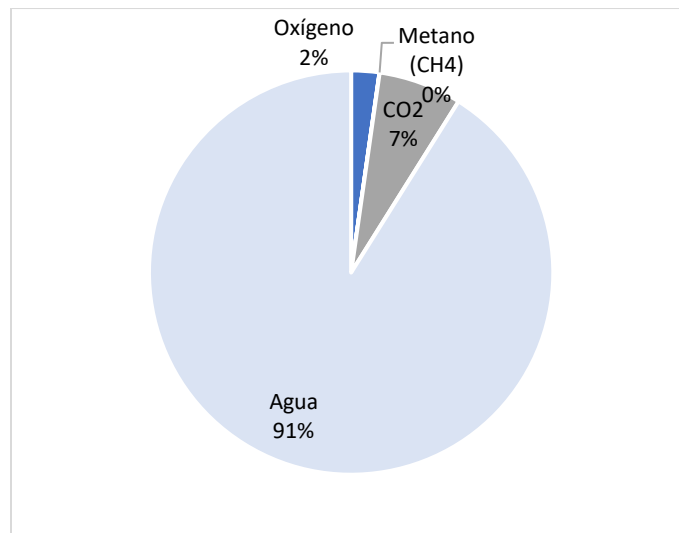
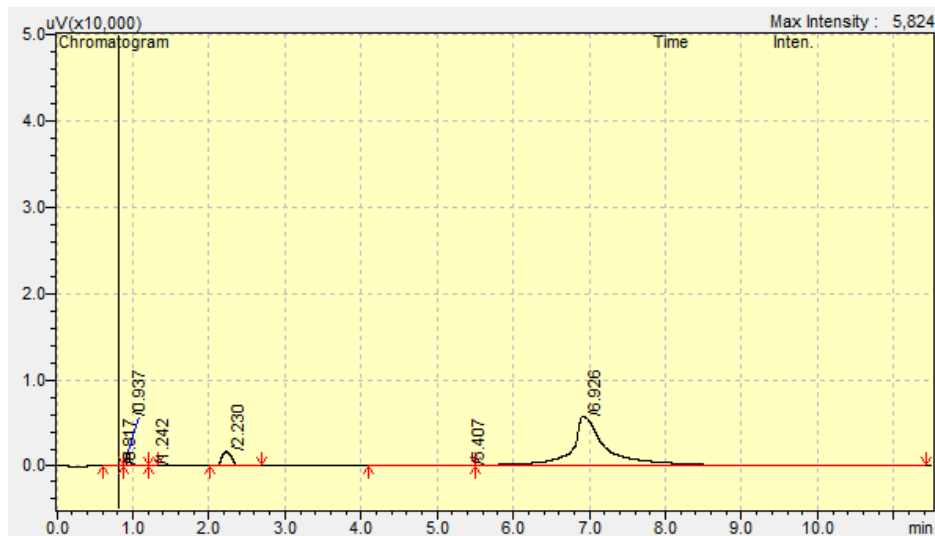


Figura 56

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 5 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 01/03/2025 - 03/04/2025



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 3 se obtuvo lo referido en la figura 57 y su cromatograma la figura 58.

Figura 57

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 6 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 03/04/2025 - 03/05/2025

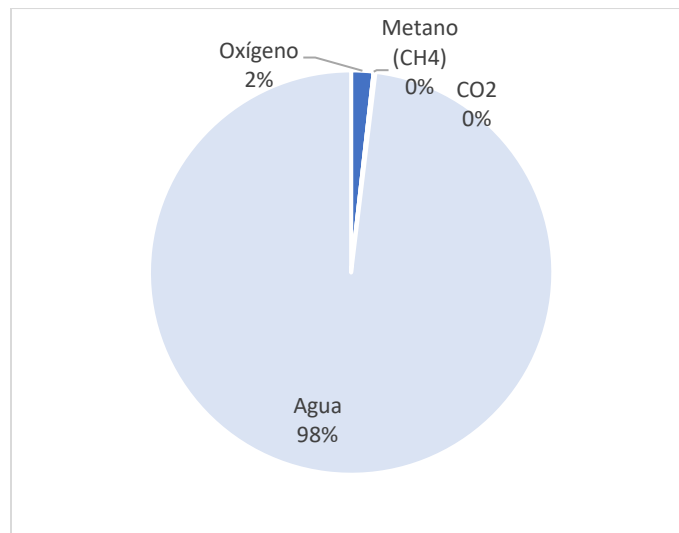
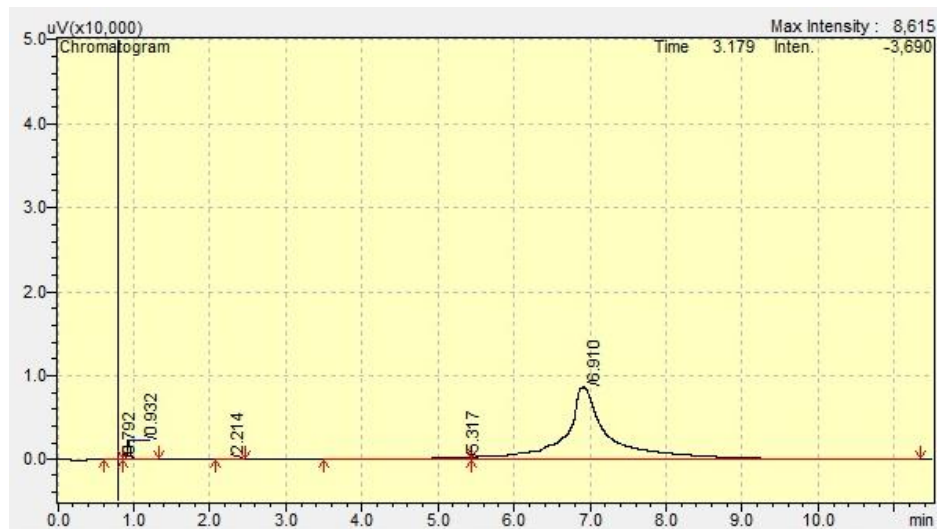


Figura 58

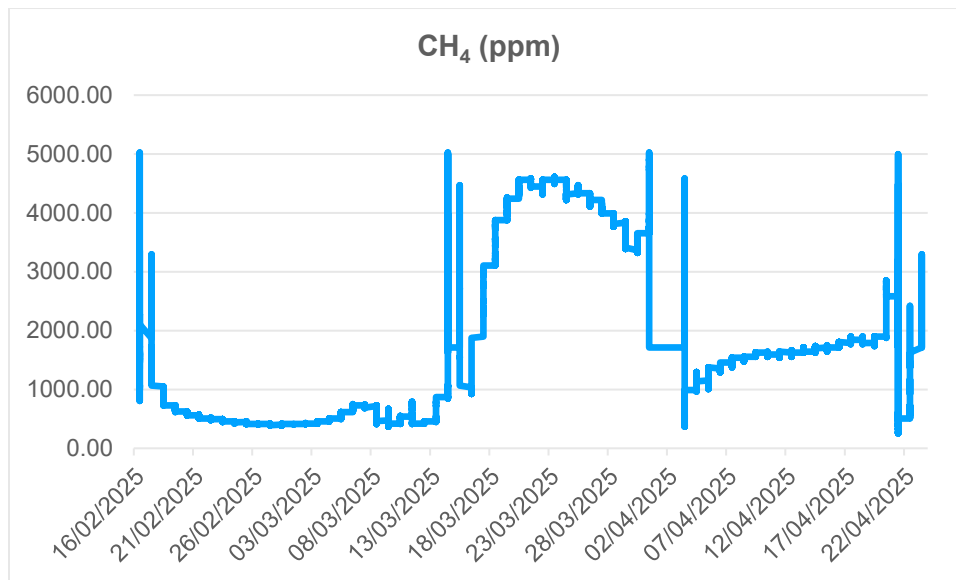
Cromatograma presentado cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 6 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 03/04/2025 - 03/05/2025



Los resultados que mostraron los sensores conforme a la producción de metano con respecto al tiempo se representan en la figura 59.

Figura 59

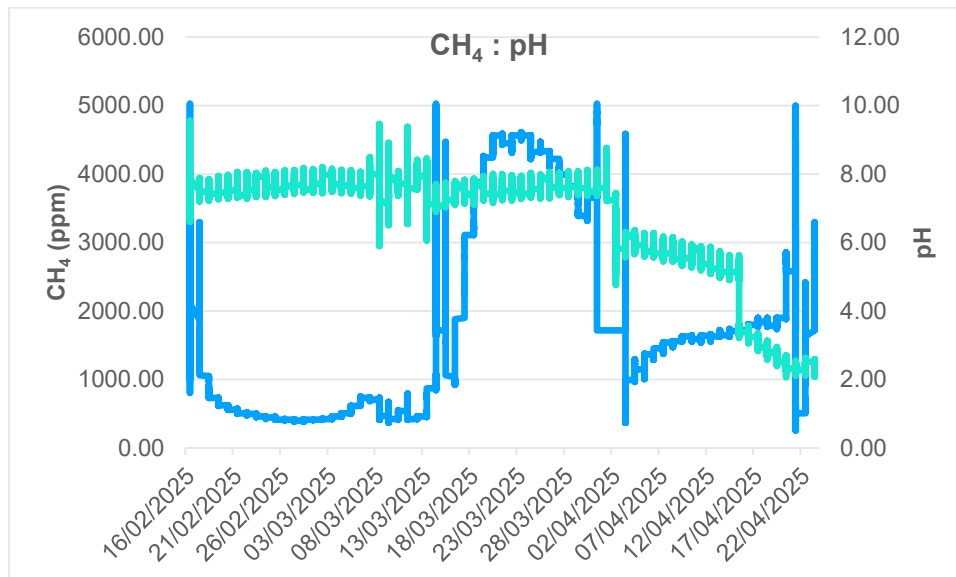
Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo en la muestra de papa blanca de la variante “*Solanum tuberosum*” fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con el promedio de los resultados de los 2 sensores de pH y se reportan en la figura 60.

Figura 60

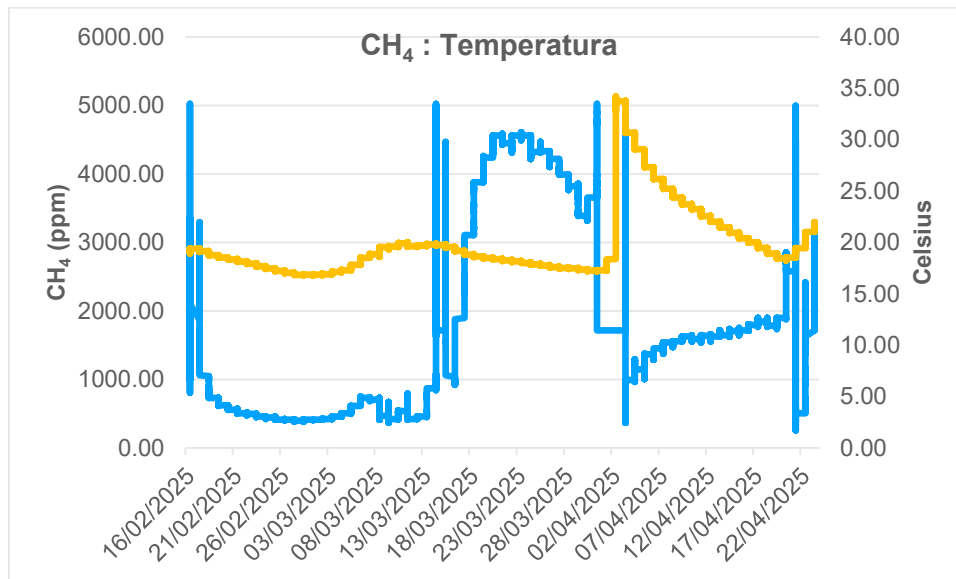
Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 2 sensores de pH en la muestra de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%)+ agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con el promedio de los resultados de los 3 sensores de temperatura y se reportan en la figura 61.

Figura 61

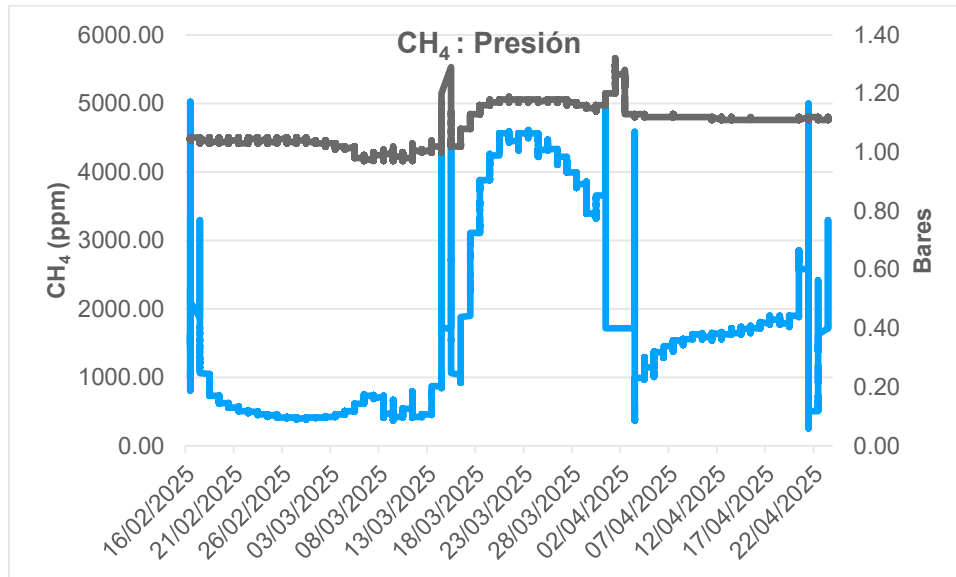
Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el promedio de los resultados de los 3 sensores de temperatura en la muestra de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con los resultados del sensor de presión y se reportan en la figura 62.

Figura 62

Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo y el resultado del sensor de presión en la muestra de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025



El sistema 2 (con filtros) se monitoreó en 1 periodo, ya que no se apreciaba producción de metano en la bolsa de alícuotas, ni en la cámara de llanta:

- Periodo 1 (Muestra 7): 16/02/2025 – 03/05/2025.

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 1 se obtuvo lo referido en la figura 63 y su cromatograma la figura 64.

Figura 63

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 7 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025, incorporando el sistema de filtros

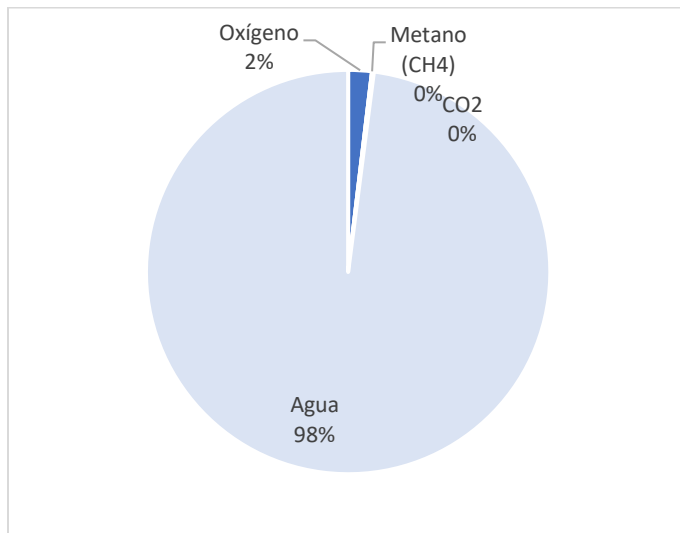
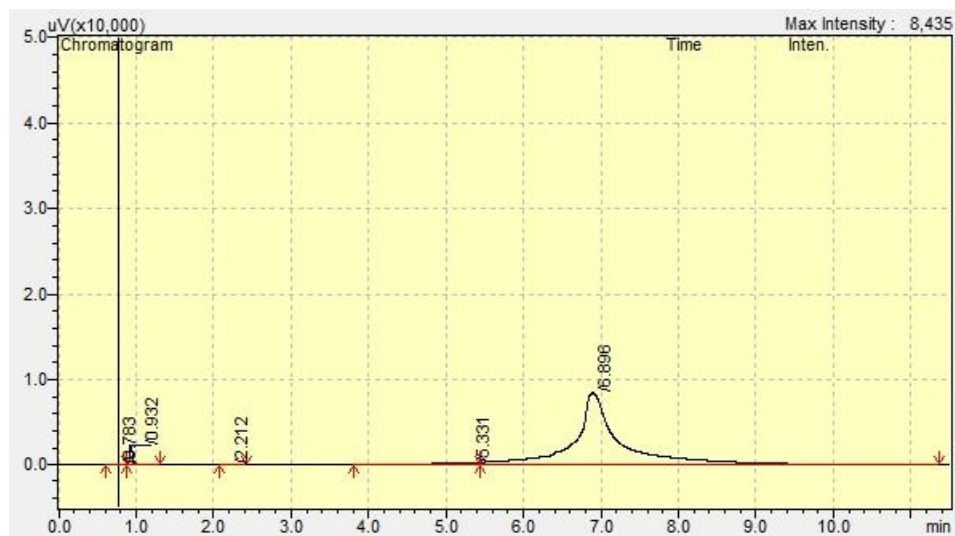


Figura 64

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 7 de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (90%) + agua 10% del 16/02/2025 - 03/05/2025, incorporando el sistema de filtros



Los resultados que mostraron los sensores conforme a la producción de metano y la poca producción de este no se consideraron relevantes para reportar en la investigación. Cabe mencionar que no se observó producción de metano por un problema con la posición

de los filtros, mismo que se detalla e ilustra en el apartado 3.3 Principales problemas en la investigación >> Incorporación de filtros.

3.2.2.3. Resultados obtenidos de la 3° carga de estudio

Ambos sistemas con la tercera carga de estudio fueron cargados del 20/05/2025 – 07/07/2025 en el domicilio del tesista, los cuales contenían 20kg de basura orgánica, estaban constituidos por sólidos orgánicos domésticos enunciados en la tabla 5 y presentados en mezcla, debido a que se observaron las altas concentraciones de agua en los resultados anteriores, se decidió eliminar el agua en la mezcla de la biomasa y sólo mantener la ya contenida por los desperdicios, esto para cada uno de los 2 sistemas.

El sistema 1 (sin filtros) se monitoreó en un solo periodo, pues en el monitoreo visual diario de producción de biogás, no se observó una producción significativa de metano en la bolsa de alícuotas, ni en la cámara de llanta:

- Periodo único (Muestra 8 sin filtros): 20/05/2025 – 07/07/2025.

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo se obtuvo lo referido en la figura 65 y su cromatograma la figura 66.

Figura 65

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 8 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025

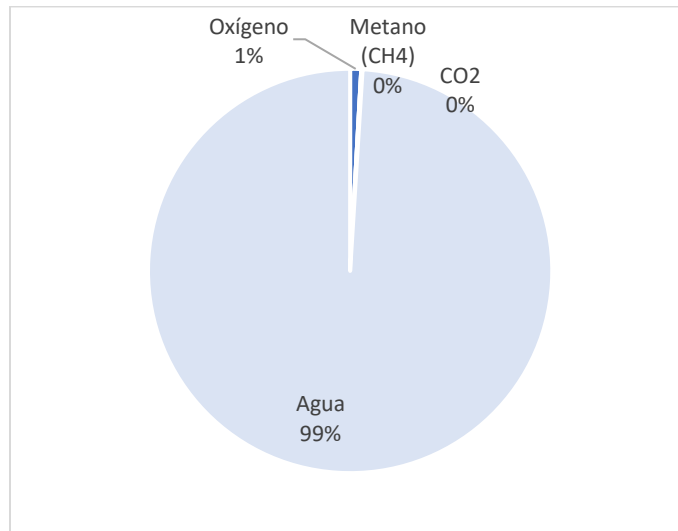
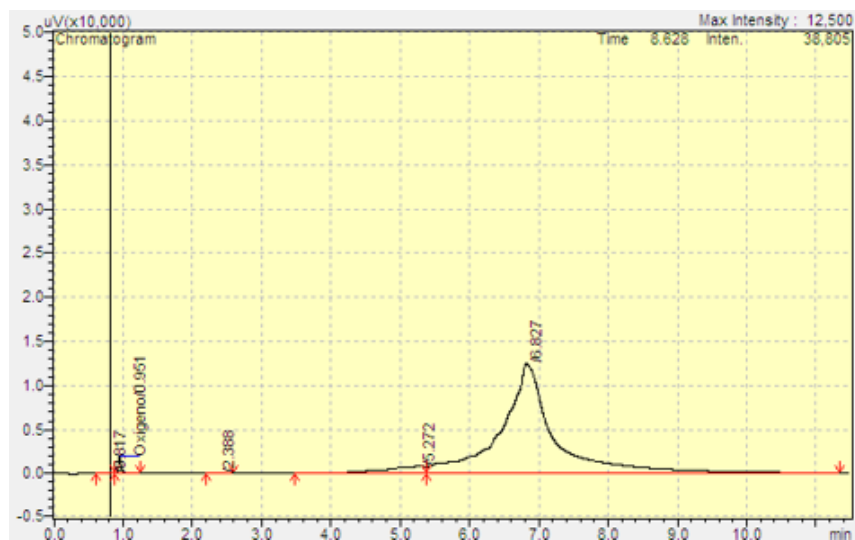


Figura 66

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 8 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025



Derivado a que no se observa producción de metano, no se considera relevante para la investigación reportar los gráficos comparativos de producción de metano con respecto a los sensores de monitoreo.

El sistema 2 (con filtros) se monitoreó en un solo periodo, pues en el monitoreo visual diario de producción de biogás, no se observó una producción significativa de metano en la bolsa de alícuotas, ni en la cámara de llanta:

- Periodo único (Muestra 9 con filtros): 20/05/2025 – 07/07/2025.

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo único se obtuvo lo referido en la figura 67 y su cromatograma la figura 68.

Figura 67

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 9 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025, incorporando el sistema de filtros

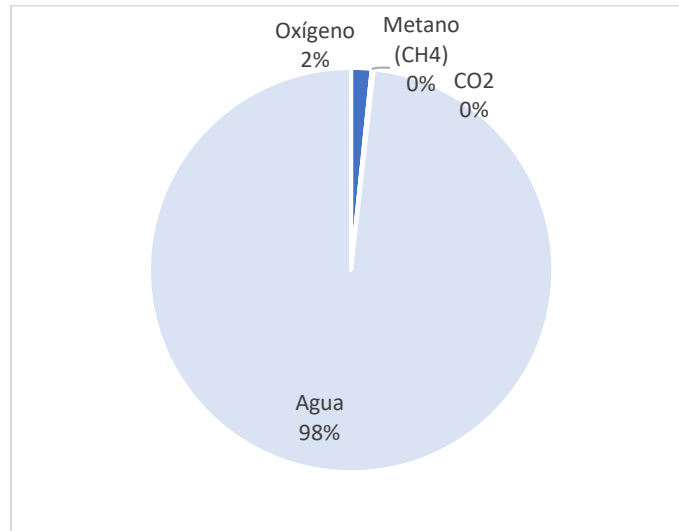
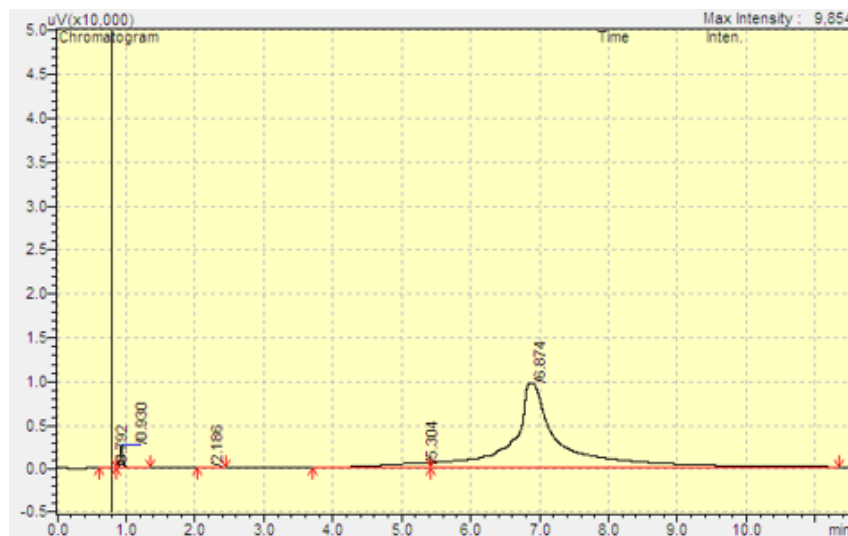


Figura 68

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la muestra 9 de sólidos orgánicos domésticos del 20/05/2025 - 07/07/2025, incorporando el sistema de filtros



Derivado a que no se observa producción de metano, no se considera relevante para la investigación reportar los gráficos comparativos de producción de metano con respecto a los sensores de monitoreo.

3.2.2.4. Resultados obtenidos de la 4° carga de estudio

Derivado a la nula producción de biogás en el último lote, se consideró una 4° carga adicional que no estaba programada en la planeación original, esta carga se consideró con 2 variantes del 29/09/2025 a las 17:00h, las cuales contenían:

- Variante 1: 18kg de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%), sumando 20kg de masa total, sin sensores de monitoreo.
- Variante 2: 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “*Solanum tuberosum*” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%), sumando 20kg de masa total, con sensores de monitoreo.

Ambos sistemas se monitorearon en 6 periodos:

- Periodo 1: 02/10/2025 – 08/10/2025.
- Periodo 2: 08/10/2025 – 15/10/2025.
- Periodo 3: 15/10/2025 – 20/10/2025.
- Periodo 4: 20/10/2025 – 28/10/2025.
- Periodo 5: 28/10/2025 – 07/11/2025
- Periodo 6: 07/11/2025 – 18/11/2025

A continuación, se presentan los resultados de la variante 1:

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 1 se obtuvo lo referido en la figura 69 y su cromatograma la figura 70.

Figura 69

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, sin sensores de monitoreo

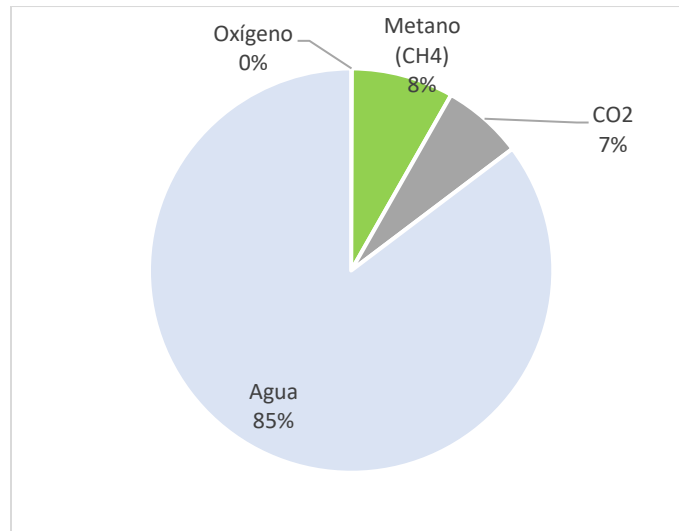
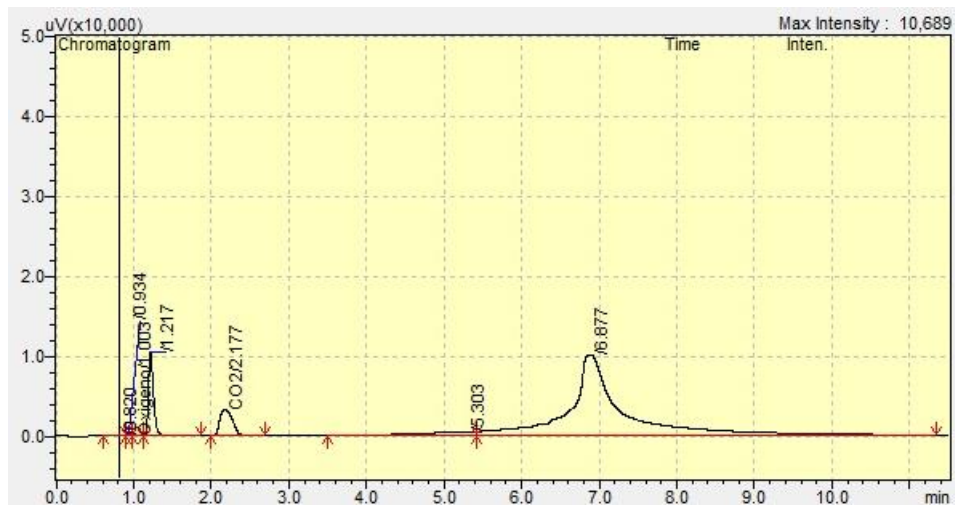


Figura 70

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, sin sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 2 se obtuvo lo referido en la figura 71 y su cromatograma la figura 72.

Figura 71

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, sin sensores de monitoreo

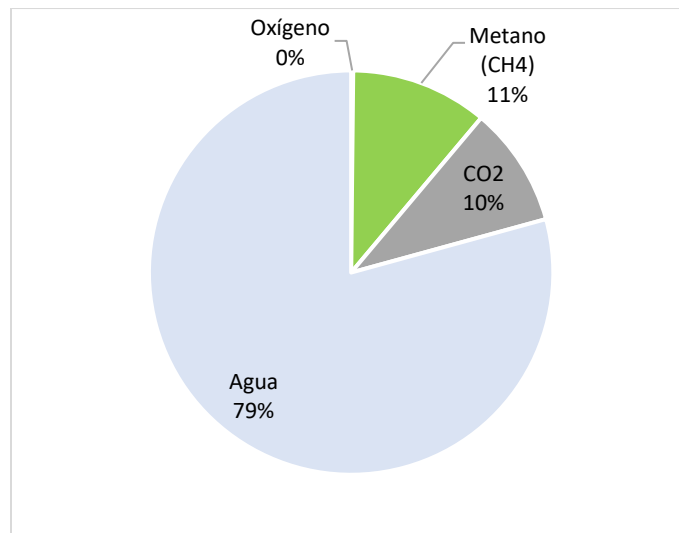
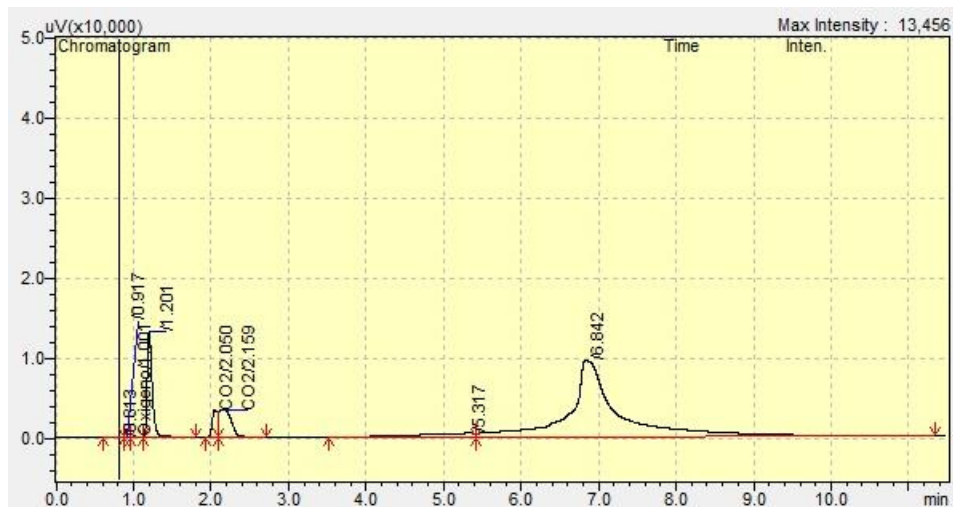


Figura 72

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, sin sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 3 se obtuvo lo referido en la figura 73 y su cromatograma la figura 74.

Figura 73

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, sin sensores de monitoreo

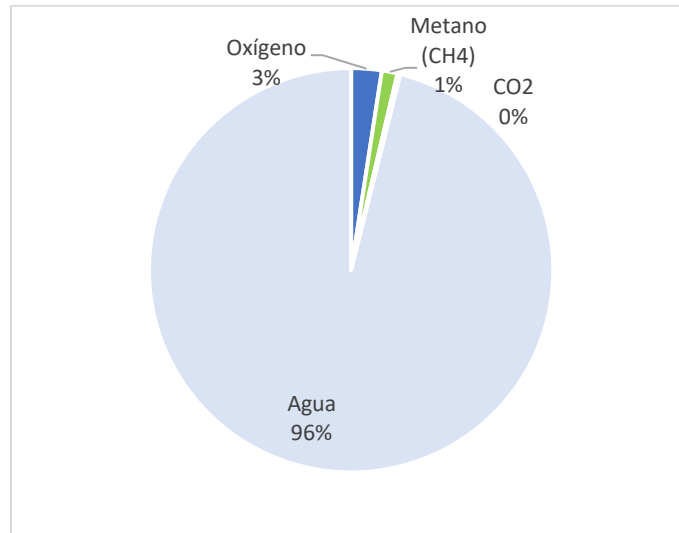
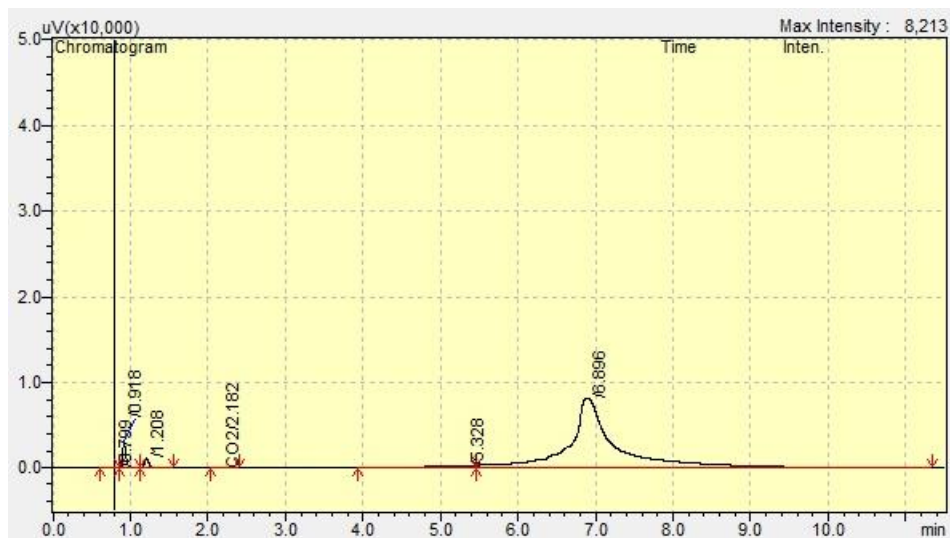


Figura 74

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, sin sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 4 se obtuvo lo referido en la figura 75 y su cromatograma la figura 76.

Figura 75

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, sin sensores de monitoreo

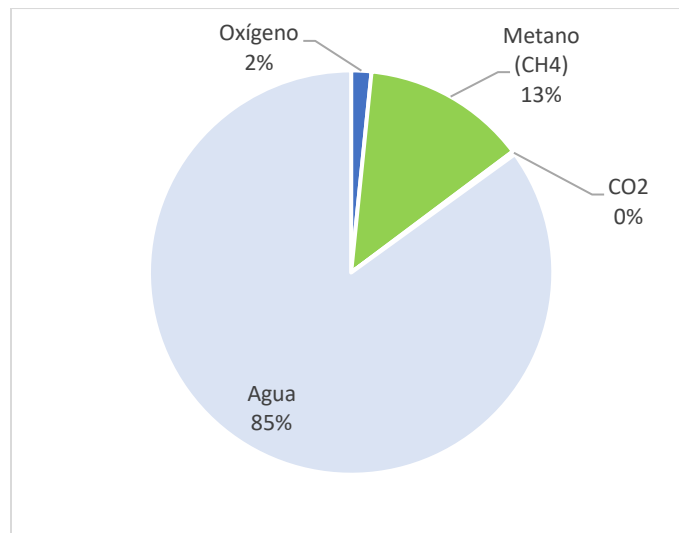
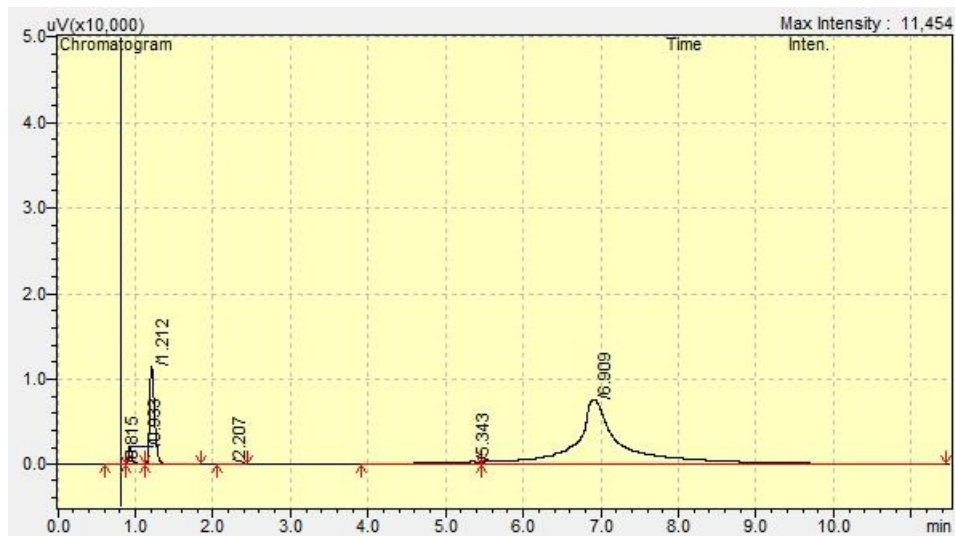


Figura 76

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, sin sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 5 se obtuvo lo referido en la figura 77 y su cromatograma la figura 78.

Figura 77

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, sin sensores de monitoreo

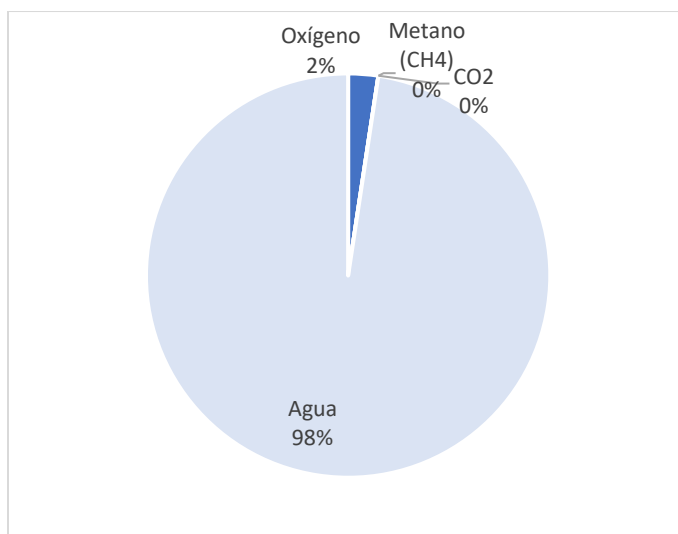
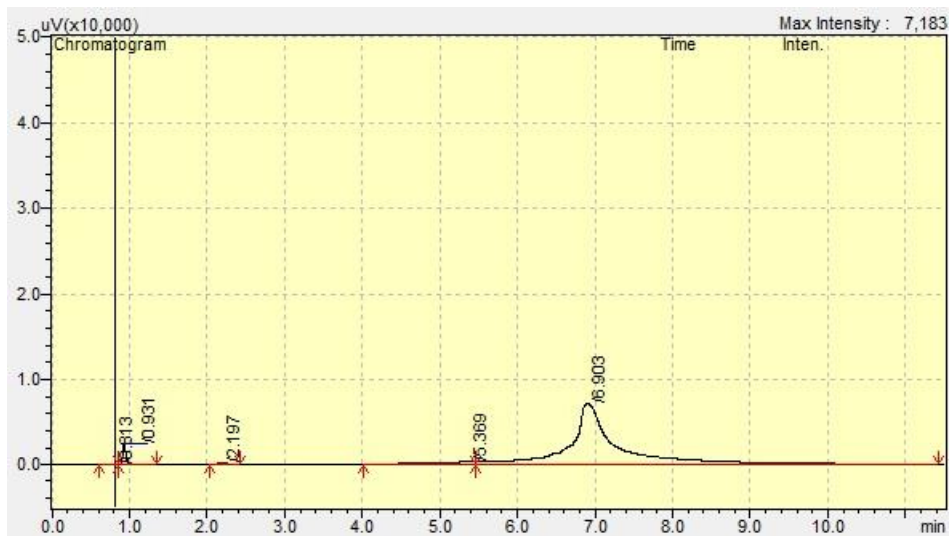


Figura 78

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, sin sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 6 se obtuvo lo referido en la figura 79 y su cromatograma la figura 80.

Figura 79

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, sin sensores de monitoreo

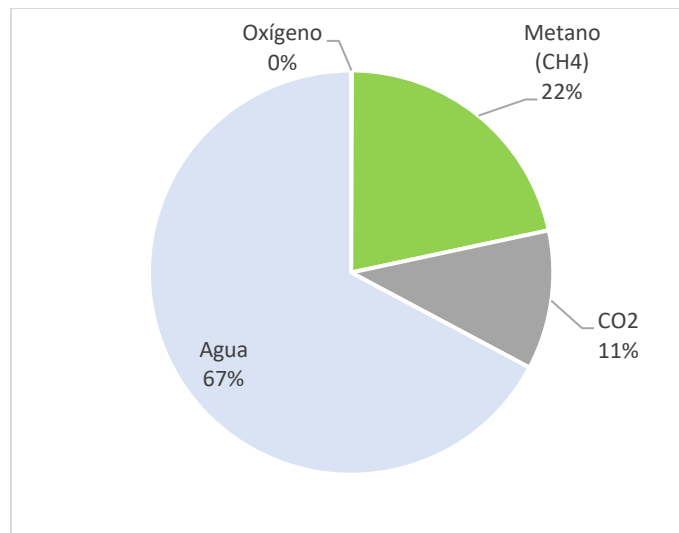
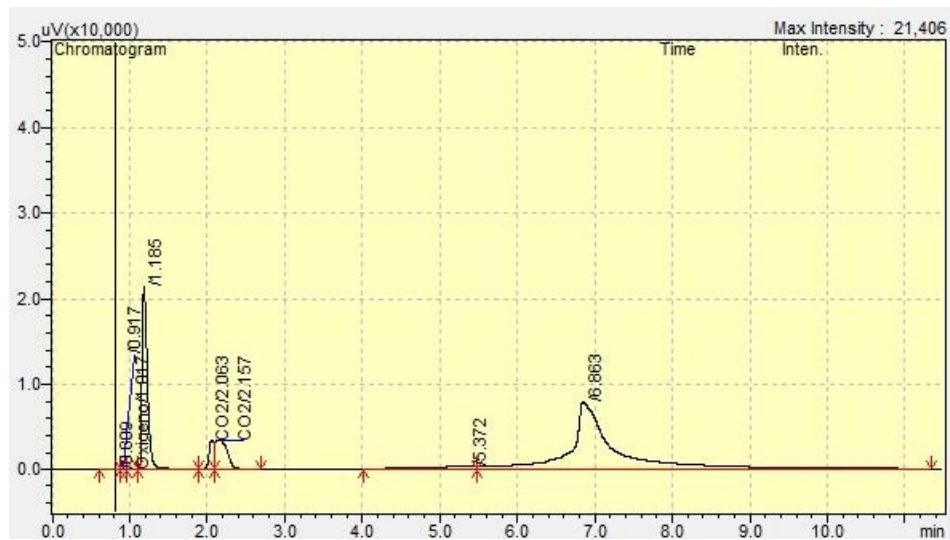


Figura 80

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 1 de estiércol vacuno (90%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, sin sensores de monitoreo



A continuación, se presentan los resultados de la variante 2:

Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 1 se obtuvo lo referido en la figura 81 y su cromatograma la figura 82.

Figura 81

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, con sensores de monitoreo

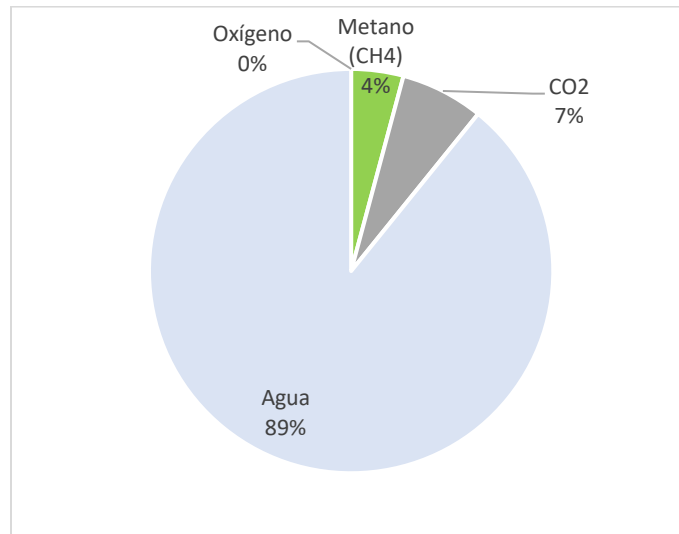
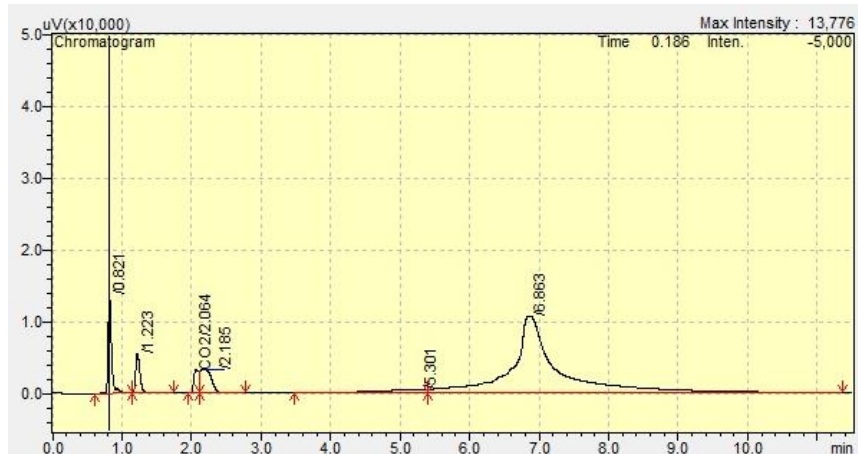


Figura 82

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 02/10/2025 – 08/10/2025, con sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 2 se obtuvo lo referido en la figura 83 y su cromatograma la figura 84.

Figura 83

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, con sensores de monitoreo

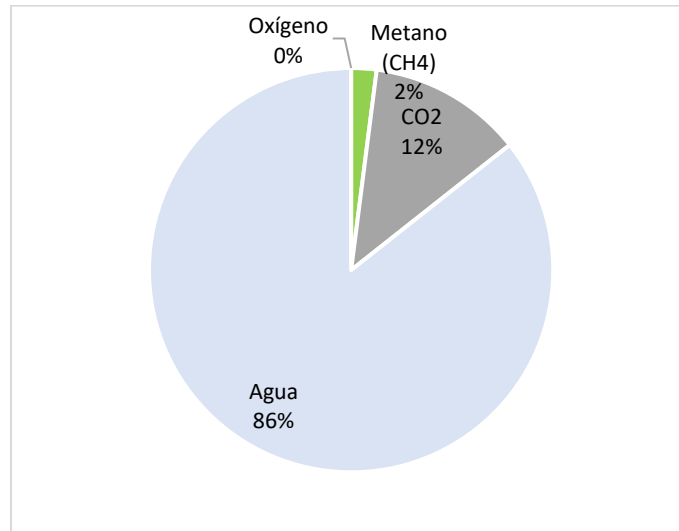
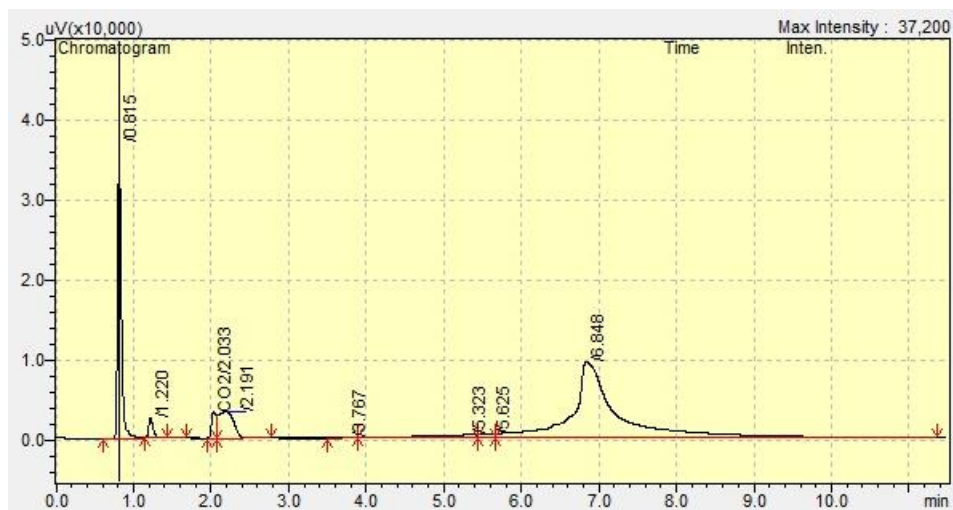


Figura 84

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 08/10/2025 – 15/10/2025, con sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 3 se obtuvo lo referido en la figura 85 y su cromatograma la figura 86.

Figura 85

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, con sensores de monitoreo

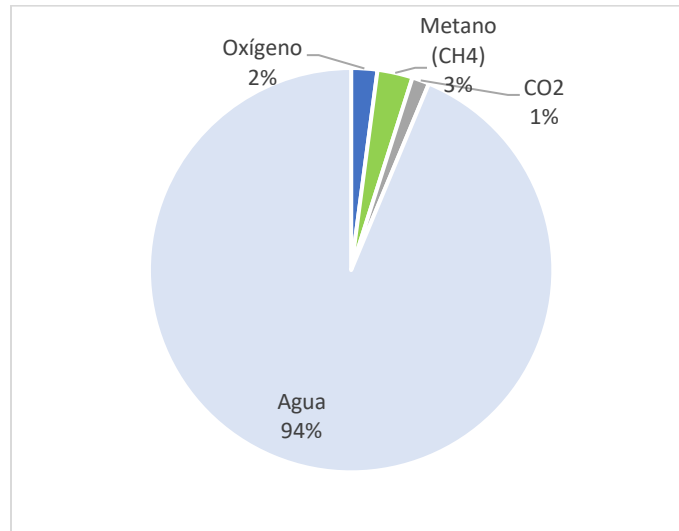
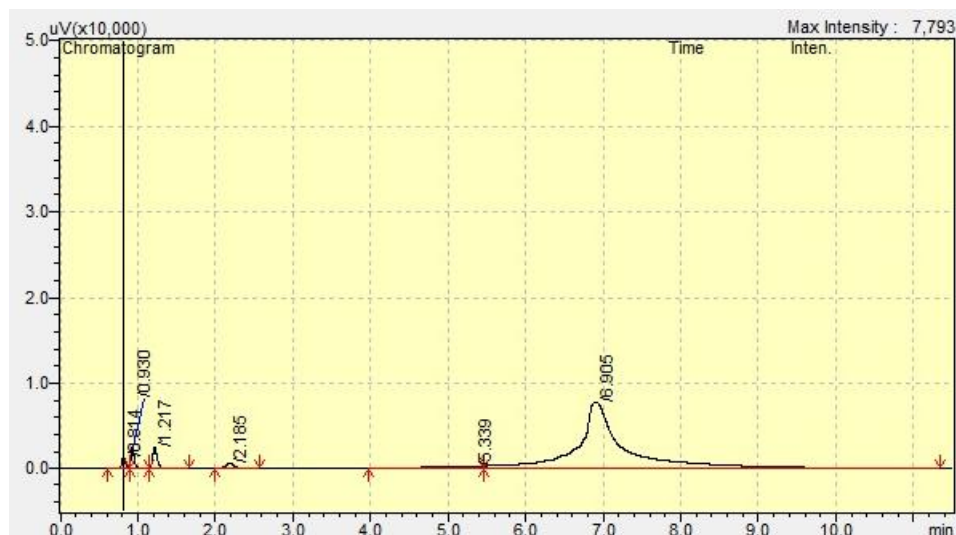


Figura 86

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 15/10/2025 – 20/10/2025, con sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 4 se obtuvo lo referido en la figura 87 y su cromatograma la figura 88.

Figura 87

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, con sensores de monitoreo

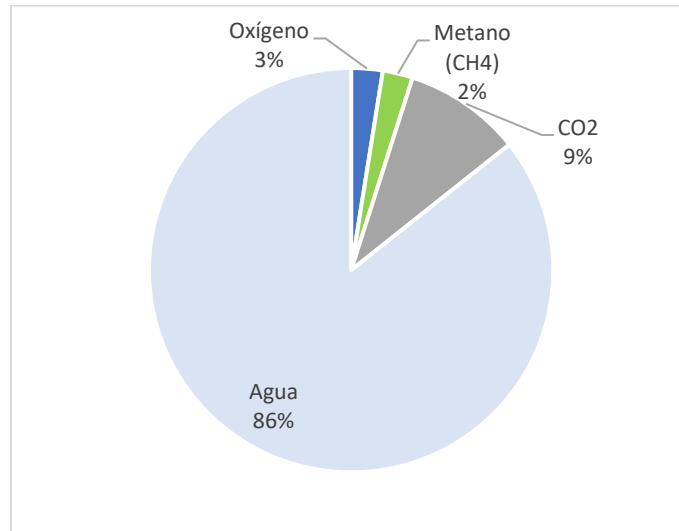
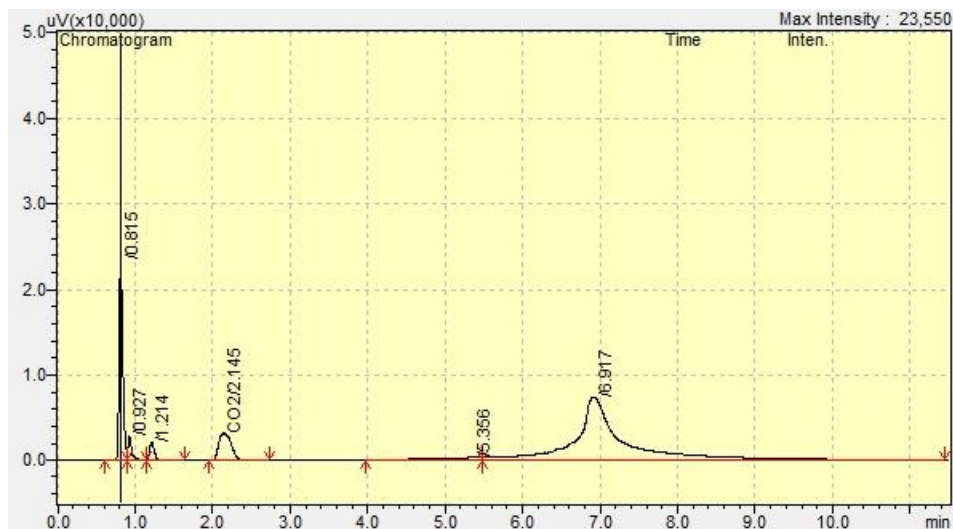


Figura 88

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 20/10/2025 – 28/10/2025, con sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 5 se obtuvo lo referido en la figura 89 y su cromatograma la figura 90.

Figura 89

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, con sensores de monitoreo

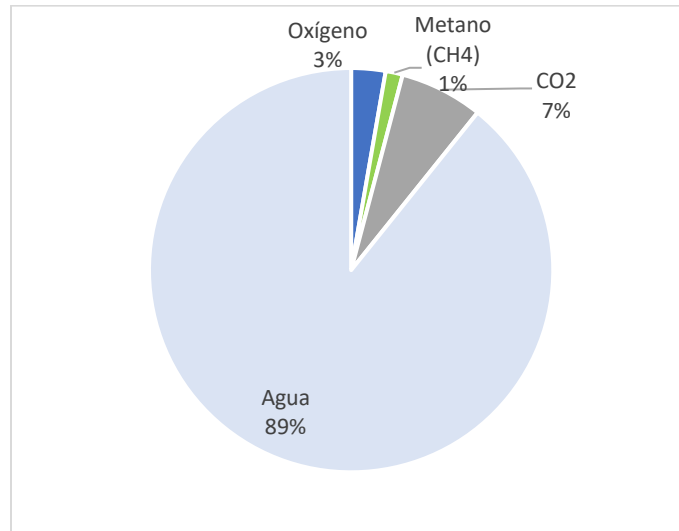
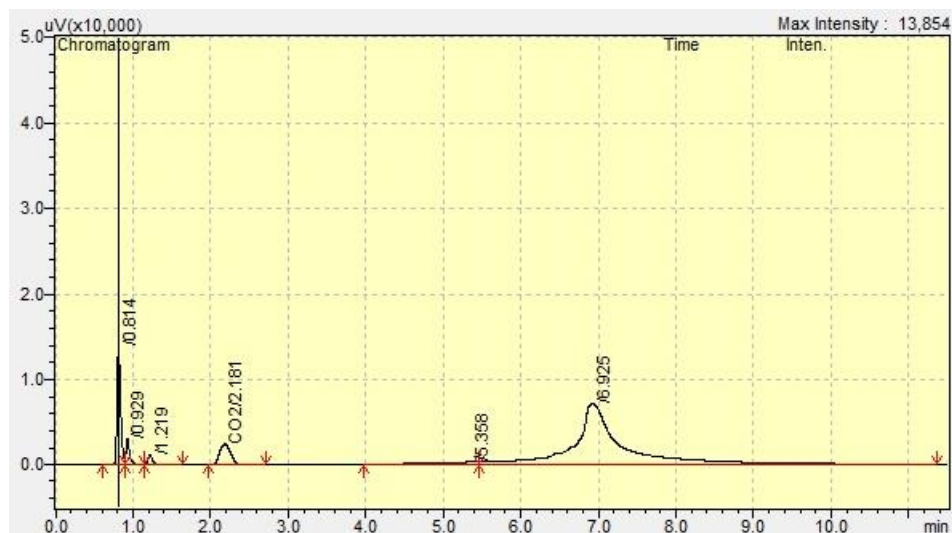


Figura 90

Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 28/10/2025 – 07/11/2025, con sensores de monitoreo



Mediante análisis en el cromatógrafo de gases en el periodo 6 se obtuvo lo referido en la figura 91 y su cromatograma la figura 92.

Figura 91

Contenido de materiales detectados con cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, con sensores de monitoreo

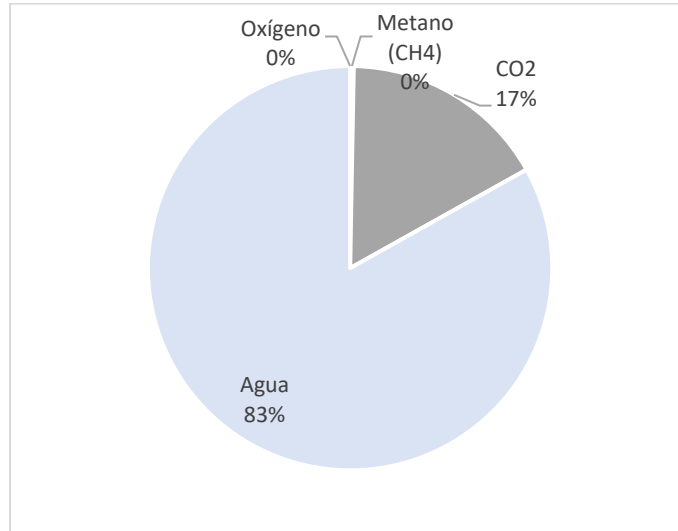
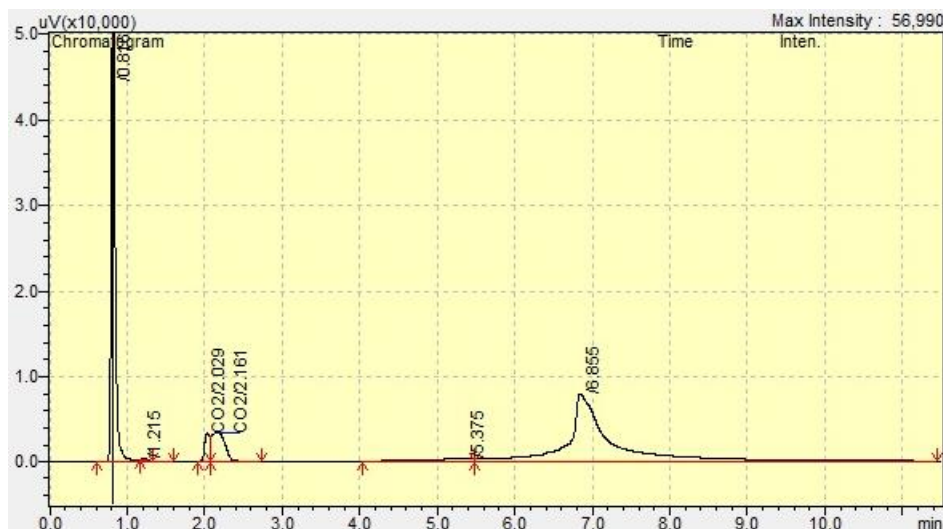


Figura 92

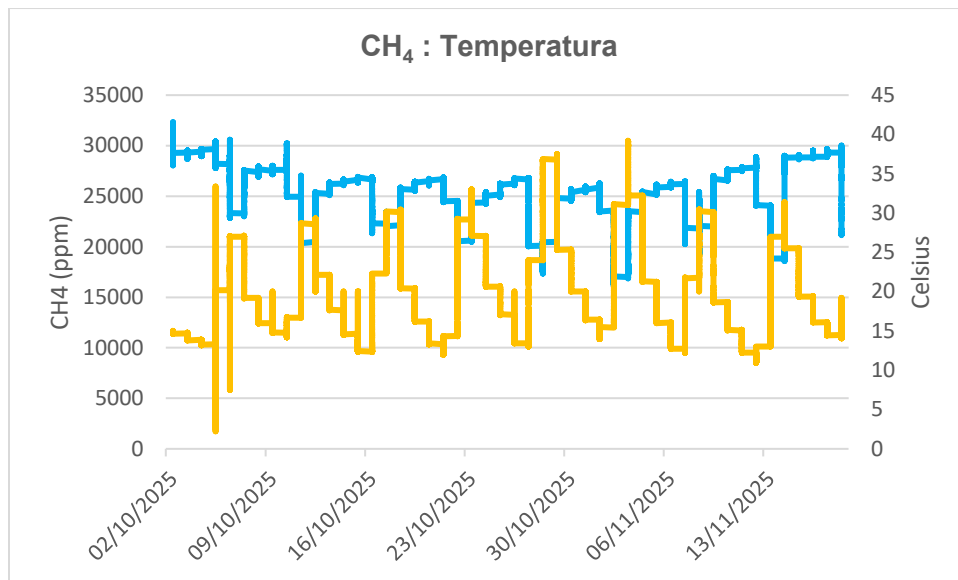
Cromatograma presentado por cromatógrafo Shimadzu GC-14B en la variante 2 con 9kg de cáscara de papa blanca de la variante "Solanum tuberosum" fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%) del 07/11/2025 – 18/11/2025, con sensores de monitoreo



Se ha realizado una comparación de la producción de metano con respecto al tiempo con los resultados del sensor de temperatura y se reportan en la figura 93.

Figura 93

Gráfico que representa la producción de metano con respecto al tiempo con los resultados del sensor de temperatura en la muestra de 9kg de cáscara de papa blanca de la variante “*Solanum tuberosum*” fresca (40%) + 9kg de estiércol vacuno (40%) + 2kg de agua (10%)



3.3. Principales problemas en la experimentación

Durante el desarrollo de esta investigación se presentaron diversas complejidades en diversas etapas de esta, mismas que se describen a continuación en orden de importancia de mayor a menor:

- Fugas

Fue el problema principal en el desarrollo de la investigación, ya que, si bien se consideró un recipiente grande y con una tapa de fácil acceso que permitiera poder maniobrar e instrumentar de una forma ágil y eficiente, no se consideró la hermeticidad entre la tapa y el contenedor, así como entre la tapa y el agitador. Las fugas se presentaron de forma constante entre cargas, ciclos y desarrollo de los lotes tal como se refiere en la figura 94.

Figura 94

Fugas presentadas en la tapa del biodigestor



- Pérdidas de corriente

Por el tipo de placa microcontrolador que se eligió (Arduino UNO) y por la arquitectura del programa creado, una vez que se interrumpía la corriente no era posible continuar con el almacenamiento de datos, esto conllevó a que se perdieran datos importantes, la pérdida de datos se descubría hasta que se realizaba la descarga de datos.

Mientras los biorreactores estuvieron en el Ecocampus CU2 de la BUAP, se presentaron constantes interrupciones de energía, al menos una cada 2 días. Esto motivó también a establecer un biorreactor en el domicilio del tesista.

También hubo pérdidas de corriente en el laboratorio de catálisis avanzada del ICUAP al menos una vez.

- Almacenamiento de datos en modo MS-DOS

Cuando se realizaba la descarga de datos de las memorias microSD a las computadoras, normalmente se formateaban las memorias microSD y, en ocasiones, se realizaba el formateo en modo MS-DOS. La placa Arduino UNO no es capaz de almacenar información en las memorias microSD cuando han sido formateadas en modo MS-DOS esto conllevó a que se perdieran datos importantes, la pérdida de datos se descubría hasta que se realizaba la descarga de datos.

- Sin medios para analizar la totalidad del contenido del biogás

La bibliografía indica que en la producción de biogás se produce ácido sulfhídrico (H_2S), sin embargo, esto no pudo ser comprobado, ya que no se contó con los equipos para poder realizar un estudio IR o FTIR de gases para conocer el contenido específico total del biogás producido y/o a identificar el ácido sulfhídrico (H_2S). Se buscaron alternativas en la universidad, con dependencias de gobierno, con otras universidades, tanto a nivel municipal, estatal, como nacional, pero no se logró llegar a ninguna instancia.

- Exceso de humedad en muestras

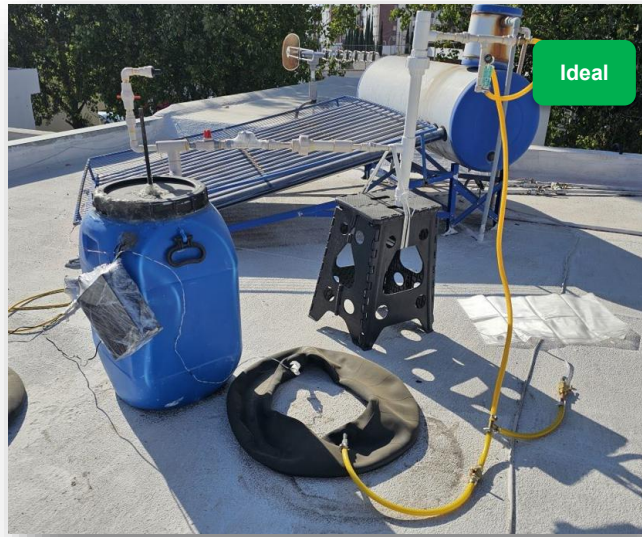
Como se observó en la sección anterior, las muestras de los 2 primeros lotes tuvieron una alta concentración de agua, lo que motivó a la incorporación de los filtros de carbón activado y de cloruro de calcio, sin embargo:

- Incorporación de filtros

Cuando se incorporaron los filtros, no se consideró la densidad del gas versus la ubicación espacial del modelo de producción de gas, pues los dispositivos de almacenamiento de biogás se ubicaban espacialmente debajo del flujo del biogás tal como se observa en la figura 39, considerando que el biogás tendería a subir, los dispositivos de almacenamiento se deberían de haber colocado sobre el sistema de producción, tal como se refiere en la figura 95.

Figura 95

Ubicación espacial equivocada de los dispositivos de almacenamiento del biogás



- Extracción de la cámara de llanta

Cuando se realizaron las primeras extracciones de biogás a la cámara de llanta, tal como se refiere en la figura 96, se observó que dicha extracción era muy compleja y se asumió que se comprometerían los valores de la presión registrada por el sensor de presión instalado en la cámara de llanta y/o que se podría dañar el sensor si se retiraba cada que se extrajera el biogás.

Figura 96

Transferencia de biogás de cámara de llanta a bolsa para alícuotas



Por lo que se optó por instalar una derivación en el sistema de transporte de biogás (mangueras), para así poder obtener alícuotas del biogás producido tal como se refiere en la figura 97, dichas alícuotas se almacenaron en bolsas para diálisis peritoneal de la marca PiSA, modelo Pisatek Biosafe como se refiere en la figura 98.

Figura 97

Derivación en el sistema de transporte de biogás (mangueras)



Figura 98

Bolsa para diálisis peritoneal de la marca PiSA, modelo Pisatek Biosafe



- Bolsas de recopilación de muestras con fugas

Derivado a que las bolsas de diálisis para recopilar las alícuotas fueron una donación, algunas estaban caducadas y se infiere que por ello presentaban pinchaduras y/o fugas, esto conllevó a que se perdieran muestras importantes, la

pérdida de biogás y la fuga se descubría hasta que se realizaba la recolección de la muestra.

- **Clima**

Este proceso de producción de energía renovable, se considera un proceso de producción limpio, en el cual, se utilizó la energía solar como fuente de energía secundaria para la producción del biogás, por lo que las condiciones meteorológicas jugaron un papel fundamental en la producción del biogás. Durante el periodo de experimentación, podríamos decir que fue un periodo meteorológico atípico, pues la irradiancia solar no fue la típica, afectando considerablemente la producción de biogás.

- **Paro de actividades por huelga de estudiantes en la universidad**

Las instalaciones de la universidad estuvieron inaccesibles del 24 de febrero al 31 de marzo de 2025 por una huelga de estudiantes, lo que imposibilitó la recolección y análisis de muestras, durante este periodo, también se perdieron algunas muestras, pues se produjo tanto biogás que rebasó la capacidad de las bolsas recolectoras provocando el estallamiento de estas.

3.4. Catalizadores

El metano después de participar en la combustión produce nuevas emisiones, así como puede usarse como combustible en quemadores residenciales, también puede emplearse como combustible en automóviles, en éstos un elemento fundamental para reducir las emisiones nocivas producidas por los motores de combustión interna es el convertidor catalítico. El cual es un dispositivo instalado generalmente en el sistema de escape, el cual transforma los gases tóxicos en sustancias menos dañinas para el medio ambiente, ayudando a cumplir con las regulaciones ambientales y mejorando la calidad del aire.

Asumiendo una posible sobreproducción de metano para uso residencial, este debería ser liberado a la atmósfera para evitar un percance. Sin embargo, en lugar de ser liberado, éste podría ser utilizado inclusive en aplicaciones automotrices, pues existen vehículos impulsados por gas natural, L.P. y biogás. Motivo por el cual también se experimentó con la creación de algunos agentes catalizadores de metano, los cuales fueron:

- Catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2 .
- Catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 .

Los catalizadores fueron preparados en el laboratorio de catálisis avanzada en el Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

De manera general y resumida, se prepararon mediante el siguiente procedimiento:

- Pesaje del material de soporte:
 - TiO_2
 - ZrO_2 .
- Adición de agua destilada al material base en un vaso.
- Colocación del vaso con la mezcla con agitación lenta.
- Agregar a la solución los metales:
 - 0.5% Platino, 0.5% Paladio
 - 2% Platino, Paladio 2%
- Se deja en agitación durante 10 minutos.
- Posteriormente, se calienta la mezcla hasta 50°C durante una hora.

- Se eleva la temperatura hasta 80°C y se supervisa hasta la evaporación, tal como se refiere en la figura 99.

Figura 99

Preparación de catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO₂



- Posterior a la evaporación, se deja reposar la preparación en un desecador por entre 1 – 2 días, consecuentemente se raspa el polvo seco y se traslada a un crisol para calcinación.
- El polvo seco se deberá calcinar a 500°C en mufla con su correspondiente curva de calentamiento:
 - 50°C durante 5 minutos.
 - Incrementar 50°C cada 10 minutos hasta lograr los 500°C.
 - Una vez alcanzados los 500°C, el catalizador deberá permanecer en esa temperatura durante 2 horas.
- Sacar el catalizador hasta que la mufla esté fría, tal como se refiere en la figura 100.

Figura 100

Catalizador en crisol para calcinación dentro de mufla



- Envasar, tal como se observa en la figura 101.

Figura 101

Catalizador envasado



Una vez obtenido el catalizador, este fue evaluado en el cromatógrafo de gases haciéndolo reaccionar con metano mediante un horno tubular, tal como se refiere en la figura 102, bajo las siguientes condiciones de reacción:

Flujo de reacción = 100 mL/min

% CH₄ (metano) = 2

% O₂ (Oxígeno) = 10

Balance % N₂ (nitrógeno) = 88

Figura 102

Catalizador reaccionando con metano en horno tubular previo a su evaluación en cromatógrafo de gases Shimadzu GC-14B



obteniendo los siguientes resultados:

Se analizaron 3 muestras en el cromatógrafo de gases para el catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO₂ donde se observó:

Tabla 6

Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra 1 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2

| Muestra 1 | | |
|-------------|--------------------|-------------|
| Temperatura | [CH ₄] | %Conversión |
| 25 | 0.147 | 0.0000 |
| 47 | 0.1162 | 20.9524 |
| 103 | 0.1646 | -11.9728 |
| 168 | 0.1598 | -8.7075 |
| 230 | 0.1682 | -14.4218 |
| 280 | 0.1242 | 15.5102 |
| 324 | 0.1692 | -15.1020 |
| 360 | 0.1784 | -21.3605 |
| 400 | 0.1204 | 18.0952 |
| 449 | 0.1792 | -21.9048 |
| 507 | 0.1626 | -10.6122 |

Figura 103

Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra 1 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2

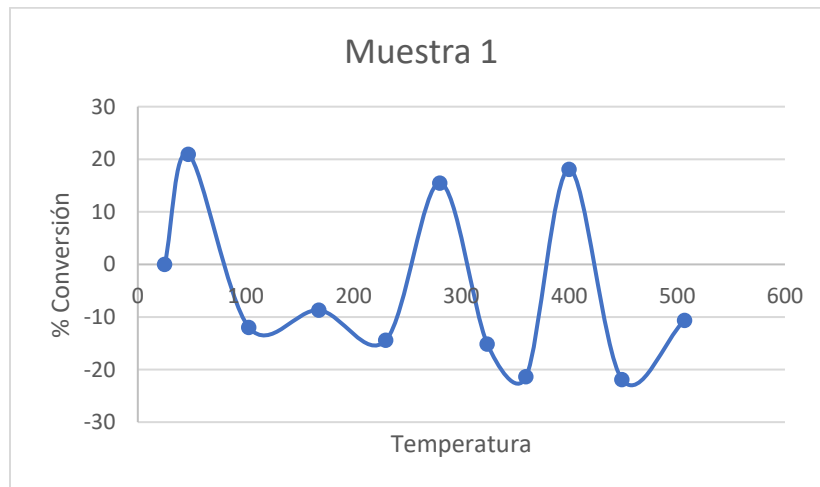


Tabla 7

Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra 2 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2

| Muestra 2 | | |
|-------------|--------------------|-------------|
| Temperatura | [CH ₄] | %Conversión |
| 25 | 0.1101 | 0.0000 |
| 50 | 0.0964 | 12.4432 |
| 97 | 0.0763 | 30.6994 |
| 156 | 0.1084 | 1.5441 |
| 187 | 0.1136 | -3.1789 |
| 251 | 0.0823 | 25.2498 |
| 299 | 0.1184 | -7.5386 |
| 347 | 0.1078 | 2.0890 |
| 403 | 0.1269 | -15.2589 |
| 454 | 0.129 | -17.1662 |
| 499 | 0.1205 | -9.4460 |

Figura 104

Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra 2 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2

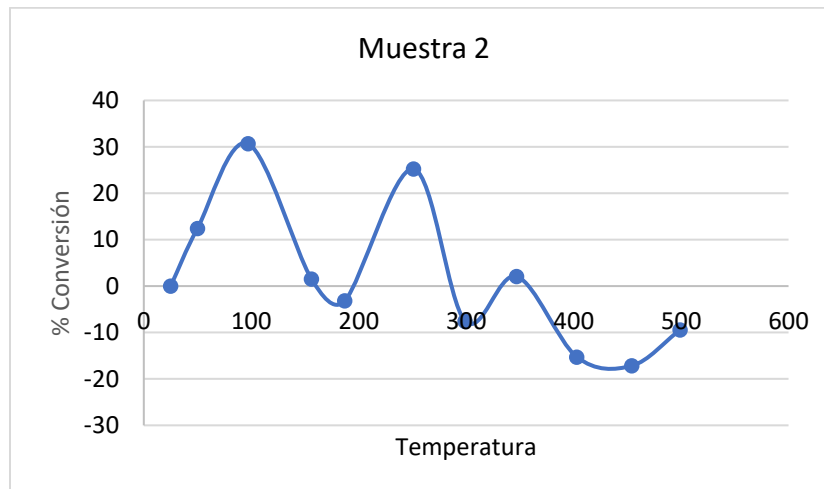


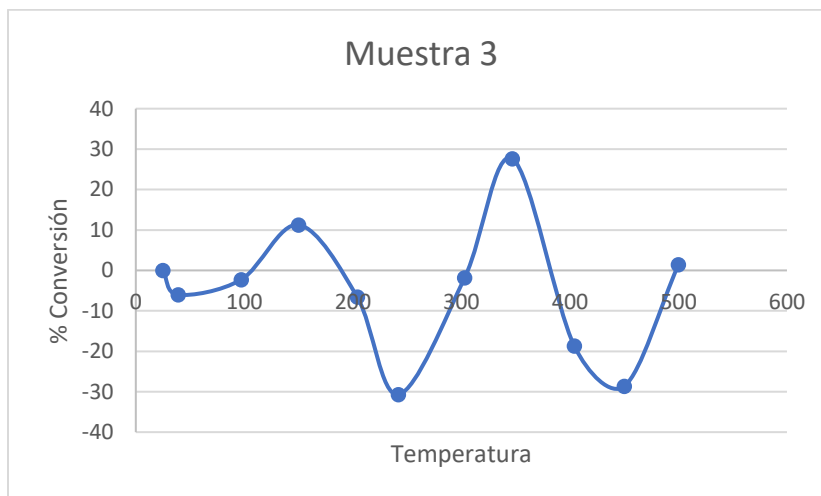
Tabla 8

Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra 3 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2

| Muestra 3 | | |
|-------------|--------------------|-------------|
| Temperatura | [CH ₄] | %Conversión |
| 25 | 0.143 | 0.0000 |
| 39 | 0.1516 | -6.0140 |
| 97 | 0.1463 | -2.3077 |
| 150 | 0.1269 | 11.2587 |
| 204 | 0.1524 | -6.5734 |
| 242 | 0.1869 | -30.6993 |
| 303 | 0.1456 | -1.8182 |
| 347 | 0.1035 | 27.6224 |
| 404 | 0.1697 | -18.6713 |
| 450 | 0.184 | -28.6713 |
| 500 | 0.141 | 1.3986 |

Figura 105

Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra 3 del catalizador 0.5% Platino, 0.5% Paladio, depositado en TiO_2



Debido a que no se observó un porcentaje de conversión significativo, ni a altas temperaturas, el catalizador se descartó para este propósito de investigación.

Se analizó una muestra en el cromatógrafo de gases para el catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 donde se observó:

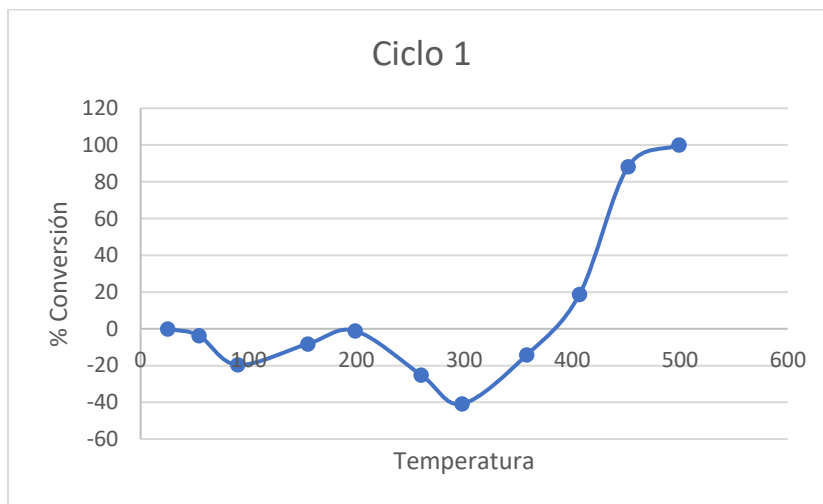
Tabla 9

Valores de temperatura, metano y porcentaje de conversión de la muestra del catalizador
2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2

| Muestra 1 | | |
|-------------|--------------------|-------------|
| Temperatura | [CH ₄] | %Conversión |
| 25 | 0.1355 | 0.0000 |
| 54 | 0.1405 | -3.6900 |
| 90 | 0.1621 | -19.6310 |
| 155 | 0.1466 | -8.1919 |
| 199 | 0.137 | -1.1070 |
| 260 | 0.1695 | -25.0923 |
| 298 | 0.1908 | -40.8118 |
| 358 | 0.1548 | -14.2435 |
| 407 | 0.11 | 18.8192 |
| 452 | 0.0159 | 88.2657 |
| 499 | 0 | 100.0000 |

Figura 106

Gráfica de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2



Derivado a que desde los 300°C se observa un porcentaje de conversión considerable, se determina tomar valores parciales de la muestra, tal como se refiere en la tabla 10:

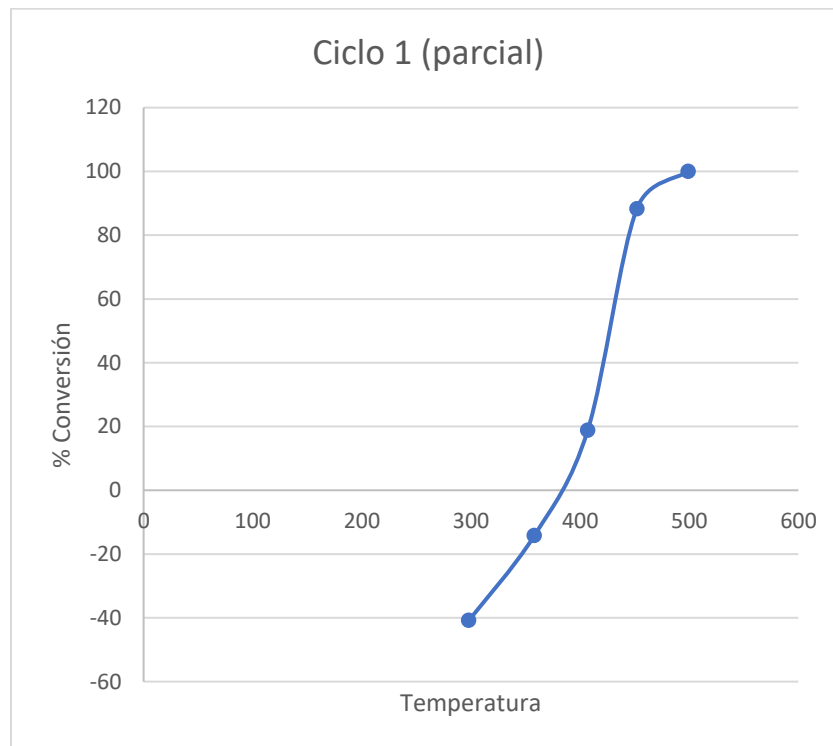
Tabla 10

Valores parciales de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2

| Ciclo 1 (parcial) | | |
|-------------------|--------------------|-------------|
| Temperatura | [CH ₄] | %Conversión |
| 25 | 0.1355 | |
| 298 | 0.1908 | -40.8118 |
| 358 | 0.1548 | -14.2435 |
| 407 | 0.11 | 18.8192 |
| 452 | 0.0159 | 88.2657 |
| 499 | 0 | 100.0000 |

Figura 107

Gráfica parcial de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2



Ya que el valor 0% de conversión se encuentra en teóricos -40%, se debe de realizar una reescalación, tal como se presenta en la tabla 11.

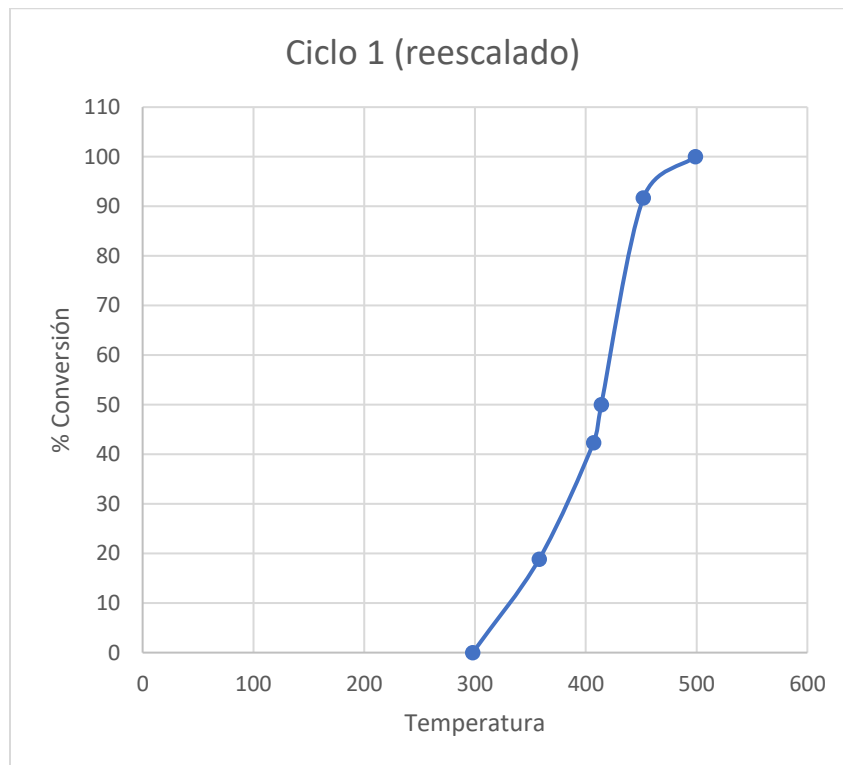
Tabla 11

Valores parciales reescalados de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%,
depositado en ZrO_2

| Ciclo 1 (parcial, reescalado) | |
|-------------------------------|-------------|
| Temperatura | %Conversión |
| 298 | 0 |
| 358 | 19 |
| 407 | 42 |
| 452 | 92 |
| 499 | 100 |

Figura 108

Gráfica parcial reescalada de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2



Y finalmente se busca el Light-off 50 mediante una interpolación, tal como se presenta en la tabla 12.

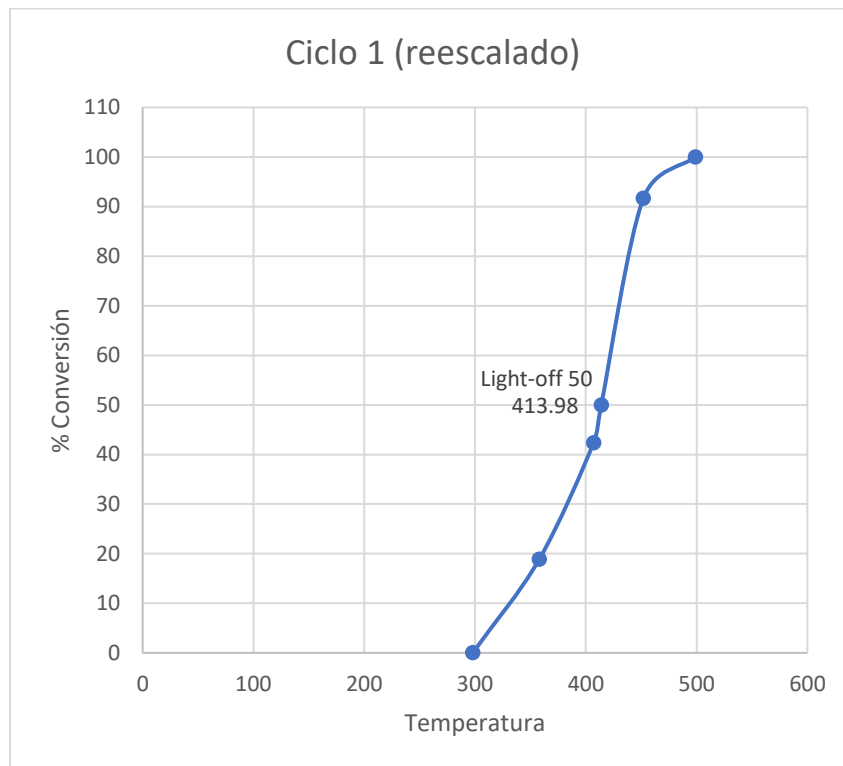
Tabla 12

Valores parciales reescalados de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 , con interpolación en 50% de valor de conversión

| Ciclo 1 (parcial, reescalado) | |
|-------------------------------|--------------------|
| Temperatura | %Conversión |
| 298 | 0 |
| 358 | 19 |
| 407 | 42 |
| 413.98 | (Interpolación) 50 |
| 452 | 92 |
| 499 | 100 |

Figura 109

Gráfica parcial reescalada de temperatura con respecto al porcentaje de conversión de la muestra del catalizador 2% Platino, Paladio 2%, depositado en ZrO_2 interpolada para hallar el Light-off 50

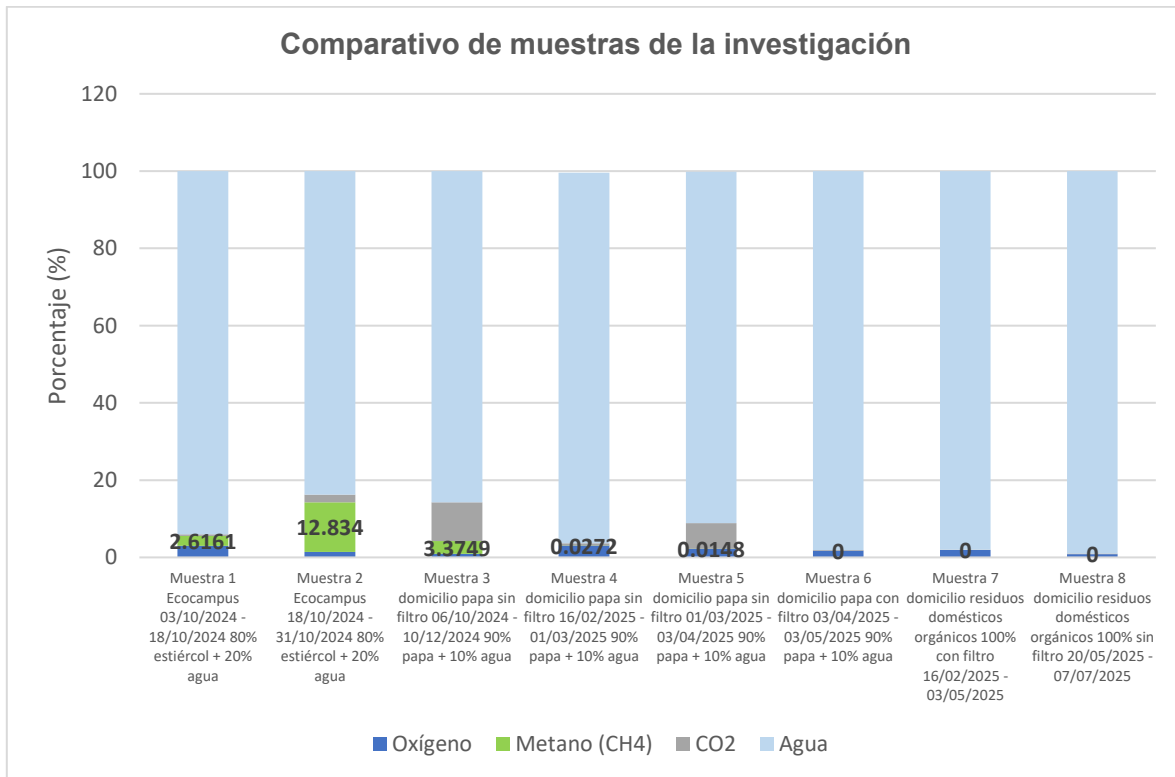


DISCUSIÓN

Para poder iniciar una discusión, se ha preparado un breve resumen de los resultados enfocados a la producción del metano, dichos resultados se pueden conceptualizar en la figura 110.

Figura 110

Comparativo de muestras de la investigación enfocadas en la producción de metano



La muestra 2 Ecocampus 18/10/2024 - 31/10/2024 80% estiércol + 20% agua tiene el valor más alto: 12.834%, mientras que otras muestras con papa o residuos orgánicos tienen valores cercanos a 0%. ¿Por qué el estiércol genera tanto metano comparado con la papa o residuos domésticos? ¿Son acaso las diferencias en el contenido de carbono y nitrógeno o la actividad microbiana es más intensa en estiércol o las condiciones anaerobias son más favorables?

Las muestras 6, 7 y 8 (con filtro) muestran 0% metano, mientras que las sin filtro (muestras 3, 4, 5) sí producen algo, aunque bajo. ¿El uso de filtros elimina el metano o evita su acumulación? ¿El filtro podría estar oxidando metano o reteniéndolo? ¿Es esto positivo para reducir gases de efecto invernadero o negativo para la eficiencia energética si se busca biogás?

La muestra 2 (alta producción) tuvo un periodo corto (13 días), mientras que muestras con periodos largos (muestra 8, casi 50 días) tienen 0% metano. ¿El tiempo prolongado reduce la producción de metano por agotamiento del sustrato? ¿Los microorganismos consumen metano en etapas posteriores? ¿Las condiciones aeróbicas pueden aparecer con el tiempo? En esta investigación considero que sí, ya que se presentaron múltiples fugas.

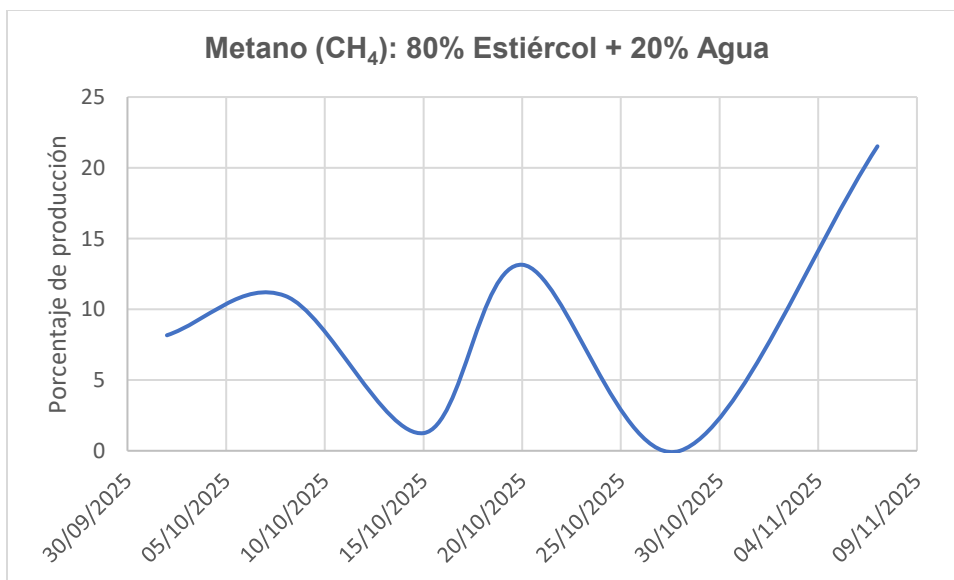
El estiércol claramente produce más metano, pero ¿qué pasa con la disponibilidad y costo? La papa y los residuos domésticos son más accesibles para un hogar, pero claramente se observa que son menos eficientes.

La alta producción de metano = mayor potencial energético, pero también mayor impacto climático si no se captura. ¿Es mejor maximizar metano para energía o minimizarlo para reducir emisiones? El balance entre energía renovable y mitigación de gases de efecto invernadero deberá equilibrarse con el desarrollo de tecnologías para captura y uso del metano.

Del mismo modo, se preparó un breve resumen de los resultados de la 4ª carga: 80% estiércol + 20% de agua, la cual fue más controlada y sin tantas variables a considerar, dichos resultados se pueden observar en la figura 111.

Figura 111

Porcentaje de producción de metano en la 4ª carga de estudio: 80% estiércol + 20% de agua



Se observan picos y caídas abruptas, incluso un valor cero el 28/10/2025. ¿Qué factores causan estas variaciones? Probablemente puede deberse a cambios en el pH del sistema o a la alteración en la carga orgánica o humedad.

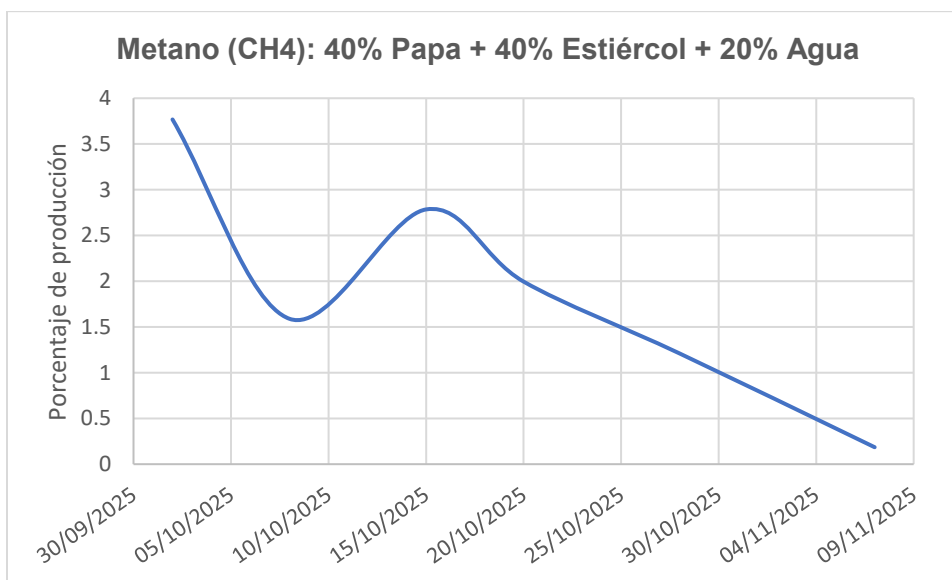
El valor más alto (21.518%) ocurre después de un periodo con cero metano. ¿Por qué el sistema se recupera y produce más metano después de un colapso? Pudo haber sido la reactivación de microorganismos metanogénicos o la acumulación de sustrato no degradado durante la fase de baja actividad, inclusive el ajuste en condiciones externas tales como la temperatura o la agitación, pues este modelo carecía una agitación automatizada y se agitaba de forma manual ocasionalmente.

El valor cero indica posible liberación de CO_2 en lugar de CH_4 . ¿Qué pasa con las emisiones cuando el metano cae? ¿Se incrementa la producción de otros gases? ¿Cómo afecta la huella de carbono del proceso?

Así mismo, también preparé un breve resumen de los resultados de la 4° carga, pero con la variable: 40% Papa + 40% Estiércol + 20% Agua, la cual fue más controlada y sin tantas variables a considerar, dichos resultados se pueden observar en la figura 112.

Figura 112

Porcentaje de producción de metano en la 4° carga de estudio: 40% Papa + 40% Estiércol + 20% Agua



A diferencia del sustrato anterior (con picos y un máximo tardío), aquí hay una tendencia general descendente. ¿Por qué este sistema pierde capacidad metanogénica

con el tiempo? Es probable que el sustrato haya sido pobre en carbono o de agotamiento rápido. Aunque no corresponde con lo que reporta la literatura.

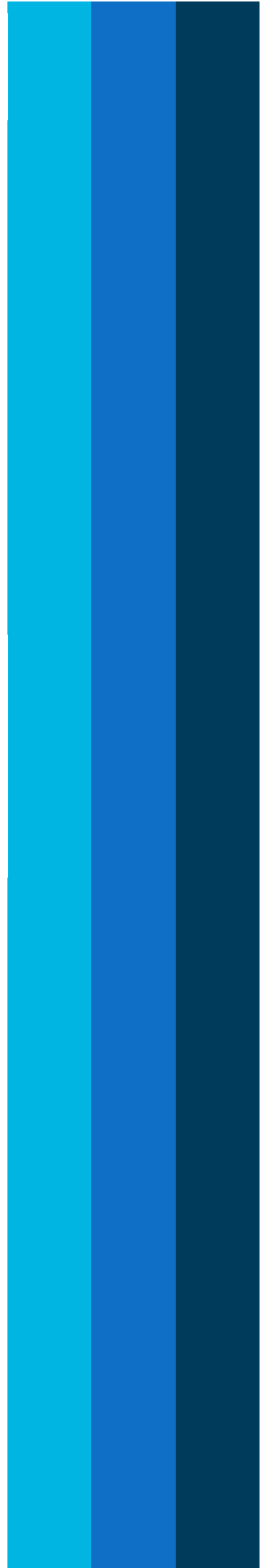
Si el sistema tiende a cero, ¿vale la pena mantenerlo activo? ¿Es mejor reinocular o reemplazar el sustrato? Este es un diseño meramente experimental y de investigación, pero en caso de escalarse, vale la pena evaluar los costos vs beneficios de reinicio.

¿Qué parámetro fue crítico para que no se reactive como el anterior?
Probablemente la diferente relación C/N.

==== ◆ ◆ ◆ =====

CONCLUSIONES

==== ◆ ◆ ◆ =====



El presente trabajo cumplió con el objetivo planteado: evaluar la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos domésticos mediante digestión anaerobia y analizar su viabilidad como combustible en quemadores residenciales. La investigación se desarrolló en respuesta a la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles, cuyos precios en México alcanzan en promedio \$10.60 MXN por litro de gas LP y \$77.94 MXN/GJ para gas natural, así como disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a su uso.

La metodología implementada consistió en el diseño y construcción de un biodigestor tipo Batch, instrumentado con sensores para monitorear variables críticas: temperatura, pH, presión y concentración de metano, controladas mediante el software Arduino IDE. El sistema incluyó un mecanismo de agitación semicontinua, filtrado con carbón activado y cloruro de calcio, y almacenamiento en una cámara de llanta. El costo total de los 2 prototipos fue de \$6,413.79 MXN, lo que lo convierte en una alternativa accesible para aplicaciones domésticas.

Los resultados experimentales demostraron la viabilidad técnica del sistema. En la primera carga de estudio (26 kg de estiércol vacuno + 4 kg de agua), el análisis cromatográfico reveló un incremento significativo en la concentración de metano: de 2.48 % en el periodo inicial a 12.17 % en el segundo periodo, acompañado de una reducción del oxígeno y un aumento del CO₂, lo que confirma la correcta evolución del proceso anaerobio. El monitoreo digital mostró concentraciones superiores a 10,000 ppm de CH₄, suficientes para su uso en quemadores residenciales. El pH inicial (10.7) descendió hasta estabilizarse en torno a 5.5, condición que favoreció la actividad metanogénica. En cargas posteriores con cáscaras de papa y basura orgánica, se observó una producción sostenida de biogás, confirmando la adaptabilidad del sistema a diferentes sustratos.

Desde el punto de vista ambiental, la propuesta contribuye a la mitigación de GEI al capturar metano que, de otro modo, se liberaría a la atmósfera desde residuos en descomposición. Además, el digestato residual se identificó como un subproducto útil para la fertilización de suelos, lo que refuerza el enfoque de economía circular. Socialmente, el sistema ofrece una solución para comunidades rurales, permitiendo la generación de energía a partir de desechos locales y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

En términos económicos, el análisis preliminar indica que la producción de biogás puede resultar competitiva frente al gas LP, especialmente considerando el incremento constante en los precios de este combustible. Si bien el prototipo se desarrolló a escala

laboratorio, su costo y simplicidad sugieren que, con mejoras en diseño y materiales, podría implementarse en hogares con una inversión moderada.

No obstante, se identificaron limitaciones durante la investigación. Entre ellas, la dificultad para mantener condiciones óptimas de temperatura en ambientes no controlados, la presencia de fugas en conexiones iniciales y la necesidad de purificación adicional para eliminar trazas de ácido sulfhídrico (H_2S). Asimismo, el tiempo de retención hidráulica (60 días por carga) representa un desafío para aplicaciones que demandan suministro continuo de gas.

Como perspectivas futuras, se recomienda:

- Diseñar sistemas modulares con tres biodigestores en serie, operando de manera desfasada para garantizar producción continua.
- Implementar sistemas de calentamiento y aislamiento térmico para optimizar la digestión en climas fríos.
- Incorporar columnas de purificación con óxidos metálicos (ZnO y Fe_2O_3) para mejorar la calidad del biogás.
- Realizar estudios de escalamiento y análisis económico comparativo frente a gas LP y gas natural en diferentes regiones del país.

Finalmente, este proyecto representa un parteaguas para continuar con mi línea de investigación, ya que el tema me ha fascinado y deseo profundizarlo en un doctorado. Mi visión a futuro es que existan biodigestores en cada hogar, tal como hoy se instalan paneles y calentadores solares, contribuyendo a la autosuficiencia energética y a la reducción del impacto ambiental. Este trabajo no solo demuestra la viabilidad técnica del sistema, sino que abre la puerta a una transformación energética sostenible y descentralizada.

En conclusión, la producción de biogás a partir de residuos orgánicos domésticos es una alternativa **técnicamente viable, ambientalmente sostenible y económicamente prometedora**. Su implementación a nivel doméstico y comunitario puede contribuir significativamente a la transición hacia energías renovables, la reducción de emisiones y la gestión eficiente de residuos, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad energética.

BIBLIOGRAFÍA

- (Rembio), R. M. (2012). *Producción de biogás en México, estado actual y perspectivas*. Obtenido de Producción de biogás en México, estado actual y perspectivas: <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT5.pdf>
- (SENER), S. d. (2011). *Estrategia nacional para la transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía*. Obtenido de Estrategia nacional para la transición energética y el aprovechamiento sustentable de la energía: <http://www.gob.mx/sener>
- (SENER), S. d. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2013–2027*. Obtenido de <http://www.gob.mx/sener>
- Alburquerque, J., de la Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, L., Abad, M., & Bernal, M. (2012). *Assessment of the fertilizer potential of digestates from farm and agroindustrial residues*. Obtenido de Biomass Bioenerg. 40: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.018>
- Alcayaga, S., Glaría, J., & Guerrero, L. (1999). Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida. En S. Alcayaga, J. Glaría, & L. Guerrero, *Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida* (pág. 11). Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Arduino. (5 de 02 de 2018). *About Arduino*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Arvizu, J. L., & Huacuz, J. M. (2003). Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. En J. L. Arvizu, & J. M. Huacuz, *Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad* (págs. Boletín IIE 27 (4): 118–23).
- Barros, R. M. (2013). Tratado sobre Resíduos Sólidos: Gestão, Uso, e Sustentabilidade. En R. M. Barros, *Interciência; Minas Gerais: Acta*. Rio de Janeiro.
- Batstone, D., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S., Pavlostathis, S., Rozzi, A., . . . Vavilin, V. (2002). Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM 1). *Scientific and Technical Report No. 13*.
- Brown, R. M. (1983). *Sudden Death*.
- Budiyono, B., Nyoman, W., Seno, J., & Sunarso, S. (2014). *Increasing biogas production rate from cattle manure using rumen fluid as inoculums*. *Inter. J. Basic. Appl.* Obtenido de Increasing biogas production rate from cattle manure using rumen fluid as inoculums. *Inter. J. Basic. Appl.*: <https://doi.org/10.12777/ijse.6.1.31-38>

- Deubleien, D., & Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable resources. En D. Deubleien, & A. Steinhauser, *Biogas from waste and renewable resources* (pág. 578). Alemania: Wiley-VCH.
- El Mashad, H., & Zhang, R. (s.f.). *Libre Text Español*. Obtenido de Libre Text Español:
[https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Ingenieria/Ingenieria_Biologica/Introducci%C3%B3n_a_la_Ingenier%C3%ADa_de_Biosystems_\(Holden_et_al.\)/01%3A_Sistemas_de_Energ%C3%ADa/1.02%3A_Energ%C3%ADa_de_biog%C3%A1s_a_partir_de_desechos_org%C3%A1nicos](https://espanol.libretexts.org/Bookshelves/Ingenieria/Ingenieria_Biologica/Introducci%C3%B3n_a_la_Ingenier%C3%ADa_de_Biosystems_(Holden_et_al.)/01%3A_Sistemas_de_Energ%C3%ADa/1.02%3A_Energ%C3%ADa_de_biog%C3%A1s_a_partir_de_desechos_org%C3%A1nicos)
- Energía, C. R. (15 de Junio de 2025). *Comisión Reguladora de Energía > Documentos*. Obtenido de Comisión Reguladora de Energía > Documentos:
<https://www.gob.mx/cre/documentos/historial-de-precios-promedio-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>
- Ershad, U., & Martin, A. (2016). *Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. Renew. Sustain. Ener.* Obtenido de Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. Renew. Sustain. Ener.:
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.044>
- Escobar, J., Rúa, D., Silva, E., Venturini, O., & Mambeli, R. (2015). Procesos biológicos de conversión, Capítulo 4. *La Red Iberoamericana de Energía*, 135.
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., & Panico, A. (2012). *Anaerobic co-digestion of organic wastes. Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* Obtenido de Anaerobic co-digestion of organic wastes. Rev. Environ. Sci. Biotechnol.:
<https://doi.org/10.1007/s11157-012-9277-8>
- FAO. (2011). *Manual de biogás*. FAO.
- Flotats, X., Campos, E., Palatsi, J., & Bonmatí, A. (2001). Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria. En X. Flotats, E. Campos, J. Palatsi, & A. Bonmatí, *Digestión anaerobia de purines de cerdo y codigestión con residuos de la industria alimentaria* (pág. 65). Monografías de actualidad.
- Foster Scott, E. D. (s.f.). *Crónica ONU*. Obtenido de Crónica ONU:
<https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- Guevara V., A. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes. En A. Guevara V., *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes* (pág. 80). Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - Organización Panamericana de la Salud.

- Karki, A., Shrestha, J., & Bajgain, S. (2005). *Biogas as Renewable Source of Energy in Nepal: Theory and Development*. Kathmandu: BSP-Nepal.
- Khalid, A., Muhammad, A., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, vol. 31, n. 8, 1737-1744.
- Kusch, S., Oechsner, H., & Jungbluth, T. (2011). Effect of various leachate recirculation strategies on batch anaerobic digestion of solid substrates. *International Journal of Environment and Waste Management*, Vol. 9, No. 1-2.
- Li, Y., Park, S., & Zhu, J. (2011). Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 1, 821-826.
- Madsen, M., J., H.-N., & Esbensen, K. (2011). "Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 6, 3141-3155.
- Mandujano, M. I., Félix, A., & Martínez, A. (1981). *Biogas, Energía y Fertilizante a partir de desechos orgánicos*. México: OLADE, Serie de publicaciones especiales N 6.
- Monroy, O., Famá, G., Meraz, M., Montoya, L., & Macarie, H. (2000). Anaerobic digestion for wastewater treatment in Mexico: state of the technology. En O. Monroy, G. Famá, M. Meraz, L. Montoya, & H. Macarie, *Anaerobic digestion for wastewater treatment in Mexico: state of the technology* (págs. 1803-16). *Water Res* 34 (6).
- Nielsen, H., Mladenovska, Z., Westerman, P., & Ahring, B. (2004). Comparison of two-stage thermophilic (68 degrees C / 55 degrees C) anaerobic digestion with one-stage thermophilic (55 degrees C) digestion of cattle manure. En H. Nielsen, Z. Mladenovska, P. Westerman, & B. Ahring, *Comparison of two-stage thermophilic (68 degrees C / 55 degrees C) anaerobic digestion with one-stage thermophilic (55 degrees C) digestion of cattle manure* (págs. 291-300). *Biotechnology and Bioengineering*.
- Oh, T., Shinogi, Y., Lee, S., & Choi, B. (2014). *Utilization of biochar impregnated with anaerobically digested slurry as slow-release fertilizer*. *J. Plant Nutr. Soil Sci*. Obtenido de Utilization of biochar impregnated with anaerobically digested slurry as slow-release fertilizer. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*: <https://doi.org/10.1002/jpln.201200487>
- Raposo, F., De La Rubia, M., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2012). "Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n. 1, 86.

- Reyes Aguilera, E. A. (2016). Producción de biogás a partir de Biomasa. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 11-22.
- Rivas Solano, O., Faith Vargas, M., & Guillén Watson, R. (2010). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en Marcha*, 40.
- Rural, I. d. (2021). *Manual para la producción de biogás*. Obtenido de <https://docer.com.ar/nvnee0s>
- Sierra, H. (2017). Purificación y usos del biogás. En G. D. Sierra H., *Purificación y usos del biogás* (pág. 19). Barcelona, Spain: Universitat Autònoma de Barcelona.
- Singh, R. B. (1974). *The biogas plant. Generating methane from organic wastes*. Ajitmal, India: U.P.
- Suhartini, S. N. (2020). Estimation of biogas production and the emission savings from anaerobic digestion of fruit-based agro-industrial waste and agricultural crops residues. *Bio-Energy Research*, 844-859. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10209-5>
- Teniza-García, O., Solís-Oba, M., Pérez-López, M., González-Prieto, J., & Valencia-Vázquez, R. (2015). Producción de metano utilizando residuos cunícolas. En O. Teniza-García, M. Solís-Oba, M. Pérez-López, J. González-Prieto, & R. Valencia-Vázquez, *Producción de metano utilizando residuos cunícolas* (págs. 321-334). México: Rev. Mex. Ing. Quim. 5.
- Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: Ministerio de energía, Gobierno de Chile.
- Weber, B. (2012). Producción de biogás en México - Estado actual y perspectivas. En B. Weber, M. Rojas Oropeza, M. Torres Bernal, & L. Pampillón González, *Producción de biogás en México* (pág. 5). México: Red Mexicana de Bioenergía.
- Weiland, P. (2010). Appl Microbiol Biotechnol 85. *Producción de biogás: estado actual y perspectivas*, 849–860. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Werner, E. (1983). *Bioconversión: Producción de energía utilizando desperdicios agrícolas*. La Paz, Bolivia: FAO.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

| Actividad | 2023 | | | | | 2024 | | | | | | | | | | | | 2025 | | | | | | |
|--|------|---|----|----|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------|---|---|---|---|---|---|
| | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Investigación científica. | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Documentación bibliográfica. | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Búsqueda y selección de recipiente "biodigestor". | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Investigación y selección de sensores para biodigestor. | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fabricación de sistema de producción y transporte de gas metano. | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Actualización en el uso e implementación del sistema Arduino IDE. | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | |
| Creación del programa de monitoreo de producción, transporte y almacenamiento de biogás. | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Incorporación del sistema de almacenamiento de gas metano al sistema de transporte y producción. | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Ajuste de parámetros y establecimiento de ceros en sensores. | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Fabricación e incorporación del sistema de agitación. | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Instrumentación del sistema. | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| Pruebas preliminares y carga de blanco | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | |
| Investigación y definición de parámetros para cargas de estudio. | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| Caracterización y estudio de los resultados obtenidos en las cargas. | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| Compendio, análisis y comparación de resultados. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | | |
| Generación de conclusiones. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | |



ANEXOS



Hojas de datos de los sensores

Sensor de temperatura

PRELIMINARY

DS18B20
Programmable Resolution
1-Wire[®] Digital Thermometer

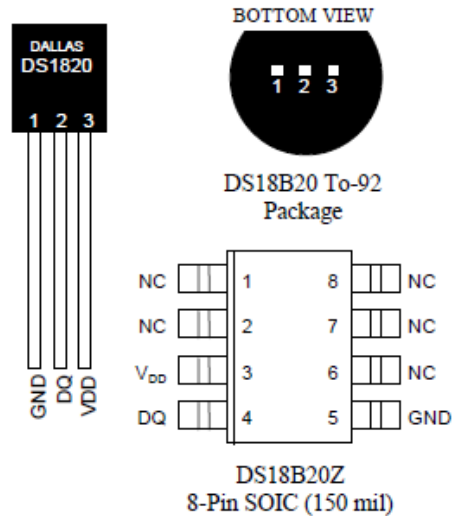


www.dalsemi.com

FEATURES

- Unique 1-Wire interface requires only one port pin for communication
- Multidrop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- Can be powered from data line. Power supply range is 3.0V to 5.5V
- Zero standby power required
- Measures temperatures from -55°C to +125°C. Fahrenheit equivalent is -67°F to +257°F
- $\pm 0.5^\circ\text{C}$ accuracy from -10°C to +85°C
- Thermometer resolution is programmable from 9 to 12 bits
- Converts 12-bit temperature to digital word in 750 ms (max.)
- User-definable, nonvolatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Applications include thermostatic controls, industrial systems, consumer products, thermometers, or any thermally sensitive system

PIN ASSIGNMENT



PIN DESCRIPTION

- GND - Ground
- DQ - Data In/Out
- V_{DD} - Power Supply Voltage
- NC - No Connect

DESCRIPTION

The DS18B20 Digital Thermometer provides 9 to 12-bit (configurable) temperature readings which indicate the temperature of the device.

Information is sent to/from the DS18B20 over a 1-Wire interface, so that only one wire (and ground) needs to be connected from a central microprocessor to a DS18B20. Power for reading, writing, and performing temperature conversions can be derived from the data line itself with no need for an external power source.

Because each DS18B20 contains a unique silicon serial number, multiple DS18B20s can exist on the same 1-Wire bus. This allows for placing temperature sensors in many different places. Applications where this feature is useful include HVAC environmental controls, sensing temperatures inside buildings, equipment or machinery, and process monitoring and control.

DS18B20

DETAILED PIN DESCRIPTION Table 1

| PIN 8PIN SOIC | PIN TO92 | SYMBOL | DESCRIPTION |
|------------------|-------------|-----------------|--|
| 5 | 1 | GND | Ground. |
| 4 | 2 | DQ | Data Input/Output pin. For 1-Wire operation: Open drain. (See "Parasite Power" section.) |
| 3 | 3 | V _{DD} | Optional V _{DD} pin. See "Parasite Power" section for details of connection. V _{DD} must be grounded for operation in parasite power mode. |

DS18B20Z (8-pin SOIC): All pins not specified in this table are not to be connected.

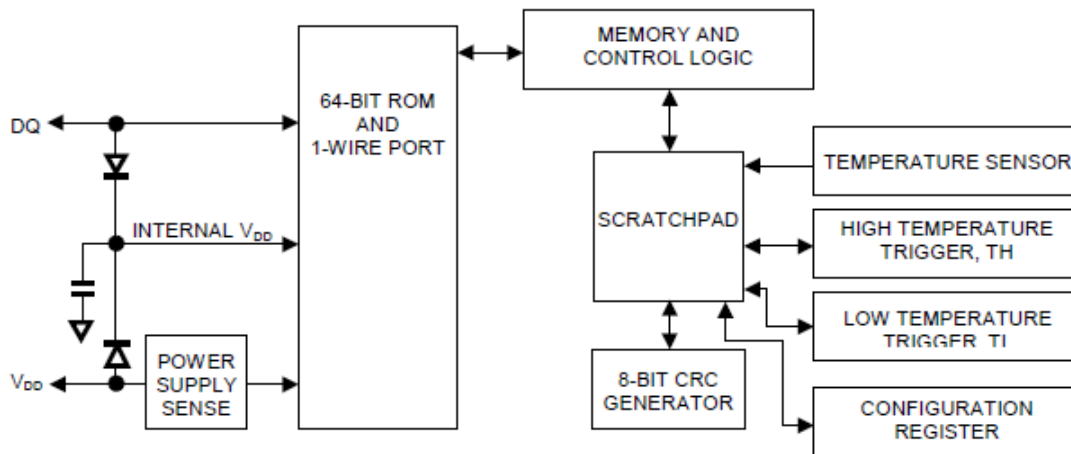
OVERVIEW

The block diagram of Figure 1 shows the major components of the DS18B20. The DS18B20 has four main data components: 1) 64-bit lasered ROM, 2) temperature sensor, 3) nonvolatile temperature alarm triggers TH and TL, and 4) a configuration register. The device derives its power from the 1-Wire communication line by storing energy on an internal capacitor during periods of time when the signal line is high and continues to operate off this power source during the low times of the 1-Wire line until it returns high to replenish the parasite (capacitor) supply. As an alternative, the DS18B20 may also be powered from an external 3 volt - 5.5 volt supply.

Communication to the DS18B20 is via a 1-Wire port. With the 1-Wire port, the memory and control functions will not be available before the ROM function protocol has been established. The master must first provide one of five ROM function commands: 1) Read ROM, 2) Match ROM, 3) Search ROM, 4) Skip ROM, or 5) Alarm Search. These commands operate on the 64-bit lasered ROM portion of each device and can single out a specific device if many are present on the 1-Wire line as well as indicate to the bus master how many and what types of devices are present. After a ROM function sequence has been successfully executed, the memory and control functions are accessible and the master may then provide any one of the six memory and control function commands.

One control function command instructs the DS18B20 to perform a temperature measurement. The result of this measurement will be placed in the DS18B20's scratch-pad memory, and may be read by issuing a memory function command which reads the contents of the scratchpad memory. The temperature alarm triggers TH and TL consist of 1 byte EEPROM each. If the alarm search command is not applied to the DS18B20, these registers may be used as general purpose user memory. The scratchpad also contains a configuration byte to set the desired resolution of the temperature to digital conversion. Writing TH, TL, and the configuration byte is done using a memory function command. Read access to these registers is through the scratchpad. All data is read and written least significant bit first.

DS18B20 BLOCK DIAGRAM Figure 1



PARASITE POWER

The block diagram (Figure 1) shows the parasite-powered circuitry. This circuitry “steals” power whenever the DQ or V_{DD} pins are high. DQ will provide sufficient power as long as the specified timing and voltage requirements are met (see the section titled “1-Wire Bus System”). The advantages of parasite power are twofold: 1) by parasiting off this pin, no local power source is needed for remote sensing of temperature, and 2) the ROM may be read in absence of normal power.

In order for the DS18B20 to be able to perform accurate temperature conversions, sufficient power must be provided over the DQ line when a temperature conversion is taking place. Since the operating current of the DS18B20 is up to 1.5 mA, the DQ line will not have sufficient drive due to the 5k pullup resistor. This problem is particularly acute if several DS18B20s are on the same DQ and attempting to convert simultaneously.

There are two ways to assure that the DS18B20 has sufficient supply current during its active conversion cycle. The first is to provide a strong pullup on the DQ line whenever temperature conversions or copies to the E² memory are taking place. This may be accomplished by using a MOSFET to pull the DQ line directly to the power supply as shown in Figure 2. The DQ line must be switched over to the strong pull-up within 10 μs maximum after issuing any protocol that involves copying to the E² memory or initiates temperature conversions. When using the parasite power mode, the V_{DD} pin must be tied to ground.

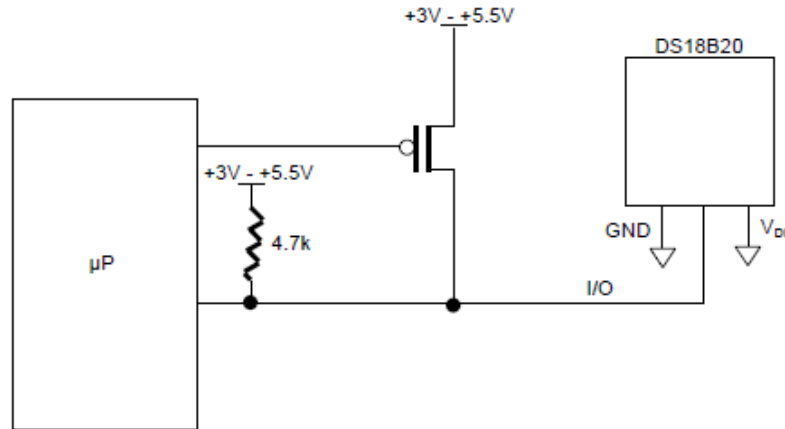
Another method of supplying current to the DS18B20 is through the use of an external power supply tied to the V_{DD} pin, as shown in Figure 3. The advantage to this is that the strong pullup is not required on the DQ line, and the bus master need not be tied up holding that line high during temperature conversions. This allows other data traffic on the 1-Wire bus during the conversion time. In addition, any number of DS18B20s may be placed on the 1-Wire bus, and if they all use external power, they may all simultaneously perform temperature conversions by issuing the Skip ROM command and then issuing the Convert T command. Note that as long as the external power supply is active, the GND pin may not be floating.

The use of parasite power is not recommended above 100°C, since it may not be able to sustain communications given the higher leakage currents the DS18B20 exhibits at these temperatures. For applications in which such temperatures are likely, it is strongly recommended that V_{DD} be applied to the DS18B20.

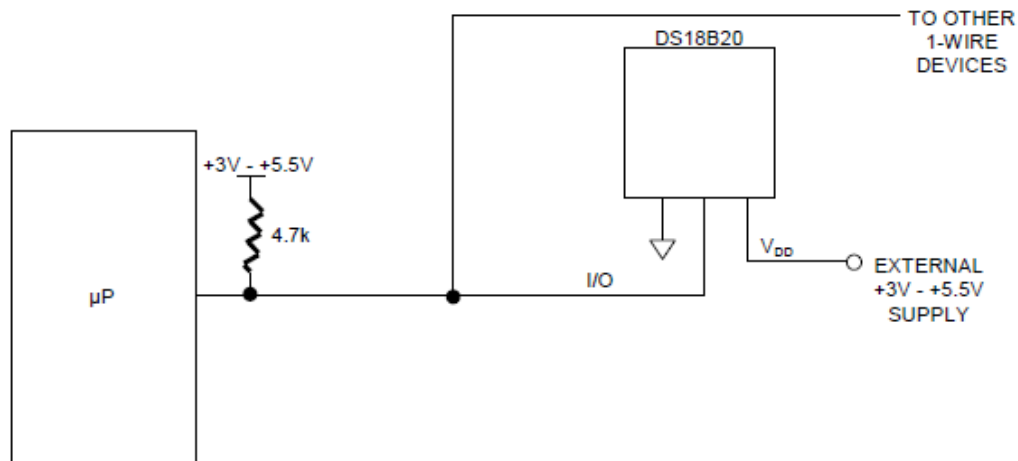
DS18B20

For situations where the bus master does not know whether the DS18B20s on the bus are parasite powered or supplied with external V_{DD} , a provision is made in the DS18B20 to signal the power supply scheme used. The bus master can determine if any DS18B20s are on the bus which require the strong pullup by sending a Skip ROM protocol, then issuing the read power supply command. After this command is issued, the master then issues read time slots. The DS18B20 will send back "0" on the 1-Wire bus if it is parasite powered; it will send back a "1" if it is powered from the V_{DD} pin. If the master receives a "0," it knows that it must supply the strong pullup on the DQ line during temperature conversions. See "Memory Command Functions" section for more detail on this command protocol.

STRONG PULLUP FOR SUPPLYING DS18B20 DURING TEMPERATURE CONVERSION Figure 2



USING V_{DD} TO SUPPLY TEMPERATURE CONVERSION CURRENT Figure 3

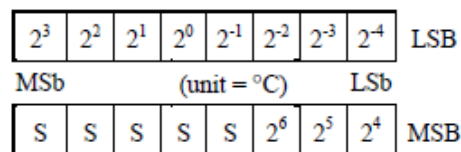


OPERATION - MEASURING TEMPERATURE

The core functionality of the DS18B20 is its direct-to-digital temperature sensor. The resolution of the DS18B20 is configurable (9, 10, 11, or 12 bits), with 12-bit readings the factory default state. This equates to a temperature resolution of 0.5°C, 0.25°C, 0.125°C, or 0.0625°C. Following the issuance of the Convert T [44h] command, a temperature conversion is performed and the thermal data is stored in the scratchpad memory in a 16-bit, sign-extended two's complement format. The temperature information can be retrieved over the 1-Wire interface by issuing a Read Scratchpad [BEh] command once the conversion has been performed. The data is transferred over the 1-Wire bus, LSB first. The MSB of the temperature register contains the "sign" (S) bit, denoting whether the temperature is positive or negative.

Table 2 describes the exact relationship of output data to measured temperature. The table assumes 12-bit resolution. If the DS18B20 is configured for a lower resolution, insignificant bits will contain zeros. For Fahrenheit usage, a lookup table or conversion routine must be used.

Temperature/Data Relationships Table 2



| TEMPERATURE | DIGITAL OUTPUT (Binary) | DIGITAL OUTPUT (Hex) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|
| +125°C | 0000 0111 1101 0000 | 07D0h |
| +85°C | 0000 0101 0101 0000 | 0550h* |
| +25.0625°C | 0000 0001 1001 0001 | 0191h |
| +10.125°C | 0000 0000 1010 0010 | 00A2h |
| +0.5°C | 0000 0000 0000 1000 | 0008h |
| 0°C | 0000 0000 0000 0000 | 0000h |
| -0.5°C | 1111 1111 1111 1000 | FFF8h |
| -10.125°C | 1111 1111 0101 1110 | FF5Eh |
| -25.0625°C | 1111 1110 0110 1111 | FF6Fh |
| -55°C | 1111 1100 1001 0000 | FC90h |

*The power on reset register value is +85°C.

OPERATION - ALARM SIGNALING

After the DS18B20 has performed a temperature conversion, the temperature value is compared to the trigger values stored in TH and TL. Since these registers are 8-bit only, bits 9-12 are ignored for comparison. The most significant bit of TH or TL directly corresponds to the sign bit of the 16-bit temperature register. If the result of a temperature measurement is higher than TH or lower than TL, an alarm flag inside the device is set. This flag is updated with every temperature measurement. As long as the alarm flag is set, the DS18B20 will respond to the alarm search command. This allows many DS18B20s to be connected in parallel doing simultaneous temperature measurements. If somewhere the temperature exceeds the limits, the alarming device(s) can be identified and read immediately without having to read non-alarming devices.

64-BIT LASERED ROM

Each DS18B20 contains a unique ROM code that is 64-bits long. The first 8 bits are a 1-Wire family code (DS18B20 code is 28h). The next 48 bits are a unique serial number. The last 8 bits are a CRC of the first 56 bits. (See Figure 4.) The 64-bit ROM and ROM Function Control section allow the DS18B20 to operate as a 1-Wire device and follow the 1-Wire protocol detailed in the section “1-Wire Bus System.” The functions required to control sections of the DS18B20 are not accessible until the ROM function protocol has been satisfied. This protocol is described in the ROM function protocol flowchart (Figure 5). The 1-Wire bus master must first provide one of five ROM function commands: 1) Read ROM, 2) Match ROM, 3) Search ROM, 4) Skip ROM, or 5) Alarm Search. After a ROM function sequence has been successfully executed, the functions specific to the DS18B20 are accessible and the bus master may then provide one of the six memory and control function commands.

CRC GENERATION

The DS18B20 has an 8-bit CRC stored in the most significant byte of the 64-bit ROM. The bus master can compute a CRC value from the first 56-bits of the 64-bit ROM and compare it to the value stored within the DS18B20 to determine if the ROM data has been received error-free by the bus master. The equivalent polynomial function of this CRC is:

$$\text{CRC} = X^8 + X^5 + X^4 + 1$$

The DS18B20 also generates an 8-bit CRC value using the same polynomial function shown above and provides this value to the bus master to validate the transfer of data bytes. In each case where a CRC is used for data transfer validation, the bus master must calculate a CRC value using the polynomial function given above and compare the calculated value to either the 8-bit CRC value stored in the 64-bit ROM portion of the DS18B20 (for ROM reads) or the 8-bit CRC value computed within the DS18B20 (which is read as a ninth byte when the scratchpad is read). The comparison of CRC values and decision to continue with an operation are determined entirely by the bus master. There is no circuitry inside the DS18B20 that prevents a command sequence from proceeding if the CRC stored in or calculated by the DS18B20 does not match the value generated by the bus master.

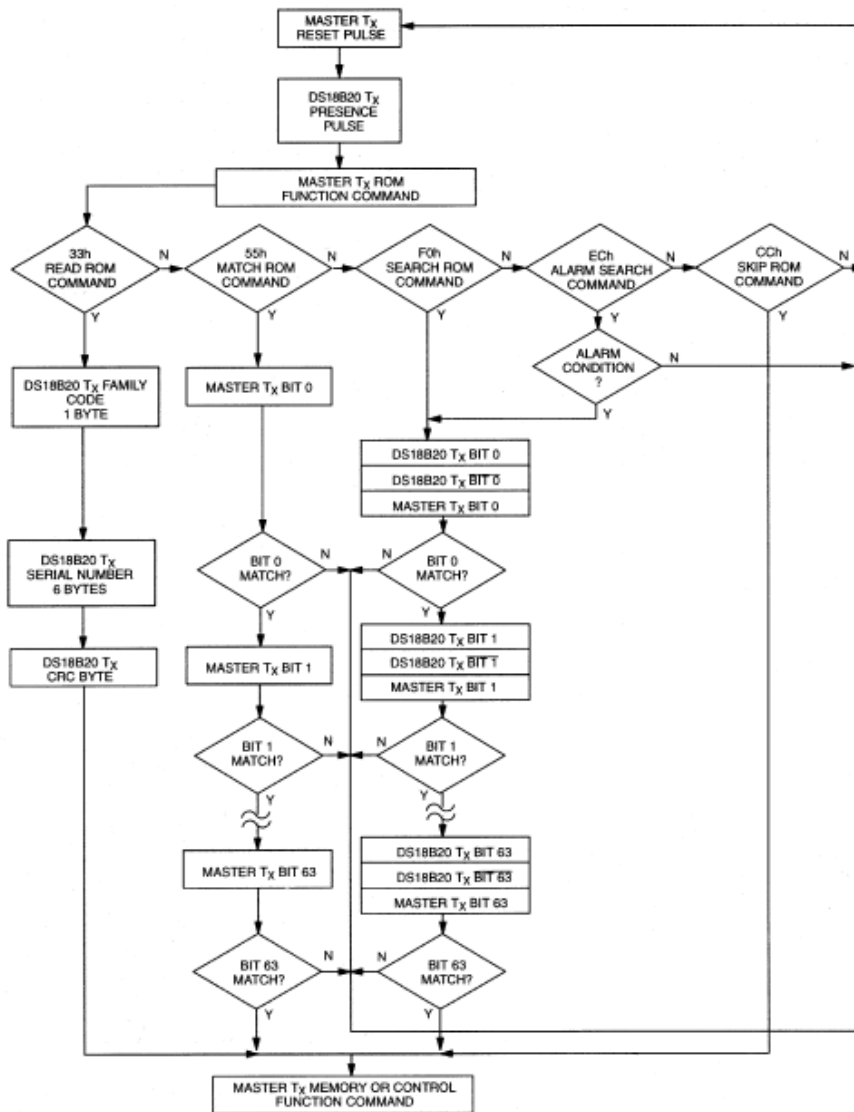
The 1-Wire CRC can be generated using a polynomial generator consisting of a shift register and XOR gates as shown in Figure 6. Additional information about the Dallas 1-Wire Cyclic Redundancy Check is available in Application Note 27 entitled “Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Dallas Semiconductor Touch Memory Products.”

The shift register bits are initialized to 0. Then starting with the least significant bit of the family code, 1 bit at a time is shifted in. After the 8th bit of the family code has been entered, then the serial number is entered. After the 48th bit of the serial number has been entered, the shift register contains the CRC value. Shifting in the 8 bits of CRC should return the shift register to all 0s.

64-BIT LASERED ROM Figure 4

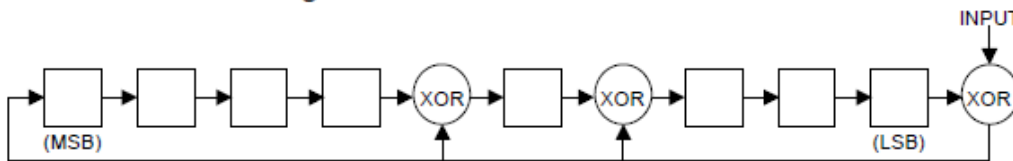
| | | | | | | | |
|----------------|-----|----------------------|-----|-----|-----|----------------------------|-----|
| 8-BIT CRC CODE | | 48-BIT SERIAL NUMBER | | | | 8-BIT FAMILY CODE (28h) | |
| MSB | LSB | MSB | LSB | MSB | LSB | MSB | LSB |

ROM FUNCTIONS FLOW CHART Figure 5



DS18B20

1-WIRE CRC CODE Figure 6



MEMORY

The DS18B20's memory is organized as shown in Figure 8. The memory consists of a scratchpad RAM and a nonvolatile, electrically erasable (E²) RAM, which stores the high and low temperature triggers TH and TL, and the configuration register. The scratchpad helps insure data integrity when communicating over the 1-Wire bus. Data is first written to the scratchpad using the Write Scratchpad [4Eh] command. It can then be verified by using the Read Scratchpad [BEh] command. After the data has been verified, a Copy Scratchpad [48h] command will transfer the data to the nonvolatile (E²) RAM. This process insures data integrity when modifying memory. The DS18B20 EEPROM is rated for a minimum of 50,000 writes and 10 years data retention at T = +55°C.

The scratchpad is organized as eight bytes of memory. The first 2 bytes contain the LSB and the MSB of the measured temperature information, respectively. The third and fourth bytes are volatile copies of TH and TL and are refreshed with every power-on reset. The fifth byte is a volatile copy of the configuration register and is refreshed with every power-on reset. The configuration register will be explained in more detail later in this section of the datasheet. The sixth, seventh, and eighth bytes are used for internal computations, and thus will not read out any predictable pattern.

It is imperative that one writes TH, TL, and config in succession; i.e. a write is not valid if one writes only to TH and TL, for example, and then issues a reset. If any of these bytes must be written, all three must be written before a reset is issued.

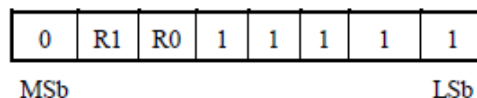
There is a ninth byte which may be read with a Read Scratchpad [BEh] command. This byte contains a cyclic redundancy check (CRC) byte which is the CRC over all of the eight previous bytes. This CRC is implemented in the fashion described in the section titled "CRC Generation".

Configuration Register

The fifth byte of the scratchpad memory is the configuration register.

It contains information which will be used by the device to determine the resolution of the temperature to digital conversion. The bits are organized as shown in Figure 7.

DS18B20 CONFIGURATION REGISTER Figure 7



Bits 0-4 are don't cares on a write but will always read out "1".

Bit 7 is a don't care on a write but will always read out "0".

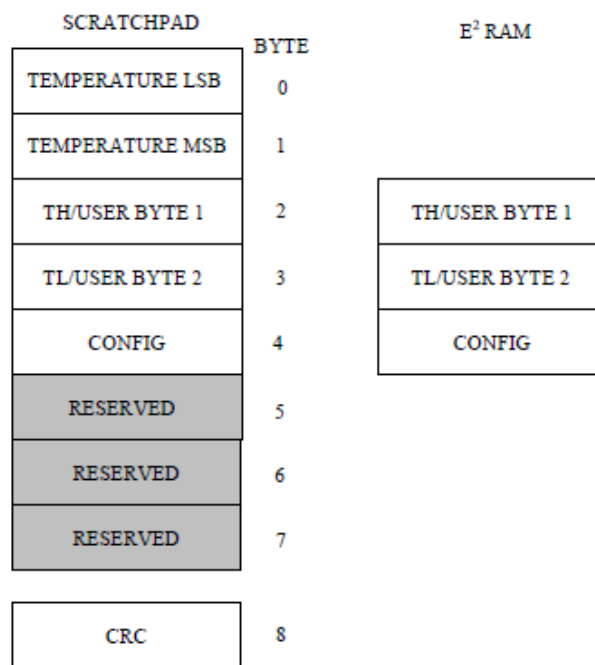
DS18B20

R0, R1: Thermometer resolution bits. Table 3 below defines the resolution of the digital thermometer, based on the settings of these 2 bits. There is a direct tradeoff between resolution and conversion time, as depicted in the AC Electrical Characteristics. The factory default of these EEPROM bits is R0=1 and R1=1 (12-bit conversions).

Thermometer Resolution Configuration Table 3

| R1 | R0 | Thermometer Resolution | Max Conversion Time |
|----|----|------------------------|---------------------------|
| 0 | 0 | 9 bit | 93.75 ms ($t_{conv}/8$) |
| 0 | 1 | 10 bit | 187.5 ms ($t_{conv}/4$) |
| 1 | 0 | 11 bit | 375 ms ($t_{conv}/2$) |
| 1 | 1 | 12 bit | 750 ms (t_{conv}) |

DS18B20 MEMORY MAP Figure 8



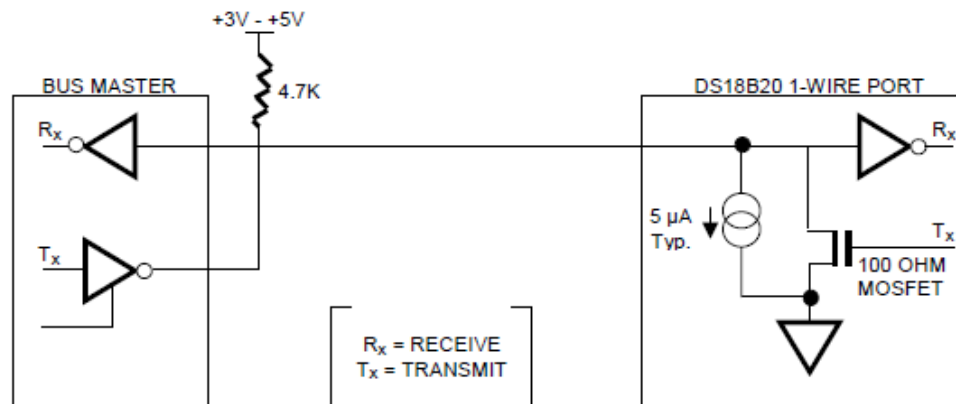
1-WIRE BUS SYSTEM

The 1-Wire bus is a system which has a single bus master and one or more slaves. The DS18B20 behaves as a slave. The discussion of this bus system is broken down into three topics: hardware configuration, transaction sequence, and 1-Wire signaling (signal types and timing).

HARDWARE CONFIGURATION

The 1-Wire bus has only a single line by definition; it is important that each device on the bus be able to drive it at the appropriate time. To facilitate this, each device attached to the 1-Wire bus must have open drain or 3-state outputs. The 1-Wire port of the DS18B20 (DQ pin) is open drain with an internal circuit equivalent to that shown in Figure 9. A multidrop bus consists of a 1-Wire bus with multiple slaves attached. The 1-Wire bus requires a pullup resistor of approximately 5 k Ω .

HARDWARE CONFIGURATION Figure 9



The idle state for the 1-Wire bus is high. If for any reason a transaction needs to be suspended, the bus MUST be left in the idle state if the transaction is to resume. Infinite recovery time can occur between bits so long as the 1-Wire bus is in the inactive (high) state during the recovery period. If this does not occur and the bus is left low for more than 480 μ s, all components on the bus will be reset.

TRANSACTION SEQUENCE

The protocol for accessing the DS18B20 via the 1-Wire port is as follows:

- Initialization
- ROM Function Command
- Memory Function Command
- Transaction/Data

INITIALIZATION

All transactions on the 1-Wire bus begin with an initialization sequence. The initialization sequence consists of a reset pulse transmitted by the bus master followed by presence pulse(s) transmitted by the slave(s).

The presence pulse lets the bus master know that the DS18B20 is on the bus and is ready to operate. For more details, see the “1-Wire Signaling” section.

ROM FUNCTION COMMANDS

Once the bus master has detected a presence, it can issue one of the five ROM function commands. All ROM function commands are 8 bits long. A list of these commands follows (refer to flowchart in Figure 5):

Read ROM [33h]

This command allows the bus master to read the DS18B20's 8-bit family code, unique 48-bit serial number, and 8-bit CRC. This command can only be used if there is a single DS18B20 on the bus. If more than one slave is present on the bus, a data collision will occur when all slaves try to transmit at the same time (open drain will produce a wired AND result).

Match ROM [55h]

The match ROM command, followed by a 64-bit ROM sequence, allows the bus master to address a specific DS18B20 on a multidrop bus. Only the DS18B20 that exactly matches the 64-bit ROM sequence will respond to the following memory function command. All slaves that do not match the 64-bit ROM sequence will wait for a reset pulse. This command can be used with a single or multiple devices on the bus.

Skip ROM [CCh]

This command can save time in a single drop bus system by allowing the bus master to access the memory functions without providing the 64-bit ROM code. If more than one slave is present on the bus and a Read command is issued following the Skip ROM command, data collision will occur on the bus as multiple slaves transmit simultaneously (open drain pulldowns will produce a wired AND result).

Search ROM [F0h]

When a system is initially brought up, the bus master might not know the number of devices on the 1-Wire bus or their 64-bit ROM codes. The search ROM command allows the bus master to use a process of elimination to identify the 64-bit ROM codes of all slave devices on the bus.

Alarm Search [ECh]

The flowchart of this command is identical to the Search ROM command. However, the DS18B20 will respond to this command only if an alarm condition has been encountered at the last temperature measurement. An alarm condition is defined as a temperature higher than TH or lower than TL. The alarm condition remains set as long as the DS18B20 is powered up, or until another temperature measurement reveals a non-alarming value. For alarming, the trigger values stored in EEPROM are taken into account. If an alarm condition exists and the TH or TL settings are changed, another temperature conversion should be done to validate any alarm conditions.

Example of a ROM Search

The ROM search process is the repetition of a simple three-step routine: read a bit, read the complement of the bit, then write the desired value of that bit. The bus master performs this simple, three-step routine on each bit of the ROM. After one complete pass, the bus master knows the contents of the ROM in one device. The remaining number of devices and their ROM codes may be identified by additional passes.

The following example of the ROM search process assumes four different devices are connected to the same 1-Wire bus. The ROM data of the four devices is as shown:

| | |
|------|-------------|
| ROM1 | 00110101... |
| ROM2 | 10101010... |
| ROM3 | 11110101... |
| ROM4 | 00010001... |

The search process is as follows:

1. The bus master begins the initialization sequence by issuing a reset pulse. The slave devices respond by issuing simultaneous presence pulses.
2. The bus master will then issue the Search ROM command on the 1-Wire bus.
3. The bus master reads a bit from the 1-Wire bus. Each device will respond by placing the value of the first bit of their respective ROM data onto the 1-Wire bus. ROM1 and ROM4 will place a 0 onto the 1-Wire bus, i.e., pull it low. ROM2 and ROM3 will place a 1 onto the 1-Wire bus by allowing the line to stay high. The result is the logical AND of all devices on the line, therefore the bus master sees a 0. The bus master reads another bit. Since the Search ROM data command is being executed, all of the devices on the 1-Wire bus respond to this second read by placing the complement of the first bit of their respective ROM data onto the 1-Wire bus. ROM1 and ROM4 will place a 1 onto the 1-Wire, allowing the line to stay high. ROM2 and ROM3 will place a 0 onto the 1-Wire, thus it will be pulled low. The bus master again observes a 0 for the complement of the first ROM data bit. The bus master has determined that there are some devices on the 1-Wire bus that have a 0 in the first position and others that have a 1.

The data obtained from the two reads of the three-step routine have the following interpretations:

- | | |
|----|--|
| 00 | There are still devices attached which have conflicting bits in this position. |
| 01 | All devices still coupled have a 0-bit in this bit position. |
| 10 | All devices still coupled have a 1-bit in this bit position. |
| 11 | There are no devices attached to the 1-Wire bus. |
4. The bus master writes a 0. This deselects ROM2 and ROM3 for the remainder of this search pass, leaving only ROM1 and ROM4 connected to the 1-Wire bus.
 5. The bus master performs two more reads and receives a 0-bit followed by a 1-bit. This indicates that all devices still coupled to the bus have 0s as their second ROM data bit.
 6. The bus master then writes a 0 to keep both ROM1 and ROM4 coupled.
 7. The bus master executes two reads and receives two 0-bits. This indicates that both 1-bits and 0-bits exist as the 3rd bit of the ROM data of the attached devices.

DS18B20

8. The bus master writes a 0-bit. This deselects ROM1, leaving ROM4 as the only device still connected.
9. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM4 and continues to access the part if desired. This completes the first pass and uniquely identifies one part on the 1-Wire bus.
10. The bus master starts a new ROM search sequence by repeating steps 1 through 7.
11. The bus master writes a 1-bit. This decouples ROM4, leaving only ROM1 still coupled.
12. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM1 and communicates to the underlying logic if desired. This completes the second ROM search pass, in which another of the ROMs was found.
13. The bus master starts a new ROM search by repeating steps 1 through 3.
14. The bus master writes a 1-bit. This deselects ROM1 and ROM4 for the remainder of this search pass, leaving only ROM2 and ROM3 coupled to the system.
15. The bus master executes two Read time slots and receives two 0s.
16. The bus master writes a 0-bit. This decouples ROM3 leaving only ROM2.
17. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM2 and communicates to the underlying logic if desired. This completes the third ROM search pass, in which another of the ROMs was found.
18. The bus master starts a new ROM search by repeating steps 13 through 15.
19. The bus master writes a 1-bit. This decouples ROM2, leaving only ROM3.
20. The bus master reads the remainder of the ROM bits for ROM3 and communicates to the underlying logic if desired. This completes the fourth ROM search pass, in which another of the ROMs was found.

NOTE:

The bus master learns the unique ID number (ROM data pattern) of one 1-Wire device on each ROM Search operation. The time required to derive the part's unique ROM code is:

$$960 \mu\text{s} + (8 + 3 \times 64) 61 \mu\text{s} = 13.16 \text{ ms}$$

The bus master is therefore capable of identifying 75 different 1-Wire devices per second.

I/O SIGNALING

The DS18B20 requires strict protocols to insure data integrity. The protocol consists of several types of signaling on one line: reset pulse, presence pulse, write 0, write 1, read 0, and read 1. All of these signals, with the exception of the presence pulse, are initiated by the bus master.

DS18B20

The initialization sequence required to begin any communication with the DS18B20 is shown in Figure 11. A reset pulse followed by a presence pulse indicates the DS18B20 is ready to send or receive data given the correct ROM command and memory function command.

The bus master transmits (TX) a reset pulse (a low signal for a minimum of 480 μ s). The bus master then releases the line and goes into a receive mode (RX). The 1-Wire bus is pulled to a high state via the 5k pullup resistor. After detecting the rising edge on the DQ pin, the DS18B20 waits 15-60 μ s and then transmits the presence pulse (a low signal for 60-240 μ s).

MEMORY COMMAND FUNCTIONS

The following command protocols are summarized in Table 4, and by the flowchart of Figure 10.

Write Scratchpad [4Eh]

This command writes to the scratchpad of the DS18B20, starting at the TH register. The next 3 bytes written will be saved in scratchpad memory at address locations 2 through 4. All 3 bytes must be written before a reset is issued.

Read Scratchpad [BEh]

This command reads the contents of the scratchpad. Reading will commence at byte 0 and will continue through the scratchpad until the ninth (byte 8, CRC) byte is read. If not all locations are to be read, the master may issue a reset to terminate reading at any time.

Copy Scratchpad [48h]

This command copies the scratchpad into the E² memory of the DS18B20, storing the temperature trigger bytes in nonvolatile memory. If the bus master issues read time slots following this command, the DS18B20 will output 0 on the bus as long as it is busy copying the scratchpad to E²; it will return a 1 when the copy process is complete. If parasite-powered, the bus master has to enable a strong pullup for at least 10 ms immediately after issuing this command. The DS18B20 EEPROM is rated for a minimum of 50,000 writes and 10 years data retention at T=+55°C.

Convert T [44h]

This command begins a temperature conversion. No further data is required. The temperature conversion will be performed and then the DS18B20 will remain idle. If the bus master issues read time slots following this command, the DS18B20 will output 0 on the bus as long as it is busy making a temperature conversion; it will return a 1 when the temperature conversion is complete. If parasite-powered, the bus master has to enable a strong pullup for a period greater than t_{conv} immediately after issuing this command.

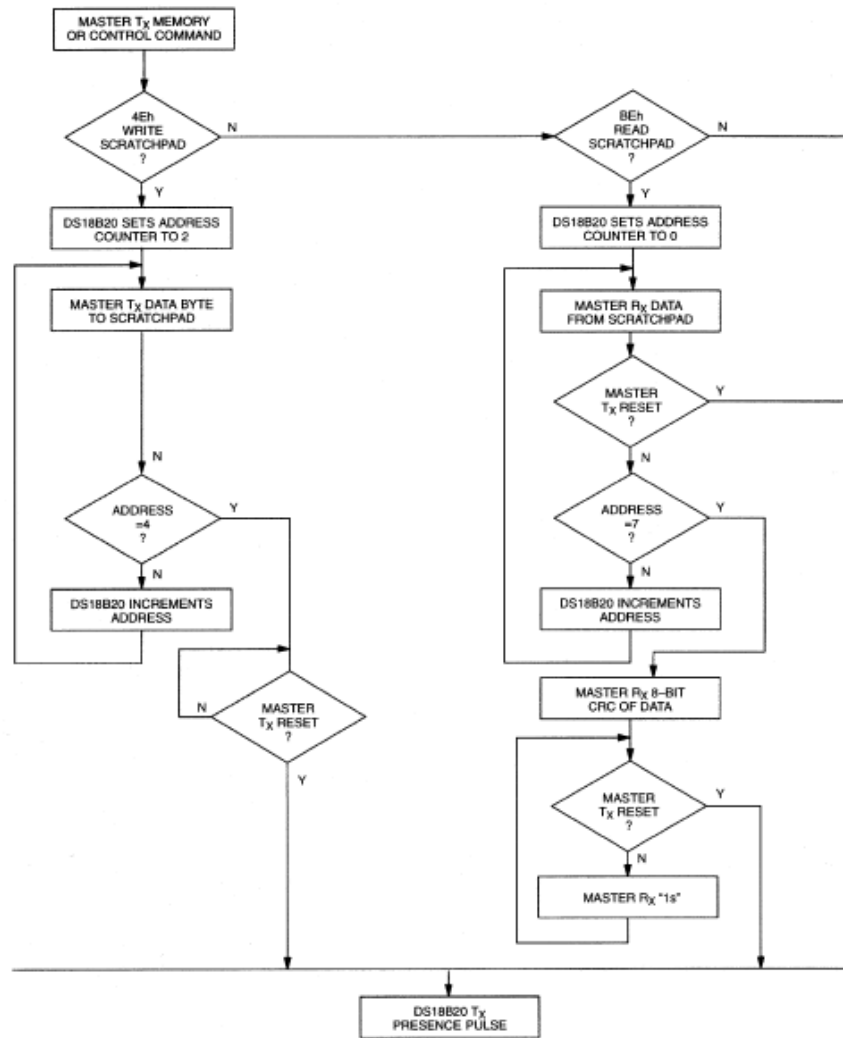
Recall E2 [B8h]

This command recalls the temperature trigger values and configuration register stored in E² to the scratchpad. This recall operation happens automatically upon power-up to the DS18B20 as well, so valid data is available in the scratchpad as soon as the device has power applied. With every read data time slot issued after this command has been sent, the device will output its temperature converter busy flag: 0=busy, 1=ready.

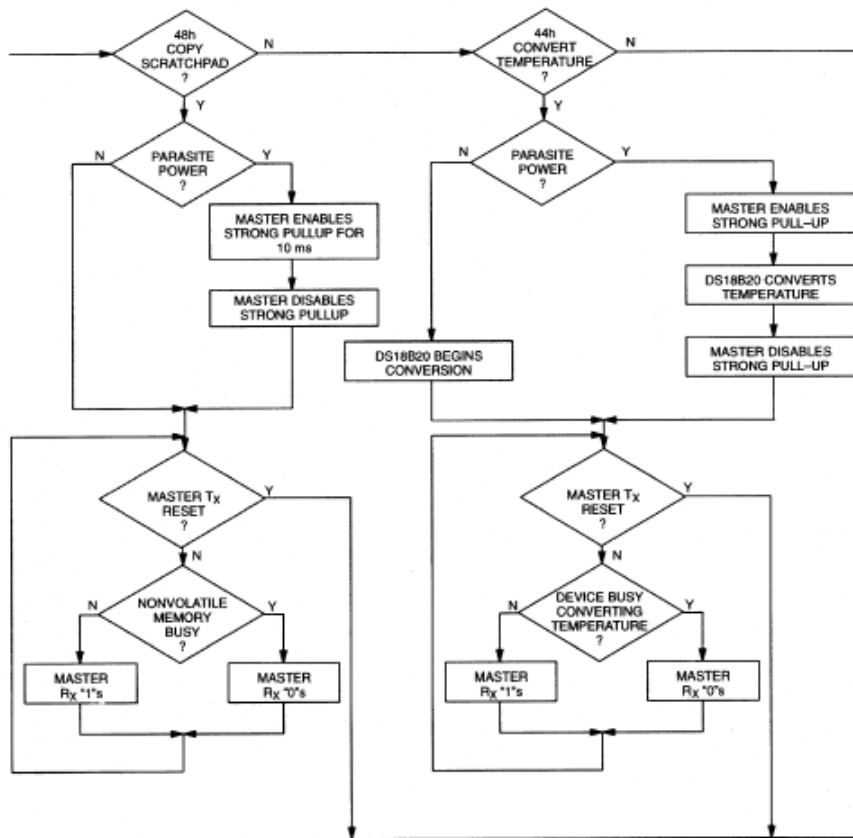
Read Power Supply [B4h]

With every read data time slot issued after this command has been sent to the DS18B20, the device will signal its power mode: 0=parasite power, 1=external power supply provided.

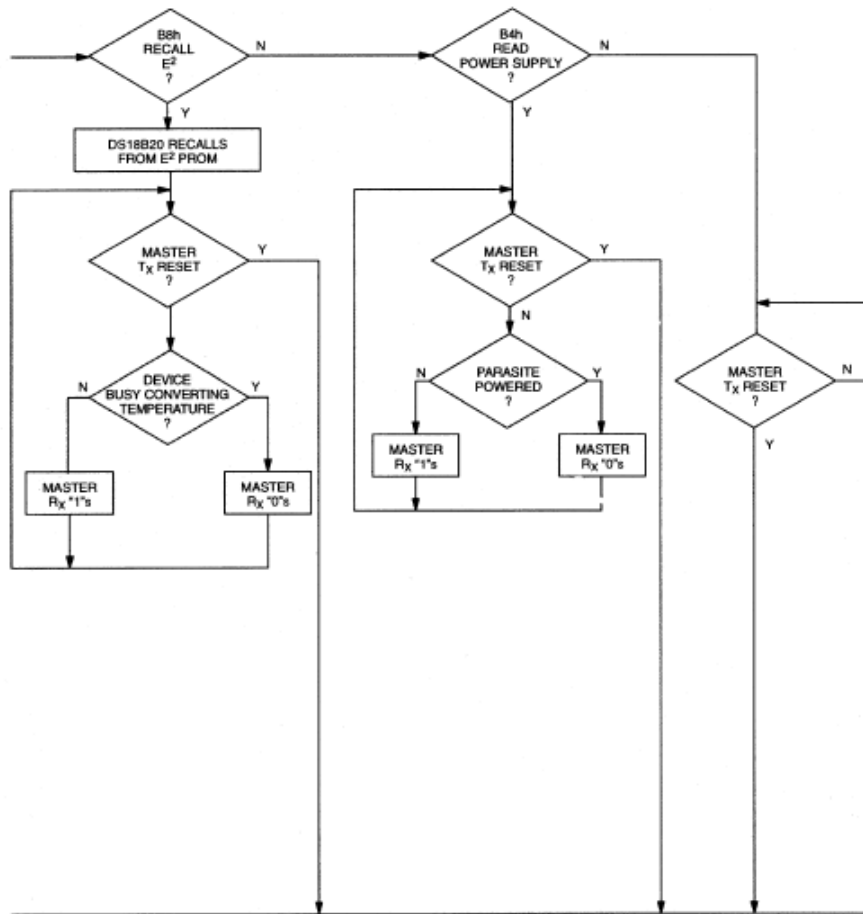
MEMORY FUNCTIONS FLOW CHART Figure 10



MEMORY FUNCTIONS FLOW CHART Figure 10 (cont'd)

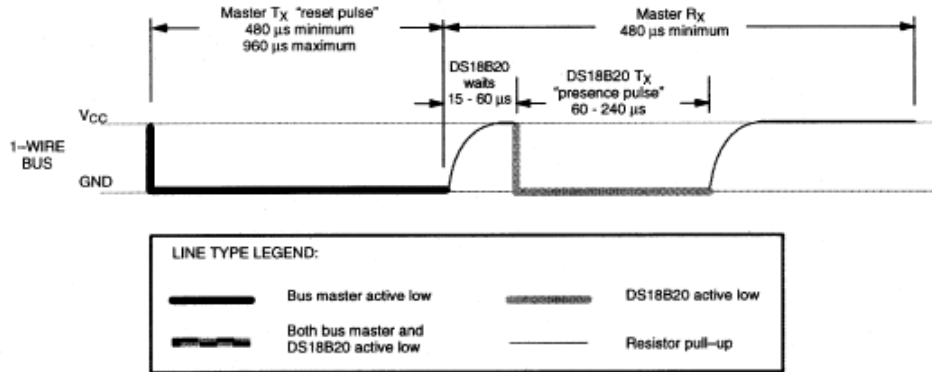


MEMORY FUNCTIONS FLOW CHART Figure 10 (cont'd)



DS18B20

INITIALIZATION PROCEDURE “RESET AND PRESENCE PULSES” Figure 11



DS18B20 COMMAND SET Table 4

| INSTRUCTION | DESCRIPTION | PROTOCOL | 1-WIRE BUS AFTER ISSUING PROTOCOL | NOTES |
|--|--|----------|--|-------|
| TEMPERATURE CONVERSION COMMANDS | | | | |
| Convert T | Initiates temperature conversion. | 44h | <read temperature busy status> | 1 |
| MEMORY COMMANDS | | | | |
| Read Scratchpad | Reads bytes from scratchpad and reads CRC byte. | BEh | <read data up to 9 bytes> | |
| Write Scratchpad | Writes bytes into scratchpad at addresses 2 through 4 (TH and TL temperature triggers and config). | 4Eh | <write data into 3 bytes at addr. 2 through 4> | 3 |
| Copy Scratchpad | Copies scratchpad into nonvolatile memory (addresses 2 through 4 only). | 48h | <read copy status> | 2 |
| Recall E ² | Recalls values stored in nonvolatile memory into scratchpad (temperature triggers). | B8h | <read temperature busy status> | |
| Read Power Supply | Signals the mode of DS18B20 power supply to the master. | B4h | <read supply status> | |

NOTES:

1. Temperature conversion takes up to 750 ms. After receiving the Convert T protocol, if the part does not receive power from the V_{DD} pin, the DQ line for the DS18B20 must be held high for at least a period greater than t_{conv} to provide power during the conversion process. As such, no other activity may take place on the 1-Wire bus for at least this period after a Convert T command has been issued.
2. After receiving the Copy Scratchpad protocol, if the part does not receive power from the V_{DD} pin, the DQ line for the DS18B20 must be held high for at least 10 ms to provide power during the copy process. As such, no other activity may take place on the 1-Wire bus for at least this period after a Copy Scratchpad command has been issued.
3. All 3 bytes must be written before a reset is issued.

READ/WRITE TIME SLOTS

DS18B20 data is read and written through the use of time slots to manipulate bits and a command word to specify the transaction.

Write Time Slots

A write time slot is initiated when the host pulls the data line from a high logic level to a low logic level. There are two types of write time slots: Write 1 time slots and Write 0 time slots. All write time slots must be a minimum of 60 μ s in duration with a minimum of a 1- μ s recovery time between individual write cycles.

The DS18B20 samples the DQ line in a window of 15 μ s to 60 μ s after the DQ line falls. If the line is high, a Write 1 occurs. If the line is low, a Write 0 occurs (see Figure 12).

For the host to generate a Write 1 time slot, the data line must be pulled to a logic low level and then released, allowing the data line to pull up to a high level within 15 μ s after the start of the write time slot.

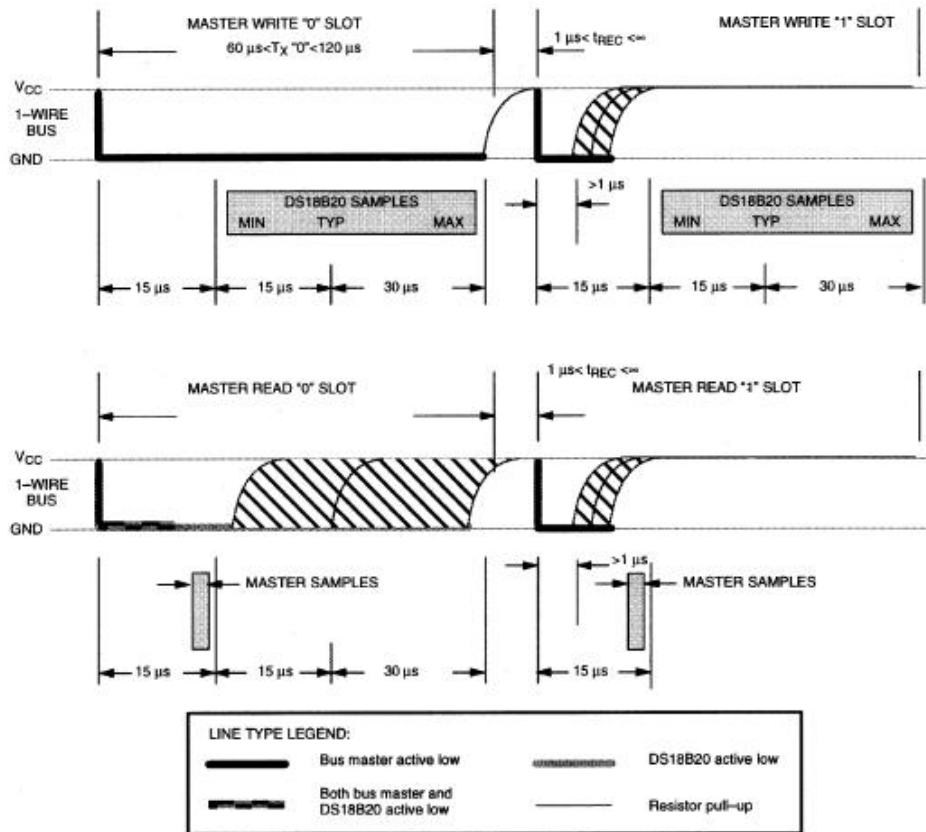
For the host to generate a Write 0 time slot, the data line must be pulled to a logic low level and remain low for 60 μ s.

Read Time Slots

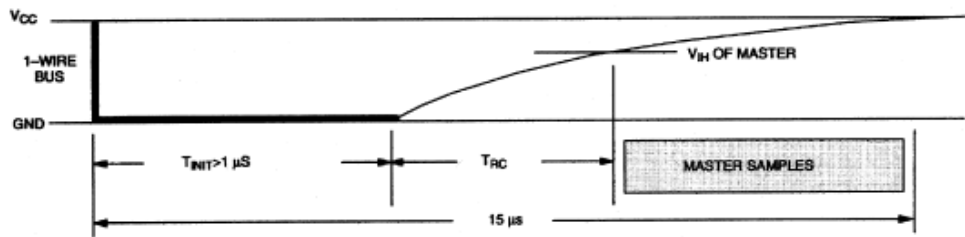
The host generates read time slots when data is to be read from the DS18B20. A read time slot is initiated when the host pulls the data line from a logic high level to logic low level. The data line must remain at a low logic level for a minimum of 1 μ s; output data from the DS18B20 is valid for 15 μ s after the falling edge of the read time slot. The host therefore must stop driving the DQ pin low in order to read its state 15 μ s from the start of the read slot (see Figure 12). By the end of the read time slot, the DQ pin will pull back high via the external pullup resistor. All read time slots must be a minimum of 60 μ s in duration with a minimum of a 1- μ s recovery time between individual read slots.

Figure 12 shows that the sum of T_{NIT} , T_{RC} , and T_{SAMPLE} must be less than 15 μ s. Figure 14 shows that system timing margin is maximized by keeping T_{NIT} and T_{RC} as small as possible and by locating the master sample time towards the end of the 15- μ s period.

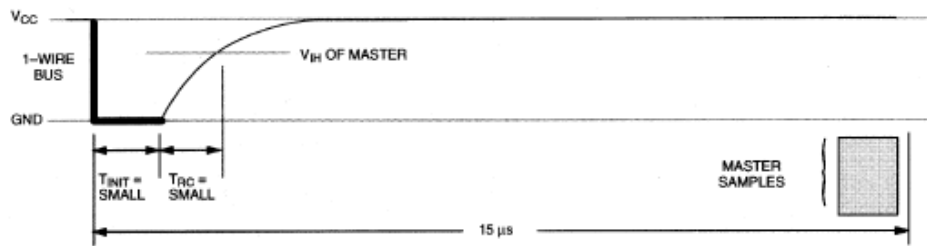
READ/WRITE TIMING DIAGRAM Figure 12



DETAILED MASTER READ 1 TIMING Figure 13



RECOMMENDED MASTER READ 1 TIMING Figure 14



| LINE TYPE LEGEND: | | | |
|-------------------|--|--|--------------------|
| | Bus master active low | | DS18B20 active low |
| | Both bus master and DS18B20 active low | | Resistor pull-up |

Related Application Notes

The following Application Notes can be applied to the DS18B20. These notes can be obtained from the Dallas Semiconductor "Application Note Book," via our website at <http://www.dalsemi.com/>.

Application Note 27: "Understanding and Using Cyclic Redundancy Checks with Dallas Semiconductor Touch Memory Product"

Application Note 55: "Extending the Contact Range of Touch Memories"

Application Note 74: "Reading and Writing Touch Memories via Serial Interfaces"

Application Note 104: "Minimalist Temperature Control Demo"

Application Note 106: "Complex MicroLANs"

Application Note 108: "MicroLAN - In the Long Run"

Sample 1-Wire subroutines that can be used in conjunction with AN74 can be downloaded from the website or our Anonymous FTP Site.

MEMORY FUNCTION EXAMPLE Table 5

Example: Bus Master initiates temperature conversion, then reads temperature (parasite power assumed).

| MASTER MODE | DATA (LSB FIRST) | COMMENTS |
|-------------|-------------------|--|
| TX | Reset | Reset pulse (480-960 μ s). |
| RX | Presence | Presence pulse. |
| TX | 55h | Issue "Match ROM" command. |
| TX | <64-bit ROM code> | Issue address for DS18B20. |
| TX | 44h | Issue "Convert T" command. |
| TX | <I/O LINE HIGH> | I/O line is held high for at least a period of time greater than t_{conv} by bus master to allow conversion to complete. |
| TX | Reset | Reset pulse. |
| RX | Presence | Presence pulse. |
| TX | 55h | Issue "Match ROM" command. |
| TX | <64-bit ROM code> | Issue address for DS18B20. |
| TX | BEh | Issue "Read Scratchpad" command. |
| RX | <9 data bytes> | Read entire scratchpad plus CRC; the master now recalculates the CRC of the eight data bytes received from the scratchpad, compares the CRC calculated and the CRC read. If they match, the master continues; if not, this read operation is repeated. |
| TX | Reset | Reset pulse. |
| RX | Presence | Presence pulse, done. |

DS18B20

MEMORY FUNCTION EXAMPLE Table 6

Example: Bus Master writes memory (parasite power and only one DS18B20 assumed).

| MASTER MODE | DATA (LSB FIRST) | COMMENTS |
|-------------|------------------|--|
| TX | Reset | Reset pulse. |
| RX | Presence | Presence pulse. |
| TX | CCh | Skip ROM command. |
| TX | 4Eh | Write Scratchpad command. |
| TX | <3 data bytes> | Writes three bytes to scratchpad (TH, TL, and config). |
| TX | Reset | Reset pulse. |
| RX | Presence | Presence pulse. |
| TX | CCh | Skip ROM command. |
| TX | BEh | Read Scratchpad command. |
| RX | <9 data bytes> | Read entire scratchpad plus CRC. The master now recalculates the CRC of the eight data bytes received from the scratchpad, compares the CRC and the two other bytes read back from the scratchpad. If data match, the master continues; if not, repeat the sequence. |
| TX | Reset | Reset pulse. |
| RX | Presence | Presence pulse. |
| TX | CCh | Skip ROM command. |
| TX | 48h | Copy Scratchpad command; after issuing this command, the master must wait 10 ms for copy operation to complete. |
| TX | Reset | Reset pulse. |
| RX | Presence | Presence pulse, done. |

DS18B20

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

| | |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Voltage on Any Pin Relative to Ground | -0.5V to +6.0V |
| Operating Temperature | -55°C to +125°C |
| Storage Temperature | -55°C to +125°C |
| Soldering Temperature | See J-STD-020A specification |

* This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS

| PARAMETER | SYMBOL | CONDITION | MIN | TYP | MAX | UNITS | NOTES |
|----------------|-----------------|-------------|------|-----|----------------------|-------|-------|
| Supply Voltage | V _{DD} | Local Power | 3.0 | | 5.5 | V | 1 |
| Data Pin | DQ | | -0.3 | | +5.5 | V | 1 |
| Logic 1 | V _{IH} | | 2.2 | | V _{CC} +0.3 | V | 1,2 |
| Logic 0 | V _{IL} | | -0.3 | | +0.8 | V | 1,3,7 |

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS (-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

| PARAMETER | SYMBOL | CONDITION | MIN | TYP | MAX | UNITS | NOTES |
|-----------------------|------------------|-----------------------|------|-----|------|-------|-------|
| Thermometer Error | t _{ERR} | -10°C to +85°C | | | ±½ | °C | |
| | | -55°C to +125°C | | | ±2 | | |
| Input Logic High | V _{IH} | Local Power | 2.2 | | 5.5 | V | 1,2 |
| | | Parasite Power | 3.0 | | | V | 1,2 |
| Input Logic Low | V _{IL} | | -0.3 | | +0.8 | V | 1,3,7 |
| Sink Current | I _L | V _{I0} =0.4V | -4.0 | | | mA | 1 |
| Standby Current | I _{DDs} | | | 750 | 1000 | nA | 6,8 |
| Active Current | I _{DD} | | | 1 | 1.5 | mA | 4 |
| DQ-Input Load Current | I _{DQ} | | | 5 | | µA | 5 |

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: NV MEMORY

(-55°C to +125°C; V_{DD}=3.0V to 5.5V)

| PARAMETER | SYMBOL | CONDITION | MIN | TYP | MAX | UNITS | NOTES |
|-----------------------|-------------------|----------------|-----|-----|-----|--------|-------|
| NV Write Cycle Time | t _{wr} | | | 2 | 10 | ms | |
| EEPROM Writes | N _{EEWR} | -55°C to +55°C | 50k | | | writes | |
| EEPROM Data Retention | t _{EEDR} | -55°C to +55°C | 10 | | | years | |

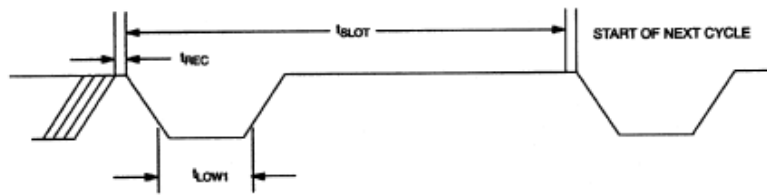
DS18B20

| AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS: (-55°C to +125°C; $V_{DD}=3.0V$ to 5.5V) | | | | | | | |
|---|--------------|-----------|-----|-----|-------|---------|-------|
| PARAMETER | SYMBOL | CONDITION | MIN | TYP | MAX | UNITS | NOTES |
| Temperature Conversion Time | t_{CONV} | 9 bit | | | 93.75 | ms | |
| | | 10 bit | | | 187.5 | | |
| | | 11 bit | | | 375 | | |
| | | 12 bit | | | 750 | | |
| Time Slot | t_{SLOT} | | 60 | | 120 | μs | |
| Recovery Time | t_{REC} | | 1 | | | μs | |
| Write 0 Low Time | t_{LOW0} | | 60 | | 120 | μs | |
| Write 1 Low Time | t_{LOW1} | | 1 | | 15 | μs | |
| Read Data Valid | t_{RDV} | | | | 15 | μs | |
| Reset Time High | t_{RSTH} | | 480 | | | μs | |
| Reset Time Low | t_{RSTL} | | 480 | | | μs | 9 |
| Presence Detect High | t_{PDHIGH} | | 15 | | 60 | μs | |
| Presence Detect Low | t_{PDLow} | | 60 | | 240 | μs | |
| Capacitance | $C_{IN/OUT}$ | | | | 25 | pF | |

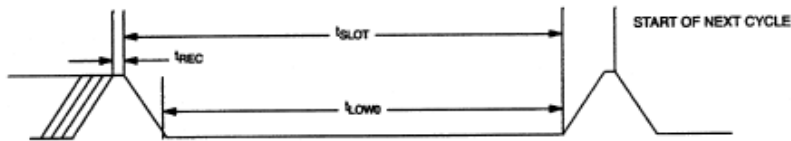
NOTES:

1. All voltages are referenced to ground.
2. Logic one voltages are specified at a source current of 1 mA.
3. Logic zero voltages are specified at a sink current of 4 mA.
4. Active current refers to either temperature conversion or writing to the E² memory. Writing to E² memory consumes approximately 200 μA for up to 10 ms.
5. Input load is to ground.
6. Standby current specified up to 70°C. Standby current typically is 3 μA at 125°C.
7. To always guarantee a presence pulse under low voltage parasite power conditions, V_{ILMAX} may have to be reduced to as much as 0.5V.
8. To minimize I_{DDs} , DQ should be: $GND \leq DQ \leq GND + 0.3V$ or $V_{DD} - 0.3V \leq DQ \leq V_{DD}$.
9. Under parasite power, the max t_{RSTL} before a power on reset occurs is 960 μS .

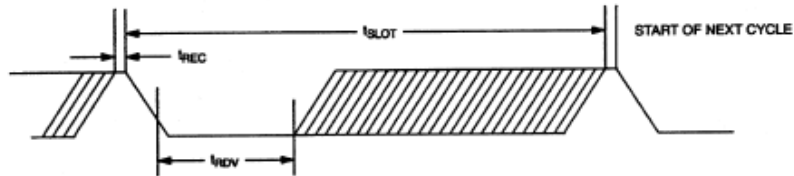
1-WIRE WRITE ONE TIME SLOT



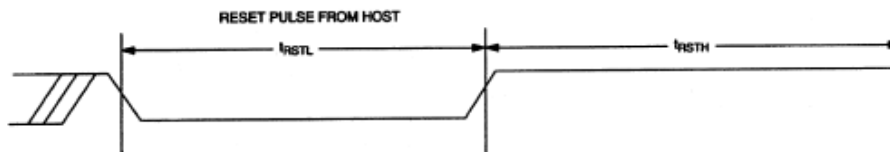
1-WIRE WRITE ZERO TIME SLOT



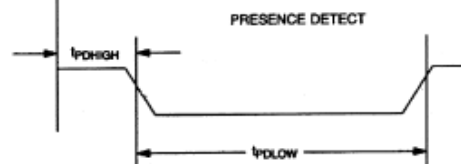
1-WIRE READ ZERO TIME SLOT



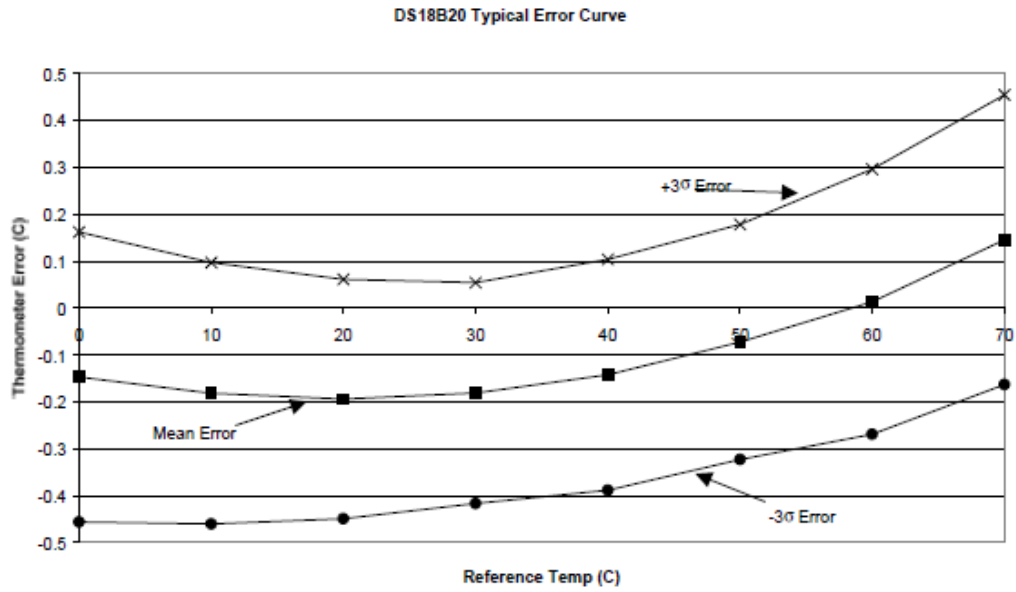
1-WIRE RESET PULSE



1-WIRE PRESENCE DETECT



TYPICAL PERFORMANCE CURVE



Sensor de pH

How to use a PH probe and sensor

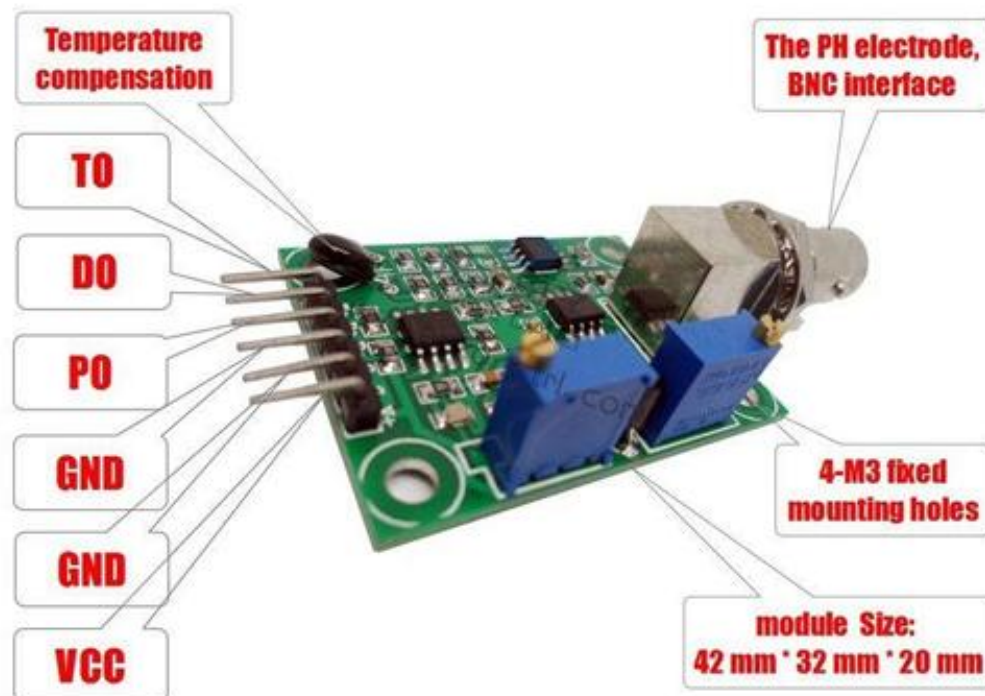
If you worked with PH metering before you will know that PH values range from 0-14. Where PH 0 Will be very acidic, PH 7 will be neutral and PH 14 very alkaline. Water is near a PH 7 and this is usually around here that we will need to monitor PH of many things. A swimming pool, for example, should be slightly alkaline at 7.2, hydroponics systems around 6 (for optimum plant nutrition takeup) and aquaponics around 6.8.

I wrote this **PH probe and sensor** "how to" because it is not as straightforward as one would think (but quite easy when you understand the ins and outs) mostly because there is not a lot of information on this on the Internet, surely not detailed information.

We will first look at the ph probe module board and then the PH probe because both the PH probe and sensor have to be set correctly:

- offset setting
- limit setting
- sketch to test the board analogue range
- sketch for PH reading and calibration.
- calibration of PH probe
- PH probe usage

The ph probe module in this tutorial is available on our site here: [PH probe module BNC conector](#)



PH Probe Sensor Pinout

TO - Temperature output
DO - 3.3V Output (from ph limit pot)
PO - PH analog output ==> **Arduino A0**
Gnd - Gnd for PH probe (can come from Arduino GND pin) ==> **Arduino GND**
Gnd - Gnd for board (can also come from Arduino GND pin) ==> **Arduino GND**
VCC - 5V DC (can come from Arduino 5V pin) ==> **Arduino 5V pin**
POT 1 - Analog reading offset (Nearest to BNC connector)
POT 2 - PH limit setting

PH probe module Offset and how to use it.

This board have the ability to supply a voltage output to the analoque board that will represent a PH value just like any other sensor that will connect to an analoq pin. Ideally, we want a PH 0 represent 0v and a PH of 14 to represent 5V.

BUT there is a catch....., this board by default have PH 7 set to 0V (or near it, it differs from one PH probe to another, that is why we have to calibrate the probe as you will see later on), This means that the voltage will go into the minuses when reading acidic PH values and that cannot be read by the analoq Arduino port. The offset pot is used to change this so that a PH 7 will read the expected 2.5V to the Arduino analoq pin, the analoq pin can read voltaqes between 0V and 5V hence the 2.5V that is halfway between 0V and 5V as a PH 7 is halfway between PH 0 and PH 14,

You will need to turn the offset potentiometer to get the right offset, The offset pot is the blue pot nearest to the BNC connector.

To set the offset is easy. First, you need to disconnect the probe from the circuit and short-circuit the inside of the BNC connector with the outside to simulate a neutral PH (PH7). I took a piece of wire, strip both sides, wrap the one side around the outside of the BNC connector and push the other side into the BNC hole. This short-circuit represents about a neutral PH reading of 7.





There are two ways you can do the adjustment.

If you have a multimeter handy you can measure the value of the PO pin and adjust the offset potentiometer until PO measures 2.5V.

I prefer to just use the sketch below. Just download it to your Arduino as you will with any other sketch, open serial monitor and view the reading there. All this sketch does is to print the volts it receives from the analog pin and print it to the serial monitor. It of course first changes the digital value to volts to make it easier. Now simply turn the offset pot until it is exactly 2.5V. You can learn more about reading voltages and digital representation of volts here: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ReadAnalogVoltage>

Offset sketch

```
void setup() {  
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
// the loop routine runs over and over showing the voltage on A0  
void loop() {  
  // read the input on analog pin 0:  
  int sensorValue = analogRead(A0);  
  // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):  
  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);  
  // print out the value you read:  
  Serial.println(voltage);  
  delay(300);  
}
```

PH limit setting

There is another pot that acts like a limit switch. Basically, the D0 pin on the sensor board will supply 3.3V to the pin until a preset PH value (that you set with the limit pot) is reached, at this point a red LED will light up and the pin will go down to about 0V.

I did not play with this much but suppose it can be handy if you want to activate a buzzer or something if a certain PH is reached, it will work great on an Arduino digital port – that will go high from about 2V up.

This will work if the PH value goes higher than the set value. If you want it to trigger something when the PH goes lower, you need to monitor the digital pin to trigger when the digital pin goes low.

You will unfortunately not be able to set this limit between two values, either if the pH goes up to high or if the PH drop to low. Programmatically you of course can do an upper and lower limit.

Connecting and calibrating the PH probe.

The hard part is over and this offset does not have to be set again, even if you change PH probes. We have PH probes available here: PH probe Electrode BNC connector
Here is a couple of things to know about PH probes:

1. The probes readings change over time and need to be calibrated every now and again to make sure the value is still the same and be adjusted if it did change.
2. You need at least one PH buffer solution to calibration your PH probe. They are available at many different PH values, A buffer solution of 6.86 and 4.01 is most common as it covers the range of most applications. If you are only going to use one buffer solution make sure its value is near the value range you will use in your normal tests – if it is pool water a buffer solution of 6.86 is usually near enough.
3. Buffers come in pre-made solutions or as a powder. I prefer the powder because it is cheaper and does not have an expiration date. The powder is easy to make up as well, I suppose it depends on the power you will use, the one I use you add the powder to 250ml distilled water and stir until all powder is dissolved. It will last about a month once you added water to it.



A PH probe **takes some time** to get to the right value, allow it to be in the liquid you want to measure for at least two minutes or longer, it does not mean it will be stable at one pH value,

it will jump around a bit between 3 or 4 values but on the last digit, for example, between 6.84 – 6.88

4. PH values differ in different temperatures, although that might sound cumbersome, in the temperature range between 10 – 30 degrees Celcius the PH does not differ and from 30 degrees Celcius it goes up with about a pH of 0.01 to 50 degrees Celcius that is about 0.06. In most uses, it will be below 30 degrees Celcius and temperature do not have to be calculated in.
Hook up your PH probe after you removed the wire you used to short-circuit the BNC connector and download the sketch below.

PH measurement sketch

```
float calibration = 0.00; //change this value to calibrate
const int analogInPin = A0;
int sensorValue = 0;
unsigned long int avgValue;
float b;
int buf[10],temp;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  for(int i=0;i<10;i++)
  {
    buf[i]=analogRead(analogInPin);
    delay(30);
  }
  for(int i=0;i<9;i++)
  {
    for(int j=i+1;j<10;j++)
    {
      if(buf[i]>buf[j])
      {
        temp=buf[i];
        buf[i]=buf[j];
        buf[j]=temp;
      }
    }
  }
}
```

Sensor de gas metano

HANWEI ELECTRONICS

MQ-4

www.hwsensor.com

TECHNICAL DATA

MQ-4 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to CH₄, Natural gas.
- * Small sensitivity to alcohol, smoke.
- * Fast response .
- * Stable and long life
- * Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of CH₄, Natural gas LNG, avoid the noise of alcohol and cooking fumes and cigarette smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

| Symbol | Parameter name | Technical condition | Remarks |
|----------------|---------------------|---------------------|----------|
| V _c | Circuit voltage | 5V±0.1 | AC OR DC |
| V _H | Heating voltage | 5V±0.1 | AC OR DC |
| P _L | Load resistance | 20KΩ | |
| R _H | Heater resistance | 33Ω±5% | Room Tem |
| P _H | Heating consumption | less than 750mw | |

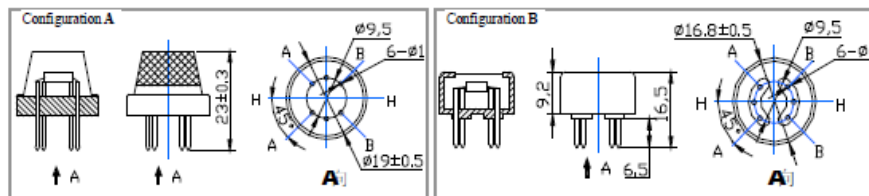
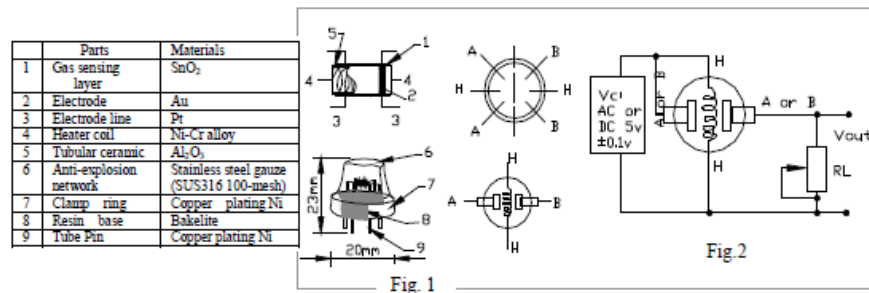
B. Environment condition

| Symbol | Parameter name | Technical condition | Remarks |
|-----------------|----------------------|--|--------------------------|
| T _{ao} | Using Tem | -10℃-50℃ | |
| T _{as} | Storage Tem | -20℃-70℃ | |
| R _H | Related humidity | less than 95%Rh | |
| O ₂ | Oxygen concentration | 21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity | minimum value is over 2% |

C. Sensitivity characteristic

| Symbol | Parameter name | Technical parameter | Remark 2 |
|---|----------------------------------|--|---|
| R _s | Sensing Resistance | 10KΩ - 60KΩ (1000ppm CH ₄) | Detecting concentration scope: 200-10000ppm CH ₄ , natural gas |
| α (1000ppm/ 5000ppm CH ₄) | Concentration slope rate | ≤0.6 | |
| Standard detecting condition | Temp: 20℃±2℃ Humidity: 65%±5% | V _c : 5V±0.1 V _H : 5V±0.1 | |
| Preheat time | Over 24 hour | | |

D. Structure and configuration, basic measuring circuit



TEL: 86-371-67169080

FAX: 86-371-67169090

E-mail: sales@hwsensor.com

Structure and configuration of MQ-4 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-4 have 6 pin, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

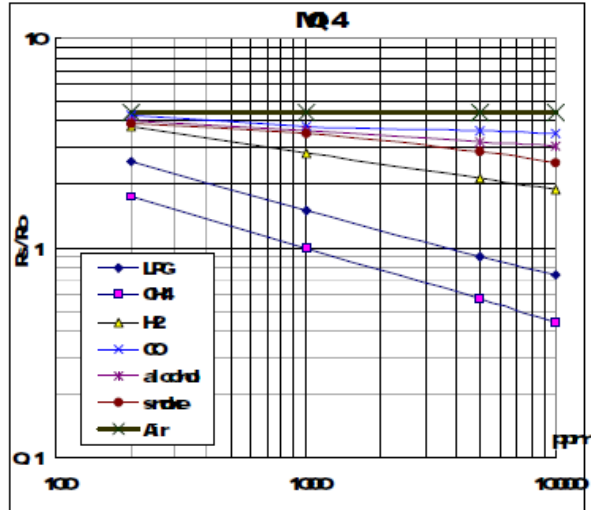


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-4

Fig.3 shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-4 for several gases. in their: Temp: 20°C, Humidity: 65%, O₂ concentration 21% RL=20kΩ
R₀: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in the clean air.
R_s: sensor resistance at various concentrations of gases.

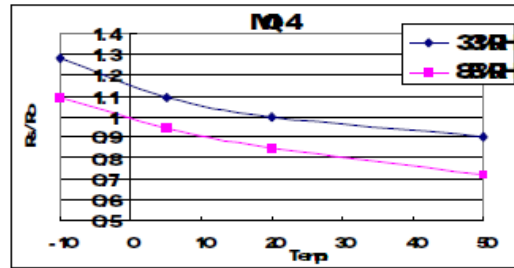


Fig.4 shows the typical dependence of the MQ-4 on temperature and humidity. R₀: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in air at 33%RH and 20 degree. R_s: sensor resistance at 1000ppm of CH₄ in air at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-4 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 5000ppm of CH₄ concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 20KΩ (10KΩ to 47KΩ).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsensor.com

MQ-4 Semiconductor Sensor for Flammable Gas

Profile

Sensitive material of MQ-4 gas sensor is SnO_2 , which with lower conductivity in clean air. When the target flammable gas exist, the sensor's conductivity gets higher along with the gas concentration rising. Users can convert the change of conductivity to correspond output signal of gas concentration through a simple circuit.

MQ-4 gas sensor has high sensitivity to methane, also has anti-interference to alcohol and other gases.

Features

It has good sensitivity to methane in wide range, and has advantages such as long lifespan, low cost and simple drive circuit & etc.

Main Applications

It is widely used in domestic gas leakage alarm, industrial flammable gas alarm and portable gas detector.

Technical Parameters Stable.1

| | | | |
|---|-----------------------|---|--|
| Model | | MQ-4 | |
| Sensor Type | | Semiconductor | |
| Standard Encapsulation | | Bakelite, Metal cap | |
| Target Gas | | Methane | |
| Detection range | | 300~10000ppm(CH_4) | |
| Standard Circuit Conditions | Loop Voltage | V_L | $\leq 24\text{V DC}$ |
| | Heater Voltage | V_H | $5.0\text{V} \pm 0.1\text{V AC or DC}$ |
| | Load Resistance | R_L | Adjustable |
| Sensor character under standard test conditions | Heater Resistance | R_H | $26\Omega \pm 3\Omega$ (room tem.) |
| | Heater consumption | P_H | $\leq 950\text{mW}$ |
| | Sensitivity | S | $R_S(\text{in air})/R_S(\text{in } 5000\text{ppmCH}_4) \geq 5$ |
| | Output Voltage | V_S | $2.5\text{V} \sim 4.0\text{V}$ (in 5000ppm CH_4) |
| | Concentration Slope | α | $\leq 0.6(R_{5000\text{ppm}}/R_{1000\text{ppm}} \text{CH}_4)$ |
| Standard test conditions | Tem. Humidity | $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}; 55\% \pm 5\% \text{RH}$ | |
| | Standard test circuit | $V_L: 5.0\text{V} \pm 0.1\text{V};$ $V_H: 5.0\text{V} \pm 0.1\text{V}$ | |
| | Preheat time | Over 48 hours | |

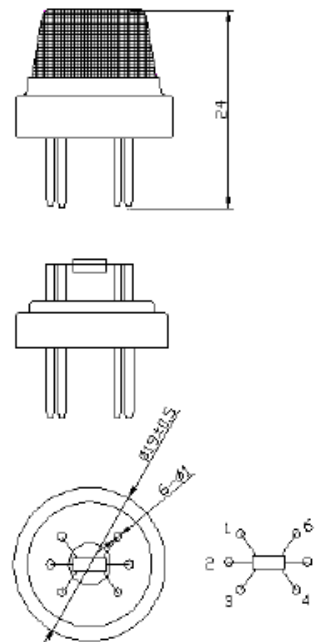


Fig1.Sensor Structure

Unit: mm

NOTE: Output voltage (V_S) is V_{R_L} in test environment.

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

Email: sales@winsensor.com

Basic Circuit

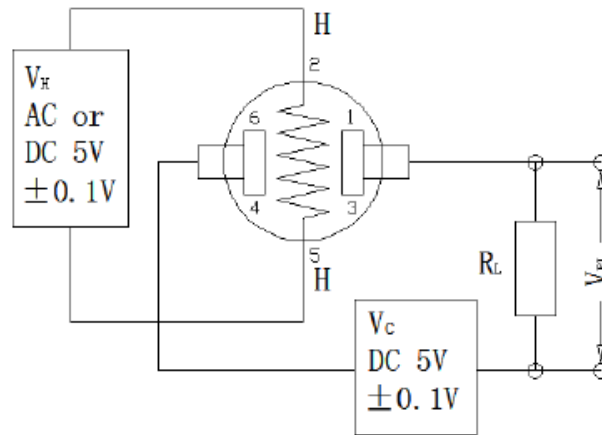


Fig2. MQ-4 Test Circuit

Instructions: The above fig is the basic test circuit of MQ-4. The sensor requires two voltage inputs: heater voltage (V_H) and circuit voltage (V_C). V_H is used to supply standard working temperature to the sensor and it can adopt DC or AC power, while V_{RL} is the voltage of load resistance R_L which is in series with sensor. V_C supplies the detect voltage to load resistance R_L and it should adopt DC power.

Description of Sensor Characters

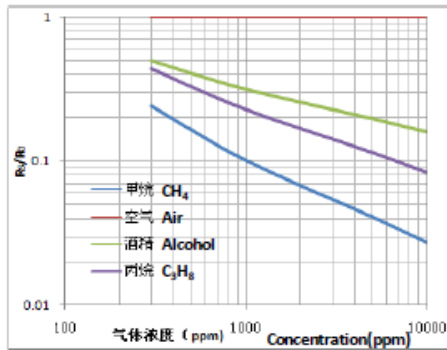


Fig3. Typical Sensitivity Curve

The ordinate is resistance ratio of the sensor (R_s/R_0), the abscissa is concentration of gases. R_s means resistance in target gas with different concentration, R_0 means resistance of sensor in dean air. All tests are finished under standard test conditions.

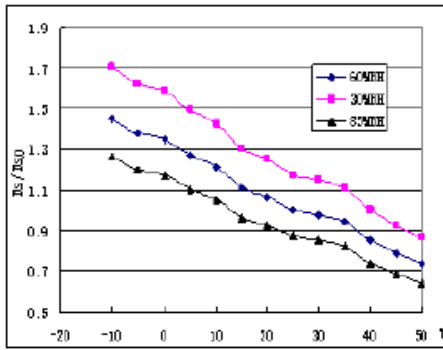


Fig4. Typical temperature/humidity characteristics

The ordinate is resistance ratio of the sensor (R_s/R_0). R_s means resistance of sensor in 5000ppm methane (CH_4) under different tem. and humidity. R_0 means resistance of the sensor in 5000ppm methane under 20°C/55%RH.

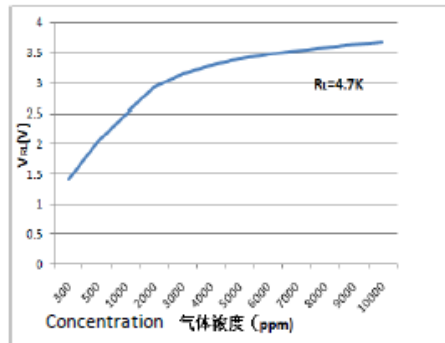


Fig5.Sensitivity Curve

Fig5 shows the V_{RL} in methane with different concentration. The resistance load R_L is 4.7 K Ω and the test is finished in standard test conditions.

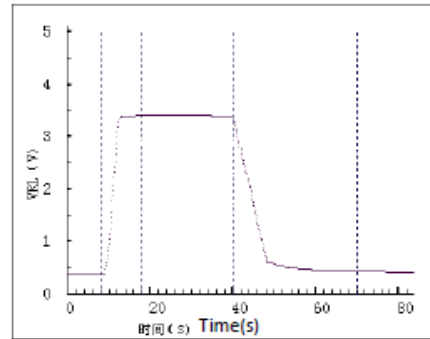


Fig6.Response and Resume

Fig5 shows the changing of V_{RL} in the process of putting the sensor into target gas and removing it out.

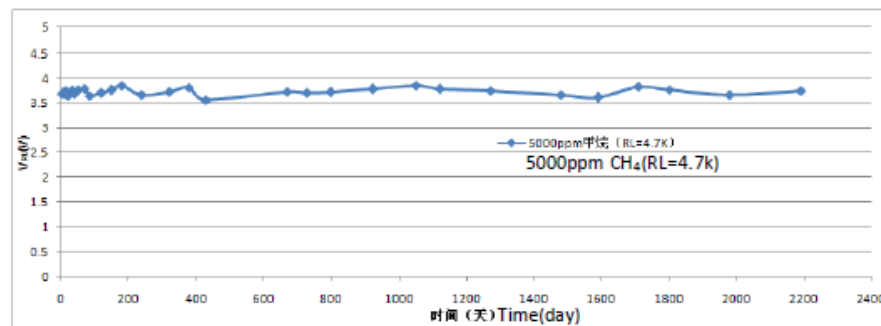


Fig7.long-term Stability

Test is finished in standard test conditions, the abscissa is observing time and the ordinate is V_{RL} .

Cautions

1. Following conditions must be prohibited

1.1 Exposed to organicsilicon steam

Sensing material will lose sensitivity and never recover if the sensor absorbs organic silicon steam. Sensors must avoid exposing to silicon bond, fixture, silicon latex, putty or plastic contain silicon environment.

1.2 High Corrosive gas

If the sensors are exposed to high concentration corrosive gas (such as H_2S , SO_x , Cl_2 , HCl etc.), it will not only result in corrosion of sensors structure, also it cause sincere sensitivity attenuation.

1.3 Alkali, Alkali metals salt, halogen pollution

The sensors performance will be changed badly if sensors be sprayed polluted by alkali metals salt



烁盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsensor.com

especially brine, or be exposed to halogen such as fluorine.

1.4 Touch water

Sensitivity of the sensors will be reduced when splattered or dipped in water.

1.5 Freezing

Do avoid icing on sensor's surface, otherwise sensing material will be broken and lost sensitivity.

1.6 Applied higher voltage

Applied voltage on sensor should not be higher than stipulated value, even if the sensor is not physically damaged or broken, it causes down-line or heater damaged, and bring on sensors' sensitivity characteristic changed badly.

1.7 Voltage on wrong pins

For 6 pins sensor, Pin 2&5 is heating electrodes, Pin (1,3)/(4,6) are testing electrodes (Pin 1 connects with Pin 3, while Pin 4 connects with Pin 6). If apply voltage on Pin 1&3 or 4&6, it will make lead broken; and no signal putout if apply on pins 2&4.

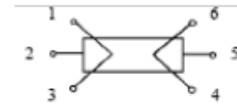


Fig8. Lead sketch

2. Following conditions must be avoided

2.1 Water Condensation

Indoor conditions, slight water condensation will influence sensors' performance lightly. However, if water condensation on sensors surface and keep a certain period, sensors' sensitive will be decreased.

2.2 Used in high gas concentration

No matter the sensor is electrified or not, if it is placed in high gas concentration for long time, sensors characteristic will be affected. If lighter gas sprays the sensor, it will cause extremely damage.

2.3 Long time storage

The sensors resistance will drift reversibly if it's stored for long time without electrify, this drift is related with storage conditions. Sensors should be stored in airproof bag without volatile silicon compound. For the sensors with long time storage but no electrify, they need long galvanical aging time for stability before using. The suggested aging time as follow:

Stable2.

| Storage Time | Suggested aging time |
|----------------------|------------------------|
| Less than one month | No less than 48 hours |
| 1 ~ 6 months | No less than 72 hours |
| More than six months | No less than 168 hours |

2.4 Long time exposed to adverse environment

No matter the sensors electrified or not, if exposed to adverse environment for long time, such as high humidity, high temperature, or high pollution etc., it will influence the sensors' performance badly.

2.5 Vibration

Continual vibration will result in sensors down-lead response then break. In transportation or assembling line, pneumatic screwdriver/ultrasonic welding machine can lead this vibration.

2.6 Concussion

If sensors meet strong concussion, it may lead its lead wire disconnected.

2.7 Usage Conditions

2.7.1 For sensor, handmade welding is optimal way. The welding conditions as follow:

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

Email: sales@winsensor.com



炜盛科技 Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd

www.winsensor.com

- Soldering flux: Rosin soldering flux contains least chlorine
 - homothermal soldering iron
 - Temperature: 250℃
 - Time: less than 3 seconds
- 2.7.2 If users choose wave-soldering, the following conditions should be obey:
- Soldering flux: Rosin soldering flux contains least chlorine
 - Speed: 1-2 Meter/Minute
 - Warm-up temperature: 100±20℃
 - Welding temperature: 250±10℃
 - One time pass wave crest welding machine

If disobey the above using terms, sensors sensitivity will be reduced.

Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd
Add: No.299, Jinsuo Road, National Hi-Tech Zone,
Zhengzhou 450001 China
Tel: +86-371-67169097/67169670
Fax: +86-371-60932988
E-mail: sales@winsensor.com
Website: www.winsensor.com

Tel: 86-371-67169097/67169670 Fax: 86-371-60932988

Email: sales@winsensor.com

Sensor de presión



Pressure

Freescale Semiconductor
Data Sheet: Technical Data

MPX5700
Rev 10, 10/2012

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5700 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Available in Absolute, Differential and Gauge Configurations
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element

MPX5700 Series

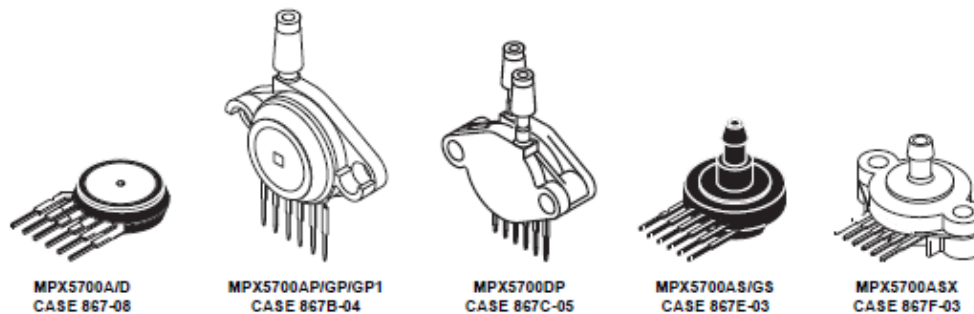
0 to 700 kPa (0 to 101.5 psi)
15 to 700 kPa (2.18 to 101.5 psi)
0.2 to 4.7 V Output

ORDERING INFORMATION

| Device Name | Case No. | # of Ports | | | Pressure Type | | | Device Name |
|----------------------------------|----------|------------|--------|------|---------------|--------------|----------|-------------|
| | | None | Single | Dual | Gauge | Differential | Absolute | |
| Unibody Package (MPX5700 Series) | | | | | | | | |
| MPX5700A | 867 | * | | | | | * | MPX5700A |
| MPX5700AP | 867B | | * | | | | * | MPX5700AP |
| MPX5700AS | 867E | | * | | | | * | MPX5700A |
| MPX5700ASX | 867F | | * | | | | * | MPX5700A |
| MPX5700D | 867 | * | | | * | | | MPX5700D |
| MPX5700DP | 867C | | | * | | * | | MPX5700DP |
| MPX5700GP | 867B | | * | | * | | | MPX5700GP |
| MPX5700GP ⁽¹⁾ | 867B | | * | | * | | | MPX5700GP |
| MPX5700GS | 867E | | * | | * | | | MPX5700D |

1. MPX5700GP1 has 90 degree lead form.

UNIBODY PACKAGES



© 2007-2009, 2012 Freescale Semiconductor, Inc. All rights reserved.





Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P1 > P2$. Decoupling circuit shown in required to meet electrical specifications.)

| Characteristic | Symbol | Min | Typ | Max | Unit |
|--|-----------|-------|-----|-------|-------------|
| Pressure Range ⁽¹⁾ Gauge, Differential: MPX5700D Absolute: MPX5700A | P_{OP} | 0 | — | 700 | kPa |
| | | 15 | — | 700 | |
| Supply Voltage ⁽²⁾ | V_S | 4.75 | 5.0 | 5.25 | Vdc |
| Supply Current | I_O | — | 7.0 | 10 | mAdc |
| Zero Pressure Offset ⁽³⁾ Gauge, Differential (0 to 85°C) Absolute (0 to 85°C) | V_{off} | 0.088 | 0.2 | 0.313 | Vdc |
| | | 0.184 | — | 0.409 | |
| Full Scale Output ⁽⁴⁾ (0 to 85°C) | V_{FSO} | 4.587 | 4.7 | 4.813 | Vdc |
| Full Scale Span ⁽⁵⁾ (0 to 85°C) | V_{FSS} | — | 4.5 | — | Vdc |
| Accuracy ⁽⁶⁾ (0 to 85°C) | — | — | — | ±2.5 | % V_{FSS} |
| Sensitivity | V/P | — | 6.4 | — | mV/kPa |
| Response Time ⁽⁷⁾ | t_R | — | 1.0 | — | ms |
| Output Source Current at Full Scale Output | I_{O+} | — | 0.1 | — | mAdc |
| Warm-Up Time ⁽⁸⁾ | — | — | 20 | — | ms |

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range.
- Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
ToSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.
ToOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.
Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Warm-up Time is defined as the time required for the device to meet the specified output voltage after the pressure has been stabilized.

MPX5700

2

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.



Maximum Ratings

Table 2. Maximum Ratings⁽¹⁾

| Parameter | Symbol | Value | Unit |
|--|------------|-------------|------|
| Maximum Pressure ⁽²⁾ ($P_2 \leq 1$ Atmosphere) | P_{1max} | 2800 | kPa |
| Storage Temperature | T_{stg} | -40 to +125 | °C |
| Operating Temperature | T_A | -40 to +125 | °C |

1. Maximum Ratings apply to Case 867 only. Extended exposure at the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.
2. This sensor is designed for applications where P_1 is always greater than, or equal to P_2 . P_2 maximum is 500 kPa.

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry integrated on a pressure sensor chip.

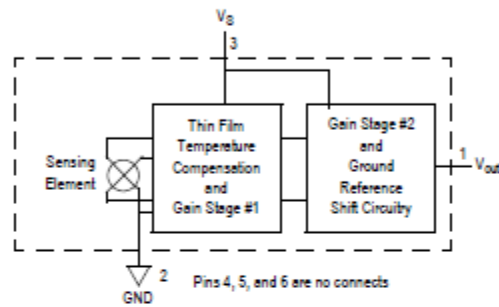


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic



On-chip Temperature Compensation and Calibration

Figure 3 illustrates both the Differential/Gauge and the Absolute Sensing Chip in the basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm. (For use of the MPX5700D in a high-pressure cyclic application, consult the factory.)

The MPX5700 series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor

performance and long-term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

Figure 2 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit shown in . The output will saturate outside of the specified pressure range.

shows the recommended decoupling circuit for interfacing the output of the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

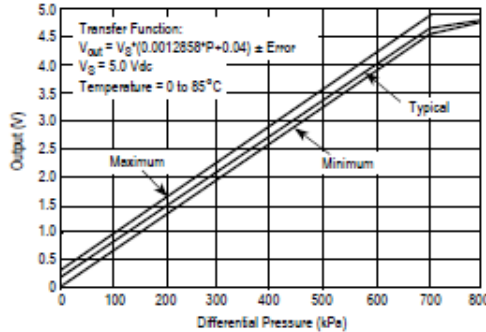


Figure 2. Output vs. Pressure Differential

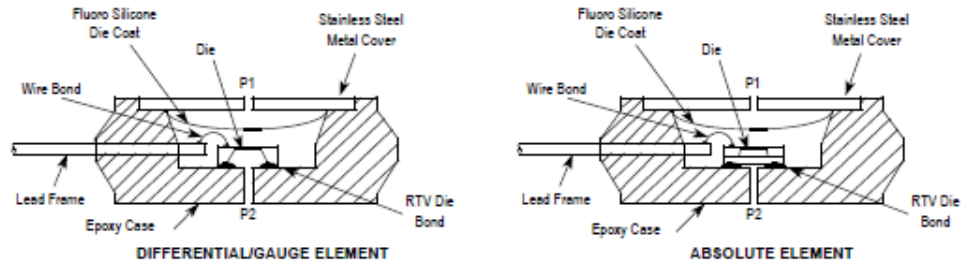


Figure 3. Cross-Sectional Diagrams (not to scale)

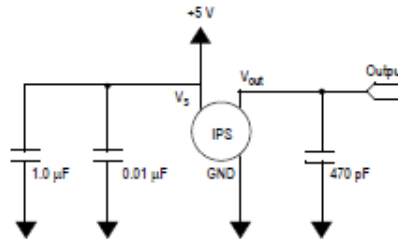


Figure 4. Recommended Power Supply Decoupling and Output Filtering (For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646)

MPX5700

4

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.



Pressure

PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Freescale designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing fluorosilicone gel which protects the die from harsh media. The Freescale MPX

pressure sensor is designed to operate with positive differential pressure applied, $P1 > P2$.

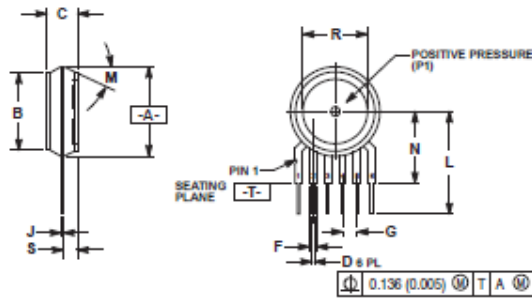
The Pressure (P1) side may be identified by using the following table.

| Part Number | Case Type | Pressure (P1) Side Identifier |
|--------------|-----------|-------------------------------|
| MPX5700A/D | 867 | Stainless Steel Cap |
| MPX5700DP | 867C | Side with Part Marking |
| MPX5700GP/AP | 867B | Side with Port Attached |
| MPX5700GS/AS | 867E | Side with Port Attached |
| MPX5700ASX | 867F | Side with Port Attached |

MPX5700



PACKAGE DIMENSIONS



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1992.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. DIMENSION -A- IS INCLUSIVE OF THE MOLD STOP RING. MOLD STOP RING NOT TO EXCEED 16.00 (0.630).

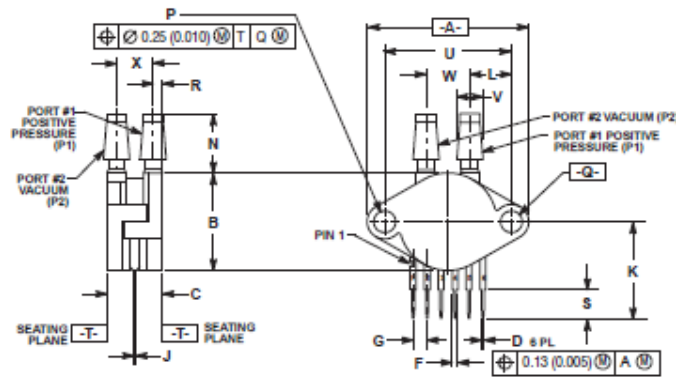
| DIM | INCHES | | MILLIMETERS | |
|-----|-----------|-------|-------------|-------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| A | 0.525 | 0.630 | 15.11 | 16.00 |
| B | 0.514 | 0.534 | 13.06 | 13.56 |
| C | 0.200 | 0.220 | 5.08 | 5.59 |
| D | 0.027 | 0.033 | 0.68 | 0.84 |
| F | 0.048 | 0.064 | 1.22 | 1.63 |
| G | 0.100 BSC | | 2.54 BSC | |
| J | 0.014 | 0.016 | 0.36 | 0.41 |
| L | 0.665 | 0.725 | 17.65 | 18.42 |
| M | 30° NOM | | 30° NOM | |
| N | 0.475 | 0.495 | 12.07 | 12.57 |
| R | 0.430 | 0.450 | 10.92 | 11.43 |
| S | 0.060 | 0.076 | 2.29 | 2.68 |

- STYLE 1:
PIN 1:
2. -VOUT
3. VCC
4. V1
5. V2
6. VEX

- STYLE 2:
PIN 1:
2. OPEN
3. -VOUT
4. +VSUPPLY
5. -VOUT
6. OPEN

- STYLE 3:
PIN 1:
2. OPEN
3. GROUND
4. -VOUT
5. +VSUPPLY
6. OPEN

CASE 867-08 ISSUE N BASIC ELEMENT



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

| DIM | INCHES | | MILLIMETERS | |
|-----|-----------|-------|-------------|-------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| A | 1.145 | 1.175 | 29.18 | 29.85 |
| B | 0.695 | 0.715 | 17.45 | 18.16 |
| C | 0.435 | 0.455 | 10.79 | 11.65 |
| D | 0.027 | 0.033 | 0.68 | 0.84 |
| F | 0.048 | 0.064 | 1.22 | 1.63 |
| G | 0.100 BSC | | 2.54 BSC | |
| J | 0.014 | 0.016 | 0.36 | 0.41 |
| K | 0.665 | 0.725 | 17.65 | 18.42 |
| L | 0.200 | 0.300 | 7.62 | 7.62 |
| N | 0.450 | 0.440 | 10.57 | 11.18 |
| P | 0.150 | 0.159 | 3.80 | 4.04 |
| Q | 0.150 | 0.159 | 3.80 | 4.04 |
| R | 0.060 | 0.063 | 1.50 | 2.11 |
| S | 0.290 | 0.280 | 5.50 | 6.10 |
| U | 0.910 BSC | | 23.11 BSC | |
| V | 0.180 | 0.194 | 4.50 | 4.93 |
| W | 0.310 | 0.330 | 7.87 | 8.38 |
| X | 0.748 | 0.779 | 6.90 | 7.95 |

- STYLE 1:
PIN 1:
2. V_{ERR}
3. GROUND
4. V_{CC}
5. V1
6. V2
7. VEX

CASE 867C-05 ISSUE F PRESSURE AND VACUUM SIDES PORTED (DP)

MPX5700

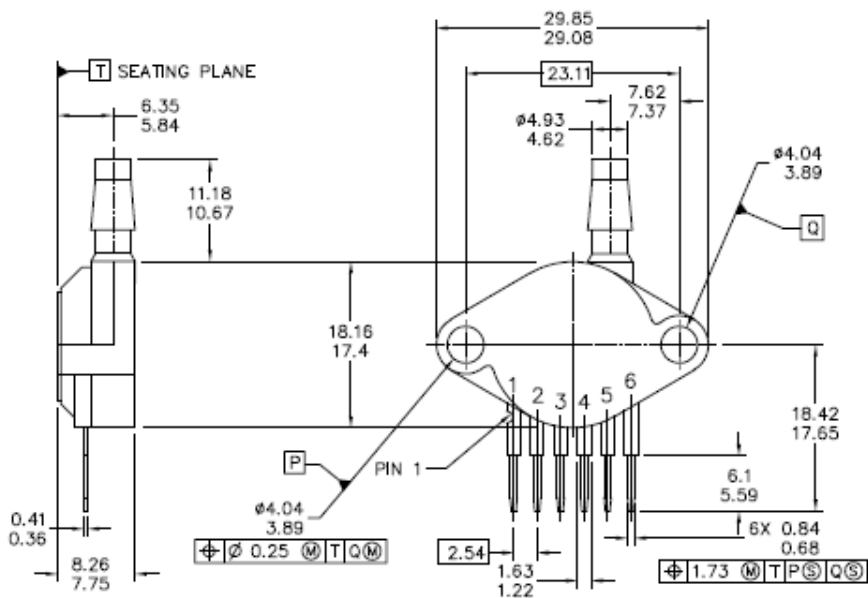
6

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.



Pressure

PACKAGE DIMENSIONS



| | | | |
|---|--------------------------|----------------------------|--|
| © FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED. | MECHANICAL OUTLINE | PRINT VERSION NOT TO SCALE | |
| TITLE: SENSOR, 6 LEAD UNIBODY CELL, AP & GP 01ASB09087B | DOCUMENT NO: 9BASB42796B | REV: G | |
| | CASE NUMBER: 867B-04 | 28 JUL 2005 | |
| | STANDARD: NON-JEDEC | | |

PAGE 1 OF 2

CASE 867B-04
ISSUE G
PRESSURE SIDE PORTED (AP, GP)

MPX5700

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.

7



PACKAGE DIMENSIONS

NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
2. DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. 867B-01 THRU -3 OBSOLETE, NEW STANDARD 867B-04.

STYLE 1:

- PIN 1: V OUT
 2: GROUND
 3: VCC
 4: V1
 5: V2
 6: V EX

| | | | |
|---|--------------------|----------------------------|-------------|
| © FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED. | MECHANICAL OUTLINE | PRINT VERSION NOT TO SCALE | |
| TITLE: SENSOR, 6 LEAD UNIBODY CELL, AP & GP 01ASB09087B | | DOCUMENT NO: 98ASB42796B | REV: G |
| | | CASE NUMBER: 867B-04 | 28 JUL 2005 |
| | | STANDARD: NON-JEDEC | |

PAGE 2 OF 2

**CASE 867B-04
 ISSUE G
 PRESSURE SIDE PORTED (AP, GP)**

MPX5700

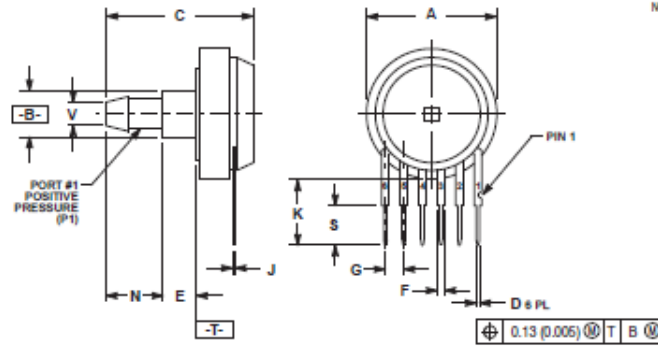
8

Sensors
Freescale Semiconductor, Inc.



Pressure

PACKAGE DIMENSIONS

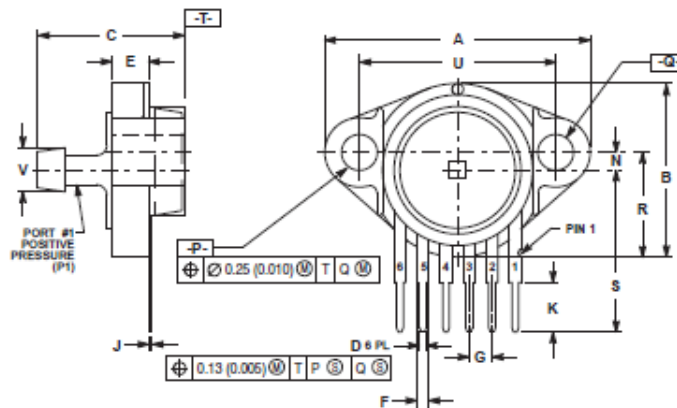


- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

| DIM | INCHES | | MILLIMETERS | |
|-----|-----------|-------|-------------|-------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| A | 0.690 | 0.720 | 17.53 | 18.28 |
| B | 0.545 | 0.555 | 6.29 | 6.48 |
| C | 0.790 | 0.820 | 19.91 | 20.82 |
| D | 0.027 | 0.033 | 0.69 | 0.84 |
| E | 0.175 | 0.185 | 4.52 | 4.72 |
| F | 0.048 | 0.064 | 1.22 | 1.63 |
| G | 0.100 BSC | | 2.54 BSC | |
| J | 0.014 | 0.016 | 0.36 | 0.41 |
| K | 0.545 | 0.555 | 6.29 | 6.53 |
| N | 0.300 | 0.310 | 7.62 | 7.87 |
| S | 0.220 | 0.240 | 5.59 | 6.10 |
| V | 0.192 | 0.194 | 4.87 | 4.93 |

- STYLE 1:
PIN 1: V_{cc}
2: GROUND
3: V_{cc}
4: VI
5: V2
6: V_{cc}

CASE 867E-03
ISSUE D
PRESSURE SIDE PORTED (AS, GS)



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

| DIM | INCHES | | MILLIMETERS | |
|-----|-----------|-------|-------------|-------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| A | 1.060 | 1.120 | 27.03 | 28.45 |
| B | 0.740 | 0.750 | 18.80 | 19.30 |
| C | 0.830 | 0.850 | 19.00 | 19.51 |
| D | 0.027 | 0.033 | 0.68 | 0.84 |
| E | 0.180 | 0.180 | 4.06 | 4.57 |
| F | 0.048 | 0.064 | 1.22 | 1.63 |
| G | 0.100 BSC | | 2.54 BSC | |
| J | 0.014 | 0.016 | 0.36 | 0.41 |
| K | 0.290 | 0.290 | 5.59 | 6.10 |
| N | 0.070 | 0.080 | 1.78 | 2.03 |
| P | 0.150 | 0.160 | 3.81 | 4.06 |
| Q | 0.150 | 0.160 | 3.81 | 4.06 |
| R | 0.440 | 0.460 | 11.18 | 11.68 |
| S | 0.605 | 0.725 | 15.37 | 18.42 |
| U | 0.840 | 0.860 | 21.34 | 21.84 |
| V | 0.192 | 0.194 | 4.82 | 4.93 |

- STYLE 1:
PIN 1: V_{cc}
2: GROUND
3: V_{cc}
4: VI
5: V2
6: V_{cc}

CASE 867F-03
ISSUE D
PRESSURE SIDE AXIAL PORT (ASX)

MPX5700

Hoja de datos de la placa Arduino UNO



Arduino® UNO R3

ii
5



Description

The Arduino® UNO R3 is the perfect board to get familiar with electronics and coding. This versatile development board is equipped with the well-known ATmega328P and the ATmega 16U2 Processor.

This board will give you a great first experience within the world of Arduino.

Target areas:

Maker, introduction, industries



Features

- **ATMega328P Processor**
 - **Memory**
 - AVR CPU at up to 16 MHz
 - 32 kB Flash
 - 2 kB SRAM
 - 1 kB EEPROM
 - **Security**
 - Power On Reset (POR)
 - Brown Out Detection (BOD)
 - **Peripherals**
 - 2x 8-bit Timer/Counter with a dedicated period register and compare channels
 - 1x 16-bit Timer/Counter with a dedicated period register, input capture and compare channels
 - 1x USART with fractional baud rate generator and start-of-frame detection
 - 1x controller/peripheral Serial Peripheral Interface (SPI)
 - 1x Dual mode controller/peripheral I2C
 - 1x Analog Comparator (AC) with a scalable reference input
 - Watchdog Timer with separate on-chip oscillator
 - Six PWM channels
 - Interrupt and wake-up on pin change
- **ATMega16U2 Processor**
 - 8-bit AVR® RISC-based microcontroller
- **Memory**
 - 16 kB ISP Flash
 - 512B EEPROM
 - 512B SRAM
 - debugWIRE interface for on-chip debugging and programming
- **Power**
 - 2.7-5.5 volts



CONTENTS

| | |
|---|-----------|
| 1 The Board | 4 |
| 1.1 Application Examples | 4 |
| 1.2 Related Products | 4 |
| 2 Ratings | 5 |
| 2.1 Recommended Operating Conditions | 5 |
| 2.2 Power Consumption | 5 |
| 3 Functional Overview | 5 |
| 3.1 Board Topology | 5 |
| 3.2 Processor | 6 |
| 3.3 Power Tree | 7 |
| 4 Board Operation | 8 |
| 4.1 Getting Started - IDE | 8 |
| 4.2 Getting Started - Arduino Cloud Editor | 8 |
| 4.3 Sample Sketches | 8 |
| 4.4 Online Resources | 8 |
| 5 Connector Pinouts | 9 |
| 5.1 J ANALOG | 10 |
| 5.2 J DIGITAL | 10 |
| 5.3 Mechanical Information | 11 |
| 5.4 Board Outline & Mounting Holes | 11 |
| 6 Certifications | 12 |
| 6.1 Declaration of Conformity CE DoC (EU) | 12 |
| 6.2 Declaration of Conformity to EU RoHS & REACH 211 01/19/2021 | 12 |
| 6.3 Conflict Minerals Declaration | 13 |
| 7 FCC Caution | 13 |
| 8 Company Information | 14 |
| 9 Reference Documentation | 14 |
| 10 Revision History | 14 |



1 The Board

1.1 Application Examples

The UNO board is the flagship product of Arduino. Regardless if you are new to the world of electronics or will use the UNO R3 as a tool for education purposes or industry-related tasks, the UNO R3 is likely to meet your needs.

First entry to electronics: If this is your first project within coding and electronics, get started with our most used and documented board; UNO. It is equipped with the well-known ATmega328P processor, 14 digital input/output pins, 6 analog inputs, USB connections, ICSP header and reset button. This board includes everything you will need for a great first experience with Arduino.

Industry-standard development board: Using the UNO R3 board in industries, there are a range of companies using the UNO R3 board as the brain for their PLC's.

Education purposes: Although the UNO R3 board has been with us for about ten years, it is still widely used for various education purposes and scientific projects. The board's high standard and top quality performance makes it a great resource to capture real time from sensors and to trigger complex laboratory equipment to mention a few examples.

1.2 Related Products

- Arduino Starter Kit
- Arduino UNO R4 Minima
- Arduino UNO R4 WiFi
- Tinkerkit Braccio Robot



2 Ratings

2.1 Recommended Operating Conditions

| Symbol | Description | Min | Max |
|--------|--|-----------------|-----------------|
| | Conservative thermal limits for the whole board: | -40 °C (-40 °F) | 85 °C (185 °F) |

NOTE: In extreme temperatures, EEPROM, voltage regulator, and the crystal oscillator, might not work as expected.

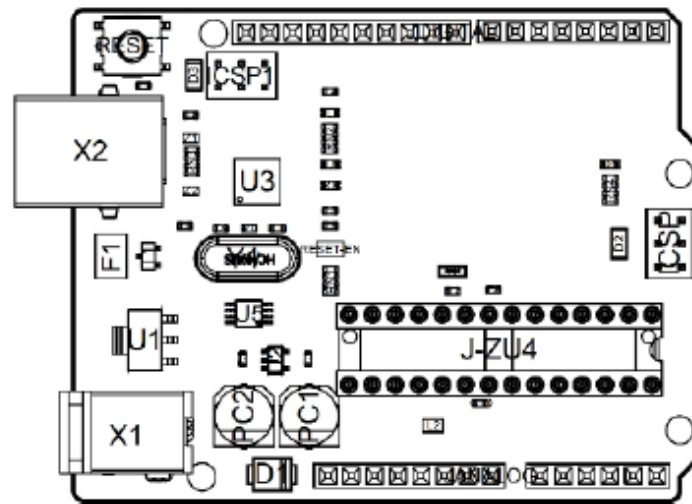
2.2 Power Consumption

| Symbol | Description | Min | Typ | Max | Unit |
|---------|--|-----|-----|-----|------|
| VINMax | Maximum input voltage from VIN pad | 6 | - | 20 | V |
| VUSBMax | Maximum input voltage from USB connector | - | - | 5.5 | V |
| PMax | Maximum Power Consumption | - | - | xx | mA |

3 Functional Overview

3.1 Board Topology

Top view



Board topology



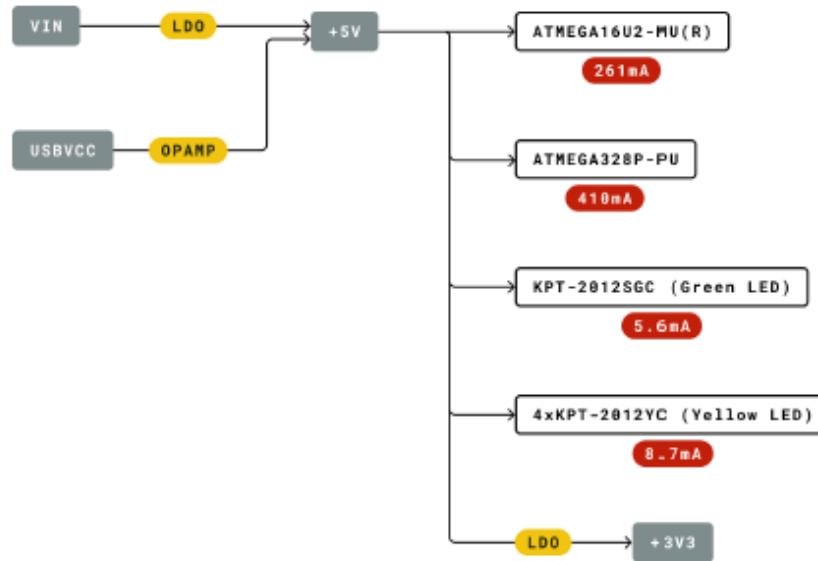
| Ref. | Description | Ref. | Description |
|-------|--------------------------------|-------|---------------------------------------|
| X1 | Power jack 2.1x5.5mm | U1 | SPX1117M3-L-5 Regulator |
| X2 | USB B Connector | U3 | ATMEGA16U2 Module |
| PC1 | EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor | U5 | LMV358LIST-A.9 IC |
| PC2 | EEE-1EA470WP 25V SMD Capacitor | F1 | Chip Capacitor, High Density |
| D1 | CGRA4007-G Rectifier | ICSP | Pin header connector (through hole 6) |
| J-ZU4 | ATMEGA328P Module | ICSP1 | Pin header connector (through hole 6) |
| Y1 | ECS-160-20-4X-DU Oscillator | | |

3.2 Processor

The Main Processor is a ATmega328P running at up to 20 MHz. Most of its pins are connected to the external headers, however some are reserved for internal communication with the USB Bridge coprocessor.



3.3 Power Tree



- Legend:
- Component
 - Power I/O
 - Conversion Type
 - Max Current
 - Voltage Range

Power tree



4 Board Operation

4.1 Getting Started - IDE

If you want to program your UNO R3 while offline you need to install the Arduino Desktop IDE [1] To connect the UNO R3 to your computer, you'll need a USB-B cable. This also provides power to the board, as indicated by the LED.

4.2 Getting Started - Arduino Cloud Editor

All Arduino boards, including this one, work out-of-the-box on the Arduino Cloud Editor [2], by just installing a simple plugin.

The Arduino Cloud Editor is hosted online, therefore it will always be up-to-date with the latest features and support for all boards. Follow [3] to start coding on the browser and upload your sketches onto your board.

4.3 Sample Sketches

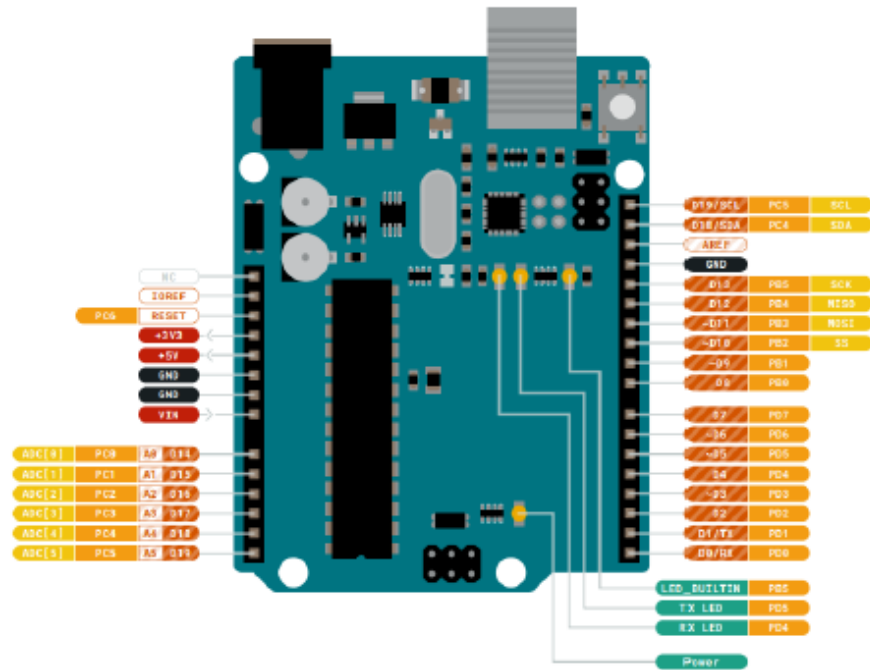
Sample sketches for the UNO R3 can be found either in the "Examples" menu in the Arduino IDE or in the "Documentation" section of the Arduino website [4].

4.4 Online Resources

Now that you have gone through the basics of what you can do with the board you can explore the endless possibilities it provides by checking exciting projects on Arduino Project Hub [5], the Arduino Library Reference [6] and the online Arduino store [7] where you will be able to complement your board with sensors, actuators and more.



5 Connector Pinouts



Pinout



5.1 ANALOG

| Pin | Function | Type | Description |
|-----|----------|------------------|---|
| 1 | NC | NC | Not connected |
| 2 | IOREF | IOREF | Reference for digital logic V - connected to 5V |
| 3 | Reset | Reset | Reset |
| 4 | +3V3 | Power | +3V3 Power Rail |
| 5 | +5V | Power | +5V Power Rail |
| 6 | GND | Power | Ground |
| 7 | GND | Power | Ground |
| 8 | VIN | Power | Voltage Input |
| 9 | A0 | Analog/GPIO | Analog input 0 /GPIO |
| 10 | A1 | Analog/GPIO | Analog input 1 /GPIO |
| 11 | A2 | Analog/GPIO | Analog input 2 /GPIO |
| 12 | A3 | Analog/GPIO | Analog input 3 /GPIO |
| 13 | A4/SDA | Analog input/I2C | Analog input 4/I2C Data line |
| 14 | A5/SCL | Analog input/I2C | Analog input 5/I2C Clock line |

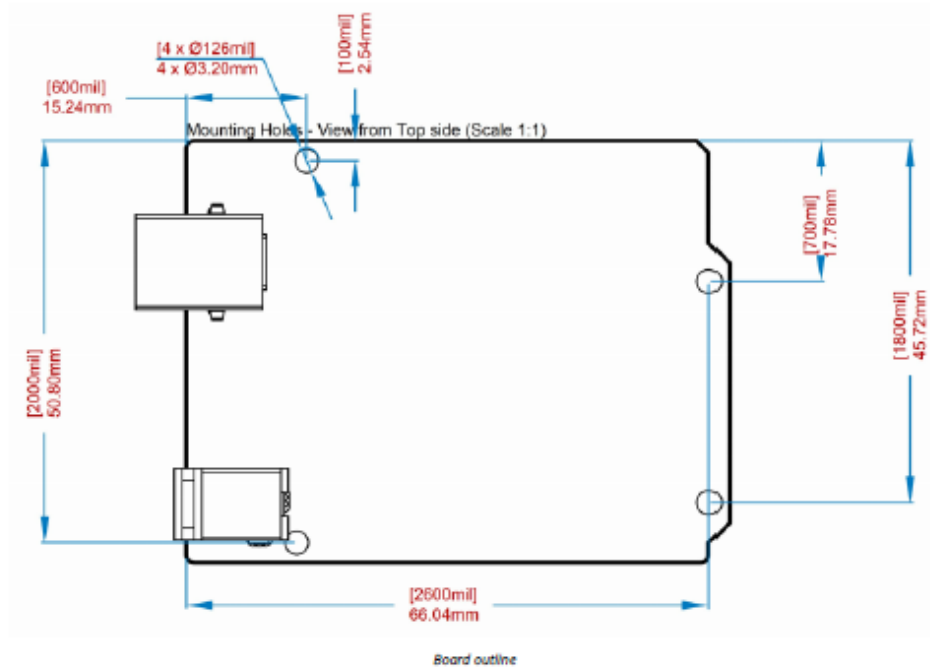
5.2 DIGITAL

| Pin | Function | Type | Description |
|-----|----------|--------------|--|
| 1 | D0 | Digital/GPIO | Digital pin 0/GPIO |
| 2 | D1 | Digital/GPIO | Digital pin 1/GPIO |
| 3 | D2 | Digital/GPIO | Digital pin 2/GPIO |
| 4 | D3 | Digital/GPIO | Digital pin 3/GPIO |
| 5 | D4 | Digital/GPIO | Digital pin 4/GPIO |
| 6 | D5 | Digital/GPIO | Digital pin 5/GPIO |
| 7 | D6 | Digital/GPIO | Digital pin 6/GPIO |
| 8 | D7 | Digital/GPIO | Digital pin 7/GPIO |
| 9 | D8 | Digital/GPIO | Digital pin 8/GPIO |
| 10 | D9 | Digital/GPIO | Digital pin 9/GPIO |
| 11 | SS | Digital | SPI Chip Select |
| 12 | MOSI | Digital | SPI1 Main Out Secondary In |
| 13 | MISO | Digital | SPI Main In Secondary Out |
| 14 | SCK | Digital | SPI serial clock output |
| 15 | GND | Power | Ground |
| 16 | AREF | Digital | Analog reference voltage |
| 17 | A4/SD4 | Digital | Analog input 4/I2C Data line (duplicated) |
| 18 | A5/SD5 | Digital | Analog input 5/I2C Clock line (duplicated) |



5.3 Mechanical Information

5.4 Board Outline & Mounting Holes





6 Certifications

6.1 Declaration of Conformity CE DoC (EU)

We declare under our sole responsibility that the products above are in conformity with the essential requirements of the following EU Directives and therefore qualify for free movement within markets comprising the European Union (EU) and European Economic Area (EEA).

| | |
|--|---|
| ROHS 2 Directive 2011/65/EU | |
| Conforms to: | EN50581:2012 |
| Directive 2014/35/EU. (LVD) | |
| Conforms to: | EN 60950-1:2006/A11:2009/A1:2010/A12:2011/AC:2011 |
| Directive 2004/40/EC & 2008/46/EC & 2013/35/EU, EMF | |
| Conforms to: | EN 62311:2008 |

6.2 Declaration of Conformity to EU RoHS & REACH 211 01/19/2021

Arduino boards are in compliance with RoHS 2 Directive 2011/65/EU of the European Parliament and RoHS 3 Directive 2015/863/EU of the Council of 4 June 2015 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

| Substance | Maximum limit (ppm) |
|--|---------------------|
| Lead (Pb) | 1000 |
| Cadmium (Cd) | 100 |
| Mercury (Hg) | 1000 |
| Hexavalent Chromium (Cr6+) | 1000 |
| Poly Brominated Biphenyls (PBB) | 1000 |
| Poly Brominated Diphenyl ethers (PBDE) | 1000 |
| Bis(2-Ethylhexyl) phthalate (DEHP) | 1000 |
| Benzyl butyl phthalate (BBP) | 1000 |
| Dibutyl phthalate (DBP) | 1000 |
| Diisobutyl phthalate (DIBP) | 1000 |

Exemptions: No exemptions are claimed.

Arduino Boards are fully compliant with the related requirements of European Union Regulation (EC) 1907 /2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals (REACH). We declare none of the SVHCs (<https://echa.europa.eu/web/guest/candidate-list-table>), the Candidate List of Substances of Very High Concern for authorization currently released by ECHA, is present in all products (and also package) in quantities totaling in a concentration equal or above 0.1%. To the best of our knowledge, we also declare that our products do not contain any of the substances listed on the "Authorization List" (Annex XIV of the REACH regulations) and Substances of Very High Concern (SVHC) in any significant amounts as specified by the Annex XVII of Candidate list published by ECHA (European Chemical Agency) 1907 /2006/EC.



6.3 Conflict Minerals Declaration

As a global supplier of electronic and electrical components, Arduino is aware of our obligations with regards to laws and regulations regarding Conflict Minerals, specifically the Dodd-Frank Wall Street Reform and Consumer Protection Act, Section 1502. Arduino does not directly source or process conflict minerals such as Tin, Tantalum, Tungsten, or Gold. Conflict minerals are contained in our products in the form of solder, or as a component in metal alloys. As part of our reasonable due diligence Arduino has contacted component suppliers within our supply chain to verify their continued compliance with the regulations. Based on the information received thus far we declare that our products contain Conflict Minerals sourced from conflict-free areas.

7 FCC Caution

Any Changes or modifications not expressly approved by the party responsible for compliance could void the user's authority to operate the equipment.

This device complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions:

- (1) This device may not cause harmful interference
- (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

FCC RF Radiation Exposure Statement:

1. This Transmitter must not be co-located or operating in conjunction with any other antenna or transmitter.
2. This equipment complies with RF radiation exposure limits set forth for an uncontrolled environment.
3. This equipment should be installed and operated with minimum distance 20cm between the radiator & your body.

English: User manuals for license exempt radio apparatus shall contain the following or equivalent notice in a conspicuous location in the user manual or alternatively on the device or both. This device complies with Industry Canada license-exempt RSS standard(s). Operation is subject to the following two conditions:

- (1) this device may not cause interference
- (2) this device must accept any interference, including interference that may cause undesired operation of the device.

French: Le présent appareil est conforme aux CNR d'Industrie Canada applicables aux appareils radio exempts de licence. L'exploitation est autorisée aux deux conditions suivantes :

- (1) l'appareil ne doit pas produire de brouillage
- (2) l'utilisateur de l'appareil doit accepter tout brouillage radioélectrique subi, même si le brouillage est susceptible d'en compromettre le fonctionnement.

IC SAR Warning:

English This equipment should be installed and operated with minimum distance 20 cm between the radiator and your body.



French: Lors de l'installation et de l'exploitation de ce dispositif, la distance entre le radiateur et le corps est d'au moins 20 cm.

Important: The operating temperature of the EUT can't exceed 85°C and shouldn't be lower than -40°C.

Hereby, Arduino S.r.l. declares that this product is in compliance with essential requirements and other relevant provisions of Directive 2014/53/EU. This product is allowed to be used in all EU member states.

8 Company Information

| | |
|-----------------|---|
| Company name | Arduino S.r.l |
| Company Address | Via Andrea Appiani 25 20900 MONZA Italy |

9 Reference Documentation

| Reference | Link |
|--|---|
| Arduino IDE (Desktop) | https://www.arduino.cc/en/Main/Software |
| Arduino Cloud Editor | https://create.arduino.cc/editor |
| Arduino Cloud Editor - Getting Started | https://docs.arduino.cc/arduino-cloud/guides/editor/ |
| Arduino Website | https://www.arduino.cc/ |
| Arduino Project Hub | https://create.arduino.cc/projecthub?by=part&part_id=11332&sort=trending |
| Library Reference | https://www.arduino.cc/reference/en/ |
| Arduino Store | https://store.arduino.cc/ |

10 Revision History

| Date | Revision | Changes |
|------------|----------|----------------------------------|
| 25/04/2024 | 3 | Updated link to new Cloud Editor |
| 26/07/2023 | 2 | General Update |
| 06/2021 | 1 | Datasheet release |