

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Materiales con el grado académico de Licenciatura

“Diseño y evaluación de un dispositivo de filtración poroso para la purificación de biogás de uso doméstico”

Realizado por: Roger Esteven Morales Sánchez

Profesor Guía: Dr. Bruno Chiné Polito

Profesores Lectores: Ing. Mario Conejo Solís

Ing. Jeimmy Gonzáles Masis

Cartago, 23 noviembre 2023

Escuela Acreditada por la Agencia de Acreditación de programas de Ingeniería y de Arquitectura (AAPIA)

TEC | Tecnológico
de Costa Rica



Resumen

Morales Sánchez, Esteven Morales, 2023. Diseño y evaluación de un dispositivo de filtración poroso para la purificación de biogás de uso doméstico. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor asesor: Dr. Bruno Chiné Polito.

Este proyecto de investigación se enfocó en el diseño y evaluación experimental de un dispositivo de filtración poroso para analizar el flujo y la caída de presión en un filtro al variar la geometría de los materiales filtrantes. Excluyendo la complejidad del biogás y su contenido de H_2S , se llevaron a cabo pruebas de laboratorio centradas en aspectos fluidodinámicos bajo flujo de aire. Se completó un circuito experimental con instrumentación para medir flujo y caída de presión en los materiales filtrantes.

Se desarrollaron tres dispositivos de purificación de biogás para entornos domésticos, diferenciados por materiales y capacidad de filtración. Dos filtros se fabricaron con PVC, mientras que el tercero utilizó policarbonato, permitiendo la visualización directa del material filtrante debido a su transparencia.

Las pruebas se realizaron con el primer filtro (300 mm de largo y 44 mm de diámetro) con diferentes geometrías de material filtrante: esferas de vidrio (16,48 mm de diámetro), cilindros de plástico ingenieril (12,4 mm de largo y 6,35 mm de diámetro) y cilindros de arcilla (13,76 mm de largo y 5,74 mm de diámetro). Los resultados destacan que la geometría del material tiene un impacto significativo en la caída de presión. En el caso de la geometría esférica, la caída de presión es lineal y aumenta con el incremento de presión del manómetro y el caudal; mientras que, para los cilindros de plástico ingenieril como material filtrante, la caída de presión es lineal, pero disminuye al aumentar la presión del manómetro y el caudal. Por otro lado, los cilindros de arcilla mantuvieron una caída de presión constante, independientemente de las variaciones en la presión o caudal.

Este estudio destaca la influencia directa de la geometría del material filtrante en el comportamiento de la caída de presión, brindando información valiosa para el diseño y optimización de dispositivos de filtración porosos.

Palabras clave: biogás, filtro, material filtrante, caída de presión, caudal.

Abstract

This research project focused on the experimental design and evaluation of a porous filtration device to analyze flow and pressure drop in a filter by varying the geometry of the filtering materials. Excluding the complexity of biogas and its H₂S content, laboratory tests were conducted focusing on fluid dynamic aspects under airflow. An experimental setup with instrumentation to measure flow and pressure drop in the filtering materials was completed.

Three biogas purification devices for domestic environments were developed, differentiated by materials and filtration capacity. Two filters were made of PVC, while the third used polycarbonate, allowing direct visualization of the filtering material due to its transparency.

Tests were carried out using the first filter (300 mm long and 44 mm in diameter) with different geometries of filtering material: glass spheres (16.48 mm in diameter), engineering plastic cylinders (12.4 mm long and 6.35 mm in diameter), and clay cylinders (13.76 mm long and 5.74 mm in diameter). The results highlight that the material's geometry significantly impacts pressure drop. In the case of spherical geometry, pressure drop is linear and increases with the manometer pressure and flow rate. Meanwhile, for engineering plastic cylinders as filtering material, pressure drop is linear but decreases with an increase in manometer pressure and flow rate. On the other hand, clay cylinders maintained a constant pressure drop, regardless of variations in pressure or flow rate.

This study emphasizes the direct influence of filtering material geometry on pressure drop behavior, providing valuable information for the design and optimization of porous filtration devices.

Keywords: biogas, filter, filtering material, pressure drop, flow rate.

**ACTA DE ENTREGA DEL INFORME FINAL
DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA**

Se certifica que se ha recibido el Informe Final de la Práctica Dirigida, realizada por el estudiante Roger Esteven Morales Sánchez, carné 2015090768, la cual se titula: Diseño y evaluación de un dispositivo de filtración poroso para la purificación de bioqás de uso doméstico y que se realizó en el tecnológico de Costa Rica en el II Semestre de 2023.

La Práctica Dirigida es un requisito académico del Programa de Bachiller en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería en Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento han sido declarados:

Públicos Confidenciales

Dr. Bruno Chiné Polito
Profesor Guía

Roger Esteven Morales
Roger Esteven Morales Sánchez
Estudiante

Ing. Jeimmy Gonzales Masis
Lector

Ing. Mario Conejo Solís
Lector

Met. Ronald Jiménez Salas
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Cartago, 23 de noviembre de 2023

Carta de entendimiento

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo, Roger Esteven Morales Sánchez carné 2015090768, autorizo (X) no autorizo () a la Biblioteca José Figueres Ferrer del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final de Graduación realizado por mi persona, con el título “Diseño y evaluación de un dispositivo de filtración poroso para la purificación de biogás de uso doméstico” para ser ubicado en el Repositorio institucional y Catálogo SIBITEC para ser accedido a través de la red Internet.

Roger Esteven Morales Sánchez

Roger Esteven Morales Sánchez

304980425

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres por darme la oportunidad de poder formarme en la educación superior, por estar conmigo en cada paso del camino durante estos años de esfuerzo y dedicación e impulsarme a salir adelante a pesar de lo difícil que fueran las situaciones que se presentaran. A mi hermana, quien ha sido un pilar incondicional, enseñándome que los sueños se alcanzan con perseverancia y trabajo duro.

Al profesor Bruno Chiné Polito, quien me brindó la oportunidad de desarrollar este proyecto de investigación bajo su tutela. Su orientación experta, constante apoyo y exigencia me han permitido alcanzar los resultados obtenidos. Me ha enseñado el valor de mi capacidad como estudiante, impulsándome siempre a superar mis propios límites.

Agradezco profundamente a la profesora Marcela Meneses Guzmán, Ignacio Mora Watson, Gabriel Trejos Vargas, Moisés Morera Alfaro y a todo el equipo del Centro de Investigación y Extensión en Materiales (CIEMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su generosidad al proporcionarme los recursos y herramientas necesarios ha sido crucial en cada etapa de mi investigación. Sin su ayuda incondicional, no habría logrado avanzar de la manera en que lo hice.

Por último, pero no menos importante, deseo expresar mi reconocimiento a la profesora Claudia Chaves Villareal, en representación de la empresa Biogás para Todos del Tecnológico de Costa Rica, por su valiosa colaboración en este proyecto. También agradezco enormemente a los profesores Jeimmy Gonzáles Masis y Mario Conejo Solís por sus valiosos aportes al documento de tesis.

DEDICATORIA

Se lo dedico a quienes me inspiraron, a quienes me ayudaron a llegar donde he llegado, a mis padres, a mis héroes.

Índice General

	Página
Índice de tablas	9
Índice de figuras	9
Índice de gráficos.....	10
1. Introducción	12
1.1. Identificación de la empresa	12
1.2. Justificación del proyecto.....	12
1.3. Impacto Socio-Ambiental	13
1.4. Objetivos del estudio	14
1.4.1. <i>Objetivo General</i>	14
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	14
1.5. Alcances y limitaciones	14
2. Marco Teórico	15
2.1. Biogás como fuente de energía renovable	15
2.2. Importancia de utilizar biogás en el contexto domestico	16
2.3. Métodos convencionales para la purificación de biogás	17
2.4. Flujo de fluidos en medios porosos	20
2.5. Ley de Darcy.....	22
3. Metodología	24
3.1. Material filtrante	24
3.2. Funcionamiento de los filtros.....	25
3.3. Evaluación del rendimiento de los medios filtrantes.....	25
3.4. Diseño de un filtro para biogás	26
3.5. Tipos de filtros.....	27
3.6. Circuito inicial de prueba	28
4. Resultados y análisis	29
4.1. Prueba experimental 1 (inicial)	30
4.2. Prueba experimental 2.....	38
4.3. Prueba experimental 3.....	47
4.4. Prueba experimental 4.....	48
4.5. Prueba experimental 5.....	63

4.6. Prueba experimental 6.....	78
5. Conclusiones	91
6. Recomendaciones.....	93
7. Bibliografía.....	94

Índice de tablas

Tabla 1. Principales componentes del biogás con su respectiva concentración	15
Tabla 2. Tratamientos secundarios de purificación del biogás.....	18
Tabla 3. Tipos de filtro para el proceso de filtración.....	27
Tabla 4. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración a) flujo de aire a la izquierda y saliendo a la derecha a una presión de 10 inH ₂ O.....	35
Tabla 5. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración a) el flujo de aire a la izquierda y saliendo a la derecha a una presión de 15 inH ₂ O.....	35
Tabla 6. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración a) el flujo de aire a la izquierda y saliendo a la derecha a una presión de 25 inH ₂ O.....	36
Tabla 7. Mediciones del medidor de flujo a una presión de 10, 15, 20 y 25 inH ₂ O.....	36
Tabla 8. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 10 inH ₂ O.	37
Tabla 9. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 15 inH ₂ O.	37
Tabla 10. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 20 inH ₂ O.	37
Tabla 11. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 25 inH ₂ O.	37
Tabla 12. Mediciones dadas por el rotámetro.	42
Tabla 13. Mediciones al colocar el medidor de volumen.....	45
Tabla 14. Valores experimentales de la prueba 4, al utilizar filtro con esferas.	50
Tabla 15. Medición de la caída de presión en el filtro al emplear un filtro con esferas.....	55
Tabla 16. Prueba experimental 5 usando el filtro lleno con cilindros plásticos.....	65
Tabla 17. Medición de la caída de presión al emplear un filtro con cilindros plásticos.....	70
Tabla 18. Prueba experimental 6 usando el filtro lleno con cilindros de arcilla.....	79
Tabla 19. Medición de la caída de presión al emplear un filtro con cilindros de arcilla.....	83

Índice de figuras

Figura 1. Montaje del circuito para la prueba 1.....	29
Figura 2. Compresor BAMBI PT90.	30

Figura 3. Llaves de paso.....	31
Figura 4. Manómetro de 30 inH ₂ O.....	31
Figura 5. Medidor de flujo BF-2000.....	32
Figura 6. Rotámetro Dwyer.....	33
Figura 7. Flujo de aire de izquierda a derecha utilizando el flujómetro.....	34
Figura 8. Flujo de aire de derecha a izquierda utilizando el flujómetro.....	34
Figura 9. Montaje del circuito para la prueba 2.....	38
Figura 10. Manómetro de 15 psi.....	39
Figura 11. Medidor de volumen.....	40
Figura 12. Filtro para biogás.....	40
Figura 13. Montaje del circuito para la prueba 3.....	47
Figura 14. Manómetro de 15 inH ₂ O.....	48
Figura 15. Sistema experimental definitivo.....	49
Figura 16. Sensor de presión.....	49

Índice de gráficos

Gráfico 1. Valores del flujo al comparar caudal vs. presión.....	43
Gráfico 2. Valores del flujo al comparar presión vs. caudal.....	43
Gráfico 3. Regresión cuadrática con valores normalizados para el rotámetro.....	44
Gráfico 4. Comportamiento del medidor de volumen al graficar caudal vs. presión.....	46
Gráfico 5. Comportamiento del medidor de volumen al graficar presión vs. caudal.....	46
Gráfico 6. Gráfica de regresión cuadrática con valores normalizados para el medidor de volumen.....	47
Gráfico 7. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar filtro con esferas.....	51
Gráfico 8. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 4, al utilizar filtro con esferas.....	52
Gráfico 9. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar filtro con esferas para una gráfica normalizada.....	52
Gráfico 10.. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar el medidor de volumen y filtro con esferas.....	53
Gráfico 11. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 4, al utilizar el medidor de volumen y filtro con esferas.....	53
Gráfico 12. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar el medidor de volumen y filtro con esferas para una gráfica normalizada.....	54
Gráfico 13. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).....	56
Gráfico 14. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).....	57
Gráfico 15. Presión entrada vs Caudal (datos del minuto 0).....	57
Gráfico 16. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 0).....	58
Gráfico 17. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).....	59
Gráfico 18. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 0).....	59
Gráfico 19. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).....	60

Gráfico 20. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).....	61
Gráfico 21. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 1).	61
Gráfico 22. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 1).....	62
Gráfico 23. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).....	62
Gráfico 24. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 1).	63
Gráfico 25. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 5, al utilizar filtro con cilindros de plástico ingenieril.	66
Gráfico 26. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 5, al utilizar filtro con cilindros de plástico ingenieril.	66
Gráfico 27. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 5, al utilizar el filtro con cilindros de plástico ingenieril.	67
Gráfico 28. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 5, usando el medidor de volumen y el filtro con cilindros de plástico ingenieril.	68
Gráfico 29. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 5, usando el medidor de volumen y el filtro con cilindros de plástico ingenieril.	68
Gráfico 30. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 5, usando el medidor de volumen y el filtro con cilindros de plástico ingenieril.	69
Gráfico 31. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).	71
Gráfico 32. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).	71
Gráfico 33. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 0).	72
Gráfico 34. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 0).....	72
Gráfico 35. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).....	73
Gráfico 36. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 0).	74
Gráfico 37. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).	74
Gráfico 38. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).....	75
Gráfico 39. Presión entrada vs Caudal (datos del minuto 1).	75
Gráfico 40. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 1).....	76
Gráfico 41. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).	76
Gráfico 42. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 1).	77
Gráfico 43. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 6 al utilizar el filtro con cilindros de arcilla.	80
Gráfico 44. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 6 al utilizar el filtro con cilindros de arcilla.	80
Gráfico 45. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 6, al utilizar el filtro con cilindros de arcilla.	81
Gráfico 46. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 6 al utilizar el medidor de volumen y el filtro con cilindros de arcilla.	81
Gráfico 47. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 6, al utilizar el medidor de volumen y el filtro con cilindros de arcilla.	82
Gráfico 48. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 6, al utilizar el medidor de volumen y el filtro con cilindros de arcilla.	82
Gráfico 49. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).	84
Gráfico 50. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).....	84
Gráfico 51. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 0).	85
Gráfico 52. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 0).....	85

Gráfico 53. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).	86
Gráfico 54. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 0).	86
Gráfico 55. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).	87
Gráfico 56. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).	87
Gráfico 57. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 1).	88
Gráfico 58. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 1).....	88
Gráfico 59. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).	89
Gráfico 60. (Pent-Psal) vs. Caudal en el minuto 1.	89

1. Introducción

1.1. Identificación de la empresa

El desarrollo del proyecto se realiza en el marco del programa “Biogás para todos”, coordinado por el Tecnológico de Costa Rica (TEC) en conjunto con la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

El TEC es una entidad autónoma dedicada a la educación superior a nivel nacional, focalizando sus esfuerzos en la investigación, la extensión y la enseñanza de la ciencias y tecnologías, para impulsar el progreso de Costa Rica. Asimismo, el programa conocido como “Biogás para todos” tiene como objetivo facilitar el acceso del pueblo costarricense al biogás como una opción sostenible de energía limpia. Además, la iniciativa se enfoca, especialmente, en asegurar que esta tecnología sea viable y perdure a lo largo del tiempo.

A partir de lo antes descrito, esta investigación tiene como propósito aportar al campo de la biodigestión anaeróbica, en el ámbito nacional, mediante el desarrollo de un sistema de filtración poroso destinado a la purificación del biogás para uso doméstico.

1.2. Justificación del proyecto

La preservación del clima mundial se posiciona como uno de los imperativos más apremiantes en las épocas venideras, particularmente, en el ámbito agropecuario, donde el cambio climático surge a raíz del aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (Europea, 2015). Según el informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, existe la posibilidad de un aumento de entre 2 °C y 6 °C en la temperatura media de la tierra,

lo que implicaría un grave riesgo para la supervivencia de varias especies, tanto vegetales como animales, incluyendo al ser humano. (IPCC, 2006).

En el ámbito de la ganadería se genera el gas de efecto invernadero metano (CH_4) a través del proceso de digestión anaeróbica de la materia orgánica. Este gas contribuye significativamente a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, representando hasta el 18 % de ellas. (Montenegro-Ballesteros et al., 2020).

Debido a lo anterior se han hecho estudios para implementar soluciones contra esta problemática, es aquí donde surge el biogás, el cual se define como una mezcla gaseosa producida tanto en entornos naturales como en dispositivos diseñados específicamente, a través de las reacciones de biodegradación de materia orgánica (Araujo et al., 2015). Sin embargo, este biogás contiene sulfuro de hidrógeno H_2S , el cual debe de ser sustraído ya que contamina el biogás y lo vuelve deficiente (Araujo et al., 2015).

Basado en lo anterior, el enfoque de este proyecto de graduación se centra en el diseño y evaluación de un dispositivo de filtración poroso, además del diseño y caracterización del circuito experimental de prueba. El dispositivo será posteriormente evaluado en el sistema experimental de laboratorio, donde deberá ser adaptado para poder instalar y evaluar el filtro. El propósito es estudiar el dispositivo utilizando distintas geometrías de material filtrante ya disponibles en el proyecto de extensión, con aire en sustitución del biogás y sin el contaminante H_2S .

1.3. Impacto Socio-Ambiental

Según las Naciones Unidas (2023), se definen energías renovables como un tipo de energía derivadas de fuentes naturales que llegan a reponerse más rápido de lo que se pueden consumir. De acuerdo con datos del Centro Nacional de Control de Energía, Costa Rica, en el 2019, alcanzó el 99% de producción de energía eléctrica renovable proveniente de los recursos limpios como son agua, viento, geotérmica, biomasa y sol (ICT, 2023).

Partiendo de los argumentos anteriores, la utilización del biogás emerge como un contribuyente fundamental al aprovechamiento de fuentes energéticas renovables. Esta tecnología implica la conversión de excedentes orgánicos provenientes de animales en una fuente de energía, lo que conlleva a una notable reducción en las emisiones de metano. Esta

disminución de CH_4 a la atmósfera desencadena una marcada reducción en la presencia de gases de efecto invernadero, generando así un impacto positivo en la contención del cambio climático.

Por esta razón, el programa “Biogás para todos” adquiere una relevancia significativa, dado que a través de esta iniciativa se logra incentivar a la población costarricense, en particular al sector agropecuario, a desempeñar un papel activo en la preservación medioambiental. De manera complementaria, esta propuesta ofrece la oportunidad de aprovechar los recursos disponibles para generar energía destinada al consumo interno.

1.4. Objetivos del estudio

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y caracterizar un dispositivo de filtración poroso usado en la purificación de biogás para uso doméstico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y construir un dispositivo de filtración poroso empleando materiales fácilmente accesibles en el entorno local y de bajo costo.
- Completar un circuito de prueba experimental que permita medir el flujo y la caída de presión a través del dispositivo de filtración poroso.
- Realizar pruebas experimentales variando la geometría del filtro y el material filtrante con el fin de evaluar su rendimiento en términos de flujo y caída de presión.

1.5. Alcances y limitaciones

El propósito fundamental de esta investigación radica en la conceptualización y caracterización de un dispositivo poroso de filtración, destinado a la depuración del biogás con fines domésticos. Este proyecto tiene como finalidad evaluar los aspectos fluidodinámicos del sistema al ser sometidos a la acción de un flujo de aire.

Es importante señalar que el enfoque experimental en esta iniciativa excluye las complicaciones inherentes al biogás y su contenido de H_2S , los cuales no serán sometidos a evaluación en el contexto de las pruebas de laboratorio. Las pruebas en cuestión, focalizadas

en aspectos fluidodinámicos, se desligan, por tanto, de la necesidad de emplear biogás y H_2S , al no abordar los fenómenos fisicoquímicos inherentes al proceso de filtración.

Es oportuno resaltar que la ejecución de este proyecto se desarrolla en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares del CIEMTEC. A través de la indagación, se persigue la generación de un aporte sustancial al programa de "Biogás para todos" enriqueciendo con conocimientos este ámbito.

2. Marco Teórico

2.1. Biogás como fuente de energía renovable

El biogás, conocido también como gas de digestión, hace referencia, generalmente, al metano (CH_4) generado mediante la fermentación anaeróbica de sustancias orgánicas, tales como estiércol, soluciones líquidas residuales, desechos municipales y diversos materiales biodegradables (Blanco, 2008).

El biogás está principalmente compuesto por metano y dióxido de carbono. Sin embargo, su composición puede fluctuar dependiendo del tipo de material orgánico introducido en el biodigestor y la duración del proceso de biodigestión. A continuación, en la **tabla 1** se detallan los porcentajes de los componentes del biogás (Toala, 2013).

Tabla 1. Principales componentes del biogás con su respectiva concentración

Componentes	Formula Química	Porcentaje
Metano	CH_4	60-70
Bióxido de Carbono	CO_2	30-40
Hidrogeno	H_2	Hasta 1.0
Sulfuro de Hidrogeno		Hasta 1.0
Nitrógeno	N_2	0.5-3
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O_2	0.1
Ácido Sulfhídrico	H_2S	0.1

Fuente: Toala, E. (2013).

A partir de la tabla anterior, es fundamental comprender en detalle cómo está compuesto el biogás, sobre todo lo que se refiere al porcentaje de metano. Este componente desempeña un papel esencial en la capacidad del biogás para generar calor. Además, es importante destacar que el metano puro tiene una capacidad calorífica de $9,97 \text{ kW}/\text{m}^3$ y cumple con un rol único como el principal constituyente en el conjunto de hidrocarburos presentes en el biogás. El metano, sucesivamente, es transformado en energía eléctrica o mecánica mediante un proceso de combustión (Morero et al., 2010).

El biogás y el proceso de purificación tienen un impacto significativo en la salud y el medio ambiente y también influyen directamente en cómo funciona y cuán eficiente es el equipo utilizado en la producción de biogás (Morero et al., 2010).

2.2. Importancia de utilizar biogás en el contexto domestico

Actualmente, en Costa Rica se genera diariamente una cifra aproximada de 4000 toneladas de desperdicios (Fernández, 2020). Estos desechos pueden ser categorizados en tres grupos distintos: los de naturaleza orgánica, los que aún conservan potencial de revalorización y los que carecen de dicha posibilidad. Los primeros provienen de fuentes naturales, los segundos son aquellos que aún mantienen algún valor susceptible de ser aprovechado a través de procesos productivos como el reciclaje, mientras que los terceros son los materiales que no pueden ser reintegrados en tales procesos y, por ende, la opción de disposición final resulta la más viable para su gestión. (Rojas-Vargas et al., 2018).

De estas tres categorías fundamentales de clasificación de residuos en el contexto costarricense se evidencia que, el 53% corresponde a desechos orgánicos, el 33% a aquellos que pueden ser revalorizados y solo un 14% cae en la categoría de no re-valorizables. Esto implica que, de las 4000 toneladas de residuos generados, diariamente, únicamente 560 toneladas necesitan ser manejadas a través de vertederos sanitarios; mientras que, 3440 toneladas conservan su potencial de valor y pueden ser aprovechadas mediante procesos productivos apropiados (Fernández, 2020).

Dadas estas circunstancias, adquiere suma importancia la maximización de la utilización de aquellos residuos que aún mantienen valor, en especial los de naturaleza orgánica, que constituyen la mayor proporción en los hogares. Estos, además, brindan la posibilidad de

generar biogás como fuente energética para abastecer las necesidades domésticas, lo que no solo repercute positivamente en la economía familiar, sino que también contribuye a la disminución del impacto ambiental derivado de una gestión inapropiada de los residuos. (Ángel et al., 2015).

2.3. Métodos convencionales para la purificación de biogás

Para seleccionar, de manera óptima, el método de purificación adecuado resulta esencial contar con un profundo entendimiento de la composición. Además, es de gran importancia comprender el destino final que se le otorgará al biogás, con el propósito de establecer con precisión los niveles de eliminación de impurezas que se anhelan alcanzar. (Betzabet Morero, 2014).

Dentro de este contexto, emergen dos enfoques de tratamiento para la purificación. En primer lugar, se encuentra el tratamiento primario, cuya función primordial radica en la reducción de la cantidad de contaminantes presentes en el biogás. Por lo general, este abordaje involucra operaciones de procesamiento físico de naturaleza simple. Aquí, los contaminantes primarios que se eliminan son el agua contaminada y las partículas en suspensión.

En cambio, el tratamiento secundario se configura con la finalidad de proporcionar niveles de limpieza del gas superiores a los obtenidos mediante el tratamiento primario de manera exclusiva. Este enfoque va más allá al incorporar procedimientos tanto físicos como químicos, con el objetivo de lograr una depuración más completa y exhaustiva. (Morero et al., 2010).

A continuación, en la **tabla 2** se muestran las características tecnológicas clave de los tratamientos secundarios más actuales para la purificación del biogás.

Tabla 2. Tratamientos secundarios de purificación del biogás.

Tratamiento Secundario	Contaminante eliminado	Diseño	Operación	Costo de inversión	Costo de operación	Calidad del tratamiento
Absorción física	Eliminación del CO_2	Muy sencillo	Muy sencillo	Bajo	Bajo	Alta eficiencia de purificación. En algunos casos se obtiene metano puro.
Absorción química	Eliminación del CO_2	Muy sencillo	Sencillo	Bajo	Medio	Principalmente se utiliza para remover CO_2 , H_2O y vapor de agua. La eficiencia es alta, aunque varía en función del compuesto químico utilizado.
Adsorción en una superficie sólida	Eliminación del CO_2	Sencillo	Sencillo	Medio	Alto	A partir de una buena elección del absorbente, el proceso puede remover CO_2 , H_2O , humedad y otras impurezas simultánea o selectivamente.
Separación por membrana	Eliminación del H_2O y CO_2	Normal	Normal	Medio	Alto	Para alta purificación de metano, la permeabilidad debe ser alta. Aunque los procesos de separación multietapa pueden lograr $98\% \frac{V}{V}$ de metano.

Separación criogénica	Eliminación del CO_2	Normal	Normal	No hay datos disponibles	No hay datos disponibles	El proceso tiene la ventaja de que permite la recuperación de los componentes puros en forma líquida, que pueden transportarse fácilmente. Aunque no presenta alta eficiencia en la remoción de CO_2 .
Método de conversión química	Eliminación del CO_2	Complejo	Complejo	Muy alto	Muy alto	Reduce la concentración de gas indeseable a niveles trazas.
Proceso de oxidación	Eliminación del H_2O	Muy sencillo	Muy sencillo	Bajo	Bajo	Solo presenta alta eficiencia en la eliminación de H_2O y en algunos casos de vapor de agua.

Fuente: Morero et al., (2010).

Como pudo observarse en la **tabla 2** existen distintas características asociadas a la eliminación de contaminantes gaseosos mediante diversos métodos. Por ejemplo, la absorción física se destaca por su sencillez y bajo costo logrando una alta purificación del CO_2 e incluso la obtención, ocasionalmente, de metano puro. A pesar de sus costos operativos, ligeramente superiores, la absorción química es una opción viable debido a su eficiencia en eliminar CO_2 , H_2O y vapor de agua. La absorción en sólidos, a pesar de sus costos de operación elevados, permite la eliminación selectiva de contaminantes mediante la elección adecuada del absorbente. Las tecnologías de separación por membrana y criogénica también son relevantes, siendo la primera moderada en costos y apta para remover CO_2 y H_2O ; mientras que, la segunda recupera componentes puros en forma líquida, con menor eficiencia en la eliminación de CO_2 . En contraste, la conversión química es costosa pero crucial para reducir contaminantes a niveles traza. En última instancia, la elección dependerá de factores como diseño, costos y metas de purificación, requiriendo un análisis completo de las necesidades específicas en cada aplicación.

En Costa Rica, el método más utilizado para la eliminación de contaminantes gaseosos es el de absorción, el cual se define como la unión de átomos, iones o moléculas de un gas o líquido (conocido como adsorbato) a la superficie de un sólido (denominado adsorbente). En

este contexto, las operaciones de adsorción se fundamentan en la habilidad específica de ciertos sólidos para extraer determinadas sustancias de una solución, concentrándolas selectivamente en su superficie. (Ortega, 2015).

Es esencial mencionar que las pruebas realizadas en este proyecto se centran en aspectos fluidodinámicos, excluyendo la evaluación de los fenómenos fisicoquímicos (biogás y H_2S). Por consiguiente, el biogás será remplazado por aire. Sin embargo, se mantendrán los parámetros de flujo y presión relativa característicos de un biodigestor real.

2.4. Flujo de fluidos en medios porosos

Antes de abordar la cuestión del flujo de fluidos en un medio poroso, es esencial comprender la naturaleza de dicho medio. Un medio poroso se caracteriza por su composición dual, que consiste en una matriz sólida que encierra en su interior un sistema de cavidades conocidas como poros. La interconexión de estos poros puede variar, influyendo en su geometría, tamaño y topología, factores que se derivan de su proceso de formación. (Raúl Horacio, 2004).

En este contexto, se deben resaltar ciertas propiedades fundamentales (Cubero, 2021):

- **Tamaño de partícula**

El tamaño de partícula es un factor de gran relevancia. Este tamaño influye, de manera directa, en la habilidad para capturar y retener de manera eficiente las impurezas en pequeñas cantidades. La relación entre el tamaño de partícula y el área superficial es esencial, ya que, al reducir el tamaño de las partículas, se aumenta proporcionalmente el área superficial por unidad de masa. Este incremento directo en el área superficial mejora la capacidad de atrapar las impurezas, pues, como se ha mencionado previamente, la interacción principal ocurre en la superficie del material

cuando entra en contacto con el gas. En consecuencia, se busca maximizar los puntos de contacto activos para la captura efectiva de las impurezas en pequeñas cantidades.

Adicionalmente, la porosidad es un factor estrechamente relacionado con el tamaño de partícula, ya que contribuye a aumentar aún más los puntos de interacción.

- **Área superficial, porosidad y volumen**

La elección del material filtrante implica una interrelación entre el área superficial, el volumen y la porosidad. Estos factores están intrínsecamente ligados al tamaño de la partícula. En consecuencia, la relación entre estas variables se manifiesta de la siguiente manera: a medida que aumenta el área superficial, la porosidad y el volumen en un material absorbente, se incrementa la capacidad para absorber impurezas. Por lo tanto, se busca mantener un alto nivel de las variables previamente explicadas al seleccionar el sustrato filtrante adecuado.

- **Cantidad de material absorbente**

Incrementar la cantidad de sustrato conlleva a una mejora en la eficiencia de la eliminación del H_2S . Esto se debe a que una mayor cantidad de sustrato proporciona un aumento en la superficie de contacto entre el medio filtrante y el H_2S , lo que se traduce en una mejora del proceso. No obstante, al aumentar la cantidad de material, es importante tener en cuenta que se pueden generar más puntos de contacto o sitios activos para eliminar las impurezas en trazas. Sin embargo, es esencial evitar el bloqueo en el flujo de gas, ya que uno de los problemas comunes que surgen al implementar métodos de desulfuración en sistemas de aprovechamiento es la disminución de la presión del biogás debido al bloqueo del flujo.

A pesar de que se usa aire en sustitución de biogás, el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo, aunque los componentes específicos varíen.

- **Capacidad regenerativa**

Es importante tener en cuenta que no todos los materiales son aptos para procesos de regeneración y que estos procesos no son infinitos. En otras palabras, la regeneración permite restaurar la superficie activa de un material solo hasta cierto

punto. Cada vez que se regenera el material, su capacidad de absorción disminuye, ya que ha pasado por un proceso de saturación previo, lo que afecta el tiempo de saturación en futuros usos.

- **Flujo**

El flujo tiene un impacto directo en la eficacia del proceso de purificación. El uso de un sustrato filtrante puede ver comprometida su capacidad de absorción a medida que aumenta el flujo. Esto ocurre porque un flujo más alto reduce el tiempo de contacto entre el sustrato y las diversas impurezas, lo que afecta negativamente la interacción entre ellos. Por otro lado, una disminución en el flujo resulta en un aumento directo de la capacidad de absorción, lo que facilita una purificación más efectiva del componente a utilizar.

Según lo expuesto previamente, se puede afirmar que la integración entre un fluido y un medio poroso está influenciada por propiedades fundamentales. El tamaño de la partícula y la porosidad influyen directamente en el área superficial, que a su vez afecta la capacidad de absorción. La cantidad de material absorbente influye en la eficiencia de eliminación de impurezas, pero debe equilibrarse con la posibilidad de bloqueo del flujo. La capacidad regenerativa permite recuperar la eficiencia del material filtrante después de la saturación, pero con limitaciones. Finalmente, el flujo impacta directamente en la capacidad de absorción, ya que un flujo más alto reduce el tiempo de contacto y puede comprometer la efectividad del proceso. Por otro lado, un flujo reducido mejora la capacidad de absorción y facilita la purificación.

En resumen, comprender estos conceptos es de gran relevancia para el flujo de fluidos en medios porosos.

2.5. Ley de Darcy

La ley de Darcy se ha definido como un principio experimental que describe el flujo de filtración en medios porosos saturados. Según esta ley, en presencia de solamente fuerzas gravitacionales, la velocidad del fluido en un medio poroso está directamente relacionada con el gradiente hidráulico, y esta relación está determinada por el coeficiente de permeabilidad. (Yepes, 2020).

En este caso, la ley de Darcy se define mediante la siguiente fórmula (Vázquez, 1999):

$$u = \frac{k}{\mu} \nabla (p + \rho g z) \quad (1)$$

Donde la coordenada vertical (z) se refiere a la posición vertical en el medio.

El operador de gradiente (∇) indica cambios en las propiedades con respecto a la posición y la gravedad (g) influye en la dirección y velocidad de flujo. La densidad (ρ) representa la masa por unidad de volumen, mientras la viscosidad dinámica (μ) mide la resistencia del fluido al flujo y (k) es el coeficiente de permeabilidad. La ecuación relaciona estas variables para calcular la velocidad del fluido (u) en función de la caída de presión (p).

Es importante tener presente que para aplicar la ley de Darcy de manera precisa se deben considerar varios requisitos específicos que abarcan tanto características de los fluidos como los materiales empleados. Tales requisitos se expresan a continuación (Francisco & García, 2014):

- en este caso particular, el flujo que atraviesa el material poroso debe ser puramente gravitacional, excluyendo cualquier flujo impulsado por energía mecánica, química, eléctrica, térmica u otras formas de energía;
- el proceso de flujo debe ser estacionario, asegurando que las condiciones no cambien a lo largo del tiempo;
- el medio permeable a través del cual fluye el fluido debe estar completamente saturado, sin la presencia de aire para evitar la interferencia de múltiples fases o fluidos, lo que garantiza una evaluación precisa de la permeabilidad y el movimiento del fluido;
- la estabilidad del agua en los piezómetros es un indicador fundamental para establecer el flujo laminar;
- la relación lineal entre la velocidad de descarga y la pérdida de presión por unidad de longitud a través del material se considera un signo de flujo laminar;
- el medio permeable debe ser uniforme en sus propiedades e isotrópico en su estructura para permitir un análisis adecuado del flujo en una sola dirección;

- las propiedades físicas y químicas del medio deben mantenerse constantes durante el proceso; el líquido no debe reaccionar con el medio, y tanto la porosidad como la permeabilidad del medio no deben cambiar.

En cambio, para un flujo en medio poroso donde existe una gradiente de presión que resulta de la operación con equipos mecánicos que impulsan el fluido y excluyendo ahora las fuerzas gravitacionales, la ley de Darcy es la siguiente (Freeze & Cherry, 1979):

$$Q = -k \times A \times \frac{dh}{dl} \quad (2)$$

Donde Q es la tasa de flujo del fluido a través del medio poroso, k conductividad hidráulica, A es el área transversal a través de la cual fluye el fluido y $\frac{dh}{dl}$ es el gradiente hidráulico a lo largo de la dirección del flujo.

3. Metodología

Esta investigación plantea la creación de un circuito experimental de prueba en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares del CIEMTEC. Este circuito se utilizará para medir tanto el flujo como la caída de presión a través del dispositivo de filtración poroso. En esta sección, se proporcionarán detalles exhaustivos sobre los pasos necesarios para alcanzar los objetivos establecidos. Se abordará la selección del material filtrante, el filtro a emplear y la evaluación del rendimiento de estos dispositivos.

3.1. Material filtrante

Para el desarrollo de este proyecto se emplearán dos geometrías distintas de material filtrante: cilindros y esferas. Los cilindros están fabricados de un plástico ingenieril (AC-ACETAL POM) con un diámetro de 6,35 mm y una longitud de 12,4 mm, y las esferas son de vidrio común con un diámetro de 16.48 mm.

Estos elementos se someterán a pruebas en dos configuraciones diferentes: un filtro compuesto exclusivamente por esferas y el mismo filtro, pero esta vez compuesto solo por cilindros.

3.2. Funcionamiento de los filtros

Para el proyecto en cuestión, se empleará aire comprimido en sustitución del metano para emular el funcionamiento de un filtro. Este proceso guarda similitud con el procedimiento de un filtro convencional diseñado para la captura y separación de impurezas en el biogás. La distinción más relevante reside en la fuente de gas utilizada para llevar a cabo la simulación. A continuación, se presenta una breve exposición acerca del funcionamiento de estos filtros particulares que hacen uso de aire comprimido.

Se introduce aire comprimido como gas de trabajo, cuidadosamente adaptado para reproducir las mismas condiciones de presión y caudal que se encuentran en un sistema de biogás real. Antes de que este aire comprimido ingrese al filtro, se realiza una medición precisa de la presión inicial del sistema utilizando un manómetro o un dispositivo de medición de presión. Posteriormente, el aire comprimido se introduce en el filtro a través de una entrada designada. El filtro, en este proceso, contiene una variedad de materiales filtrantes con diferentes geometrías y proporciones. Al final del recorrido, cuando el aire comprimido filtrado sale del sistema, se efectúa una medición de la presión final. La diferencia entre la presión inicial y la presión final se denomina "caída de presión", que indica cuánta presión se ha perdido debido a la resistencia que ofrece el medio filtrante.

Por último, la utilización de aire comprimido para cuantificar la caída de presión posibilita una evaluación de la eficacia de los medios filtrantes, así como su influencia en el funcionamiento de los sistemas de biogás, todo ello sin requerir el empleo de biogás real. Este enfoque resulta fundamental en el proceso de desarrollo y mejora de los sistemas de filtración destinados a aplicaciones relacionadas con el biogás.

3.3. Evaluación del rendimiento de los medios filtrantes

Para evaluar la disminución de la presión al pasar un flujo de aire a través de un filtro con material filtrante, se emplearán manómetros y sensores de presión. Los sensores

proporcionan información más precisa al registrar esta caída de presión. A diferencia de los manómetros disponibles, que no son tan efectivos al trabajar con presiones muy bajas, ya que la diferencia de presión no es distinguible a simple vista.

La caída de presión permite saber cuánta de esta se ha reducido a través del material filtrante. En este contexto, es preferible que la caída de presión sea baja para asegurar un flujo continuo y eficiente a través del material filtrante.

3.4. Diseño de un filtro para biogás

El desarrollo de este filtro va de acuerdo con las necesidades planteadas en los objetivos generales y específicos de la investigación. Este proyecto se centra en la realización de un estudio experimental destinado a medir la presión y el caudal que atraviesa un filtro, el cual va a contener material filtrante en diferentes geometrías. Además, el volumen del filtro se va a llenar por completo.

Es fundamental destacar que en los experimentos se reproducen parámetros muy similares a las condiciones reales. Esto implica que se trabajará con un rango de flujo de biogás que varía entre $0,2 \frac{m^3}{h}$ y $1 \frac{m^3}{h}$ y con una presión relativa en la entrada de aproximadamente 1 KPa. Estos valores específicos varían de datos obtenidos de la finca Biamonte, ubicada en Coronado.

El equipo experimental se compone, principalmente, de un filtro, que representa el núcleo de esta investigación. Este filtro se encuentra conectado a una tubería de $\frac{1}{2}$ in, la cual está equipada con múltiples instrumentos de medición, como manómetros, sensores de presión, medidores de flujo y un medidor de volumen. Además, se integran llaves de paso para tener un control preciso sobre el flujo de aire que nos proporciona el compresor.

Con base en lo mencionado anteriormente, se diseñaron y adaptaron diversos sistemas de operación y medición, que incluyen lo siguiente:

- filtro de medio poroso, componente esencial que permite el flujo del fluido a través de diferentes medios porosos, con la relativa caída de presión;
- sistema de suministro gaseoso, que se encarga de proporcionar el flujo de aire necesario para nuestras pruebas, asegurando un régimen constante y controlado;

- medidores de flujo (flujómetro y rotámetro), para medir y controlar el flujo de aire de manera precisa;
- medidores de presión (manómetros y sensores de presión), para mantener un monitoreo de las condiciones de presión en nuestro circuito experimental;
- sistema de válvulas, para tener un control total sobre el flujo de aire, lo cual es esencial para mantener las condiciones adecuadas en todo el momento.

Estos sistemas, en conjunto, proporcionan las herramientas necesarias para llevar a cabo el estudio experimental de manera controlada, permitiéndoles obtener datos significativos en cuanto al proceso de flujo en la filtración (caudal y presión).

3.5. Tipos de filtros

Se han diseñado tres tipos de filtros distintos, como se puede apreciar en la **tabla 3**. No obstante para efectos de esta investigación, se tomará en cuenta, únicamente, el primer filtro que es un dispositivo igual a los de la finca Biamonte. Se realizarán diversas pruebas, una con el filtro vacío, otra con material filtrante de geometría esférica (bolinchas) y otra con material filtrante de geometría cilíndrica (cilindros de plástico ingenieril y cilindros de arcilla).

Tabla 3. Tipos de filtro para el proceso de filtración.

Filtro	Largo (mm)	Diámetro (mm)	Material
	300	44	PVC
	300	52	PVC

	300	94	Policarbonato
---	-----	----	---------------

Fuente: Elaboración propia (2023).

Como se puede apreciar en la tabla, los tres filtros diseñados tienen la misma longitud, pero varían en diámetro. Estas variaciones en el diámetro se justifican por la capacidad de alojar una mayor cantidad de material filtrante en los filtros de mayor diámetro. Es importante destacar que los dos primeros filtros utilizan tubos de PVC debido a su alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, dado que el PVC no es transparente y no permite la observación visual de cambios físicos en su interior, se optó por fabricar el tercer filtro con policarbonato. El policarbonato, al igual que el PVC, presenta una buena resistencia a la corrosión, pero su transparencia permite la detección visual de cualquier cambio físico en el tubo que contiene el material filtrante.

3.6. Circuito inicial de prueba

En la **figura 1** se muestra esquematizado el diseño conceptual con los componentes dispuestos para la primera prueba experimental.

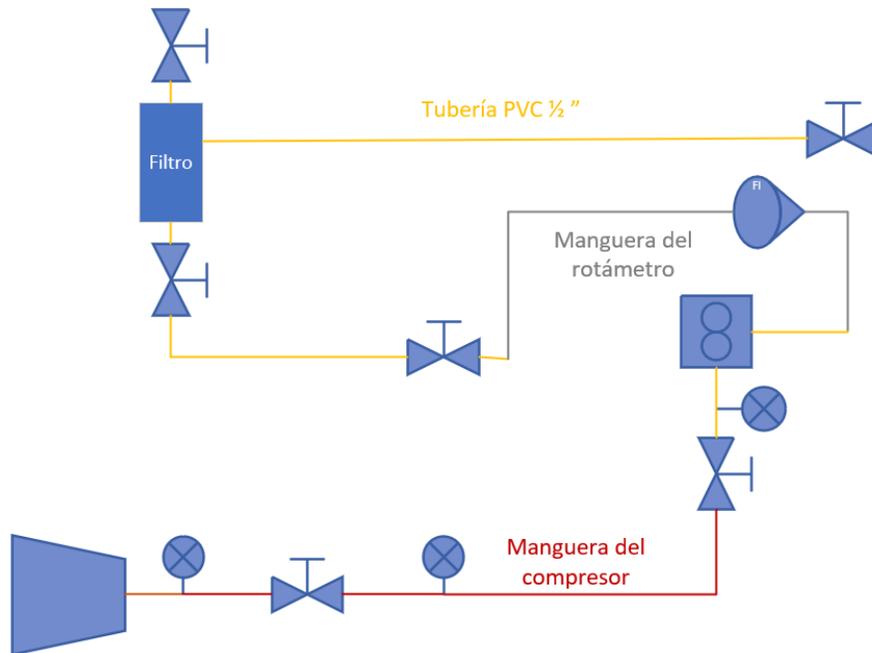


Figura 1. Montaje del circuito para la prueba 1.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Con este circuito inicial se analizará el sistema y la instrumentación existente cuando se les someta a un flujo de aire. Además, se evaluará el desempeño de los equipos utilizados para detectar posibles problemas, los cuales serán detallados en el análisis de resultados. A medida que se realicen más pruebas, se planea ajustar el sistema, añadiendo o eliminando equipos, con el objetivo de obtener el circuito experimental definitivo.

4. Resultados y análisis

Esta sección describe el procedimiento experimental y los desafíos que se enfrentan al llevar a cabo el trabajo de campo. El objetivo es ejecutar las pruebas experimentales de la

manera más efectiva posible, identificando parámetros críticos y buscando soluciones a eventuales problemas.

4.1. Prueba experimental 1 (inicial)

A continuación, se ofrece una breve descripción de los equipos del circuito inicial de prueba.

- **Compresor**

El compresor Bambi PT90 es una unidad de compresión de aire diseñada para funcionar con una alimentación eléctrica de 110 V, en conformidad con las especificaciones eléctricas de los Estados Unidos (US Spec). Este dispositivo tiene la capacidad de comprimir aire y suministrar una fuente de aire a presión en diversas aplicaciones industriales y de taller. Se trata de un compresor portátil versátil que puede utilizarse en una amplia gama de tareas, desde inflar neumáticos hasta abastecer aplicaciones especializadas que requieren una fuente confiable y eficiente de aire comprimido. Este compresor se puede observar en la **figura 2**.



Figura 2. Compresor BAMBI PT90.

Fuente: BAMBI (2023).

- **Llaves de paso**

Estos dispositivos permiten regular el flujo de líquidos o gases en tuberías por lo que brinda un control preciso del flujo, como se aprecia claramente en la **figura 3**.

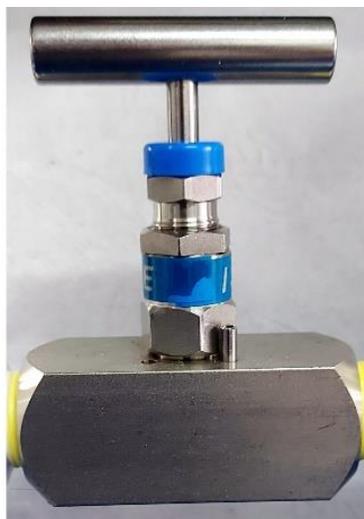


Figura 3. Llaves de paso.

Fuente: Hy-Lok (2023).

- **Manómetro**

La estación de trabajo estará equipada con un manómetro de máximo 30 inH₂O, y mínimo 15 inH₂O cuyos detalles se pueden apreciar en la **figura 4**. Estos instrumentos se utilizarán para regular la presión que se dirige hacia el sistema.



Figura 4. Manómetro de 30 inH₂O.

Fuente: Ashcroft (n.d.).

- **Flujómetro**

Se usa un medidor de flujo de Biogás BF-2000, un instrumento especializado que utiliza la tecnología ultrasónica para medir con precisión el flujo de biogás en tuberías

sin interrumpir el proceso, tal como se ilustra en la **figura 5**. Se utiliza en aplicaciones relacionadas con la generación de energía a partir del biogás. Este dispositivo es esencial para el control preciso y confiable del flujo de biogás y entre sus principales características es que el rango de flujo que puede medir es de $0,08 \text{ m}^3/\text{h} \sim 4 \text{ m}^3/\text{h}$ y a una presión $\leq 20 \text{ KPa}$.



Figura 5. Medidor de flujo BF-2000.

Fuente: Hubei Cubic-Ruiyi Instrument (2023).

- **Rotámetro**

El rotámetro de la marca Dwyer es un dispositivo de medición que se usa para determinar el flujo de aire en litros por minuto (LPM). Este instrumento cuenta con un tubo transparente que contiene una bola flotante y una escala graduada, como se observa en la **figura 6**. Cuando el aire pasa a través del flujo, la bola flotante se eleva y se detiene en una posición que muestra el flujo de aire en LPM en la escala.



Figura 6. Rotámetro Dwyer.

Fuente: Dwyer Instruments (n.d.).

Inicialmente se llevan a cabo experimentos con el circuito descrito y se identifican problemas relativos a la medición incorrecta del flujo de aire a través del flujómetro. Para analizar el problema, ya que se reportaban datos confusos sobre la configuración de este equipo, se realizan dos pruebas distintas: a) una con el flujo de aire entrando desde la izquierda y saliendo por la derecha, y la otra b) con el flujo de aire entrando desde la derecha y saliendo por la izquierda del flujómetro. A continuación, se describen las pruebas realizadas.

La configuración a) se aprecia en la **figura 7**. Además, se coloca un rotámetro en el sistema para contar con dos instrumentos de medición de flujo y comparar los resultados. Sin embargo, al realizar esta configuración, no se logró obtener una medición del caudal en el flujómetro, ya que marcaba $0 \text{ m}^3/h$. A pesar de esto, el aire fluía y llegaba al rotámetro, el cual proporcionaba una medida válida. Esto indicaba que había un problema con el funcionamiento del flujómetro con la configuración a).



Figura 7. Flujo de aire de izquierda a derecha utilizando el flujómetro.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Sucesivamente se crea la configuración b), tal como se ilustra en la **figura 8**. Al igual que en el experimento anterior, se instaló un rotámetro para contar con dos instrumentos de medición de caudal y comparar sus lecturas. Sin embargo, al realizar esta configuración, se obtuvo una medición de caudal en el flujómetro, pero no así en el rotámetro, cuyo indicador permaneció por debajo de la escala de medición. Esta falta de lectura del rotámetro mostraba que no llegaba un flujo de aire suficiente para hacer elevar el balón del rotámetro.



Figura 8. Flujo de aire de derecha a izquierda utilizando el flujómetro.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Debido a esto se determinó que, era necesario realizar unas mediciones más detalladas con el flujómetro para aceptar o descartar este instrumento de medición, usando además un medidor de volumen de gas para corroborar los valores.

Para la primera configuración a) se realizaron tres pruebas a diferentes presiones: 10 inH₂O, 15 inH₂O y 25 inH₂O. La medición de presión de 10 inH₂O se realizó con un manómetro de 15 inH₂O y la de 15 y 25 inH₂O se realizó con un manómetro de 30 inH₂O. Durante estas mediciones se registró el volumen que pasaba a través del flujómetro en intervalos de tiempo de 0,1,2 y 4 minutos como se observa en las **tablas 4, 5 y 6**, con el objetivo de calcular el caudal en m^3/min y compararlo con la medición del rotámetro para verificar la relación entre ellas.

Tabla 4. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración a) flujo de aire a la izquierda y saliendo a la derecha a una presión de 10 inH₂O.

Presión "10 in H2O"	Tiempo				Caudal "Q" m^3/min	Caudal "Q" m^3/h	Rotámetro	
	Prueba	0 min	1 min	2 min			4 min	Caudal Q LPM
1	11,650	11,730	/	/	0,080	4,800	/	/
2	11,780	/	11,920	/	0,070	4,200	/	/
3	11,990	/	/	12,310	0,080	4,800	/	/

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 5. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración a) el flujo de aire a la izquierda y saliendo a la derecha a una presión de 15 inH₂O.

Presión "15 in H2O"	Tiempo				Caudal "Q" m^3/min	Caudal "Q" m^3/h	Rotámetro	
	Prueba	0 min	1 min	2 min			4 min	Caudal Q LPM
1	9,640	9,720	/	/	0,080	4,800	1,600	0,096
2	9,740	/	9,900	/	0,080	4,800	1,600	0,096
3	9,920	/	/	10,240	0,080	4,800	1,600	0,096

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 6. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración a) el flujo de aire a la izquierda y saliendo a la derecha a una presión de 25 inH₂O.

Presión "25 in H2O"	Tiempo				Caudal "Q" m^3/min	Caudal "Q" m^3/h	Rotámetro	
	Prueba	0 min	1 min	2 min			4 min	Caudal Q LPM
1	8,490	8,570	/	/	0,080	4,800	3,300	0,198
2	8,590	/	8,750	/	0,080	4,800	3,300	0,198
3	8,761	/	/	9,081	0,080	4,800	3,300	0,198

Fuente: Elaboración propia (2023).

Se observa que el caudal se mantuvo constante en todas las mediciones y siempre estuvo \leq al rango mínimo que este puede medir, el cual era de $0,08 \text{ m}^3/h$. Además, la medición del caudal obtenida con la tabla no era similar a los valores del rotámetro. Esto llevó a concluir que el funcionamiento del flujómetro era incorrecto, ya que no proporcionaba los resultados esperados. Debería haber mostrado un aumento de caudal a medida que aumentaba la presión, pero en cambio se mantuvo constante a un valor de $0,08 \text{ m}^3/h$.

Para la segunda configuración se realizaron 4 pruebas a diferentes presiones: 10 inH₂O, 15 inH₂O, 20 inH₂O y 25 inH₂O. La medición de presión de 10 inH₂O se realizó con un manómetro de 15 inH₂O y la de 15, 20 y 25 inH₂O se realizó con un manómetro de 30 inH₂O. Al igual que la prueba anterior se registró el volumen que pasaba a través del flujómetro en intervalos de tiempo de 0,1,2, 4 y 8 minutos, con el objetivo de calcular el caudal en m^3/h y compararlo con la medición de caudal del flujómetro a diferentes presiones, esto se puede apreciar en la **tabla 7**, con el fin de observar si hay concordancia entre ellos.

Tabla 7. Mediciones del medidor de flujo a una presión de 10, 15, 20 y 25 inH₂O.

Mediciones del flujómetro	
Presión "in H2O"	Caudal "Q" m^3/h
10	0,075
15	0,081
20	0,091
25	0,094

Fuente: Elaboración propia (2023).

A continuación, las **tablas 8, 9, 10 y 11** muestran las mediciones del flujómetro a 10, 15, 20 y 25 inH₂O., respectivamente.

Tabla 8. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 10 inH₂O.

Presión "10 in H2O"	Tiempo					Caudal "Q" m ³ /min	Caudal "Q" m ³ /h
	0 min	1 min	2 min	4 min	8 min		
	11,535	11,536	11,537	11,539	11,544	0,001	0,06

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 9. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 15 inH₂O.

Presión "15 in H2O"	Tiempo					Caudal "Q" m ³ /min	Caudal "Q" m ³ /h
	0 min	1 min	2 min	4 min	8 min		
	11,551	11,552	11,553	11,556	11,561	0,001	0,06

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 10. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 20 inH₂O.

Presión "20 in H2O"	Tiempo					Caudal "Q" m ³ /min	Caudal "Q" m ³ /h
	0 min	1 min	2 min	4 min	8 min		
	11,566	11,567	11,568	11,571	11,577	0,0014	0,084

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 11. Mediciones del flujómetro BT-2000 en la configuración b) flujo de aire a la derecha y saliendo a la izquierda a una presión de 25 inH₂O.

Presión "25 in H2O"	Tiempo					Caudal "Q" m ³ /min	Caudal "Q" m ³ /h
	0 min	1 min	2 min	4 min	8 min		
	11,582	11,583	11,585	11,587	11,593	0,0014	0,084

Fuente: Elaboración propia (2023).

Con base en la información proporcionada por las **tablas 8, 9, 10 y 11**, puede concluirse que esta segunda configuración b) arrojó resultados más correctos en comparación con la primera configuración a). Esto se evidencia con las mediciones de caudal proporcionadas por el flujómetro y las obtenidas a través del experimento al calcular volúmenes en diferentes

intervalos de tiempo. Además, se observa una correlación coherente: a medida que aumenta la presión, el caudal también aumenta. Sin embargo, se identificó una falla en la salida del flujómetro, ya que se detectó una obstrucción que impedía que el flujo de aire llegara al rotámetro, lo que resultaba en la imposibilidad de obtener una lectura válida del caudal.

Debido a esta limitación en el funcionamiento del flujómetro en ambas configuraciones, se tomó la decisión de descartarlo como equipo de medición del sistema. En su lugar, se optó por instalar un medidor de volumen alternativo para llevar a cabo las mediciones correspondientes del flujo de aire con mayor precisión y confiabilidad.

4.2. Prueba experimental 2

En el diagrama de la **figura 9**, se presenta el circuito del segundo experimento. En comparación con el primero, la única variación consistió en reemplazar el flujómetro por un medidor de volumen y la inclusión de un manómetro de mayor precisión. Además, en esta prueba se inserta el filtro, ya que se realizarán pruebas con un material filtrante, en este caso, esferas, las que serán puestas en el filtro para llevar a cabo el experimento.

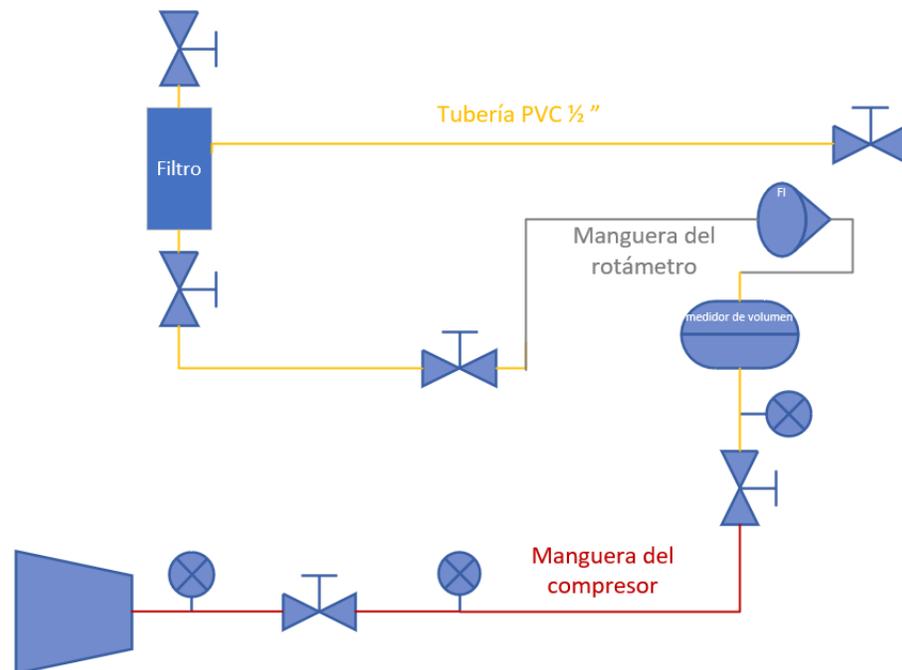


Figura 9. Montaje del circuito para la prueba 2.

Fuente: Elaboración propia (2023).

A continuación, se brinda una breve descripción de los equipos añadidos para el segundo experimento.

- **Manómetro**

La estación de trabajo se equipa con un manómetro de máximo 15 psi, cuyos detalles se pueden apreciar en la **figura 10**. Al igual que en el experimento 1 este manómetro se usa para regular la presión que sale al sistema.



Figura 10. Manómetro de 15 psi.

Fuente: Ashcroft (n.d.).

- **Medidor de volumen**

El medidor de volumen es un dispositivo versátil con una presión máxima de 10 kPa y un rango de caudal que va desde $0,025 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ hasta $4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, adaptándose a diferentes necesidades de medición de volumen. Este instrumento se puede observar en la **figura 11**.



Figura 11. Medidor de volumen.

Fuente: EKATON (2023).

- **Filtro**

Este actuará como medio de retención de material filtrante para partículas esféricas y cilíndricas, como se muestra en la **figura 12**.



Figura 12. Filtro para biogás.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Teniendo claro los equipos seleccionados, se procedió a realizar el segundo experimento, en el que después de instalar el medidor de volumen, se llevaron a cabo pruebas, usando además el rotámetro, con la variación de las presiones en un rango desde 0.17 psi hasta 3.20 psi. Estas mediciones se realizaron tanto con el filtro vacío como con el filtro lleno al 100%

con esferas. Es importante destacar que, cuando el filtro se llena al 100% con esferas, la porosidad es de 0,455 de acuerdo con:

Volumen del cilindro (V_{cil}) $\rightarrow R=0,022$ m; $L=0,3$ m.

$$V_{cil} = \pi * R^2 * L$$

$$V_{cil} = \pi * (0,022 \text{ m})^2 * 0,3 \text{ m}$$

$$V_{cil} = 0,000456 \text{ m}^3$$

Volumen de la esfera (V_{esf}) $\rightarrow R=0,00824$ m.

$$V_{esf} = \frac{4}{3} * \pi * R^3$$

$$V_{esf} = \frac{4}{3} * \pi * (0,00824 \text{ m})^3$$

$$V_{esf} = 0,000002344 \text{ m}^3$$

Volumen total de esferas ($V_{total.esf}$) \rightarrow Para en llenar el filtro al 100% se necesitan 106 esferas.

$$V_{total.esf} = n_{esferas} * V_{esf}$$

$$V_{total.esf} = 106 * 0,000002344 \text{ m}^3$$

$$V_{total.esf} = 0,0002484 \text{ m}^3$$

Porosidad (\emptyset).

$$\emptyset = \frac{V_{cil} - V_{total.esf}}{V_{cil}}$$

$$\emptyset = \frac{0,000456 \text{ m}^3 - 0,0002484 \text{ m}^3}{0,000456 \text{ m}^3}$$

$$\emptyset = 0,455$$

Los resultados obtenidos se presentan en la **tabla 12** y muestran que a medida que se incrementa la presión, el caudal también aumenta. Al comparar los caudales con el filtro vacío y el filtro con esferas, se observa que el filtro vacío permite un mayor flujo de aire, lo que es coherente ya que las esferas restringen el paso del flujo en el filtro lleno. Esta disminución de caudal con el filtro de esferas es esperada y adecuada en comparación con el filtro vacío.

Tabla 12. Mediciones dadas por el rotámetro.

Presión (PSI)	Mediciones con rotámetro		Valores normalizados de caudal	
	Caudal (LPM) Filtro vacío	Caudal (LPM) Filtro con esferas	Caudal (LPM) Filtro vacío	Caudal (LPM) Filtro con esferas
0,17	1,60	1,80	0,17	0,19
0,25	3,00	2,80	0,31	0,29
0,50	3,50	3,70	0,36	0,39
0,60	4,30	4,00	0,45	0,42
0,70	4,60	4,30	0,48	0,45
0,80	4,50	4,60	0,47	0,48
0,90	5,25	4,90	0,55	0,51
1,00	5,00	5,20	0,52	0,54
1,10	5,40	5,40	0,56	0,56
1,20	5,80	5,70	0,60	0,59
1,30	5,90	5,90	0,61	0,61
1,40	6,00	6,00	0,63	0,63
1,60	6,30	6,40	0,66	0,67
1,80	6,80	6,80	0,71	0,71
2,00	7,10	7,40	0,74	0,77
2,20	7,40	7,70	0,77	0,80
2,40	8,00	8,10	0,83	0,84
2,60	8,40	8,50	0,88	0,89
2,80	8,90	9,00	0,93	0,94
3,00	9,40	9,30	0,98	0,97
3,20	9,60	9,60	1,00	1,00

Fuente: Elaboración propia (2023).

Lo expuesto con anterioridad se puede verificar de forma visual al representar gráficamente el caudal frente a la presión y viceversa, tal como se muestra en los **gráficos 1** y **2**. En ambas gráficas, es evidente que a medida que la presión aumenta, el caudal también se incrementa.

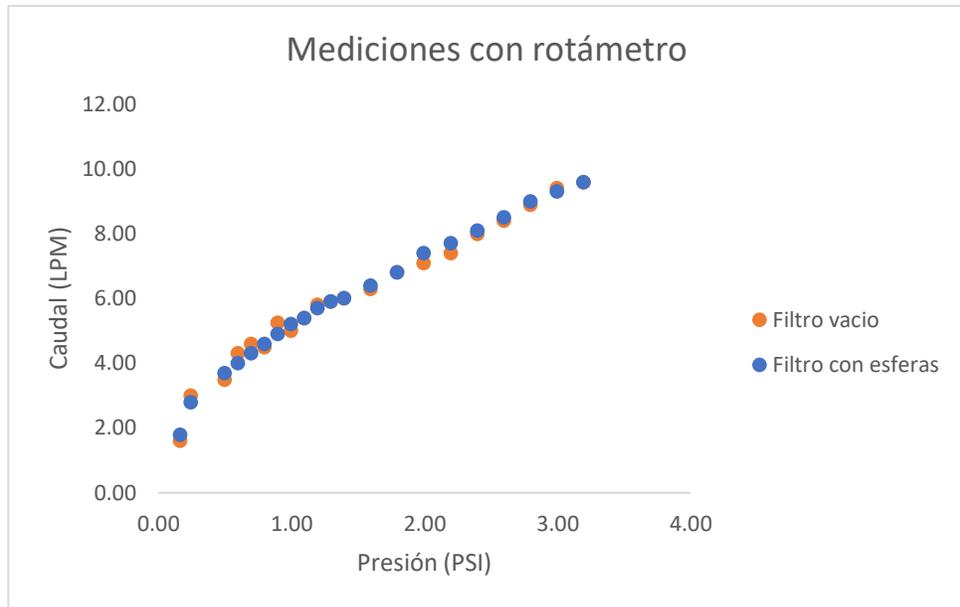


Gráfico 1. Valores del flujo al comparar caudal vs. presión.

Fuente: Elaboración propia (2023).

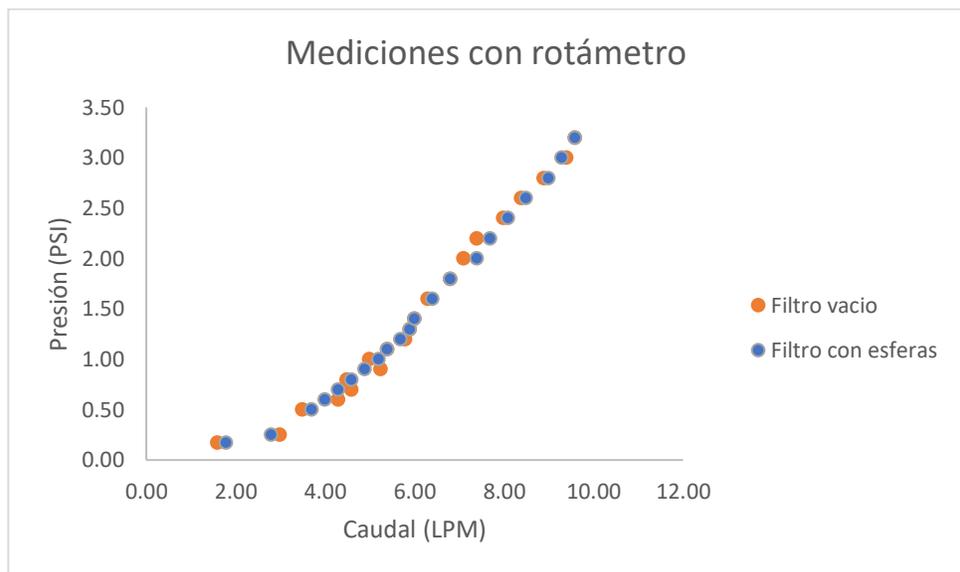


Gráfico 2. Valores del flujo al comparar presión vs. caudal.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el caso del **gráfico 3**, se trazan valores normalizados de caudal tanto para el filtro vacío como el filtro con esferas, los cuales fueron suministrados por el rotámetro. La normalización se logra dividiendo cada caudal por el valor máximo obtenido en la misma prueba. A continuación se aplica un análisis de regresión cuadrática, ya que se observa un

comportamiento parabólico. Es relevante destacar que se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 mayor a 0,9 para ambas configuraciones, lo que indica que el ajuste es satisfactorio.

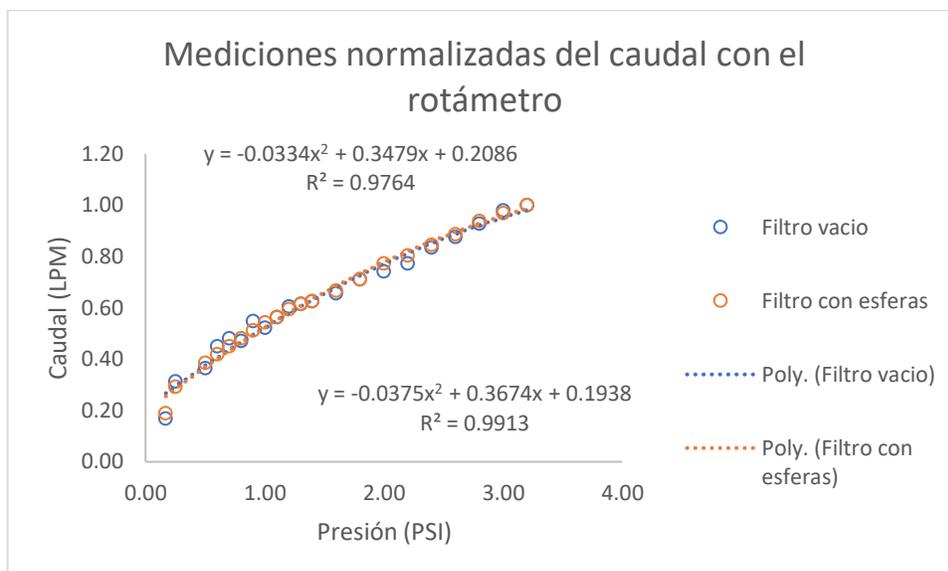


Gráfico 3. Regresión cuadrática con valores normalizados para el rotámetro.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Seguidamente se realizaron pruebas usando el medidor de volumen a las presiones antes mencionadas, variando desde 0,17 psi hasta 3,20 psi. Se registra el volumen inicial en el instante 0 minutos y el volumen final a los 1 minutos, para cada valor de presión, como se presenta en la **tabla 13**. A partir de estos datos, se calcula el caudal en litros por minuto tanto para el filtro con esferas como para el filtro sin esferas. Se observa un aumento en el caudal a medida que la presión crece. No obstante, al comparar el caudal obtenido por el medidor de volumen con el rotámetro, se nota una significativa diferencia entre ellos.

Tabla 13. Mediciones al colocar el medidor de volumen.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Medidor de volumen filtro vacío			Medidor de volumen filtro con esferas			Valores normalizados de caudal	
		Volumen inicial 10 ⁻³ m ³	Volumen final 10 ⁻³ m ³	Caudal (LPM)	Volumen inicial 10 ⁻³ m ³	Volumen final 10 ⁻³ m ³	Caudal (LPM)	Caudal (LPM) Filtro vacío	Caudal (LPM) Filtro con esferas
0,17	/	0,3700	0,3815	0,0115	0,4400	0,4515	0,0115	0,2347	0,2396
0,25	/	0,4500	0,4668	0,0168	0,4700	0,4858	0,0158	0,3429	0,3292
0,50	/	0,5100	0,5293	0,0193	0,5000	0,5193	0,0193	0,3939	0,4021
0,60	/	0,5700	0,5918	0,0218	0,5300	0,5505	0,0205	0,4449	0,4271
0,70	/	0,6400	0,6640	0,0240	0,5700	0,5922	0,0222	0,4898	0,4625
0,80	/	0,7000	0,7242	0,0242	0,6100	0,6341	0,0241	0,4939	0,5021
0,90	/	0,7500	0,7767	0,0267	0,6500	0,6755	0,0255	0,5449	0,5312
1,00	/	0,8100	0,8373	0,0273	0,7000	0,7270	0,0270	0,5571	0,5625
1,10	/	0,8800	0,9080	0,0280	0,7500	0,7775	0,0275	0,5714	0,5729
1,20	/	0,9500	0,9799	0,0299	0,8000	0,8300	0,0300	0,6102	0,6250
1,30	/	0,0300	0,0613	0,0313	0,8500	0,8808	0,0308	0,6388	0,6417
1,40	/	0,1100	0,1418	0,0318	0,9200	0,9528	0,0328	0,6490	0,6833
1,60	/	0,3000	0,3340	0,0340	0,9900	1,0240	0,0340	0,6939	0,7083
1,80	/	0,4100	0,4456	0,0356	0,0900	0,1269	0,0369	0,7265	0,7688
2,00	/	0,5000	0,5378	0,0378	0,1500	0,1888	0,0388	0,7714	0,8083
2,20	/	0,6200	0,6602	0,0402	0,2200	0,2605	0,0405	0,8204	0,8438
2,40	/	0,8000	0,8425	0,0425	0,2900	0,3315	0,0415	0,8673	0,8646
2,60	/	0,9400	0,9840	0,0440	0,3600	0,4038	0,0438	0,8980	0,9125
2,80	/	0,0800	0,1260	0,0460	0,4300	0,4750	0,0450	0,9388	0,9375
3,00	/	0,1500	0,1978	0,0478	0,5200	0,5670	0,0470	0,9755	0,9792
3,20	/	0,2300	0,2790	0,0490	0,6000	0,6480	0,0480	1,0000	1,0000

Fuente: Elaboración propia (2023).

En los **gráficos 4 y 5** se aprecia un patrón de comportamiento similar a los de los gráficos 2 y 3, donde un incremento en la presión conlleva a un aumento en el caudal, según un comportamiento cuadrático. Sin embargo, la distinción clave radica en que los valores de caudal obtenidos con el medidor de volumen son significativamente inferiores en comparación con los valores medidos por el rotámetro.

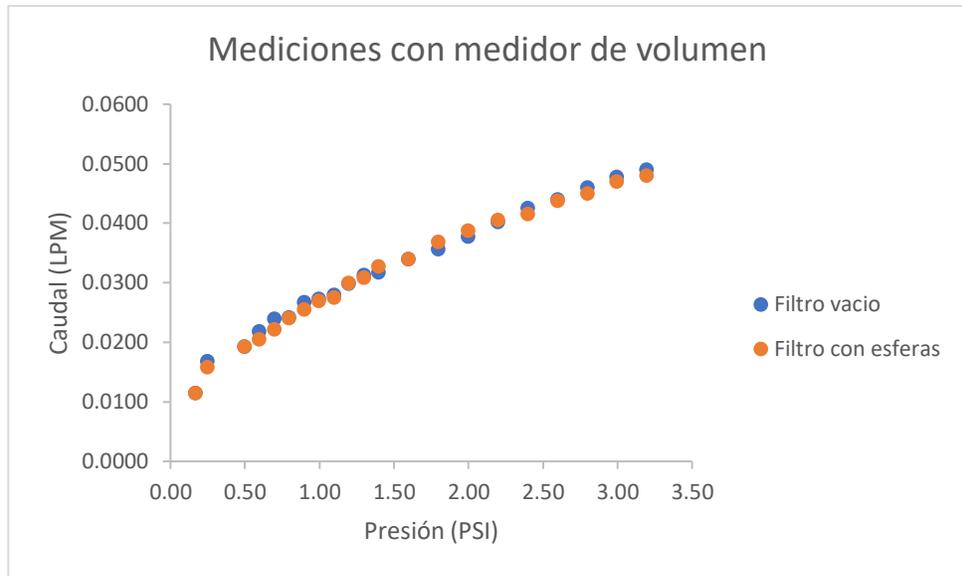


Gráfico 4. Comportamiento del medidor de volumen al graficar caudal vs. presión.

Fuente: Elaboración propia (2023).

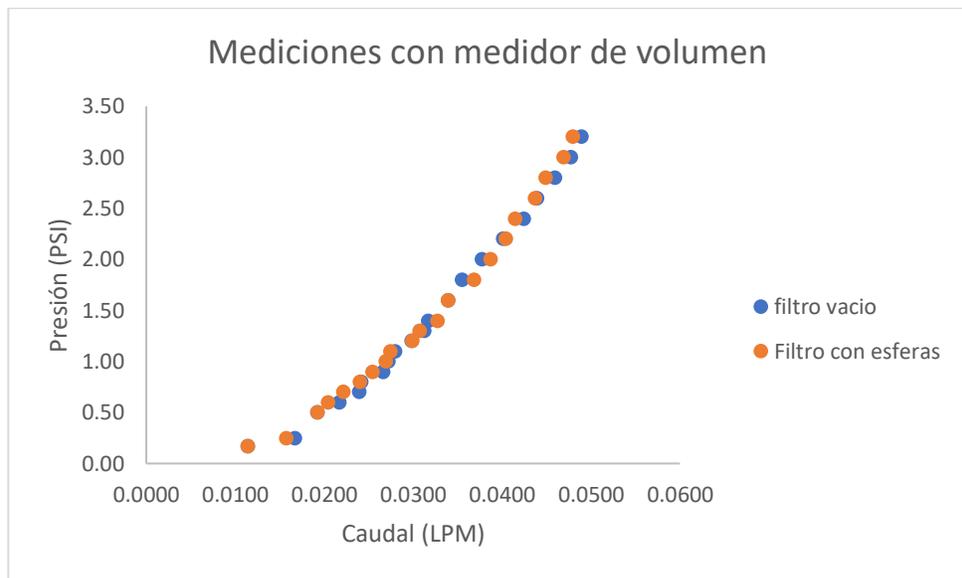


Gráfico 5. Comportamiento del medidor de volumen al graficar presión vs. caudal.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el **gráfico 6**, se siguió el mismo procedimiento que en la gráfica 3 y se obtuvieron resultados similares, donde R^2 sigue siendo mayor a 0,9 dándose un buen ajuste de datos.

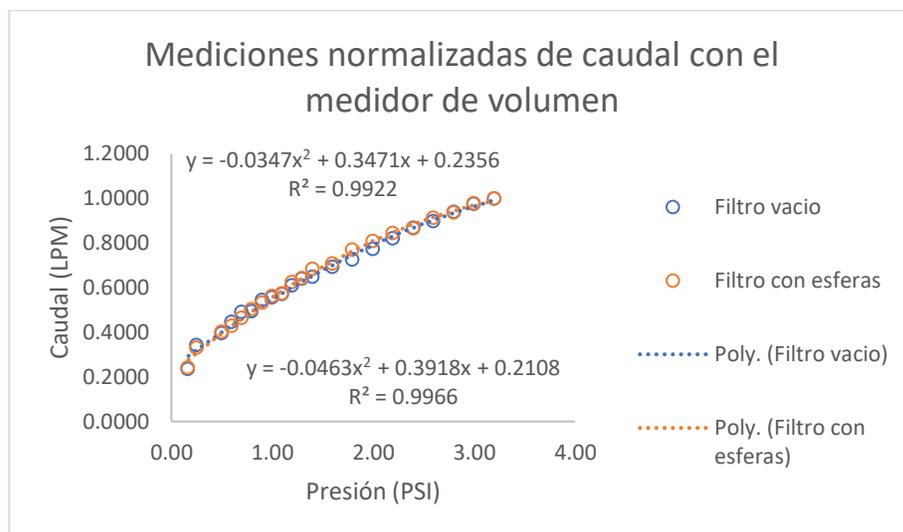


Gráfico 6. Gráfica de regresion cuadrática con valores normalizados para el medidor de volumen.

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.3. Prueba experimental 3

Para el tercer experimento, se expone el diseño conceptual del sistema, el cual está representado en el circuito de la **figura 13**.

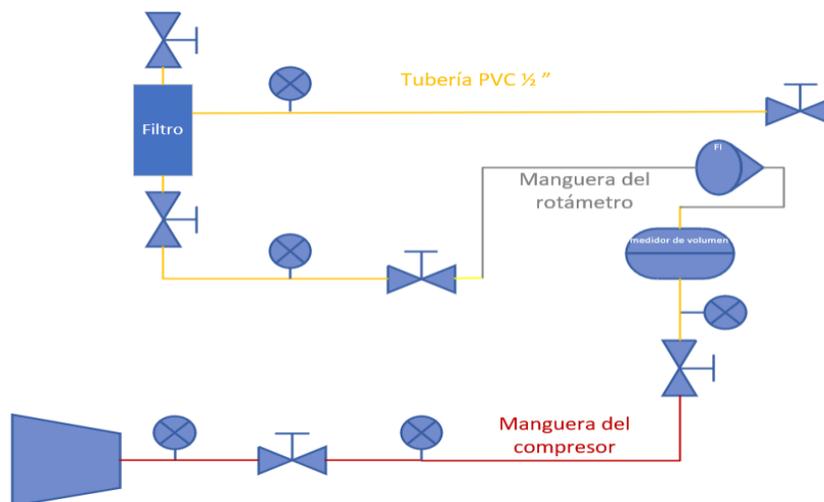


Figura 13. Montaje del circuito para la prueba 3.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En este sistema se mantuvieron las mismas condiciones que en el experimento anterior, con un filtro lleno al 100% y una porosidad de 0,455. Además, se incluyeron dos manómetros de precisión con máximo 15 inH₂O de la marca ASHCROFT, tanto antes como después del filtro, como se ilustra en la **figura 14**, con el propósito de registrar la caída de presión en el filtro.



Figura 14. Manómetro de 15 inH₂O.

Fuente: (Ashcroft, n.d.).

Sin embargo, no fue posible medir esta caída de presión utilizando estos manómetros, debido a que la presión que los atraviesa era muy baja y no se podía detectar, visualmente, la diferencia de presión. En consecuencia, se optó por la instalación de sensores de presión, más sensibles, para el cuarto experimento.

4.4. Prueba experimental 4

Finalmente, se presenta el sistema experimental definitivo, el cual se encuentra representado en la **figura 15**.

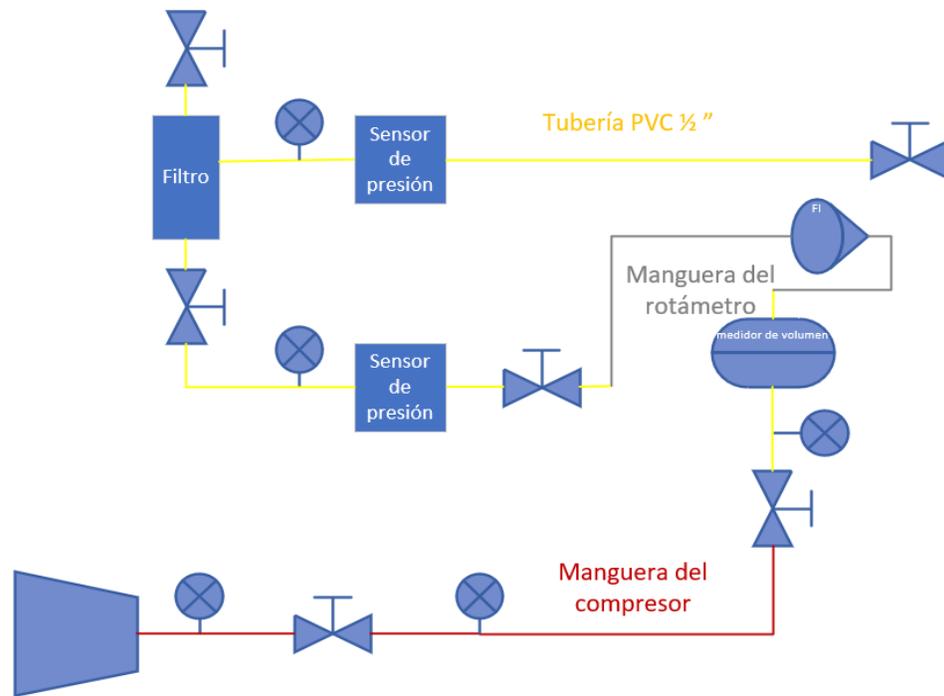


Figura 15. Sistema experimental definitivo.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Es fundamental resaltar que se han incorporado dos sensores de presión, uno ubicado antes del filtro y otro después, con el fin de medir con precisión la caída de presión que hay en el dispositivo poroso. El sensor que se va a utilizar se puede observar claramente en la **figura 16**.



Figura 16. Sensor de presión.

Fuente: WIKA (2023).

Adicionalmente, en la ejecución de la prueba 4, se mantienen las condiciones idénticas a las de la prueba 3, donde el filtro se mantiene completamente lleno de esferas y con una porosidad de 0,455.

Teniendo en cuenta estas consideraciones para la prueba experimental 4, se planea replicar la prueba experimental 2, con la única diferencia de que esta se lleva a cabo con el filtro con esferas. La intención detrás de esta replica es la evaluación de la facilidad de reproducibilidad de los resultados, un aspecto crucial del trabajo experimental propuesto.

Como se puede apreciar en la **tabla 14**, se empleó el mismo rango de presiones y se realizaron todas las mediciones durante un periodo de 1 minuto, al igual que se hizo en la prueba experimental 2. Además, se registró el volumen inicial y final con ayuda del medidor de volumen y con base en esto se determinó el caudal en correspondencia de cada presión. Asimismo, se tomó la lectura del caudal medido a través del rotámetro para cada nivel de presión correspondiente. La **tabla 14** refleja una tendencia similar a la observada en el experimento 2, donde el caudal aumenta a medida que la presión se incrementa, lo cual es correcto y concuerda con los resultados de la prueba experimento 2.

Tabla 14. Valores experimentales de la prueba 4, al utilizar filtro con esferas.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Medidor de volumen filtro con esferas			Valores normalizados de caudal (LPM)	Rotámetro (LPM)	Valores normalizados de caudal rotámetro (LPM)
		Volumen inicial 10 ⁻³ m ³	Volumen final 10 ⁻³ m ³	Caudal (LPM)			
0,17	/	0,6400	0,6520	0,0120	0,2927	2,80	0,28
0,25	/	0,6800	0,6927	0,0127	0,3098	3,00	0,3
0,50	/	0,8200	0,8338	0,0138	0,3366	3,50	0,35
0,60	/	0,7600	0,7779	0,0179	0,4366	4,90	0,49
0,70	/	0,8900	0,9105	0,0205	0,5000	5,30	0,53
0,80	/	0,9300	0,9510	0,0210	0,5122	5,40	0,54
0,90	/	0,9900	1,0128	0,0228	0,5561	5,90	0,59
1,00	/	0,2000	0,2238	0,0238	0,5805	6,00	0,6
1,10	/	0,2500	0,2750	0,0250	0,6098	6,30	0,63
1,20	/	0,3700	0,3960	0,0260	0,6341	6,50	0,65
1,30	/	0,4100	0,4375	0,0275	0,6707	6,90	0,69
1,40	/	0,4500	0,4780	0,0280	0,6829	7,00	0,7
1,60	/	0,4900	0,5190	0,0290	0,7073	7,20	0,72
1,80	/	0,5900	0,6222	0,0322	0,7854	8,10	0,81

2,00	/	0,6400	0,6739	0,0339	0,8268	8,80	0,88
2,20	/	0,7100	0,7448	0,0348	0,8488	9,00	0,9
2,40	/	0,7600	0,7960	0,0360	0,8780	9,40	0,94
2,60	/	0,9300	0,9678	0,0378	0,9220	10,00	1
2,80	/	0,9900	1,0290	0,0390	0,9512		
3,00	/	0,0600	0,1000	0,0400	0,9756		
3,20	/	0,1700	0,2110	0,0410	1,0000		

Fuente: Elaboración propia (2023).

Posteriormente, se generan dos gráficas que representan la relación entre el caudal y la presión, así como la presión y el caudal, con el propósito de observar con mayor claridad su tendencia. Es importante destacar que estos gráficos se basan en las mediciones efectuadas inicialmente con el rotámetro.

Como se puede apreciar los **gráficos 7 y 8**, concuerdan con los gráficos del experimento anterior 2, lo que indica que presentan un comportamiento similar.

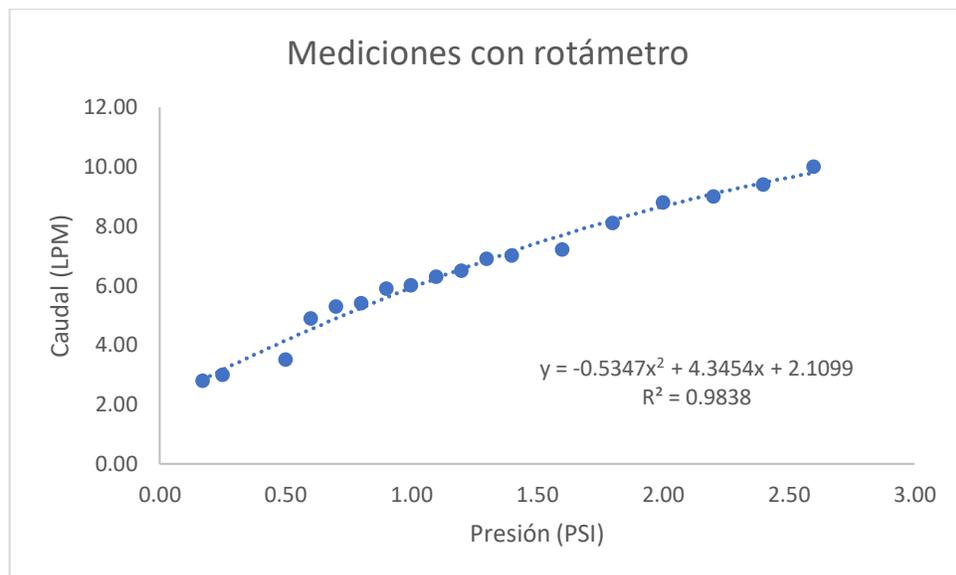


Gráfico 7. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar filtro con esferas.

Fuente: Elaboración propia (2023).

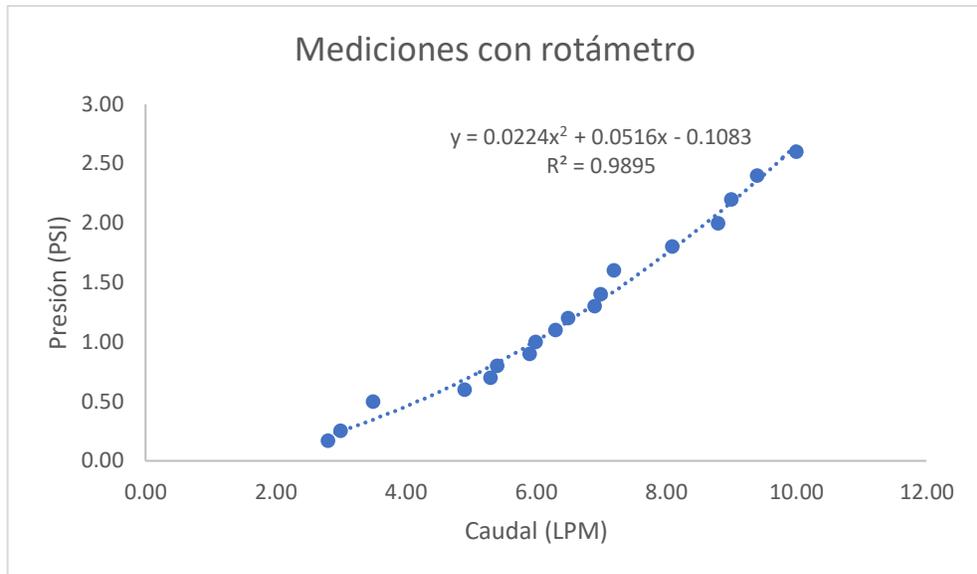


Gráfico 8. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 4, al utilizar filtro con esferas.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Para el **gráfico 9**, se siguió el mismo procedimiento de normalización que se aplicó anteriormente. Sin embargo, en este caso, se busca verificar si la tendencia es consistente entre ambas gráficas para evaluar la facilidad de reproducibilidad de los resultados.

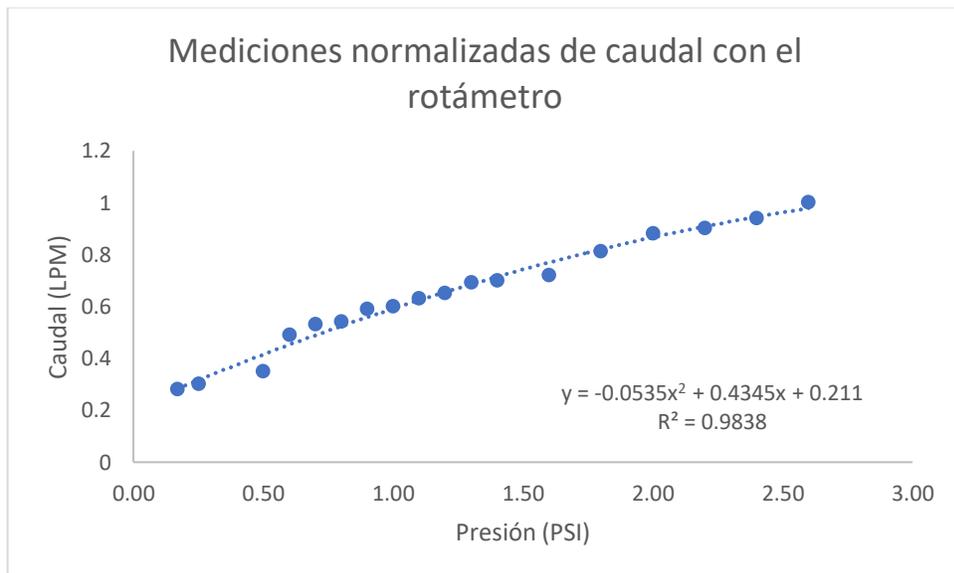


Gráfico 9. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar filtro con esferas para una gráfica normalizada.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Seguidamente, se generaron tres gráficos adicionales, siguiendo la misma estructura, pero en esta ocasión se usó el caudal evaluado con los datos del medidor de volumen.

Como se puede apreciar las **gráficas 10 y 11**, concuerdan con los **gráficos 4 y 5**.

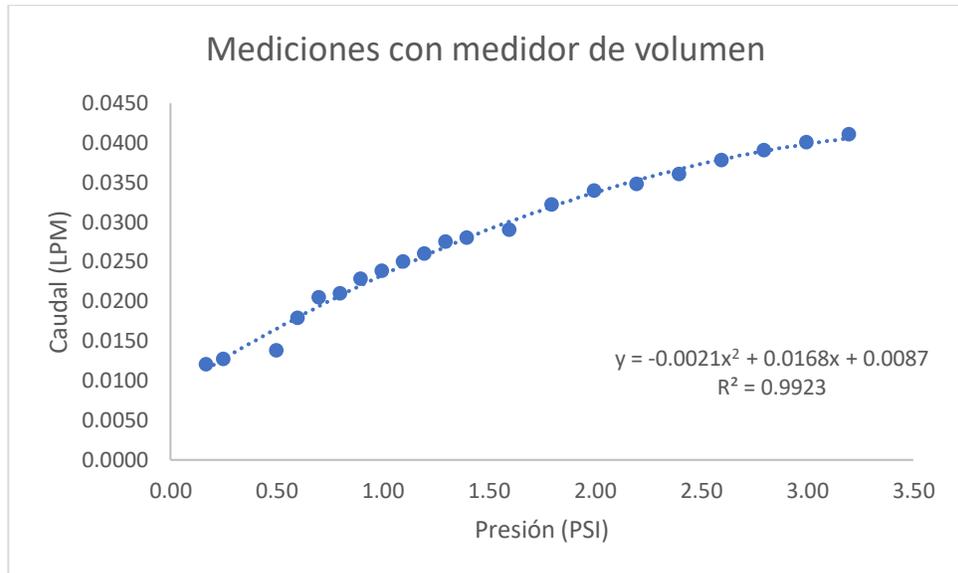


Gráfico 10.. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar el medidor de volumen y filtro con esferas.

Fuente: Elaboración propia (2023).

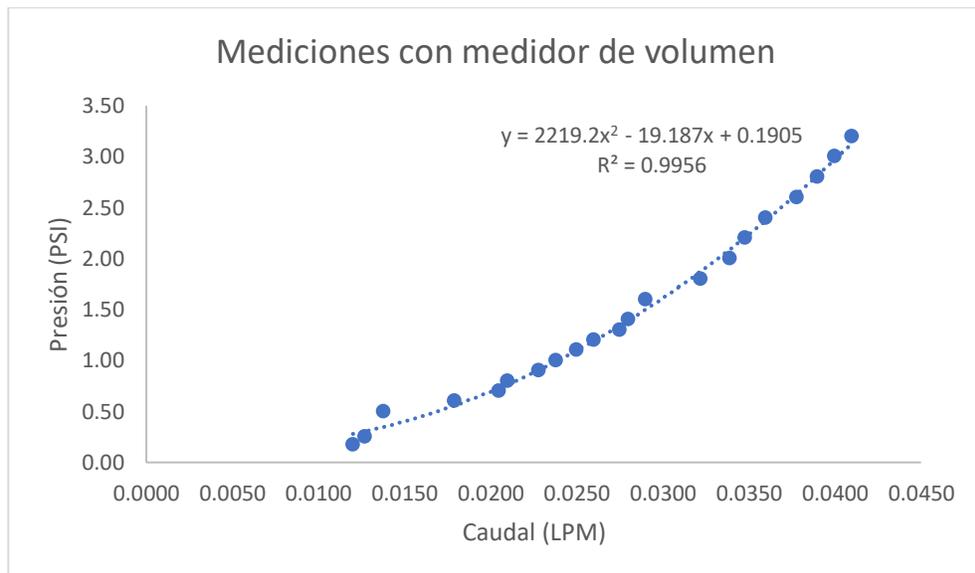


Gráfico 11. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 4, al utilizar el medidor de volumen y filtro con esferas.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Finalmente, se elaboró una gráfica normalizada que muestra la relación entre caudal y presión como puede observarse en el **gráfico 12**.

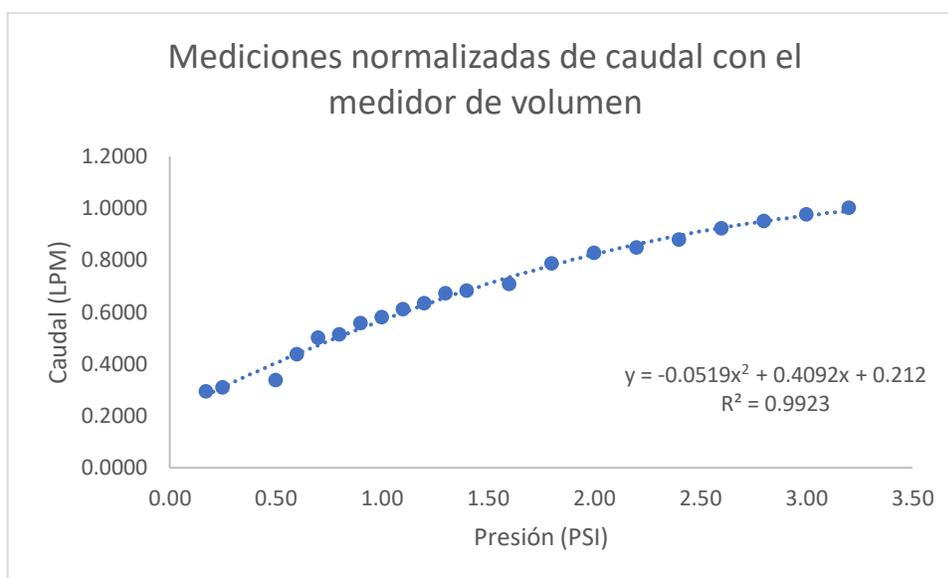


Gráfico 12. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 4, al utilizar el medidor de volumen y filtro con esferas para una gráfica normalizada.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Dado que la gráfica tiene un comportamiento no lineal se ajustó una curva parabólica mediante regresión por mínimos cuadrados, lo que brinda un coeficiente de determinación (R^2) superior a 0,9. Esto indica que el ajuste es bueno y además el experimento es altamente replicable, ya que los valores obtenidos son similares a los de la prueba 2.

En la segunda parte de la prueba experimental 4 se midió la caída de presión a través del filtro. Para ello, se tomaron lecturas de esta caída de presión utilizando sensores de presión y registrando la información mediante el software LabVIEW de National Instruments. Para cada valor de la presión de aire establecida en la prueba se realizaron dos lecturas, una al inicio (minuto 0), donde se registran la presión de entrada y la de salida; y después de 1 minuto (minuto 1), como se muestra en la **tabla 15**.

Tabla 15. Medición de la caída de presión en el filtro al emplear un filtro con esferas.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Caudal (LPM)	Caída de presión Fesferas min 0			Caída de presión Fesferas min 1		
			Sensor entrada del filtro (PSI)	Sensor salida del filtro (PSI)	delta P minuto 0 (PSI)	Sensor entrada del filtro (PSI)	Sensor salida del filtro (PSI)	delta P minuto 1 (PSI)
0,17	/	0,0120	0,0493	0,0341	0,0152	0,0493	0,0341	0,0152
0,25	/	0,0127	0,0515	0,0363	0,0152	0,0515	0,0363	0,0152
0,50	/	0,0138	0,0696	0,0529	0,0167	0,0551	0,0392	0,0160
0,60	/	0,0179	0,0769	0,0602	0,0167	0,0638	0,0471	0,0167
0,70	/	0,0205	0,0827	0,0653	0,0174	0,0725	0,0558	0,0167
0,80	/	0,0210	0,0841	0,0674	0,0167	0,0856	0,0682	0,0174
0,90	/	0,0228	0,0928	0,0754	0,0174	0,0935	0,0761	0,0174
1,00	/	0,0238	0,0986	0,0805	0,0181	0,0979	0,0805	0,0174
1,10	/	0,0250	0,1059	0,0877	0,0181	0,1066	0,0892	0,0174
1,20	/	0,0260	0,1095	0,0906	0,0189	0,1037	0,0856	0,0181
1,30	/	0,0275	0,1175	0,0979	0,0196	0,1175	0,0979	0,0196
1,40	/	0,0280	0,1218	0,1037	0,0181	0,1233	0,1044	0,0189
1,60	/	0,0290	0,1283	0,1088	0,0196	0,1305	0,1109	0,0196
1,80	/	0,0322	0,1479	0,1276	0,0203	0,1523	0,1312	0,0210
2,00	/	0,0339	0,1631	0,1436	0,0196	0,1581	0,1370	0,0210
2,20	/	0,0348	0,1697	0,1479	0,0218	0,1755	0,1544	0,0210
2,40	/	0,0360	0,1834	0,1620	0,0215	0,1885	0,1668	0,0218
2,60	/	0,0378	0,2016	0,1769	0,0247	0,2023	0,1776	0,0247
2,80	/	0,0390	0,2110	0,1878	0,0232	0,2103	0,1856	0,0247
3,00	/	0,0400	0,2219	0,1987	0,0232	0,2240	0,2008	0,0232
3,20	/	0,0410	0,2422	0,2168	0,0254	0,2385	0,2139	0,0247

Fuente: Elaboración propia (2023).

Al analizar los datos de entrada y salida para el minuto 0 y el minuto 1, se puede observar que la presión de entrada, mayor de la presión de salida, se reduce justamente al pasar a través del filtro, donde el flujo de aire debe vencer los obstáculos presentes en su interior, en este caso, las esferas. Estas esferas actúan como una restricción al flujo de aire, lo que resulta de una reducción de la presión al salir del filtro, lo que es el comportamiento esperado.

Además, es importante destacar que se pudo registrar una pequeña caída de presión, lo que indica que los sensores son efectivos para evaluar la diferencia de presión del sistema usado para la filtración.

Para una mejor comprensión de lo explicado previamente, se llevará a cabo un análisis individual de las gráficas correspondientes a la caída de presión, usando los datos de los minutos 0 y 1.

- Análisis de la caída de presión (datos de minuto 0)

En el **gráfico 13** se representa la relación entre la presión de entrada y la presión a la salida del compresor y su medida mediante el manómetro. Esta representación ilustra claramente que a medida que la presión registrada por el manómetro aumenta, también lo hace la presión de entrada al filtro. Además, se destaca en esta gráfica que la relación entre ambas presiones es lineal.

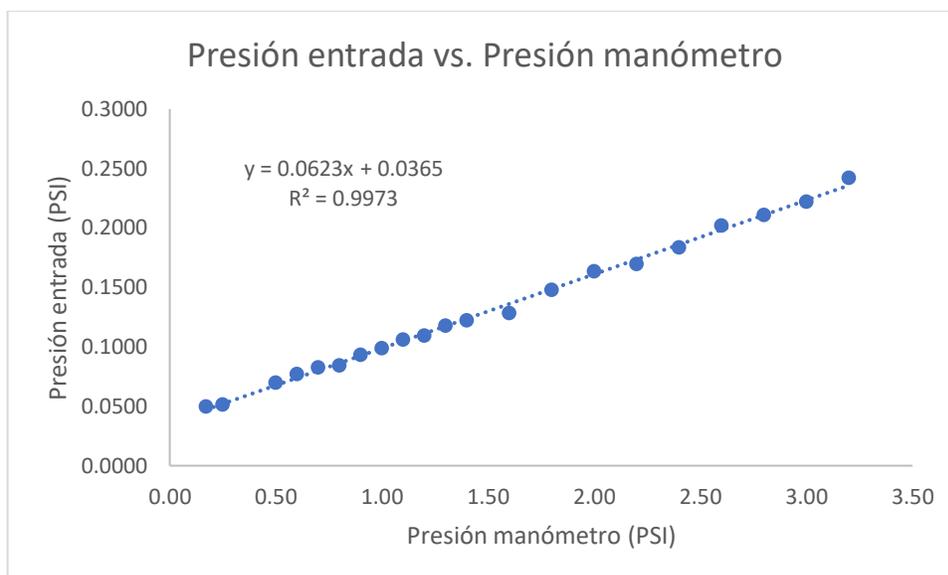


Gráfico 13. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Esta tendencia es igualmente evidente al examinar la presión de salida y la presión del manómetro tal como evidencia el **gráfico 14**. La diferencia principal radica en que las presiones de entrada al filtro son más elevadas que las de salida, pero en ambas situaciones, se aprecia un incremento a medida que la presión del manómetro se eleva.

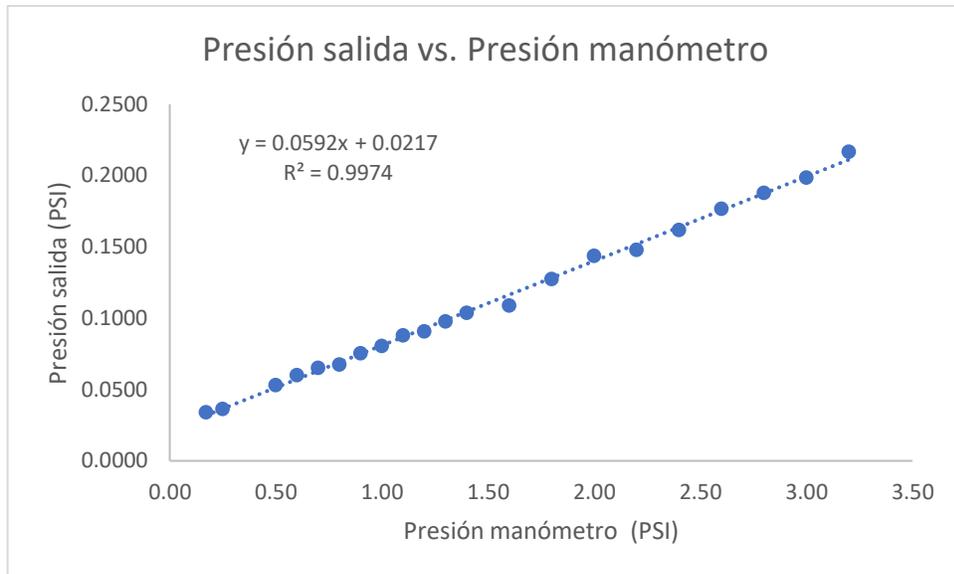


Gráfico 14. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Sucesivamente, en el **gráfico 15**, se representa la relación entre la presión de entrada en el filtro versus el caudal de aire. El aumento de la presión a medida que aumenta el caudal no es lineal y en este caso se desarrolla un ajuste de naturaleza polinómico de segundo grado, ya que se distingue claramente un comportamiento parabólico en los datos experimentales.

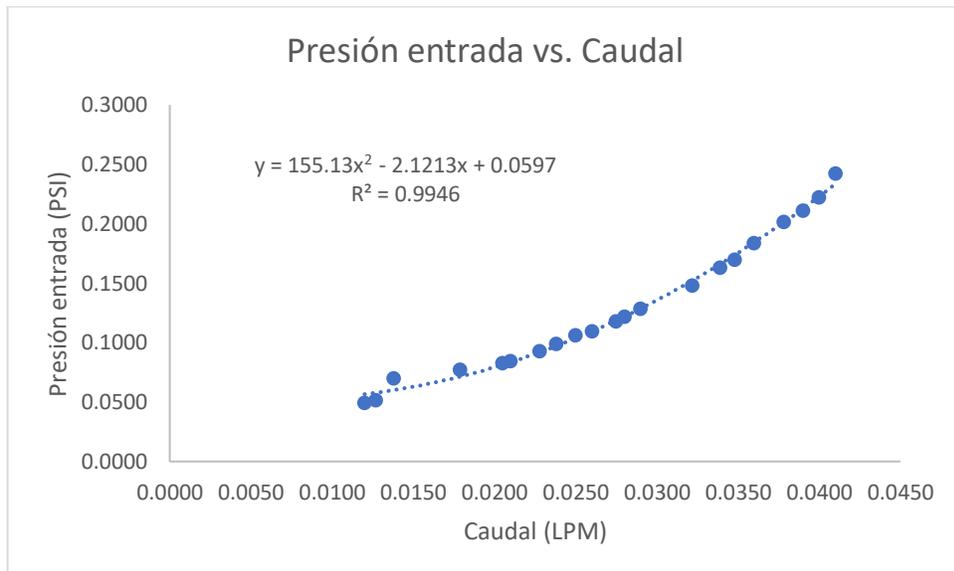


Gráfico 15. Presión entrada vs Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Esta misma tendencia se repite al graficar la presión de salida en función del caudal, como se muestra en la **gráfica 16** y el comportamiento es coherente, ya que un aumento en la presión genera un incremento en el flujo.

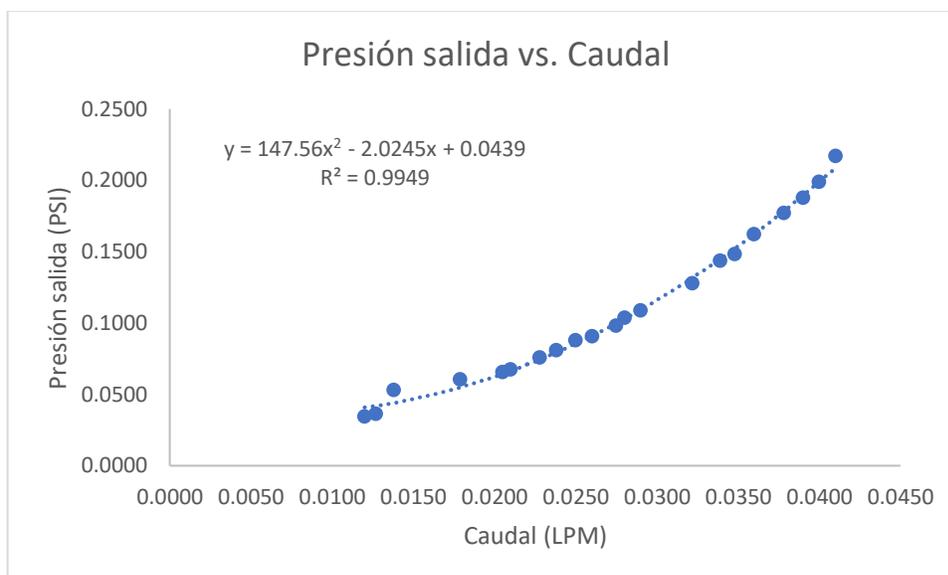


Gráfico 16. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el **gráfico 17**, se aprecia la diferencia de la presión al ingresar el flujo de aire al sensor y al salir (caída de presión en el filtro) en comparación con la presión manométrica. Se observa que a medida que una variable aumenta, la otra también lo hace siguiendo un comportamiento lineal. Al calcular el coeficiente de determinación, se obtiene un valor aproximadamente de 0.94, lo que evidencia un buen ajuste lineal a la tendencia de los datos experimentales.

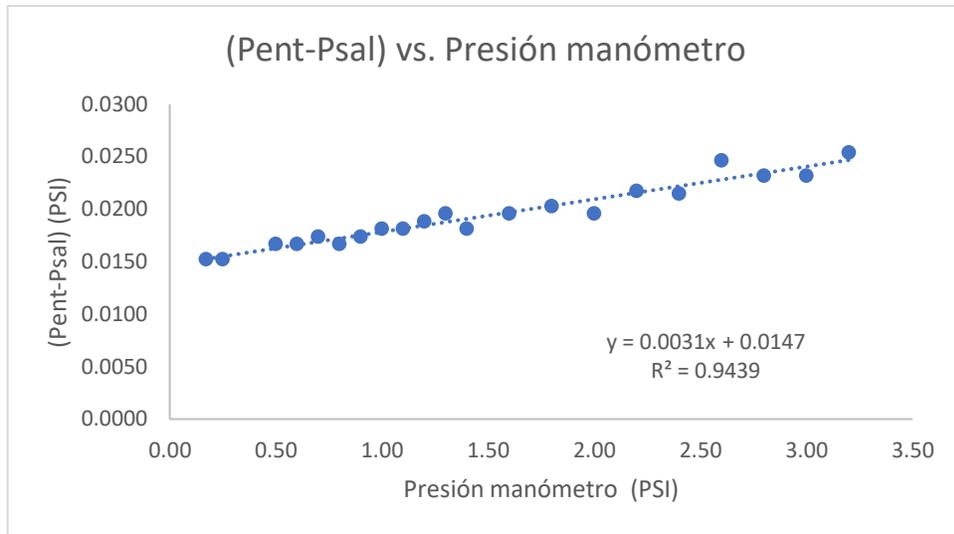


Gráfico 17. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el caso de la **gráfica 18**, que representa en cambio la relación entre la caída de presión en el filtro y el caudal, se observa un comportamiento de tipo parabólico. Al verificar esta tendencia con el coeficiente de determinación, se obtiene un valor cercano a 0.94, lo que indica un buen ajuste a esta forma parabólica. Además, al igual que en todos los casos anteriores, se mantiene la consistencia de que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace.

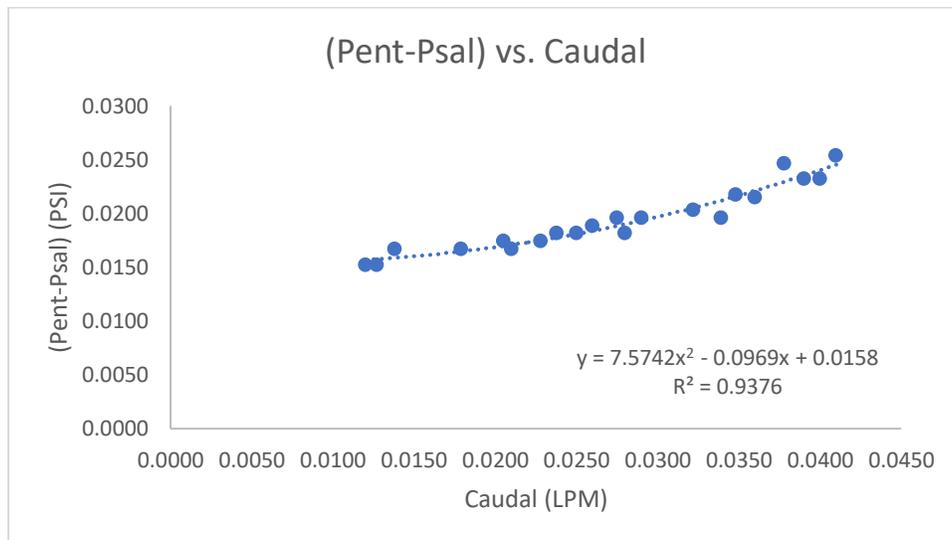


Gráfico 18. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

- Análisis de la caída de presión (datos del minuto 1)

La **gráfica 19** exhibe la relación entre la presión de entrada y la presión del manómetro, usando la segunda serie de datos adquiridos por los dos sensores de presión al minuto 1. También en este caso, conforme la presión del manómetro aumenta, la presión de entrada al filtro también se incrementa, siguiendo nuevamente un comportamiento lineal.

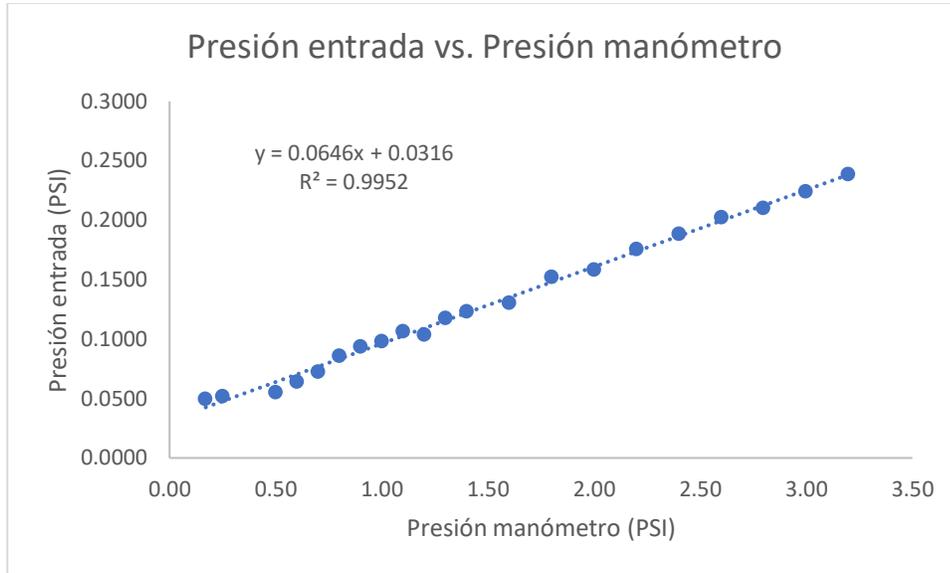


Gráfico 19. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

La misma tendencia se hace igualmente evidente al analizar la relación entre la presión de salida y la presión del manómetro, como indican los datos reportados en el **gráfico 20**.

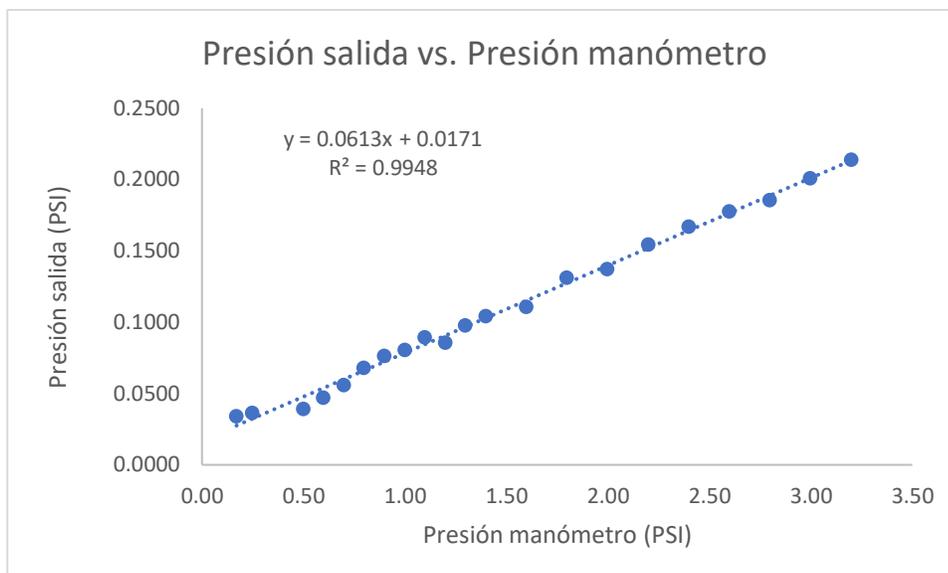


Gráfico 20. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el **gráfico 21**, se muestra la relación entre la presión de entrada al filtro versus el caudal de aire, donde se confirma el comportamiento polinomial de segundo grado.

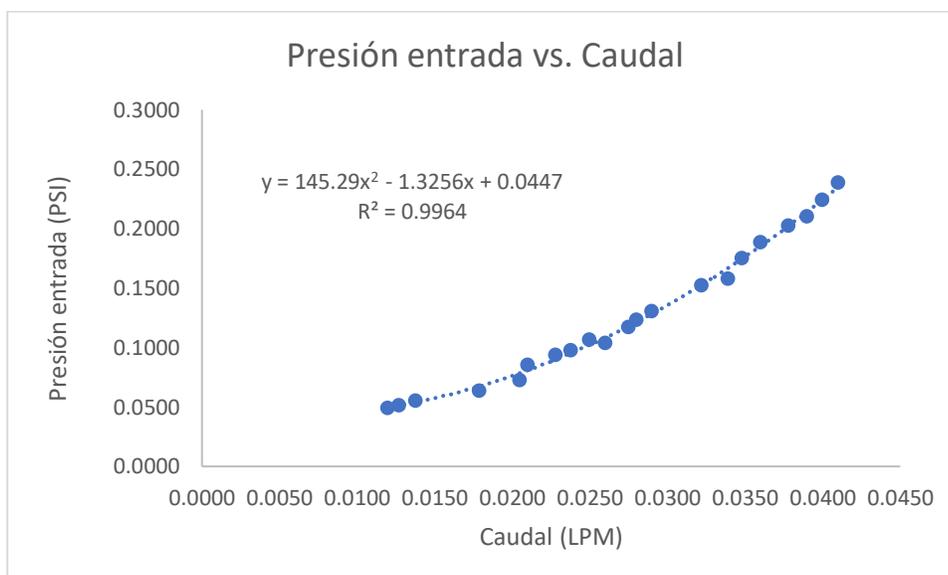


Gráfico 21. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

La misma tendencia se repite al representar la presión de salida en función del caudal, como ilustra el **gráfico 22**.

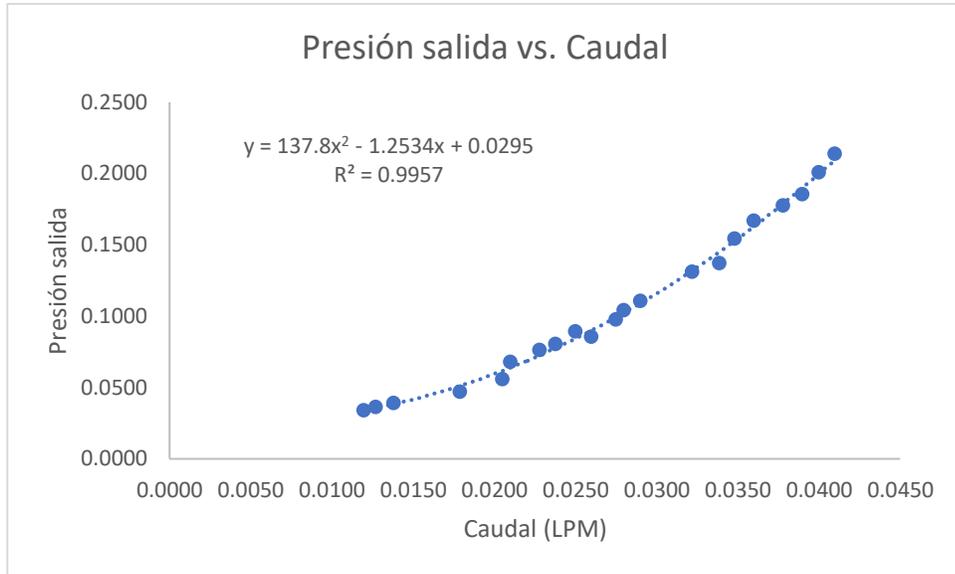


Gráfico 22. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

La variación de la caída de presión en el filtro en relación con la presión manométrica calibrada a la salida del compresor se presenta en el **gráfico 23**, donde se aprecia un comportamiento lineal. Al calcular el coeficiente de determinación del ajuste lineal, se obtiene un valor de 0,9583, lo que confirma un óptimo ajuste de los datos a esta tendencia.

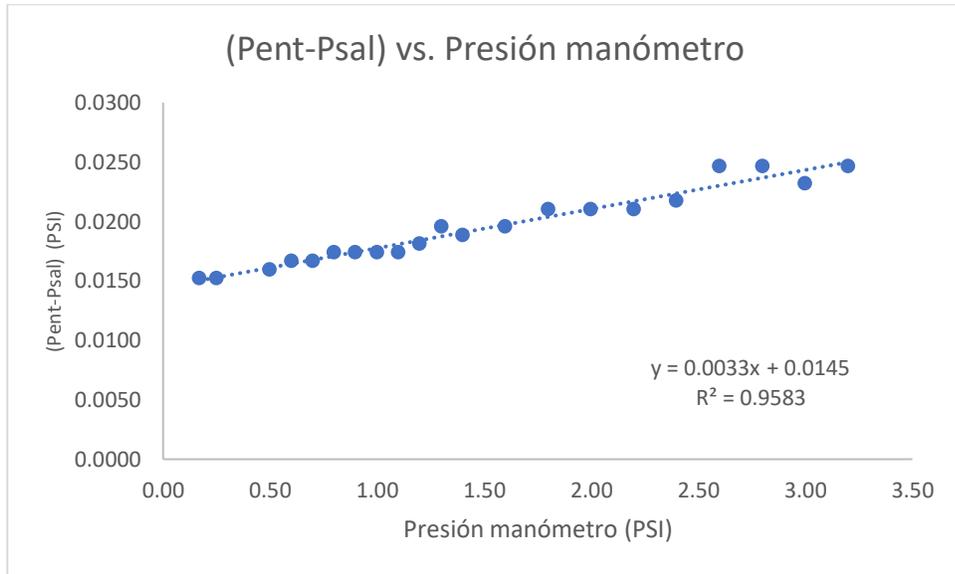


Gráfico 23. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En lo que respecta al **gráfico 24**, el cual ilustra la relación entre la caída de presión y el caudal, se observa nuevamente un comportamiento parabólico. Al evaluar el ajuste polinomial de segundo orden, mediante el coeficiente de determinación, se obtiene un valor de 0.9583 que evidencia un muy buen ajuste a la curva parabólica.

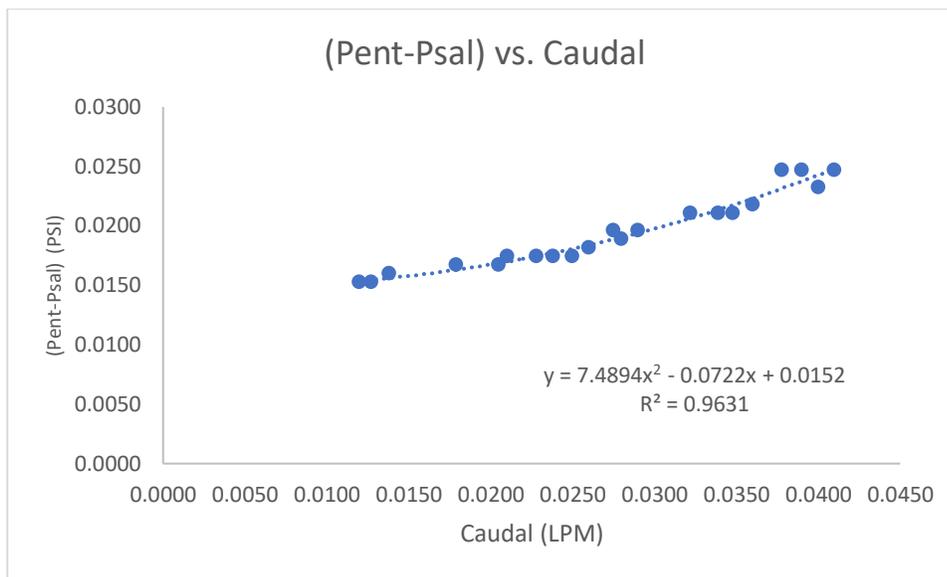


Gráfico 24. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tras el análisis individual de las gráficas, se observa que el comportamiento de los datos adquirido en el sistema experimental al minuto 0 es consistente con el comportamiento observado en el sistema al minuto 1. Por lo tanto, puede concluirse que estos datos son **bastante confiables**.

4.5. Prueba experimental 5

En esta nueva prueba experimental (prueba 5) se sustituyen las esferas por cilindros de plástico ingenieril como elemento de estudio, usando el mismo circuito experimental evaluado anteriormente con los datos de la prueba 4. El filtro se llena por completo, cabe recalcar que para esta se obtiene una porosidad de 0.447. Las dimensiones de los cilindros y el cálculo de la porosidad se brindan a continuación.

Volumen del cilindro (V_{cil}) $\rightarrow R=0,022$ m; $L=0,3$ m.

$$V_{cil} = \pi * R^2 * L$$

$$V_{cil} = \pi * (0,022 \text{ m})^2 * 0,3 \text{ m}$$

$$V_{cil} = 0,000456 \text{ m}^3$$

Volumen cilindros plásticos ($V_{cil-pla}$) $\rightarrow R=0,003175$ m; $L=0,012256$ m.

$$V_{cil-pla} = \pi * R^2 * L$$

$$V_{cil-pla} = \pi * (0,003175 \text{ m})^2 * 0,012256 \text{ m}$$

$$V_{cil-pla} = 0,00000038813 \text{ m}^3$$

Volumen total de esferas ($V_{total.cil-pla}$) \rightarrow Para en llenar el filtro al 100% se necesitan 650 cilindros.

$$V_{total.cil-pla} = n_{esferas} * V_{cil-pla}$$

$$V_{total.cil-pla} = 650 * 0,00000038813 \text{ m}^3$$

$$V_{total.cil-pla} = 0,00025228965 \text{ m}^3$$

Porosidad (\emptyset).

$$\emptyset = \frac{V_{cil} - V_{total.cil-pla}}{V_{cil}}$$

$$\emptyset = \frac{0,000456 \text{ m}^3 - 0,00025228965 \text{ m}^3}{0,000456 \text{ m}^3}$$

$$\emptyset = 0,447$$

Sucesivamente, se reportan los caudales estimados usando los datos del medidor de volumen y el rotámetro para el flujo a través del filtro cargado al 100% con cilindros, tal como se detalla en la **tabla 16**.

Tabla 16. Prueba experimental 5 usando el filtro lleno con cilindros plásticos.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Medidor de volumen filtro cilindros plástico ingenieril			Valores normalizados de caudal (LPM)	Rotámetro (LPM)	Valores normalizados de caudal rotámetro (LPM)
		Volumen inicial 10 ⁻³ m ³	Volumen final 10 ⁻³ m ³	Caudal (LPM)			
0,17	/	0,8600	0,8756	0,0156	0,3805	1,70	0,17
0,25	/	0,9000	0,9235	0,0235	0,5732	3,00	0,3
0,50	/	0,9600	0,9930	0,0330	0,8049	4,50	0,45
0,60	/	0,0200	0,0562	0,0362	0,8829	4,75	0,475
0,70	/	0,1400	0,1770	0,0370	0,9024	5,25	0,525
0,80	/	0,2000	0,2420	0,0420	1,0244	5,70	0,57
0,90	/	0,3000	0,3429	0,0429	1,0463	5,80	0,58
1,00	/	0,3900	0,4346	0,0446	1,0878	6,25	0,625
1,10	/	0,5100	0,5549	0,0449	1,0951	6,40	0,64
1,20	/	0,6200	0,6670	0,0470	1,1463	6,50	0,65
1,30	/	0,7200	0,7690	0,0490	1,1951	6,75	0,675
1,40	/	0,8500	0,9001	0,0501	1,2220	7,00	0,7
1,60	/	0,1300	0,1846	0,0546	1,3317	7,50	0,75
1,80	/	0,2800	0,3369	0,0569	1,3878	8,00	0,8
2,00	/	0,3900	0,4500	0,0600	1,4634	8,70	0,87
2,20	/	0,5000	0,5620	0,0620	1,5122	9,50	0,95
2,40	/	0,7900	0,8540	0,0640	1,5610	9,60	0,96
2,60	/	0,9300	0,9987	0,0687	1,6756	9,80	0,98
2,80	/	0,0300	0,0988	0,0688	1,6780		
3,00	/	0,2000	0,2697	0,0697	1,7000		
3,20	/	0,3900	0,4636	0,0736	1,7951		

Fuente: Elaboración propia (2023).

Además, se generan dos gráficas para analizar la relación entre la presión y el caudal indicado por el rotámetro, tanto como presión versus caudal en la dirección contraria. Como se puede apreciar en las **gráficas 25 y 26**, ambas muestran una tendencia parabólica y exhiben un coeficiente de determinación próximo a 1.00, lo cual indica un óptimo ajuste proporcionado por la regresión numérica de segundo grado.

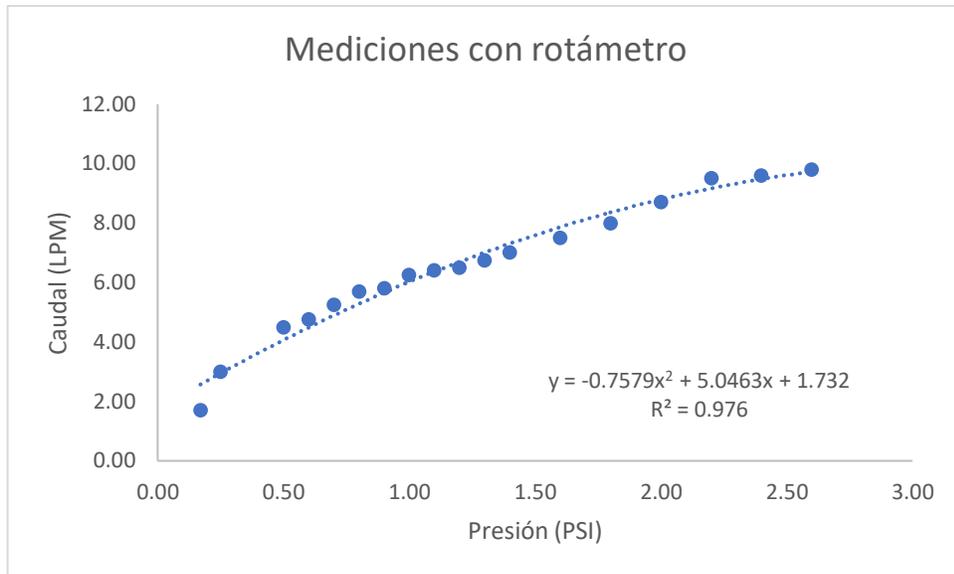


Gráfico 25. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 5, al utilizar filtro con cilindros de plástico ingenieril.

Fuente: Elaboración propia (2023).

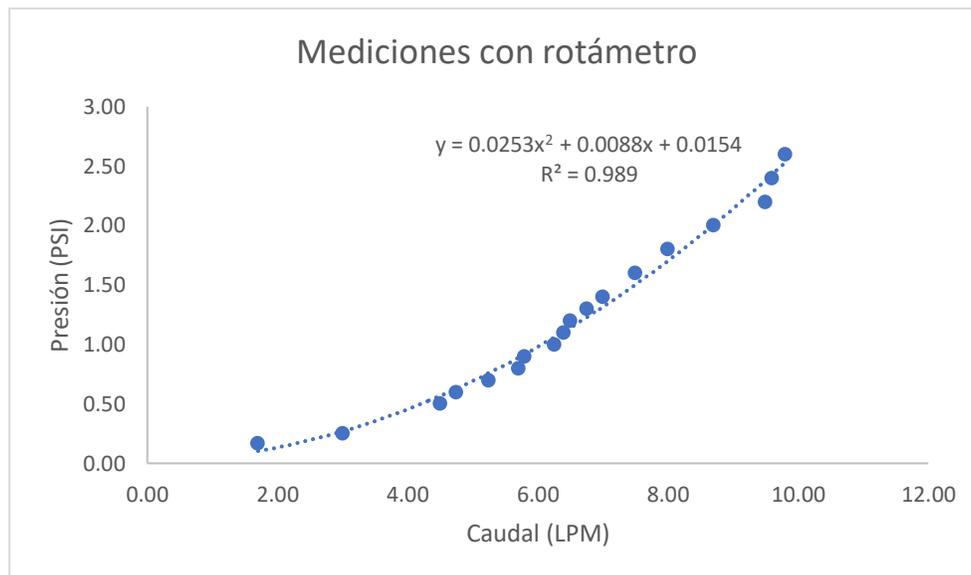


Gráfico 26. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 5, al utilizar filtro con cilindros de plástico ingenieril.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En lo que respecta al **gráfico 27** para los datos normalizados, se observa un comportamiento parabólico similar al de los gráficos previos, con un coeficiente de

determinación igualmente cercano a 1.00. Se confirma, por lo tanto, la relación hasta aquí observada entre las variables presión y caudal relativas al proceso de flujo en el filtro.

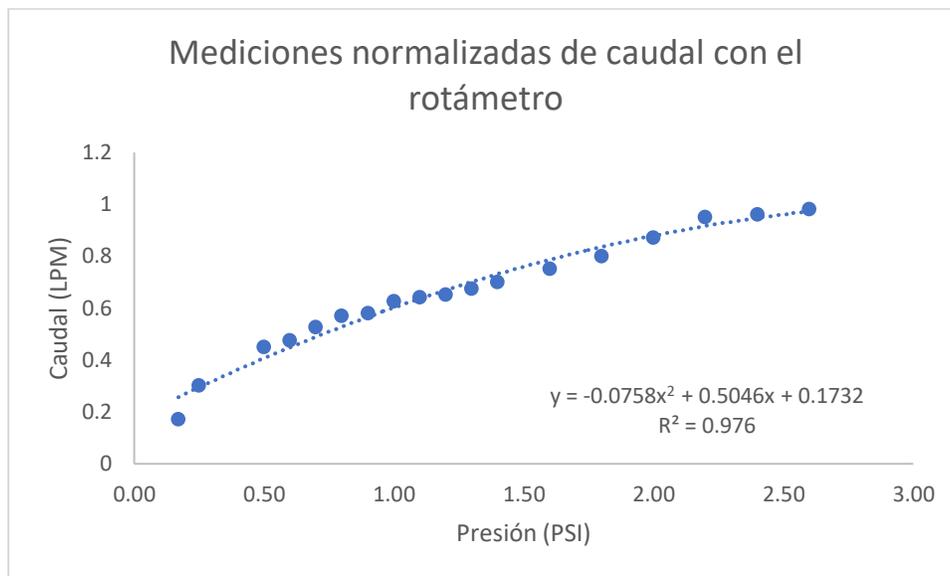


Gráfico 27. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 5, al utilizar el filtro con cilindros de plástico ingenieril.

Fuente: Elaboración propia (2023).

A continuación, se desarrolla un análisis similar al llevado a cabo con el rotámetro, pero en lugar de emplear este último, se usan los datos obtenidos con el medidor de volumen. En el caso de los gráficos **28 y 29**, se confirma el comportamiento evidenciado anteriormente en las **gráficas 25 y 26**. Aunque los valores son diferentes en magnitud, las curvas de regresión numérica parabólicas arrojan nuevamente un coeficiente de determinación cercano a 1.00.

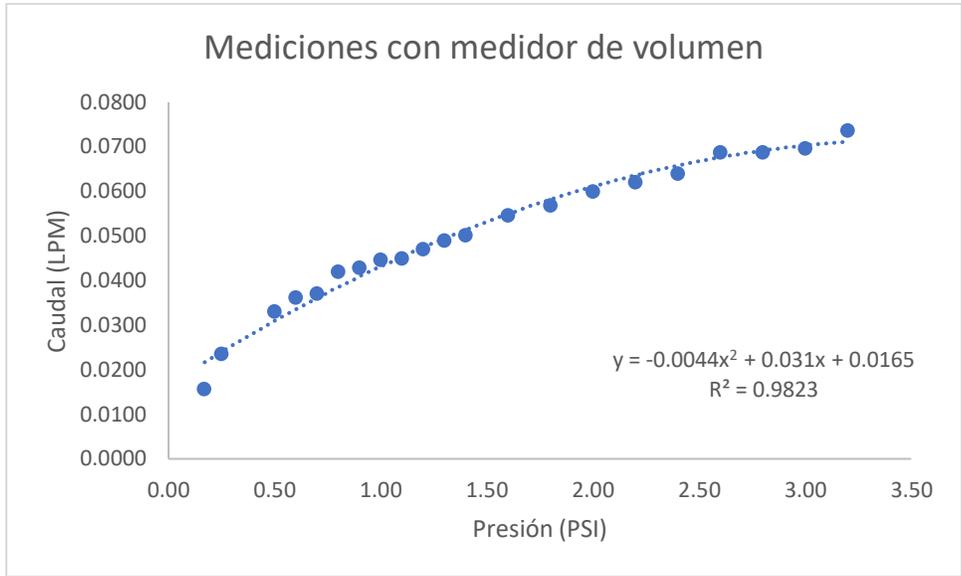


Gráfico 28. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 5, usando el medidor de volumen y el filtro con cilindros de plástico ingenieril.

Fuente: Elaboración propia (2023).

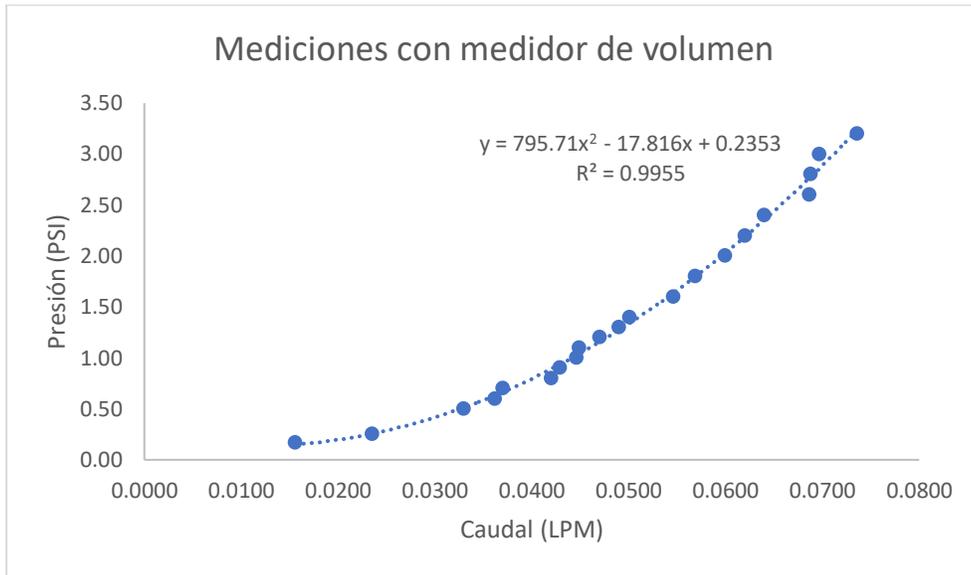


Gráfico 29. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 5, usando el medidor de volumen y el filtro con cilindros de plástico ingenieril.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Para los datos normalizados, el **gráfico 30** sigue la misma tendencia observada, anteriormente, en la gráfica **27**.

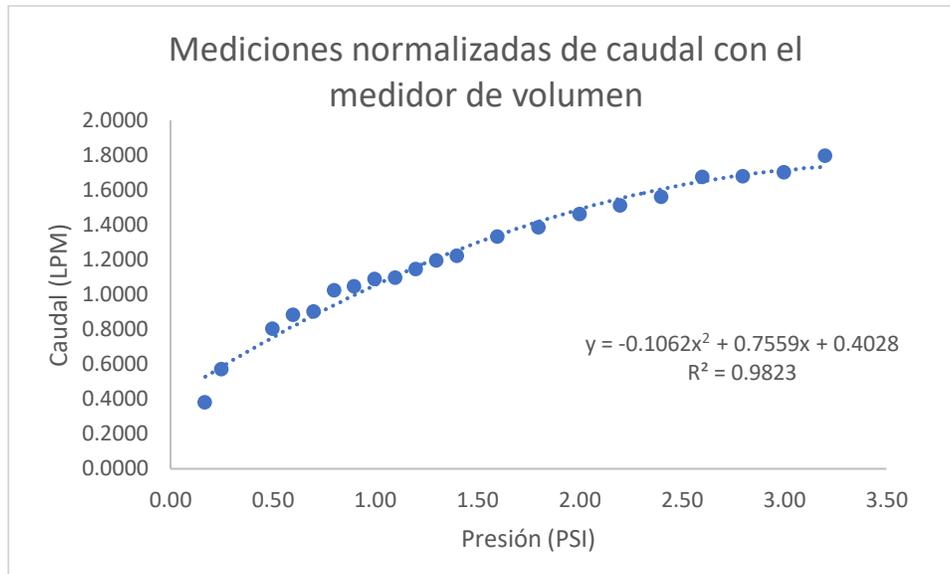


Gráfico 30. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 5, usando el medidor de volumen y el filtro con cilindros de plástico ingenieril.

Fuente: Elaboración propia (2023).

También para este caso de medios filtrantes cilíndricos, es fundamental analizar la caída de presión durante el proceso de filtración, al igual que en el caso anterior de las esferas. Para el cálculo respectivo, se efectúan mediciones de la presión en la entrada y la salida del filtro, usando sensores y el software LabVIEW de National Instruments. Para cada medición se adquieren datos iniciales a 0 minutos y sucesivamente a 1 minuto, contando así con dos series de datos, tal como se indica en la **tabla 17**.

Tabla 17. Medición de la caída de presión al emplear un filtro con cilindros plásticos.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Caudal (LPM)	Caída de presión Fcilindros min 0			Caída de presión Fcilindros min 1		
			Sensor entrada del filtro (PSI)	Sensor salida del filtro (PSI)	delta P minuto 0 (PSI)	Sensor entrada del filtro (PSI)	Sensor salida del filtro (PSI)	delta P minuto 1 (PSI)
0,17	/	0,0156	0,0030	0,0009	0,0021	0,0030	0,0009	0,0021
0,25	/	0,0235	0,0036	0,0016	0,0020	0,0036	0,0016	0,0020
0,50	/	0,0330	0,0048	0,0028	0,0020	0,0051	0,0030	0,0020
0,60	/	0,0362	0,0055	0,0039	0,0016	0,0057	0,0038	0,0020
0,70	/	0,0370	0,0055	0,0035	0,0020	0,0058	0,0038	0,0020
0,80	/	0,0420	0,0063	0,0043	0,0020	0,0066	0,0046	0,0020
0,90	/	0,0429	0,0062	0,0043	0,0019	0,0065	0,0046	0,0020
1,00	/	0,0446	0,0070	0,0048	0,0022	0,0065	0,0050	0,0015
1,10	/	0,0449	0,0071	0,0052	0,0019	0,0073	0,0054	0,0019
1,20	/	0,0470	0,0072	0,0056	0,0017	0,0077	0,0058	0,0019
1,30	/	0,0490	0,0084	0,0065	0,0019	0,0072	0,0055	0,0017
1,40	/	0,0501	0,0083	0,0065	0,0018	0,0086	0,0068	0,0018
1,60	/	0,0546	0,0091	0,0074	0,0017	0,0098	0,0080	0,0018
1,80	/	0,0569	0,0099	0,0082	0,0017	0,0103	0,0086	0,0017
2,00	/	0,0600	0,0108	0,0091	0,0017	0,0112	0,0095	0,0017
2,20	/	0,0620	0,0126	0,0109	0,0017	0,0118	0,0103	0,0015
2,40	/	0,0640	0,0126	0,0111	0,0015	0,0124	0,0111	0,0014
2,60	/	0,0687	0,0134	0,0120	0,0014	0,0134	0,0119	0,0015
2,80	/	0,0688	0,0148	0,0134	0,0014	0,0144	0,0131	0,0014
3,00	/	0,0697	0,0158	0,0143	0,0015	0,0157	0,0144	0,0013
3,20	/	0,0736	0,0170	0,0156	0,0014	0,0169	0,0160	0,0009

Fuente: Elaboración propia (2023)

- Análisis de la caída de presión (datos del minuto 0)

Cuando se representan la presión de entrada y la presión de salida en función de la presión del manómetro, según se detalla en las **gráficas 31 y 32**, se puede apreciar una tendencia lineal en los datos. Además, la presencia de un coeficiente de determinación superior a 0,99 sugiere que este ajuste es bueno. También es evidente que ambas variables tienden a aumentar conjuntamente.

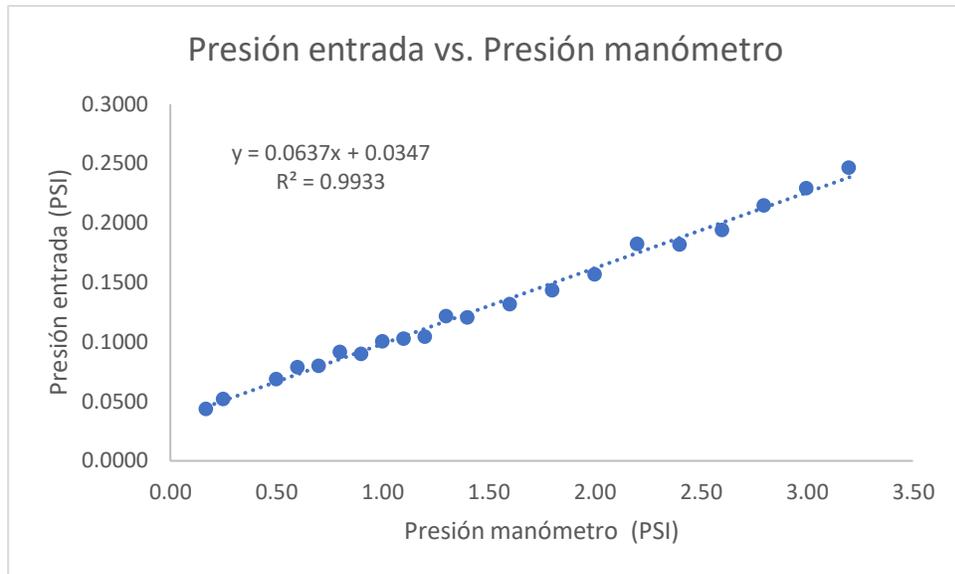


Gráfico 31. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

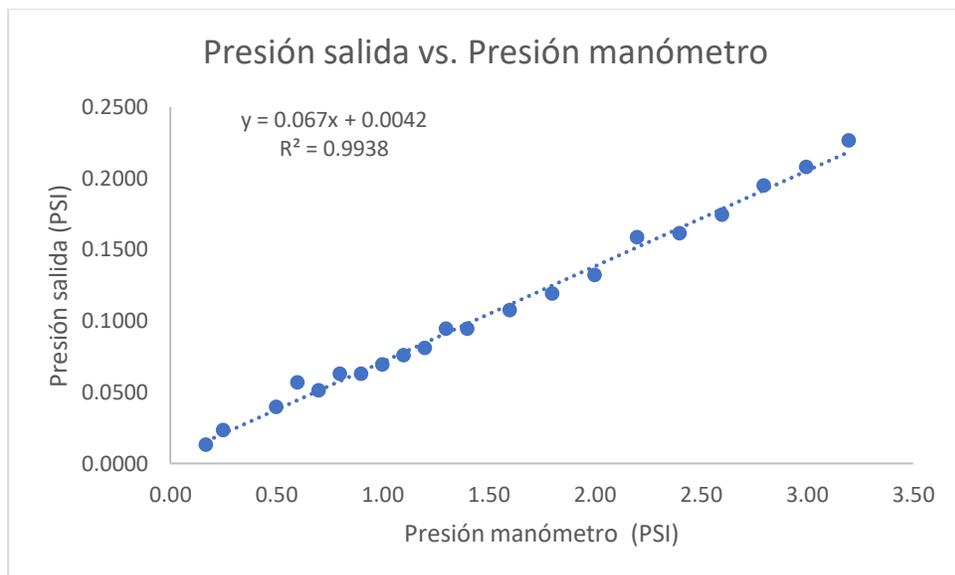


Gráfico 32. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el caso de la presión de entrada y salida en relación con el caudal, se observa un comportamiento parabólico tal como se puede apreciar en los **gráficos 33 y 34**. Además, se obtiene un coeficiente de determinación de aproximadamente 0,98 y que ambas variables experimentan un aumento conjunto.

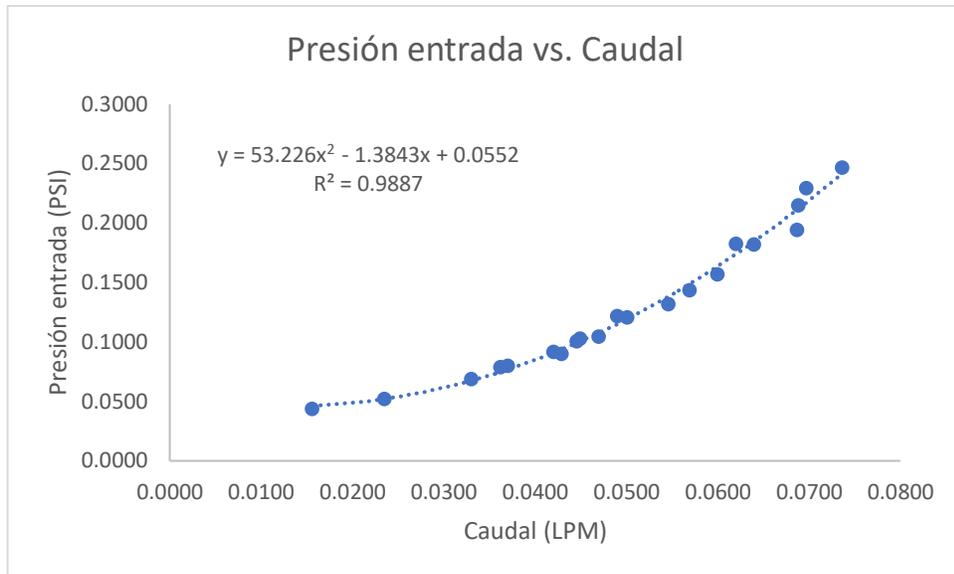


Gráfico 33. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

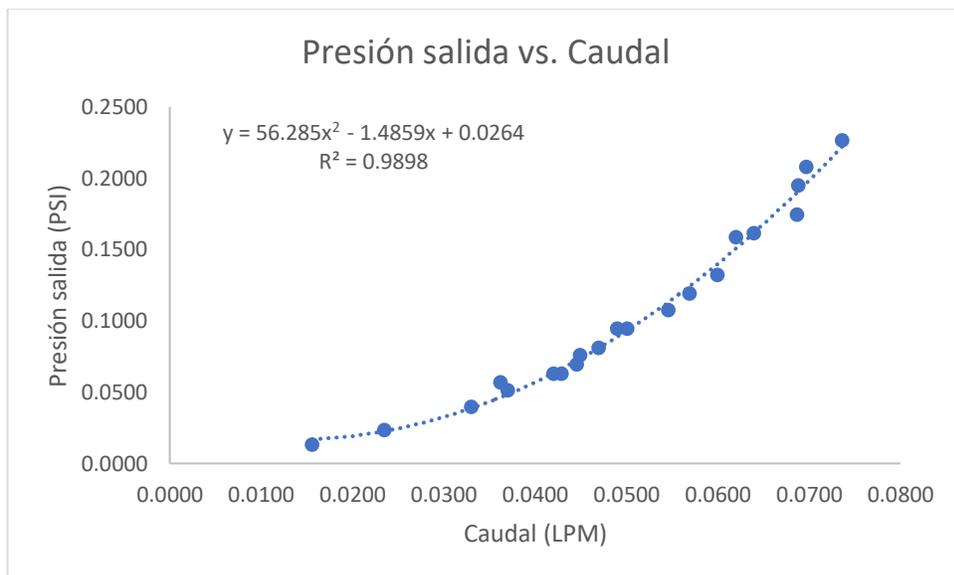


Gráfico 34. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En lo que respecta a los valores de la caída de presión (Pent-Psal) en función de la presión manométrica establecida a la salida del compresor, el cual alimenta el aire al circuito experimental de prueba, se obtiene una tendencia lineal análoga a la del caso anterior de las esferas (**Gráfico 35**). Sin embargo, el ajuste lineal no es ahora tan bueno con un coeficiente

de determinación de 0,7, ya que los datos muestran una cierta desviación, provocada por una serie de oscilaciones respecto del valor lineal. Además, se registra esta vez una disminución en la caída de presión a medida que aumenta la presión del manómetro.

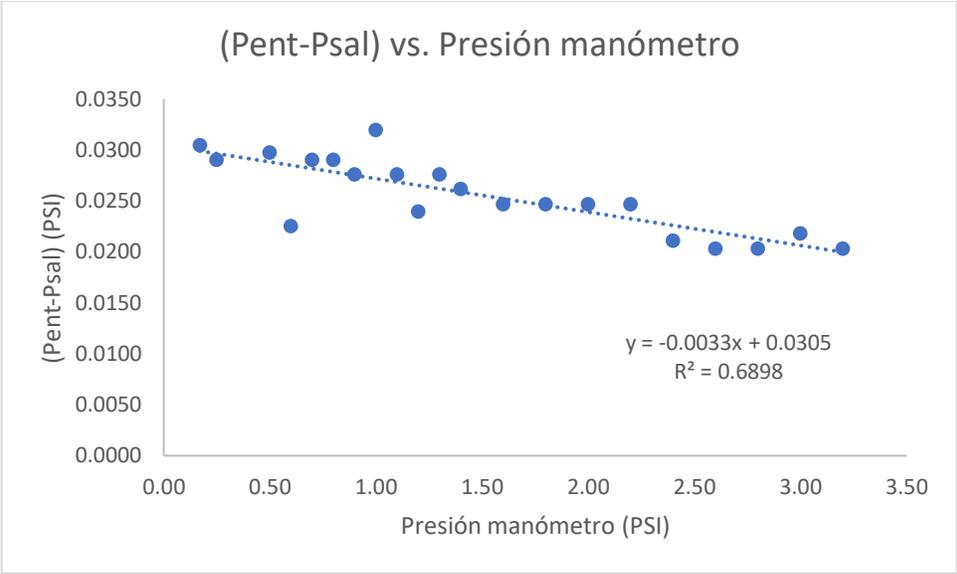


Gráfico 35. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el caso del **gráfico 36**, que representa la relación entre la diferencia de presión (Pent-Psal) y el caudal, se observa una tendencia parabólica similar al caso anterior de los medios filtrantes esféricos. Como en el caso del **gráfico 34 y 35** se nota una disminución en la caída de presión a medida que el caudal aumenta. Se confirma también que el ajuste no es tan satisfactorio, ya que el coeficiente de determinación es de 0,7, aproximadamente.

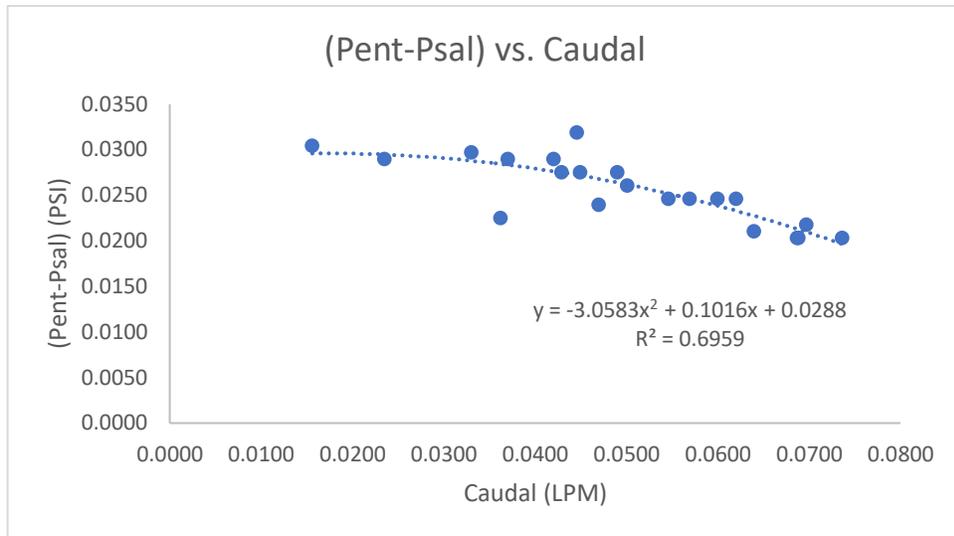


Gráfico 36. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

- Análisis de la caída de presión (datos del minuto 1)

Los **gráficos 37 y 38** exhiben un comportamiento análogo a las **gráficas 31 y 32** del minuto 0. Se confirma la tendencia lineal y un muy buen valor de determinación, igual a aproximadamente 0,99.

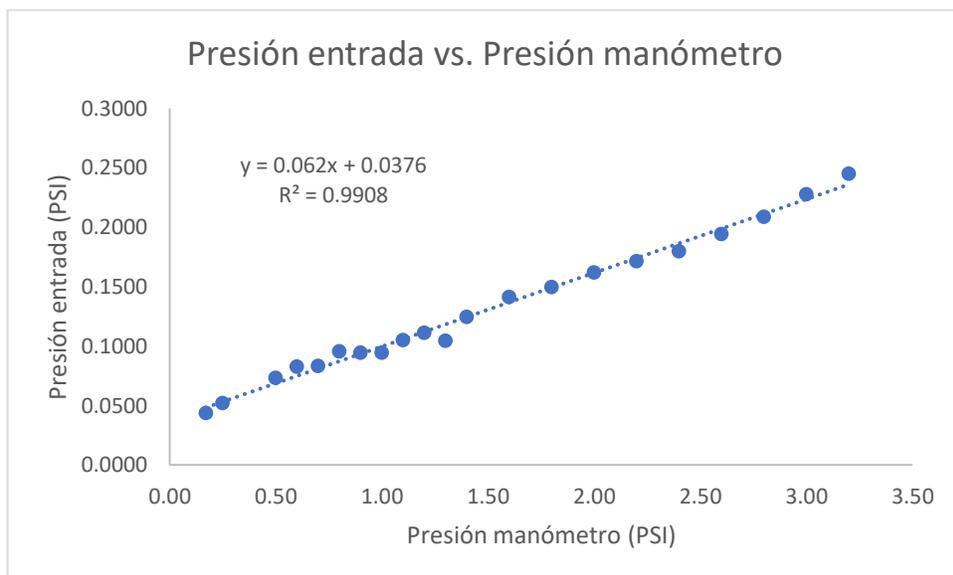


Gráfico 37. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

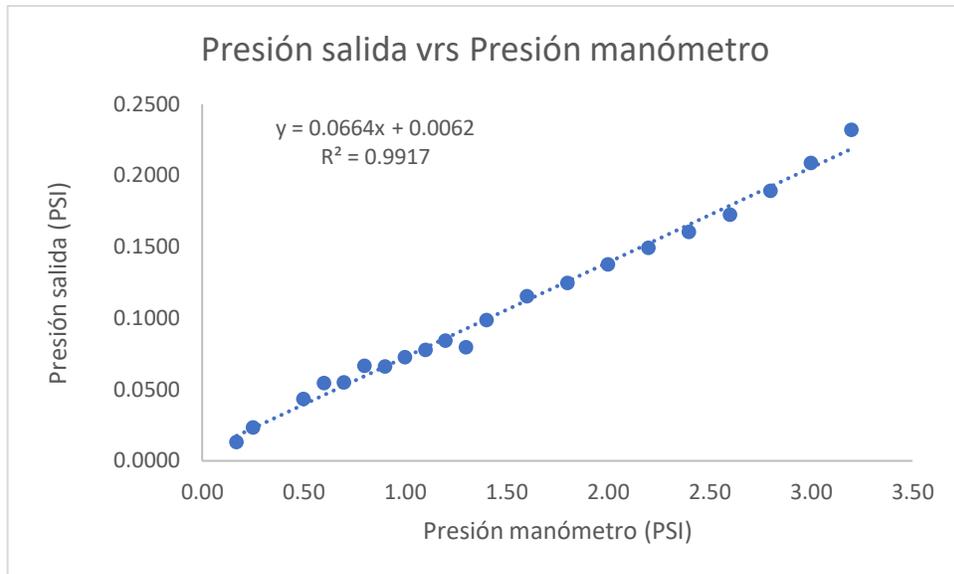


Gráfico 38. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Para el caso de las presiones de entrada y salida versus el caudal de aire que atraviesa el filtro, los valores trazados en los **gráficos 39 y 40** muestran la misma tendencia parabólica del caso anterior de las esferas y valores de crecimiento similares a los observados en las **gráficas 33 y 34**, para la serie de datos experimentales del minuto 0.

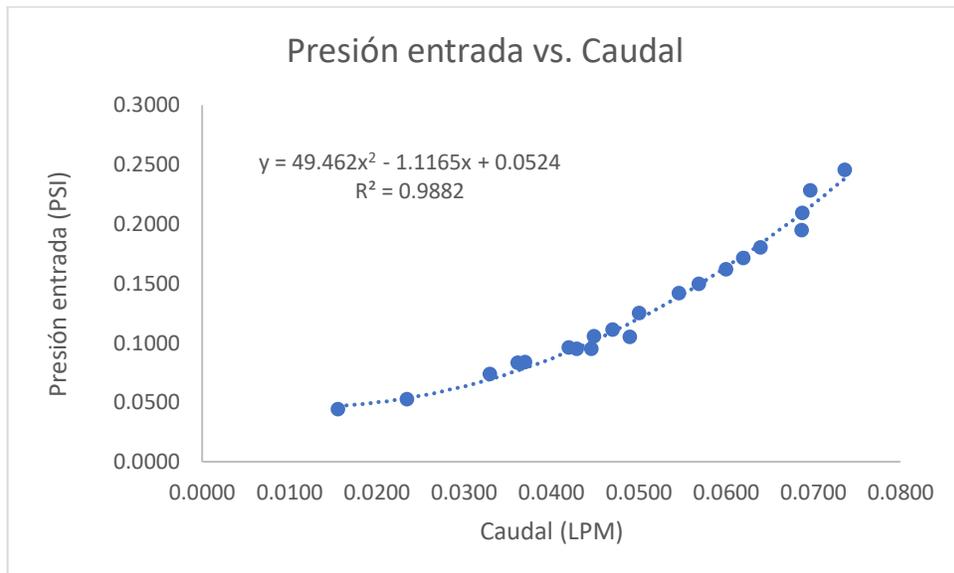


Gráfico 39. Presión entrada vs Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

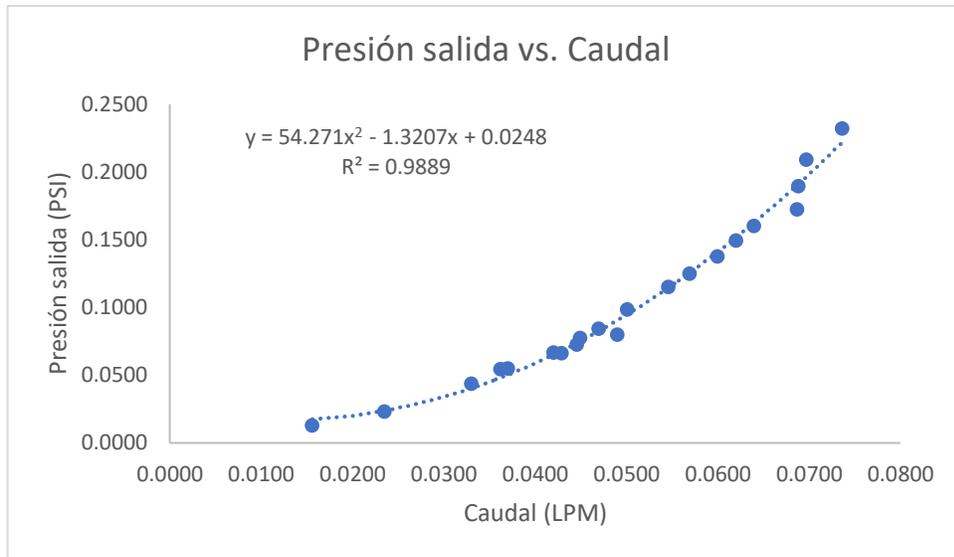


Gráfico 40. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

En la **gráfica 41** se brindan los valores de la caída de presión en el filtro para los medios filtrantes cilíndricos, el cual presenta una concordancia con el **gráfico 35**, obtenido con la serie de datos del minuto 0. También en este caso se nota una disminución de la caída de presión cuando aumenta la presión manométrica del compresor, contrariamente a lo observado en el caso de las esferas.

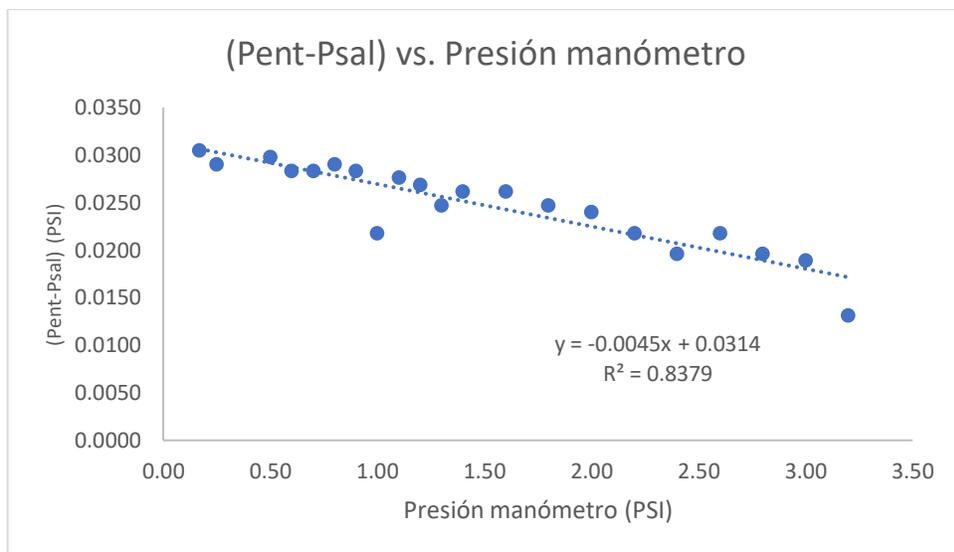


Gráfico 41. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Este comportamiento se observa también en el caso del **gráfico 42**, donde la caída de presión disminuye en función del caudal de aire, lo que confirma lo observado en el gráfico **36**, para la serie de datos del minuto 0.

Para la serie de datos del minuto 1, los coeficientes de determinación de los respectivos ajustes lineal y parabólico, son ahora mejores y valen ambos 0,84, sea en el caso de curva lineal de la caída de presión versus la presión del compresor (**gráfico 41**) que en el caso de la curva parabólica caída de presión versus caudal de aire en el filtro (**gráfico 42**).

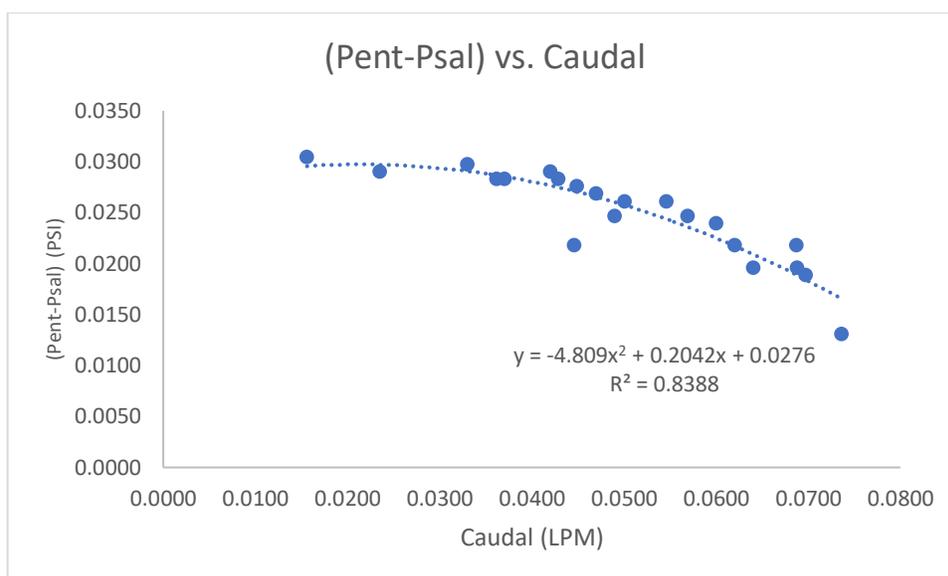


Gráfico 42. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.6. Prueba experimental 6

La prueba experimental número 6 se desarrolla con el propósito de evaluar el filtro cuando se emplean como material filtrante los cilindros de arcilla (pellets de arcilla), que representan un material convencional empleado en la filtración del biogás. Al igual que en las pruebas anteriores, el filtro se llena completamente, y se determina su porosidad, la cual alcanza un valor del 0,445. Este cálculo se realiza de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Volumen del cilindro (V_{cil}) $\rightarrow R=0,022$ m; $L=0,3$ m.

$$V_{cil} = \pi * R^2 * L$$

$$V_{cil} = \pi * (0,022 \text{ m})^2 * 0,3 \text{ m}$$

$$V_{cil} = 0,000456 \text{ m}^3$$

Volumen cilindros arcilla ($V_{cil-arc}$) $\rightarrow R=0,00287$ m; $L=0,01376$ m.

$$V_{cil-arc} = \pi * R^2 * L$$

$$V_{cil-arc} = \pi * (0,00287 \text{ m})^2 * 0,01376 \text{ m}$$

$$V_{cil-arc} = 0,00000035606 \text{ m}^3$$

Volumen total de cilindros de arcilla ($V_{total.cil-arc}$) \rightarrow Para en llenar el filtro al 100% se necesitan 710 cilindros de arcilla:

$$V_{total.cil-arc} = n_{cilindros-arc} * V_{cil-arc}$$

$$V_{total.cil-arc} = 710 * 0,00000035606 \text{ m}^3$$

$$V_{total.cil-arc} = 0,00025280778 \text{ m}^3$$

Porosidad (\emptyset).

$$\emptyset = \frac{V_{cil} - V_{total.cil-arc}}{V_{cil}}$$

$$\emptyset = \frac{0,000456 \text{ m}^3 - 0,00025280778 \text{ m}^3}{0,000456 \text{ m}^3}$$

$$\emptyset = 0,445$$

En la tabla 18 se brindan los datos de caudal estimados mediante la información adquirida tanto por el medidor de volumen como por el rotámetro.

Tabla 18. Prueba experimental 6 usando el filtro lleno con cilindros de arcilla.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Medidor de volumen filtro con cilindros arcilla			Valores normalizados de caudal (LPM)	Rotámetro (LPM)	Valores normalizados de caudal rotámetro (LPM)
		Volumen inicial 10 ⁻³ m ³	Volumen final 10 ⁻³ m ³	Caudal (LPM)			
0,17	/	0,5600	0,5725	0,0125	0,3049	3,00	0,3
0,25	/	0,5900	0,6038	0,0138	0,3366	3,50	0,35
0,50	/	0,6200	0,6339	0,0139	0,3390	3,70	0,37
0,60	/	0,6500	0,6677	0,0177	0,4317	4,60	0,46
0,70	/	0,6800	0,6978	0,0178	0,4341	4,70	0,47
0,80	/	0,7400	0,7600	0,0200	0,4878	5,20	0,52
0,90	/	0,8200	0,8410	0,0210	0,5122	5,50	0,55
1,00	/	0,8600	0,8815	0,0215	0,5244	5,70	0,57
1,10	/	0,9000	0,9228	0,0228	0,5561	5,90	0,59
1,20	/	0,0000	0,0242	0,0242	0,5902	6,40	0,64
1,30	/	0,0500	0,0755	0,0255	0,6220	6,70	0,67
1,40	/	0,1100	0,1358	0,0258	0,6293	6,80	0,68
1,60	/	0,1800	0,2078	0,0278	0,6780	7,50	0,75
1,80	/	0,2600	0,2889	0,0289	0,7049	8,00	0,8
2,00	/	0,3200	0,3515	0,0315	0,7683	8,70	0,87
2,20	/	0,4000	0,4318	0,0318	0,7756	9,30	0,93
2,40	/	0,4700	0,5035	0,0335	0,8171	9,70	0,97
2,60	/	0,5400	0,5745	0,0345	0,8415	10,00	1
2,80	/	0,6200	0,6552	0,0352	0,8585		
3,00	/	0,6900	0,7263	0,0363	0,8854		
3,20	/	0,8200	0,8575	0,0375	0,9146		

Fuente: Elaboración propia (2023).

Para una comprensión más detallada de los datos obtenidos, estos se analizan mediante los siguientes gráficos.

Para el caso de los datos registrados con el rotámetro, las **figuras 43 y 44** trazan los valores de caudal versus presión y viceversa, apreciándose la misma tendencia de tipo parabólica, con un incremento notable a medida que alguna de las variables aumenta. Las curvas de regresión numérica de segundo orden obtenidas en ambos casos ajustan muy bien los valores experimentales, con un coeficiente de determinación cercano a 1.

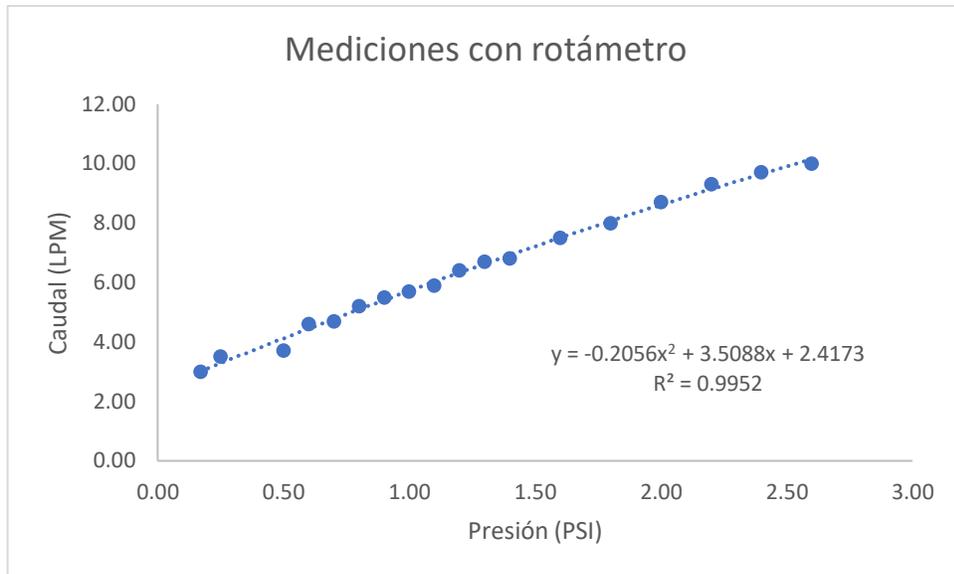


Gráfico 43. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 6 al utilizar el filtro con cilindros de arcilla.

Fuente: Elaboración propia (2023).

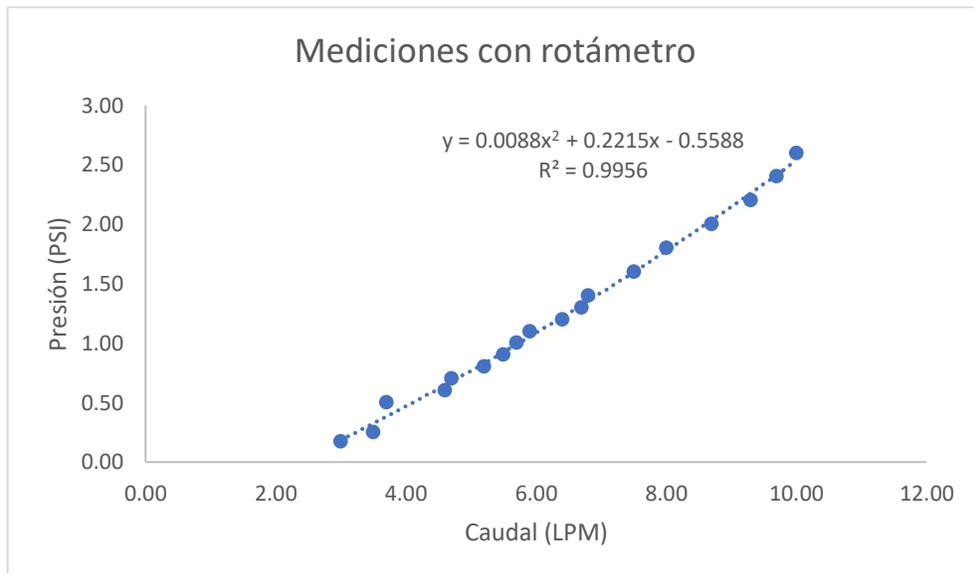


Gráfico 44. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 6 al utilizar el filtro con cilindros de arcilla.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Al utilizar los valores normalizados de caudal, como se observa en el **gráfico 45**, se obtuvo un coeficiente de determinación bastante elevado, superior a 0.9, indicando una correlación bastante buena.

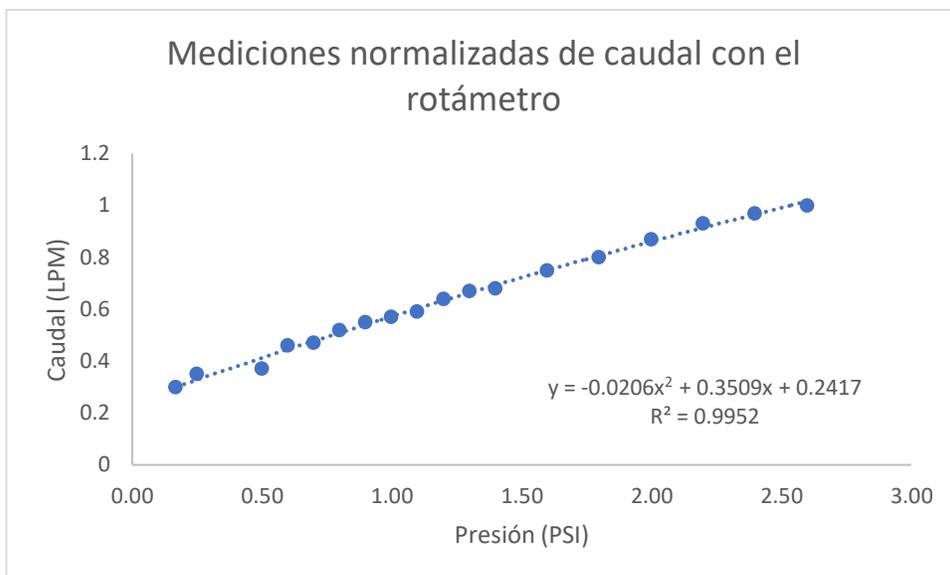


Gráfico 45. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 6, al utilizar el filtro con cilindros de arcilla.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Para el caso de los datos brindados por el medidor de volumen, las **gráficas 46 y 47** exhiben un comportamiento similar y la regresión cuadrática arroja, igualmente, un coeficiente de determinación cercano a 1.

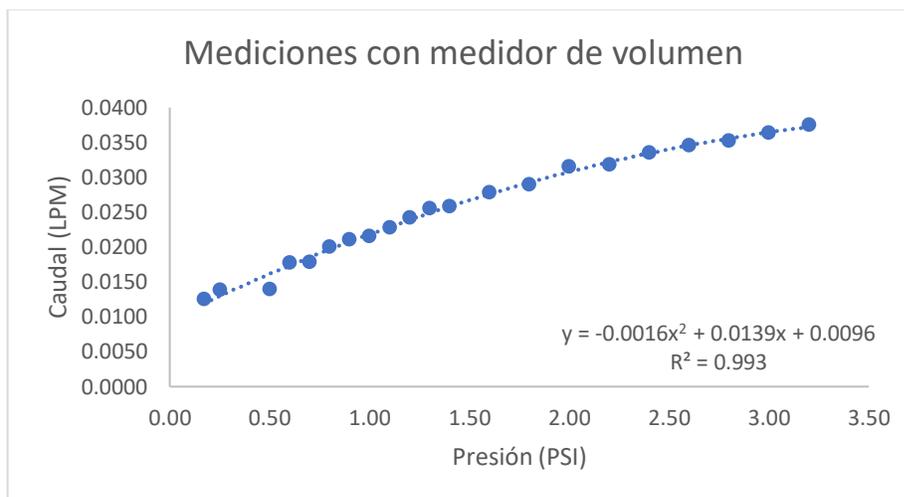


Gráfico 46. Curva de flujo caudal versus presión de la prueba experimental 6 al utilizar el medidor de volumen y el filtro con cilindros de arcilla.

Fuente: Elaboración propia (2023).

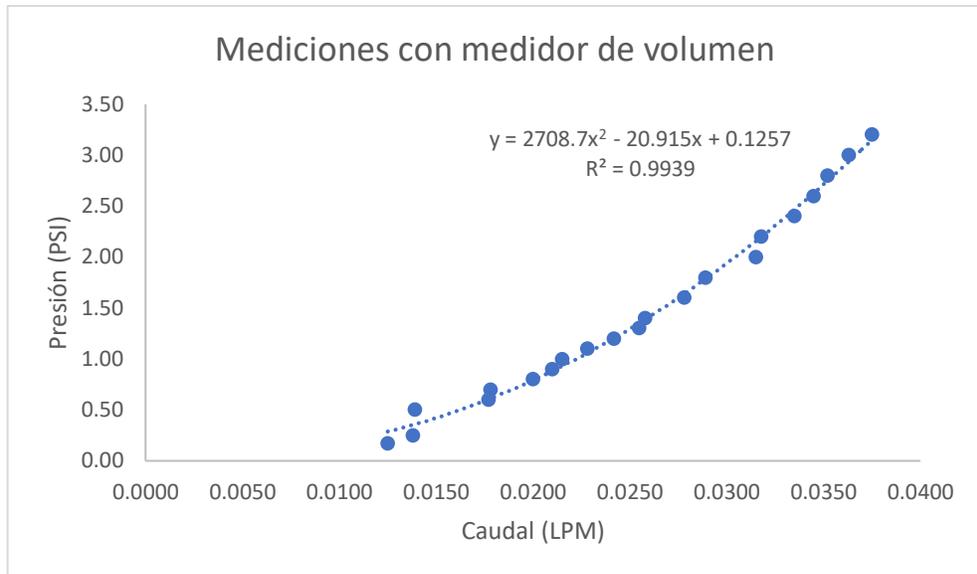


Gráfico 47. Curva de flujo presión versus caudal de la prueba experimental 6, al utilizar el medidor de volumen y el filtro con cilindros de arcilla.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Por último, se traza un gráfico normalizado del caudal, y se obtiene un resultado similar al del **gráfico 45** correspondiente a los datos obtenidos con el rotámetro.

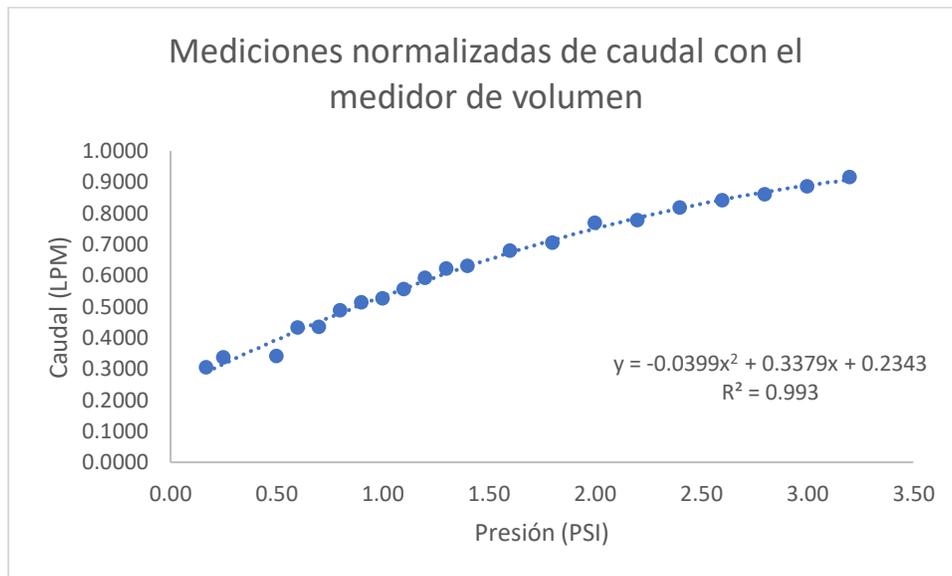


Gráfico 48. Curva de flujo normalizada caudal versus presión de la prueba experimental 6, al utilizar el medidor de volumen y el filtro con cilindros de arcilla.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Sucesivamente, los valores de presión de dos series de datos digitales, correspondientes a los minutos 0 y 1, tanto en el sensor de entrada como en el sensor de salida, se enlistan en la **tabla 19**.

Tabla 19. Medición de la caída de presión al emplear un filtro con cilindros de arcilla.

Presión (PSI)	Tiempo (1 min)	Caudal (LPM)	Caída de presión Fcil.arc min 0			Caída de presión Fcil-arc min 1		
			Sensor entrada del filtro (PSI)	Sensor salida del filtro (PSI)	delta P minuto 0 (PSI)	Sensor entrada del filtro (PSI)	Sensor salida del filtro (PSI)	delta P minuto 1 (PSI)
0,17	/	0,0125	0,0943	0,0218	0,0725	0,0943	0,0218	0,0725
0,25	/	0,0138	0,1015	0,0290	0,0725	0,1015	0,0290	0,0725
0,50	/	0,0139	0,1015	0,0290	0,0725	0,1015	0,0290	0,0725
0,60	/	0,0177	0,1160	0,0435	0,0725	0,1160	0,0435	0,0725
0,70	/	0,0178	0,1160	0,0435	0,0725	0,0435	0,0435	0,0000
0,80	/	0,0200	0,1305	0,0580	0,0725	0,1305	0,0580	0,0725
0,90	/	0,0210	0,1305	0,0580	0,0725	0,1305	0,0580	0,0725
1,00	/	0,0215	0,1378	0,0653	0,0725	0,1378	0,0653	0,0725
1,10	/	0,0228	0,1450	0,0725	0,0725	0,1450	0,0725	0,0725
1,20	/	0,0242	0,1523	0,0798	0,0725	0,1523	0,0798	0,0725
1,30	/	0,0255	0,1595	0,0870	0,0725	0,1595	0,0870	0,0725
1,40	/	0,0258	0,1595	0,0870	0,0725	0,1668	0,0943	0,0725
1,60	/	0,0278	0,1813	0,1088	0,0725	0,1813	0,1088	0,0725
1,80	/	0,0289	0,1885	0,1160	0,0725	0,1885	0,1160	0,0725
2,00	/	0,0315	0,2103	0,1378	0,0725	0,2103	0,1378	0,0725
2,20	/	0,0318	0,2175	0,1450	0,0725	0,2175	0,1450	0,0725
2,40	/	0,0335	0,2393	0,1668	0,0725	0,2320	0,1668	0,0653
2,60	/	0,0345	0,2538	0,1813	0,0725	0,2538	0,1813	0,0725
2,80	/	0,0352	0,2683	0,1958	0,0725	0,2610	0,1885	0,0725
3,00	/	0,0363	0,2755	0,2030	0,0725	0,2755	0,2030	0,0725
3,20	/	0,0375	0,2973	0,2248	0,0725	0,2973	0,2175	0,0798

Fuente: Elaboración propia (2023).

- Análisis de la caída de presión (datos del minuto 0)

Cuando se traza la presión de salida y entrada en función de la presión del manómetro ubicado a la salida del compresor de aire, se evidencia un comportamiento lineal, respaldado por un coeficiente de determinación cercano a 1. (**gráficos 49 y 50**).

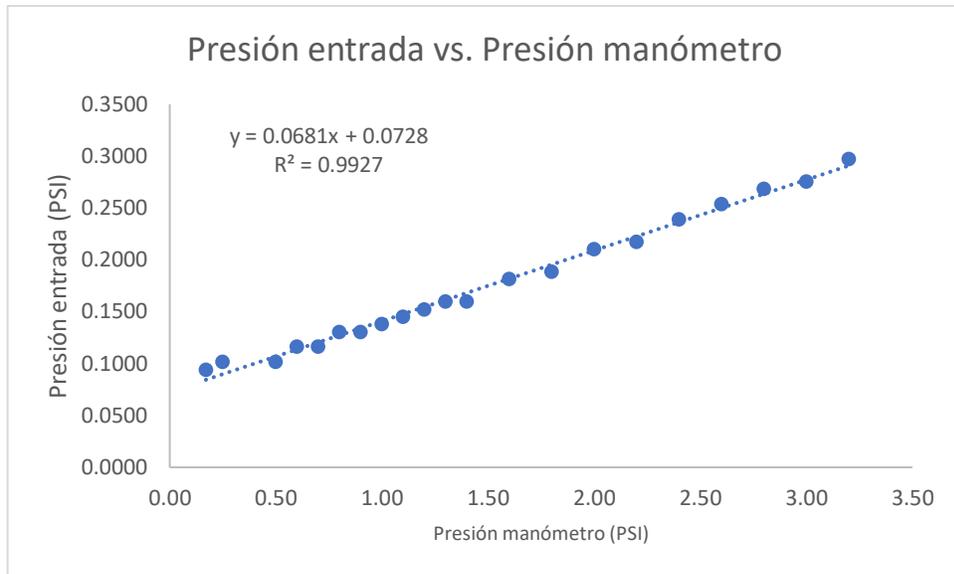


Gráfico 49. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

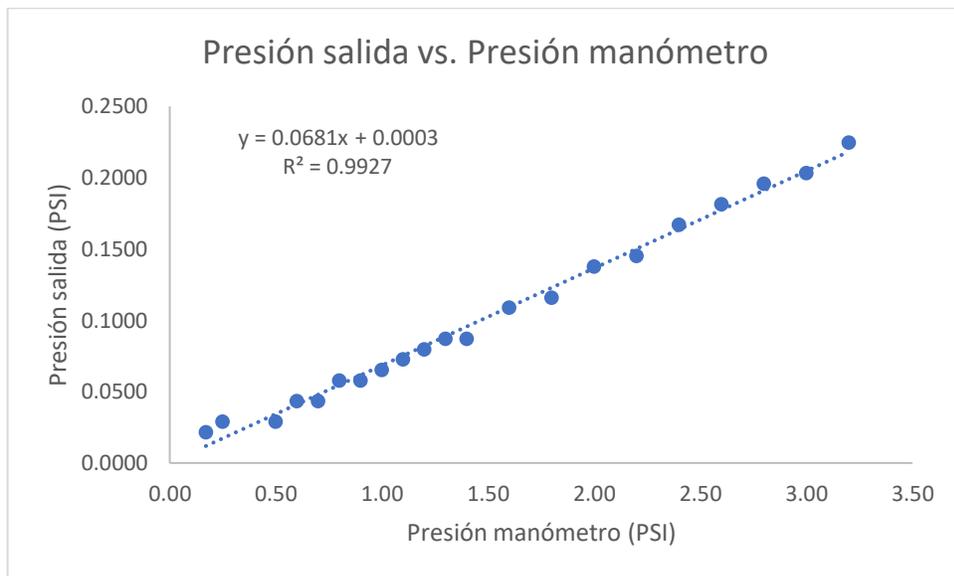


Gráfico 50. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Trazando los datos en el plano presión versus caudal, los **gráficos 51 y 52** confirman el comportamiento parabólico de los casos de esferas y cilindros plásticos anteriores, brindando un coeficiente de determinación siempre cercano a 1, tanto para la presión de entrada como de salida.

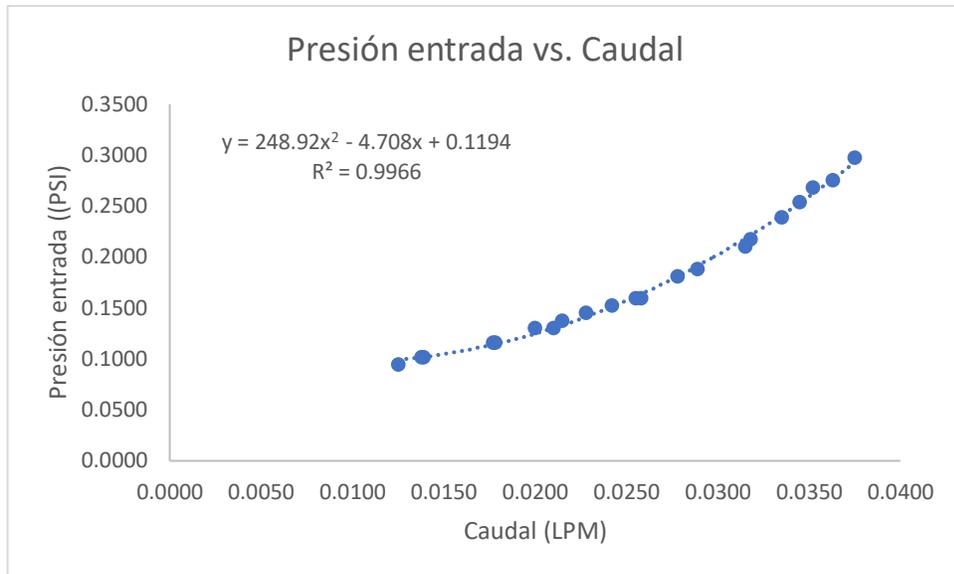


Gráfico 51. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

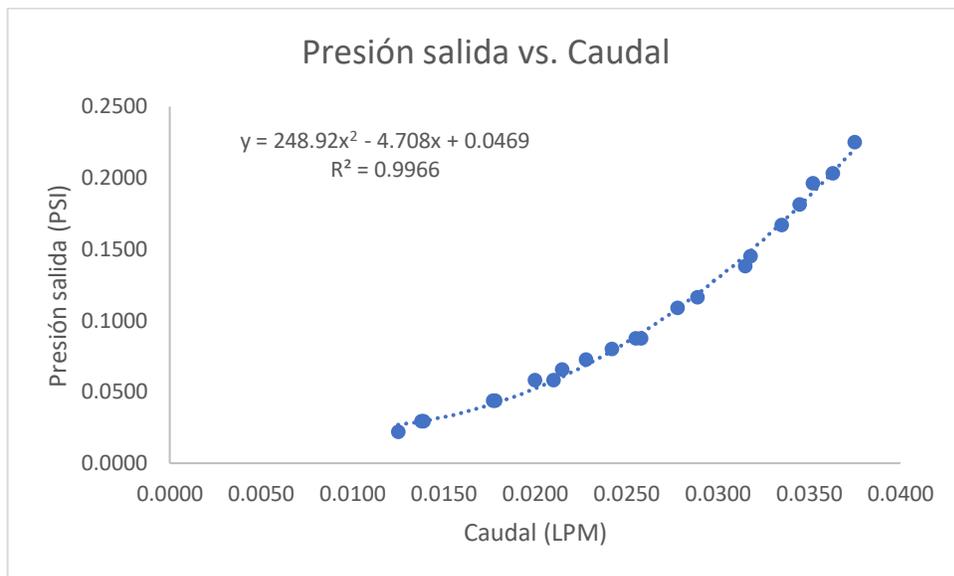


Gráfico 52. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

El **gráfico 53** revela que, independientemente del ajuste en la presión del manómetro, la caída de presión detectada por los sensores permanece constante en todas las mediciones. Lo mismo ocurre cuando se representa la caída de presión en función del caudal; ya que no

importa cuánto se incremente, pues la caída de presión sigue manteniéndose constante tal como se muestra en el gráfico 54.

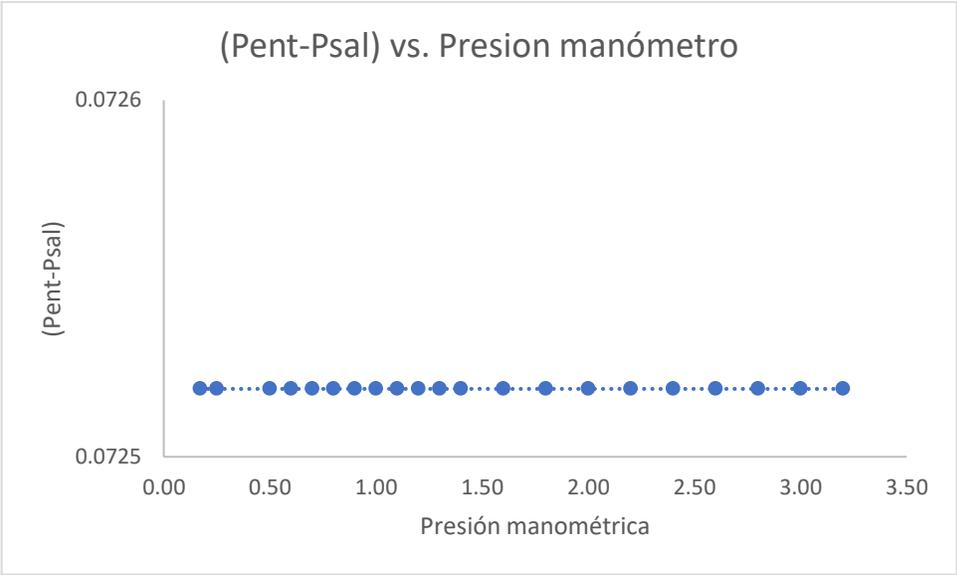


Gráfico 53. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

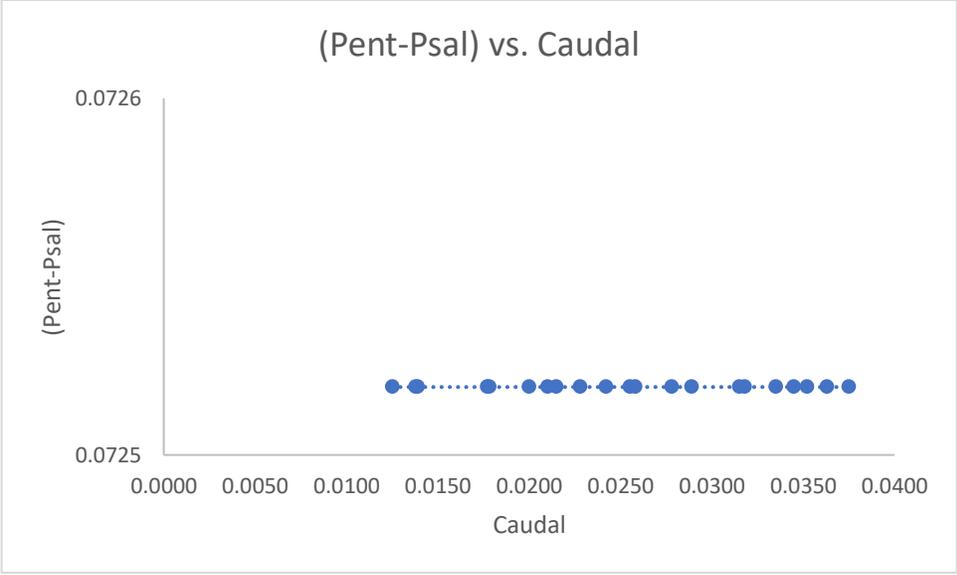


Gráfico 54. (Pent-Psal) vs. Caudal (datos del minuto 0).

Fuente: Elaboración propia (2023).

- Análisis de la caída de presión (datos del minuto 1)

Cuando se representa la presión de entrada y salida en función de la presión del manómetro, respectivamente en los **gráficos 55 y 56**, se evidencia que el comportamiento de la serie de datos del minuto 1 es similar al que se observó para la serie anterior del minuto 0.

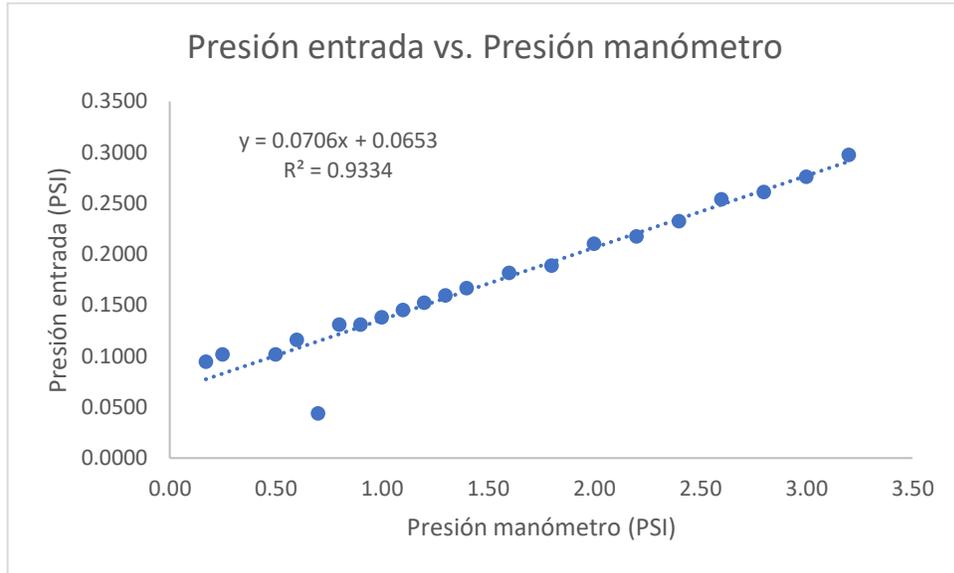


Gráfico 55. Presión entrada vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

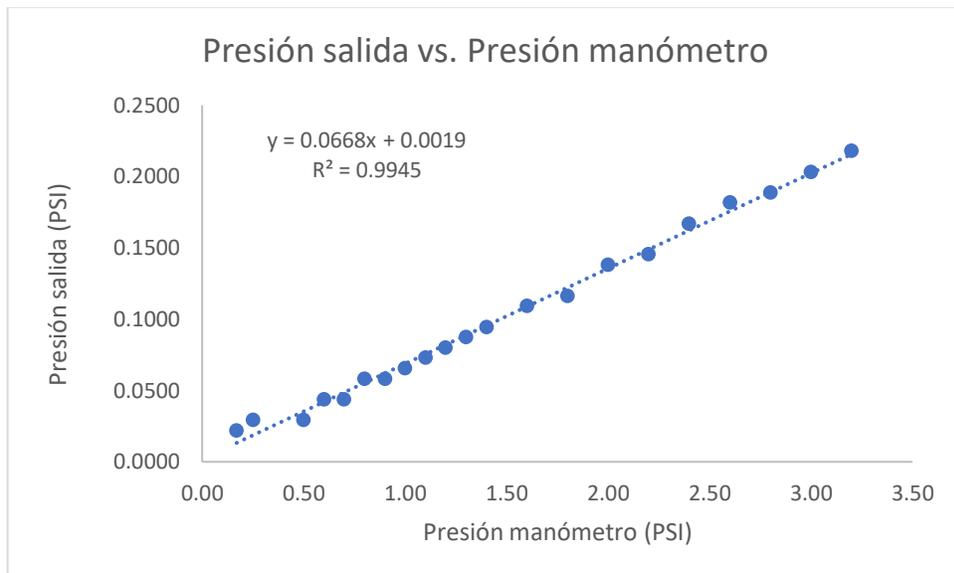


Gráfico 56. Presión salida vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Al representar la presión de entrada y salida en función del caudal al minuto 1, como se ilustra en las **gráficas 57 y 58**, se observa que el comportamiento es consistente con el que se registró en el minuto 0, con un comportamiento parabólico y creciente al aumentar la presión.

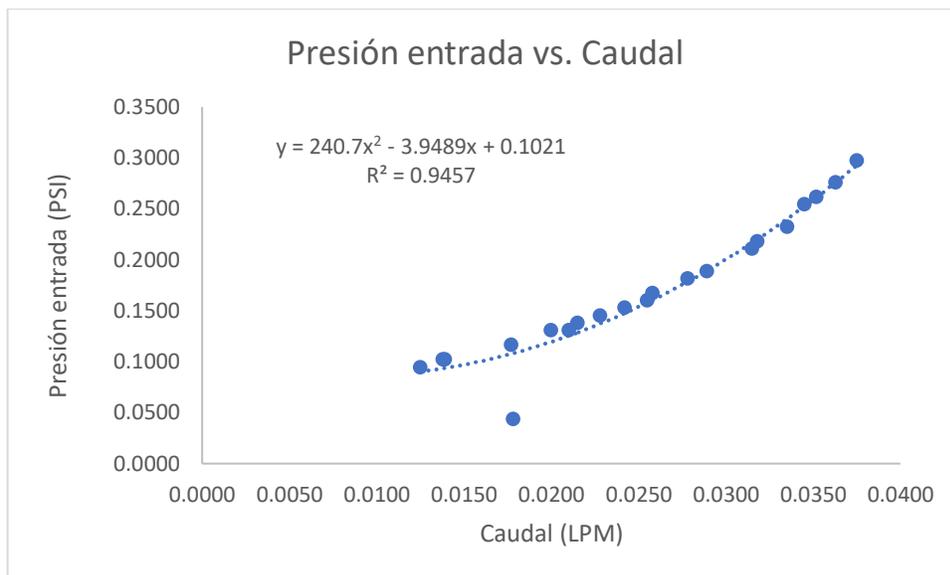


Gráfico 57. Presión entrada vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

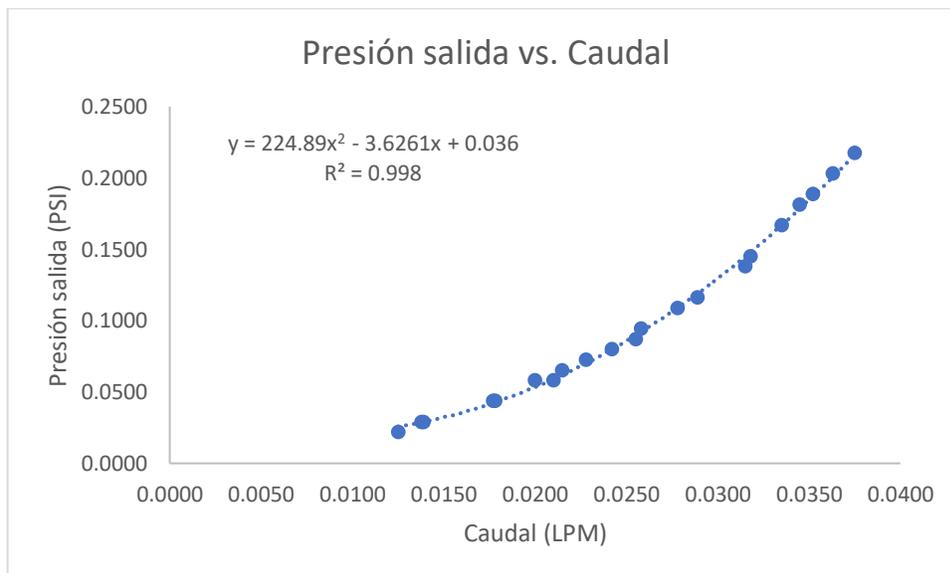


Gráfico 58. Presión salida vs. Caudal (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

Finalmente, de manera análoga a lo que se observó en las **gráficas 53 y 54** para la serie de datos digitales del minuto 0, tanto la caída de presión en el filtro, en función de la presión del manómetro como en función del caudal se mantienen constantes, a medida que se incrementa el caudal o la presión del manómetro. Esto se puede observar en los respectivos **gráficos 59 y 60**.

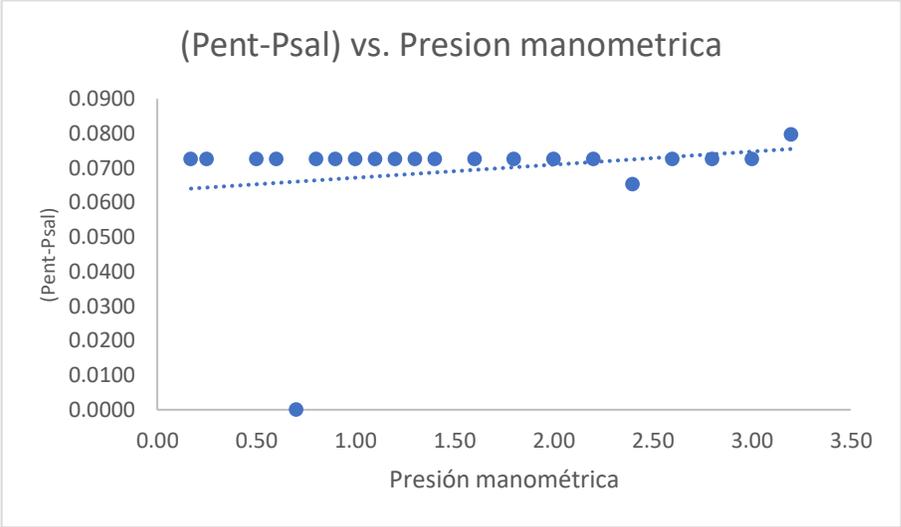


Gráfico 59. (Pent-Psal) vs. Presión manómetro (datos del minuto 1).

Fuente: Elaboración propia (2023).

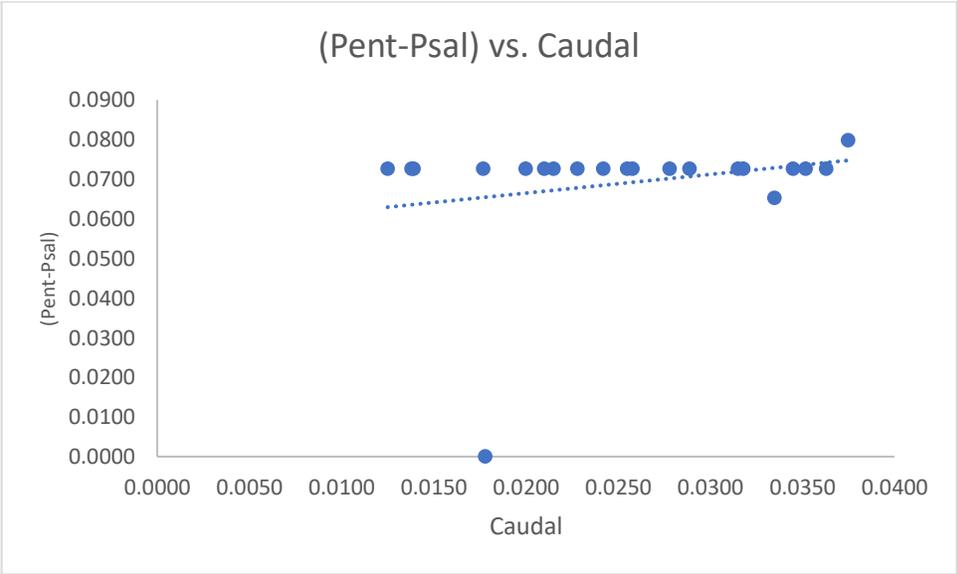


Gráfico 60. (Pent-Psal) vs. Caudal en el minuto 1.

Fuente: Elaboración propia (2023).

De acuerdo con los datos obtenidos mediante el trabajo experimental de la prueba 6 que considera el estudio del proceso de flujo en el filtro cargado con material filtrante convencional (cilindros de arcilla), se observa lo siguiente:

- a) los valores del caudal del aire trazados en función de la presión de alimentación brindada por el compresor y viceversa, brindan un comportamiento de tipo parabólico, con un ajuste por el método de regresión muy bueno;
- b) la curva de flujo caudal versus presión mantiene el mismo comportamiento, ya sea cuando se usa el rotámetro en el circuito experimental o el medidor digital de volúmenes;
- c) la caída de presión en el filtro es de tipo lineal y de acuerdo con los datos es relativamente constante al variar el caudal o la presión de alimentación;
- d) los resultados son bastante similares en el caso de mediciones efectuadas al comienzo, minuto 0 o después del minuto 1;
- e) eventuales diferencias pueden atribuirse a variaciones de flujo causadas por el compresor, el cual distribuye el aire en el circuito experimental usando un tanque de almacenamiento que, aunque presente un volumen importante, tiene dimensiones finitas;
- f) el efecto de las variaciones del punto anterior e) no es tan significativo, pues las presiones y el consecuente flujo de alimentación al filtro son muy bajas.

5. Conclusiones

Se ha diseñado y caracterizado un dispositivo poroso de filtración, usado en la purificación de biogás para uso doméstico, completando un circuito experimental de prueba que permite medir el flujo y la caída de presión a través del mismo dispositivo. Sucesivamente se han efectuado una serie de mediciones experimentales seleccionando la geometría del filtro y los elementos filtrantes, con el propósito de evaluar la caída de presión y el flujo de aire durante el proceso. También se han caracterizado algunos equipos del circuito con el propósito de valorar los datos experimentales que estos otorgan.

En cuanto a las conclusiones derivadas de los experimentos se puede afirmar que estos brindan datos reproducibles. Al representar gráficamente el caudal versus la presión, y viceversa, se obtuvieron resultados similares en todos los casos. Los datos siguen una tendencia parabólica, con un crecimiento evidente a medida que una de las variables aumenta.

En los experimentos 4, 5 y 6, al graficar la presión de entrada y salida en función de la presión del manómetro, se observa una tendencia lineal clara. Las presiones de entrada y salida aumentan, proporcionalmente, con la presión del manómetro. Al representar la presión de entrada y salida frente al caudal, la tendencia es parabólica, y las presiones de entrada y salida crecen a medida que el caudal se incrementa.

Se ha observado que la caída de presión en función de la presión del manómetro y viceversa varía en función de la geometría y el tipo de material utilizado, de acuerdo con los experimentos 4, 5 y 6, donde se obtuvieron comportamientos diferentes.

Cuando se emplearon esferas como material filtrante, la relación entre la caída de presión y la presión del manómetro se comportó de manera lineal, con un aumento de la caída de presión a medida que la presión del manómetro aumentaba. En el caso de la relación entre la caída de presión y el caudal, la tendencia fue parabólica, y la caída de presión creció con el incremento del caudal.

Cuando se usaron cilindros de plástico ingenieril como material filtrante (prueba 5), la relación entre la caída de presión y la presión del manómetro siguió siendo lineal, pero la primera disminuyó a medida que aumentaba la presión del manómetro. Al relacionar la caída de presión con el caudal, la tendencia siguió siendo parabólica, pero la caída de presión

también disminuyó a medida que aumentaba el caudal. En ambos casos, los datos presentaron variaciones, especialmente, en el caso de la serie de datos adquiridos al inicio (minuto 0) del muestreo por los sensores digitales. El ajuste por regresión no fue tan satisfactorio como en cambio ocurrió con el experimento 4 de las esferas.

Finalmente, en el caso del filtro cargado con cilindros de arcilla, que representa la condición que más reproduce los casos reales de las actividades de generación y filtración de biogás para el uso doméstico, se pueden subrayar las conclusiones siguientes:

- a) los valores del caudal del aire en función de la presión de alimentación y viceversa, brindan un comportamiento de tipo parabólico, con un ajuste por el método de regresión muy bueno;
- b) la caída de presión en el filtro es de tipo lineal y de acuerdo con los datos es relativamente constante al variar el caudal o la presión de alimentación.

6. Recomendaciones

- Llevar a cabo las pruebas en un entorno aún más controlado, manteniendo la temperatura constante y, preferiblemente, realizando las pruebas en el mismo día y a la misma hora.
- Incorporar un rotámetro de mayor precisión para obtener mediciones de caudal más confiables. Además, se sugiere disponer de manómetros para rangos de presión muy bajos (0-5 inH₂O), con el propósito de complementar y verificar la adquisición digital existente.
- Utilizar un medidor de flujo en vez del medidor de volumen ya disponible, pues el medidor de flujo proporciona mediciones directas de caudal, de manera más eficiente y precisa, lo que ahorra tiempo y simplifica el proceso de recolección de datos.
- Para futuros trabajos, una vez optimizado el circuito experimental de prueba con la adquisición de nueva instrumentación, se puede plantear la variación de otras magnitudes del filtro y del material filtrante. En particular se podría relacionar la caída de presión en filtro con los otros experimentos que tienen el propósito de evaluar los mecanismos físico-químicos de filtración. De ser así se podrían estudiar las variaciones en los procesos de flujo en el filtro causadas por otras nuevas geometrías de material filtrante, como por ejemplo las que persiguen el aumento del área superficial de los medios porosos usados en el proceso de filtración.

7. Bibliografía

- Ángel, M., Peralta, M., Sergio, A., Contreras, B., Paz, L., & México, B. C. S. (2015). *Análisis del uso de biogás como combustible domestico a partir de los residuos alimenticios de la vivienda*.
- Araujo, T., Gabriela, A., Vázquez, R., & Antonio, J. (2015). Técnicas para la disminución en la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 1(2), 1449–1453. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/74>
- Ashcroft. (n.d.). *Manómetro*. https://ashcroft.com.mx/WP_ASH/productos/presion/manometros/?pageNumber=2&postType=product&postsPerPage=12&sortType=menu_order&sortOrder=ASC
- BAMBI. (2023). *Bambi PT90 compresor sin aceite*.
- Betzabet Morero Director, I., Campanella Co-Director, E. A., & Eduardo Gropelli Miembros del Jurado Rodolfo Brandi Martín Cismondi Duarte Oscar A Iribarren, M. J. (2014). *Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias*. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/572>
- Blanco, J. (2008). *El biogás limpio como fuente de energía renovable*. <https://web.s.ebscohost.com/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=40d418a4-2de4-4021-be0a-147e816a158d%40redis>
- Cubero, G. (2021). *Activación de carbón vegetal para desulfuración de biogás producido por biodigestor anaerobio en proceso agroindustrial*.
- Dwyer Instruments. (n.d.). *Rotámetro*. <https://intl.dwyer-inst.com/Products/CatalogSearch.cfm>
- EKATON. (2023). *Medidor de Gas G2.5*.
- Europea, U. (2015). *Compendio de experiencias en la mitigación de Gas de Efecto Invernadero (GEI) para la agricultura y ganadería*.
- Fernández, G. (2020). *El problema de la gestión de los residuos en Costa Rica*. <https://www.360-sv.com/blog/residuos>
- Francisco, J., & García, R. (2014). *Los Límites de la Ley de Darcy*.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Agua subterránea. Capítulo 2: Principios y Propiedades Físicas*. <https://fc79.gw-project.org/espanol/capitulo-2/>
- Hubei Cubic-Ruiyi Instrument. (2023). <https://pdf.directindustry.es/pdf-en/hubei-cubic-ruiyi-instrument-co-ltd/ruiyi-ultrasonic-flow-meter-bf-2000/187991-760795.html#open2026266>
- Hy-Lok. (2023). *Valvulas de presión*. <https://www.hylokusa.com/valves/>
- ICT. (2023). *Costa Rica cierra 2019 con 99% en generación eléctrica renovable*. <https://www.ict.go.cr/es/noticias-destacadas-2/1626-costa-rica-cierra-2019-con-99-en-generaci%C3%B3n-el%C3%A9ctrica-renovable.html>

- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC.
<https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Montenegro-Ballester, J., Barrantes-Guevara, E., Ivankovich-Cruz, S., Montenegro-Ballester, J., Barrantes-Guevara, E., & Ivankovich-Cruz, S. (2020). Cuantificación de metano entérico según estado fisiológico en vacas lecheras de alta producción en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 79–92. <https://doi.org/10.15517/RAC.V44I1.40003>
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. A. (2010). Revisión de las principales tecnologías de purificación de biogás. *Ciencia y Tecnología*, 10.
- Nations, U. (2023). *¿Qué son las energías renovables?*
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>
- Ortega, L. (2015). *Principales métodos para la desulfuración del biogás*. XXXVII(1), 45–56.
- Raúl Horacio. (2004). *Caracterización de Medios Porosos y Procesos Percolativos y de Transporte*.
- Rojas-Vargas, J., Bogantes, J., Rojas-Vargas, J., & Bogantes, J. (2018). Cuantificación y caracterización de los residuos sólidos ordinarios de la Universidad Nacional de Costa Rica, dispuestos en rellenos sanitarios. *Uniciencia*, 32(2), 57–69. <https://doi.org/10.15359/RU.32-2.4>
- Toala, E. (2013). *Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el rancho verónica*.
- Vazquez, J. (1999). *Las ecuaciones de la filtración de fluidos en medios porosos*.
<https://verso.mat.uam.es/~juanluis.vazquez/flmpfig.pdf>
- WIKA. (2023). *Transmisor de presión de alta calidad - S-20*. https://www.wika.com/es-es/s_20.WIKA
- Yepes, V. (2020). Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención. *Colección Manual de Referencia, 2ª edición*, 480.
https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/149852/TOC_0328_09_02.pdf?seque