

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

“Mejora de un circuito de flujo y de un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás”

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

Realizado por: Felliot Augusto Ureña Ulcigrai

Profesor Guía: Ing. Bruno Chiné Polito, PhD.

Profesor Lector: Ing. Francisco Rodríguez Méndez, MSc.

Profesor Lector: Ing. William Benavides Ramírez, MEng.

Cartago Junio, 2024

Mejora de un circuito de flujo y de un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás © 2024 by [Felliot Augusto Ureña Ulcigrai](#) is licensed under [CC BY](#)

[4.0](#)

RESUMEN

Ureña Ulcigrai, Felliott Augusto, 2024, Mejora de un circuito de flujo y de un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor asesor: Dr. Bruno Chiné Polito.

El presente trabajo de graduación se ha enfocado en la mejora de un circuito experimental existente que alberga un filtro similar a los usados en la purificación del Biogás. En el proyecto se empleó aire como gas y se instalaron manómetros de $10,00 \pm 0,05$ inH₂O y $15,0 \pm 0,1$ inH₂O. Además, se instaló una válvula de aguja en la salida del circuito completa de un goniómetro de $360^\circ \pm 0,5^\circ$, para controlar el valor de cierre/apertura de la válvula y regular así el caudal de aire. El circuito se completó con un caudalímetro con escala máxima adimensional de $65,0 \pm 0,5$, equivalente a 6,33 L/min máximo. En la experimentación se emplearon cinco materiales filtrantes: esferas de vidrio clásico ($\varnothing 16,320 \pm 0,017$ mm), esferas cerámicas ($\varnothing 6,180 \pm 0,017$ mm), esferas de azúcar ($\varnothing 3,160 \pm 0,017$ mm), cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM ($\varnothing 6,480 \pm 0,017$ mm y un largo de $12,350 \pm 0,017$ mm) y cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM ($\varnothing 16,080 \pm 0,017$ mm y un largo de $16,420 \pm 0,017$ mm). Se apreció que todos los materiales filtrantes, con excepción de las pequeñas esferas de azúcar, experimentaron una pérdida de presión similar, la cual estaba dentro de la incertidumbre de resolución instrumental de $\pm 0,05$ inH₂O. En el caso de las esferas de azúcar, se pudo apreciar la caída de presión del aire al cruzar el filtro, con un valor máximo de 0,20 inH₂O. Con respecto al circuito de prueba, este brindó pérdidas de presión similar a la incertidumbre de resolución instrumental de $\pm 0,1$ inH₂O, sin importar el tipo de material filtrante que estuviera presente en el filtro. Si se considera el área superficial de los materiales filtrantes empleados, se determinó que las esferas azucaradas presentaban la mayor área superficial de filtración.

Palabras claves: Biogás, circuito experimental, material poroso, flujo, Darcy.

ABSTRACT

Ureña Ulcigrai, Felliott Augusto, 2024, Improvement of a flow circuit and an experimental porous filtration device for biogas purification. Costa Rica Technological Institute. Advisory professor: Dr. Bruno Chiné Polito.

The present graduation work has focused on the improvement of an existing experimental circuit that houses a filter similar to those used in the purification of Biogas. In the project, air was used as gas and pressure gauges of 10.00 ± 0.05 inH₂O and 15.0 ± 0.1 inH₂O were installed. In addition, a needle valve was installed at the complete circuit outlet of a $360^\circ \pm 0.5^\circ$ goniometer, to control the closing/opening value of the valve and thus regulate the air flow. The circuit was completed with a flowmeter with a maximum dimensionless scale of 65.0 ± 0.5 , equivalent to 6.33 L/min maximum. In the experiment, five filter materials were used: classic glass spheres ($\varnothing 16.320 \pm 0.017$ mm), ceramic spheres ($\varnothing 6.180 \pm 0.017$ mm), sugar spheres ($\varnothing 3.160 \pm 0.017$ mm), polymeric cylinders made with AC-ACETAL POM ($\varnothing 6.480 \pm 0.017$ mm and a length of 12.350 ± 0.017 mm) and polymeric cylinders made with AC-ACETAL POM ($\varnothing 16.080 \pm 0.017$ mm and a length of 16.420 ± 0.017 mm). It was noted that all filter materials, with the exception of the small sugar spheres, experienced a similar pressure loss, which was within the instrumental resolution uncertainty of ± 0.05 inH₂O. In the case of the sugar spheres, the air pressure drop could be seen when crossing the filter, with a maximum value of 0.20 inH₂O. Regarding the test circuit, this provided pressure losses similar to the instrumental resolution uncertainty of ± 0.1 inH₂O, regardless of the type of filter material that was present in the filter. If the surface area of the filter materials used is considered, it was determined that the sugar spheres had the largest filtration surface area.

Key words: Biogas, experimental circuit, porous material, flow, Darcy.

ACTA DE ENTREGA DEL INFORME FINAL DE LA PRÁCTICA DIRIGIDA

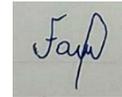
Se certifica que se ha recibido el Informe Final de la Práctica Dirigida, realizada por el estudiante Felliott Augusto Ureña Ulcigrai, carné 2018118509, la cual se titula: Mejora de un circuito de flujo y de un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás y que se realizó en el Tecnológico de Costa Rica en el I Semestre de 2024.

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 ha sido declarado:

Públicos

Confidenciales



Ing. Bruno Chiné Polito, PhD
Profesor Guía

Felliott Augusto Ureña Ulcigrai
Estudiante

Ing. Francisco Rodríguez Méndez, MSc
Profesor Lector

Ing. William Benavides Ramírez, MEng
Profesor Lector

Ing. Ricardo Esquivel Isern
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Cartago, junio de 2024

CONSTANCIA DE DEFENSA PUBLICA DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

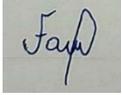
El presente Proyecto Final de Graduación titulado “Mejora de un circuito de flujo y de un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás” y realizado en la empresa “Instituto Tecnológico de Costa Rica”, durante el I Semestre de 2024, ha sido defendido, ante el Tribunal Examinador integrado por los profesores Bruno Chiné Polito, Francisco Rodríguez Méndez, William Benavides Ramírez; como requisito para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Este documento y su defensa ante el Tribunal Examinador han sido declarados:

Públicos

Confidenciales

Ing. Bruno Chiné Polito, PhD
Profesor Guía


Felliot Augusto Ureña Ulcigrai
Estudiante

Ing. Francisco Rodríguez Méndez, MSc
Profesor Lector

Ing. William Benavides Ramírez, MEng
Profesor Lector

Ing. Ricardo Esquivel Isern
Director Escuela de Ciencia e Ingeniería de los
Materiales

Cartago, junio de 2024

AGRADECIMIENTOS

Quisiera comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes han sido mi faro en el camino de la educación superior. Su inquebrantable apoyo y la oportunidad que me brindaron para embarcarme en este viaje han sido el cimiento de todo lo que he logrado hasta ahora. Además, a mis hermanos por ser unos guías ejemplares en mi educación superior. Nunca podré agradecerles lo suficiente por estar siempre a mi lado, aconsejándome y animándome a nunca rendirme.

Al profesor Bruno Chiné Polito, mi más sincero agradecimiento por haberme guiado con sabiduría y paciencia a lo largo de este proyecto de investigación. Su vasta experiencia y profundo conocimiento me han ayudado a alcanzar los resultados deseados.

A la profesora Marcela Meneses Guzmán, a Ignacio Mora Watson y a todo el equipo del Centro de Investigación y Extensión en Materiales (CIEMTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, les estoy eternamente agradecido por su apoyo y por proporcionarme los recursos necesarios de investigación para llevar a cabo este proyecto.

Por último, pero definitivamente no menos importante, quiero expresar mi profundo agradecimiento a la profesora Jaqueline Herrera Núñez. Su generosidad al brindarme orientación y apoyo en el proceso educativo ha sido invaluable. Su constante aliento y fe en mí han sido una luz que me ha guiado a lo largo de este camino, dándome la fuerza para seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por creer en mí.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTOS	6
1. Introducción.....	12
1.1 Identificación de la empresa	12
1.2 Justificación del estudio	12
1.3 Impacto Socio – Ambiental.....	13
1.4 Objetivos del estudio	14
1.4.1 Objetivo General	14
1.4.1 Objetivos Específicos	14
1.5 Alcances y limitaciones.....	14
2 Marco Teórico	15
2.1 Número adimensional de Mach	15
2.2 Temperatura de estancamiento	15
2.3 Razón de flujo de masa.....	16
2.4 Ecuación de Bernoulli.....	17
2.5 Ecuación general de la energía	18
2.6 Número de Reynolds.....	20
2.7 Pérdidas de energía por fricción en tuberías.....	20
2.8 Ecuación de Darcy para pérdidas por fricción	20
2.9 Factor de fricción para flujo laminar.....	21
2.10 Factor de fricción para flujo turbulento.....	21
2.11 Coeficientes de resistencia para pérdidas menores	22
2.11.1 Ampliación súbita	22
2.11.2 Contracción súbita	23
2.11.3 Válvulas y accesorios	24
2.12 Peso específico del aire	26
2.13 Ecuación de Darcy, constante K en función de la geometría y características del fluido	26
2.14 Precisión, exactitud e incertidumbre en la medición.....	30
3 Metodología.....	32

3.1 Medición geométrica del circuito de prueba	33
3.2 Verificación de flujo incompresible y características del fluido en el circuito	33
3.3 Material filtrante para proceso experimental	33
3.4 Optimización, experimentación y contraste con cálculos teóricos del circuito de prueba ³⁴	
4. Resultados y su Análisis.....	36
4.1 Medición geométrica del circuito de prueba	36
4.2 Verificación de flujo incompresible y características del fluido en el circuito	36
4.3 Optimización, experimentación y contraste de cálculos teóricos del circuito de prueba	38
4.3.1 Modificaciones iniciales del circuito de prueba y desarrollo de mediciones experimentales	38
4.3.2 Nuevo dispositivo de filtración y desarrollo de pruebas experimentales	55
4.4.3 Nuevas pruebas experimentales.....	59
4.3.4 Pruebas con material filtrante de menor porosidad	70
5. Conclusiones	79
6. Recomendaciones	80
7. Bibliografía	81
8. Anexos	83
Anexo A.....	83
Anexo B.....	84
Anexo C.....	92
Anexo E.....	108
Anexo F.....	110
Anexo G.	111

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Rugosidad de tuberías según el material.....	21
Tabla 2. Coeficiente de resistencia K para ampliación súbita	22
Tabla 3. Coeficiente de resistencia K para contracción súbita	23
Tabla 4. Coeficiente de resistencia K_L representativa para accesorios y válvulas para flujo turbulento.....	24
Tabla 5. Valores de longitud equivalente en metros de tubería recta para accesorios	25
Tabla 6. Diferencia de presión máxima teórica y experimental en función del material filtrante.	76
Tabla 7. Área superficial según el material filtrante empleado.	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplificación de variables de razón de flujo de masa.....	16
Figura 2. Ejemplificación de variables de la ecuación de Bernoulli.....	18
Figura 3. Ejemplificación de variables de ecuación general de energía.....	19
Figura 4. Ejemplificación de variables para la ecuación de Darcy.....	27
Figura 5. Ejemplificación de variable d para la ecuación de Darcy.....	27
Figura 6. Explicación visual de precisión, exactitud y resolución.....	31
Figura 7. Circuito experimental de prueba existente con manómetro de entrada (círculo naranja), manómetro de salida del filtro (círculo verde) y manómetro de alimentación (círculo rojo).....	32
Figura 8. Material filtrante para experimentación.....	34
Figura 9. Cambio de los manómetros del circuito de prueba para la primera prueba piloto.....	39
Figura 10. Goniómetro elaborado e instalación de válvula con indicador metálico (encerrado en círculo rojo).....	40
Figura 11. Cambio del flujómetro marca Dwyer por caudalímetro marca Masterflex.....	41
Figura 12. Material filtrante de forma piramidal para la prueba piloto.....	41
Figura 13. Gráfica de resultados de las presiones de entrada y salida del filtro en función del caudal con incertidumbre de resolución de manómetros $\pm 0,05$ inH ₂ O e incertidumbre de válvula de salida de circuito $\pm 0,5^\circ$	42
Figura 14. Cambio de manómetros de entrada y salida del filtro de 15 inH ₂ O a 10 inH ₂ O.....	44
Figura 15. Gráfica de resultados de las presiones de entrada y salida del filtro en función del caudal con incertidumbre de resolución de manómetros $\pm 0,05$ inH ₂ O e incertidumbre de válvula de salida de circuito $\pm 0,5^\circ$	45
Figura 16. Circuito de prueba optimizado para ensayos experimentales.....	46
Figura 17. Presión de salida del filtro, al variar el material filtrante y en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O) y de la apertura de la válvula de salida del circuito (incertidumbre de resolución $\pm 0,5^\circ$).....	48
Figura 18. Presión de entrada del filtro, al variar el material filtrante y en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O) y de la apertura de la válvula de salida del circuito (incertidumbre de resolución $\pm 0,5^\circ$).....	49
Figura 19. Resultados de las presiones de entrada y salida del filtro en función del caudal, para filtro con 0% de material filtrante (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O para el manómetro y $\pm 0,5^\circ$ para el goniómetro).....	51
Figura 20. Curva con regresión de los valores obtenidos en la Tabla 2	52
Figura 21. Curva con regresión de los valores obtenidos en la Tabla 3	53
Figura 22. Cálculos teóricos de la pérdida de presión entre la entrada y salida del filtro por ecuación de Bernoulli con 0% de material filtrante.....	54
Figura 23. Optimización del circuito de prueba con nuevo subensamble del filtro.....	55
Figura 24. Instalación de la malla polimérica de PLA para retención del material filtrante.....	56

Figura 25. Instalación y ubicación de los manómetros en el dispositivo de filtración.....	57
Figura 26. Cálculos teóricos de la pérdida de presión entre la entrada y salida del circuito usando la ecuación de Bernoulli, con 0% de material filtrante.	58
Figura 27. Probeta marca Nalgene con resolución de 10mL e incertidumbre de ± 5 ml, con material filtrante y agua en su interior.	59
Figura 28. Pérdida de presión teórica con una distancia de $28,5 \pm 0,05$ cm en el filtro.....	61
Figura 29. Presión de salida del circuito en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.....	62
Figura 30. Presión de entrada del circuito en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.....	63
Figura 31. Presión de salida del filtro en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.....	64
Figura 32. Presión de entrada del filtro en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.....	65
Figura 33. Presión de entrada y salida del circuito en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.	66
Figura 34. Presión de entrada y salida del filtro en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH ₂ O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.	67
Figura 35. Material filtrante compuesto por esferas de azúcar para generar una menor porosidad en el dispositivo de filtración.	70
Figura 36. Malla para retener el material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm.	71
Figura 37. Cálculos teóricos de pérdida de presión en el filtro con material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro.	72
Figura 38. Presión de entrada y de salida en el circuito con material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro.	73
Figura 39. Pérdida de entrada y de salida del filtro en presencia de material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro.	74
Figura 40. Rango de diferencia de la incertidumbre de resolución de los manómetros de 15,0 inH ₂ O.	75
Figura 41. Rango de diferencia de la incertidumbre de resolución de los manómetros de 10,00 inH ₂ O.	75
Figura 42. Visualización de algunos materiales filtrantes para aumentar el área superficial de las reacciones químicas de filtración del Biogás.	78

1. Introducción

La elaboración de un trabajo de graduación es crucial, no solo para evaluar el impacto positivo que este puede generar en la población y en la institución, sino también para reflejar las competencias y habilidades del estudiante, por consiguiente, en el siguiente apartado se describirán el tipo de empresa en el que se desarrollará el proyecto, la justificación del estudio y el impacto socio – ambiental que generará.

1.1 Identificación de la empresa

El presente trabajo se desarrolla en el marco del proyecto de extensión “Seguridad, sostenibilidad y resiliencia en sistemas de aprovechamiento de biogás a escala doméstica y pequeña para el sector agropecuario y agroindustrial de la Región Huetar Caribe” el cual forma parte de investigaciones realizadas por la Escuela de Ciencias e Ingeniería de los Materiales y la Escuela de Ingeniería Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, ambas del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) es una institución nacional autónoma de educación superior universitaria, dedicada a la docencia, la investigación y la extensión de la tecnología para el progreso de Costa Rica (TEC, 2016). Además, el proyecto de extensión “Seguridad, sostenibilidad y resiliencia en sistemas de aprovechamiento de biogás a escala doméstica y pequeña para el sector agropecuario y agroindustrial de la Región Huetar Caribe” tiene como objetivo brindar las condiciones necesarias al pueblo costarricense para que el biogás se convierta en una opción sostenible de energía limpia, además, que la presente tecnología sea sostenible y perdure en el tiempo.

1.2 Justificación del estudio

El planeta tierra está enrutado a un aumento de temperatura de 3,7 – 4,8 ° C para el año 2100, lo que generaría daños catastróficos e irreparables, ocasionando destrucción a las costas y convirtiendo las zonas boscosas en desiertos (Conservatorio Internacional, 2020). Una causa de este aumento son los gases de efecto invernadero que son el principal generador del cambio climático. Existen gases en la atmósfera de la tierra que actúan de forma similar a un cristal de un invernadero: retienen el calor

del sol e impiden que sean liberados al espacio, ocasionando el calentamiento global. Algunas causas de aumento de las emisiones son: Tala de bosques, combustión de carbón, petróleo y gas, gases fluorados y el desarrollo de la ganadería (Comisión Europea, 2016).

En lo que respecta al ámbito ganadero la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Fao) ha mencionado que el sector ganadero mundial genera el 18 por ciento de los gases de efecto invernadero (Naciones Unidas, 2006), entre ellos el metano que es generado principalmente por las fermentaciones de las excreciones bovinas. A partir de esta información se han desarrollado proyectos que buscan emplear el metano producido por las vacas como fuente de calor en la cocción de alimentos, lo cual genera el producto biogás. Sin embargo, para utilizar el biogás deben eliminarse contaminantes como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) (Werkneh, 2022) que en contacto con el agua genera ácido sulfúrico, sustancia corrosiva. Es por esa razón que se desarrollan filtros que permiten eliminar estas impurezas del biogás, no obstante, además de la purificación del biogás, existen circuitos de flujo para transportar el fluido hasta el dispositivo de cocción, por lo que se deben mantener presiones para el correcto transporte y poder brindar el flujo necesario para alimentar los equipos.

Por lo tanto, el enfoque del presente proyecto se centra en optimizar un circuito de flujo y un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás desarrollado en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares del CIEMTEC (Morales-Sánchez, 2023), empleando técnicas e instrumentos de medición con mayor resolución que permita recopilar los valores de las variables que afectan la caída de presión y poder contrastarlo con la teoría para futuros desarrollos de circuitos de flujos y filtros porosos eficientes.

1.3 Impacto Socio – Ambiental

Según ONU (Naciones Unidas, 2022) las energías renovables son un tipo de energía que son obtenidas de fuentes naturales que logran reponerse más rápido que lo que se pueden consumir, por lo que al implementar biogás este contribuye al empleo de

fuentes de energía renovables. La presente tecnología emplea el uso de residuos orgánicos originarios de animales como fuente de energía, lo que ocasionaría una reducción en las emisiones de metano. Por lo tanto, el proyecto ofrece una posibilidad de generar un valor agregado a residuos para obtener energía destinada al consumo interno.

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo General

- Mejorar el circuito de flujo y un dispositivo de filtración poroso experimental para la purificación de biogás.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Optimizar un circuito experimental de prueba existente para la evaluación del flujo y la pérdida de presión en un dispositivo de filtración poroso.
- Evaluar mediante un estudio teórico el flujo y la pérdida de presión en el medio poroso del filtro.
- Usando el circuito experimental optimizado, realizar pruebas con el fin de evaluar el flujo y la caída de presión en dispositivos de filtración existentes.
- Analizar los resultados experimentales obtenidos y contrastarlos con los resultados teóricos anteriores.

1.5 Alcances y limitaciones

El objetivo principal de la presente investigación se enfoca en optimizar el circuito de prueba experimental y el filtro poroso existentes en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares del CIEMTEC (Morales-Sánchez, 2023), que permita obtener mejores datos, siendo estos luego contrastados con la teoría, para una mejor y correcta interpretación de los resultados para circuitos de flujo de biogás.

El proyecto fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares del CIEMTEC, Instituto Tecnológico de Costa Rica, empleando aire como gas debido a las complicaciones que conlleva el uso de biogás (metano) por su

contenido de sulfuro de hidrógeno (H₂S). Además, se usarán pellets disponibles en el laboratorio para el material filtrante en los ensayos, manteniendo en lo mayor posible las dimensiones geométricas del circuito experimental con máximo de 6,33 L/min como caudal, una presión relativa máxima en la entrada del filtro de 0,54 psi y consideración de fluido incompresible en estas condiciones.

2 Marco Teórico

En la mecánica de fluidos existen leyes y ecuaciones que permiten describir comportamientos cuando un tipo de flujo pasa por un medio en el cual estará expuestos a condiciones que afectarán su conducta fluidodinámica. Con relación a flujos gaseosos y con velocidades bajas se pueden obtener ecuaciones y leyes que permiten describir su comportamiento de forma muy apropiada.

2.1 Número adimensional de Mach

Cuando la densidad de un fluido permanece casi constante en su recorrido esta se le denomina incompresible, no obstante, si su densidad varía en gran porcentaje se le considera compresible. Un valor adimensional que nos ayuda a definir tanto flujos compresibles como incompresibles es el número de Mach, indicando que valores menores a 0,3 se puede considerar a los flujos de gases como incompresibles o débilmente compresibles. Por lo que para gases como el aire se puede despreciar la compresibilidad si la velocidad es menor a los 100 m/s. Para obtener el número de Mach se utiliza la siguiente **Ecuación 1** (Çengel & Cimbala, 2010):

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1)$$

siendo Ma el número de Mach, V la velocidad del flujo en m/s y C la velocidad del sonido cuyo valor es de 346 m/s en el aire a temperatura ambiente al nivel del mar.

2.2 Temperatura de estancamiento

Cuando un gas ideal llega al reposo adiabático obtiene una temperatura llamada de estancamiento o temperatura total. Esto ocurriría si el flujo frenara adiabáticamente

hasta detener su movimiento completamente. La siguiente **Ecuación 2** permite obtener la temperatura de estancamiento (Çengel & Cimbala, 2010):

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2C_p} \quad (2)$$

siendo T_0 la temperatura de estancamiento, T la temperatura del gas, V la velocidad del fluido gaseoso y C_p es el calor específico a presión constante.

2.3 Razón de flujo de masa

Cuando una cantidad de masa de un gas fluye a través de una sección de un ducto por unidad de tiempo se le llama a esto razón de flujo de masa y se representa como \dot{m} . Para poder aproximar el valor de \dot{m} deben considerarse tres variables para su cálculo: el área transversal de la tubería por donde pasa el fluido (A_c), la velocidad promedio del flujo (V_{prom}), ya que permite facilitar los cálculos, y la densidad promedio (ρ) del fluido que pasa por la tubería (visualizar **Figura 1** para ejemplificación de las variables).

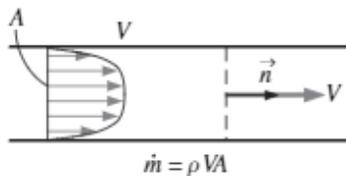


Figura 1. Ejemplificación de variables de razón de flujo de masa.

Fuente: Çengel & Cimbala, 2010.

De acuerdo con lo anterior se usa la siguiente **Ecuación 3** (Çengel & Cimbala, 2010):

$$\dot{m} = \rho * V_{prom} * A_c \quad (3)$$

En presencia de aire como fluido se pueden relacionar conceptos teóricos que permitan explicar el comportamiento del gas. Para el caso de un sistema cerrado en donde entra gas sin producción o sumidero se debe cumplir que $m_{sistema} = constante$,

lo que significa que la masa que entra debe ser la misma que sale. Se puede emplear la siguiente **Ecuación 4** (Çengel & Cimbala, 2010):

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (4)$$

siendo $\dot{m}_{entrada}$ y \dot{m}_{salida} las razones totales del flujo de masa que van hacia adentro y afuera del volumen de control respectivamente, y $\frac{dm_{vc}}{dt}$ es la razón de cambio de la masa dentro de las fronteras del respectivo volumen. Si la densidad del fluido permanece constante se puede considerar que el caudal para un flujo gaseoso no varía al aumentar o reducir secciones de tubería.

2.4 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una relación entre la presión, velocidad y la elevación, válida en regiones de flujos estacionarios e incompresibles donde las fuerzas netas de fricción son despreciables. La deducción clave para la ecuación de Bernoulli es que los efectos viscosos son pequeños y por lo tanto despreciables comparación a los efectos gravitacionales, de inercia y de la presión. Por lo tanto, emplear la aproximación de Bernoulli es de utilidad por lo general en zonas del flujo por fuera de las capas límite y estelas, en donde el movimiento que tiene el fluido lo estipulan los efectos combinados de la gravedad y presión. A partir de esta relación se tiene la **Ecuación 5** de Bernoulli (Çengel & Cimbala, 2010):

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g * z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g * z_2 \quad (5)$$

siendo P_1 y P_2 la presión, V_1 y V_2 la velocidad del fluido y z_1 y z_2 las alturas en las coordenadas cartesianas rectangulares de la sección 1 y sección 2 respectivamente (visualizar **Figura 3** para ejemplificación de las variables). Finalmente g es la aceleración de gravedad (9,8 m/s) y la ρ es la densidad del fluido.

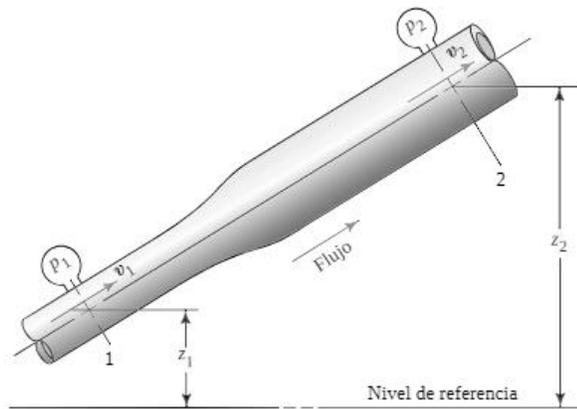


Figura 2. Ejemplificación de variables de la ecuación de Bernoulli.

Fuente: Mott & Untener, 2015.

2.5 Ecuación general de la energía

La energía no se crea ni se destruye solo se transforma, lo que permite tener mayor entendimiento para la ecuación de Bernoulli, ya que un fluido al pasar por un sistema de flujo de fluidos pierde, gana o mantiene la energía al entrar y salir del sistema. Se pueden mencionar algunas formas de energías que pueden existir en el sistema, las cuales son (Mott & Untener, 2015):

- energía perdida debido a la fricción generada mientras el fluido fluye por las tuberías del sistema;
- energía perdida debido al flujo por válvulas o accesorios en el sistema;
- energía añadida al sistema por medio de una bomba para mejorar el desplazamiento o aumentar la presión;
- energía eliminada del sistema por medio de turbinas o motores que utilizan energía para poder conducir otros sistemas mecánicos.

Siguiendo siempre Mott & Untener, (2015), para emplear la ecuación general de la energía de un fluido en movimiento se determinan tres variables para su uso, las cuales son:

- h_A = es la energía incorporada al fluido por medio de un dispositivo mecánico como una bomba;
- h_R = es la energía eliminada del fluido por medio de un dispositivo mecánico como un motor de fluido;
- h_L = es la energía perdida del sistema ocasionada por la fricción en tuberías, válvulas y accesorios.

Teniendo las variables para la ecuación general de la energía se puede representar la misma y también relacionarla con la ecuación de Bernoulli, respectivamente, como sigue en la **Ecuación 6** y **7**:

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2 \quad (6)$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (7)$$

siendo E'_1 y E'_2 la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2, respectivamente (visualizar **Figura 3** para ejemplificación de elementos que brindan o reducen energía).

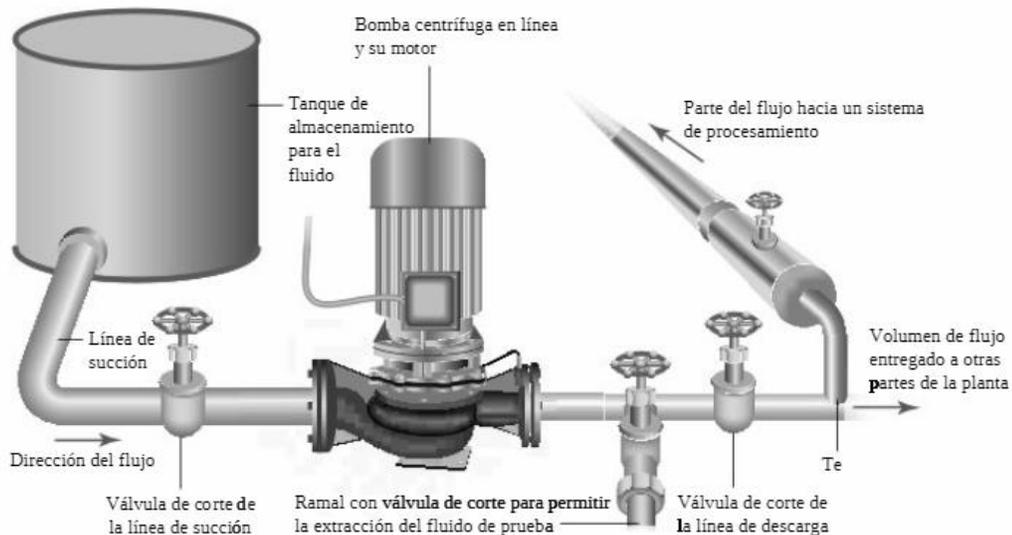


Figura 3. Ejemplificación de variables de ecuación general de energía.

Fuente: Mott & Untener, 2015.

2.6 Número de Reynolds

El número de Reynolds Re es un valor adimensional que permite determinar si un fluido se comporta de manera laminar o turbulento, ya que dicho valor permite tener una relación con las pérdidas de energía de un fluido. En el caso de los sistemas de flujos de fluidos en tubos circulares, se determina Re para secciones circulares empleando la **Ecuación 8** (Mott & Untener, 2015):

$$Re = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (8)$$

donde es v la velocidad promedio del fluido, ρ la densidad del fluido, η la viscosidad dinámica del fluido y D el diámetro de la tubería.

Como referencia, si el valor del número de Reynolds es aproximadamente menor a 2000 se puede decir que el flujo es laminar y si es mayor a 4000 sería turbulento.

2.7 Pérdidas de energía por fricción en tuberías

En el trasiego de un fluido por medio de una tubería existen pérdidas de presión conforme pasan por accesorios, codos, válvulas y tuberías. Como la pérdida de presión se relaciona con pérdidas de energía del fluido se puede obtener las pérdidas de energía (h_L) con la siguiente **Ecuación 9** (Mott & Untener, 2015):

$$h_L = K * \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Siendo K el coeficiente de resistencia, v velocidad promedio del fluido y g la gravedad del planeta Tierra.

2.8 Ecuación de Darcy para pérdidas por fricción

La ecuación de Darcy para pérdidas por fricción nos permite calcular dichas pérdidas en secciones largas y rectas de tuberías circulares para flujos laminares como turbulentos. Se puede representar con la siguiente **Ecuación 10** (Mott & Untener, 2015):

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

Siendo h_L las pérdidas de fricción, f el factor de fricción, L la longitud de la corriente del flujo y D el diámetro de la tubería.

2.9 Factor de fricción para flujo laminar

Para valores del número de Reynolds (R_e) menores a 2000 se puede emplear la siguiente **Ecuación 11** para obtener el factor de fricción (f) (Mott & Untener, 2015):

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (11)$$

2.10 Factor de fricción para flujo turbulento

Para valores del número de Reynolds (R_e) mayores a 4000 se puede indicar que el flujo es turbulento, por lo que la siguiente **Ecuación 12** nos permite calcular el factor de fricción (Mott & Untener, 2015):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \frac{D}{\varepsilon}} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (12)$$

donde ε es la rugosidad promedio de la pared interna de la tubería y R_e el número de Reynolds. Para estimar el valor de ε se puede usar la siguiente **Tabla 1**:

Tabla 1. Rugosidad de tuberías según el material

Material	Rugosidad ε (m)	Rugosidad ε (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$
Tubo estirado; cobre, latón, acero	$1,5 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4,6 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil – revestido	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil – sin revestir	$2,4 \times 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-4}$
Concreto, bien hecho	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1,8 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-3}$

Fuente: (Mott & Untener, 2015).

2.11 Coeficientes de resistencia para pérdidas menores

A partir de la **Ecuación 10** (ecuación de Darcy para pérdidas de fricción) se pueden determinar las pérdidas de energía en la tubería, las cuales se consideran como pérdidas mayores. Para el caso de las pérdidas menores que son causadas por elementos o variación en el circuito por el cual pasa el fluido, se emplean ecuaciones con coeficientes de resistencia específicos.

2.11.1 Ampliación súbita

La ampliación súbita sucede cuando un fluido pasa de una sección de tubería menor a otra de mayor diámetro sin que sea una ampliación gradual. Por lo que para obtener las pérdidas de energía se emplea la siguiente **Ecuación 13** (Mott & Untener, 2015):

$$h_L = K * \frac{v_1^2}{2g} \quad (13)$$

Siendo K el coeficiente de resistencia, v_1 velocidad promedio del fluido en la tubería de menor diámetro. Para obtener el valor de K para la ampliación súbita se emplea la

Tabla 2:

Tabla 2. Coeficiente de resistencia K para ampliación súbita

D_2/D_1	v_1						
	0,6 m/s 2 ft/s	1,2 m/s 4 ft/s	3 m/s 10 ft/s	4,5 m/s 15 ft/s	6 m/s 20 ft/s	9 m/s 30 ft/s	12 m/s 40 ft/s
1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2	0,11	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
1,4	0,26	0,25	0,23	0,22	0,22	0,21	0,20
1,6	0,40	0,38	0,35	0,34	0,33	0,32	0,32
1,8	0,51	0,48	0,45	0,43	0,42	0,41	0,40
2,0	0,60	0,56	0,52	0,51	0,50	0,48	0,47
2,5	0,74	0,70	0,65	0,63	0,62	0,60	0,58
3,0	0,83	0,78	0,73	0,70	0,69	0,67	0,65
4,0	0,92	0,87	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

5,0	0,96	0,91	0,84	0,82	0,80	0,77	0,75
10,0	1,00	0,96	0,89	0,86	0,84	0,82	0,80
Infinito	1,00	0,98	0,91	0,88	0,86	0,83	0,81

Fuente: (Mott & Untener, 2015).

2.11.2 Contracción súbita

La contracción súbita se da cuando un fluido pasa de una sección de tubería mayor a otra de menor diámetro sin que sea una reducción gradual. Por lo que para obtener las pérdidas de energía se emplea la siguiente **Ecuación 14** (Mott & Untener, 2015):

$$h_L = K * \frac{v_2^2}{2g} \quad (14)$$

Siendo K el coeficiente de resistencia, v_2 velocidad promedio del fluido en la tubería de menor diámetro.

Para obtener el valor de K para la ampliación súbita se emplea la **Tabla 3**:

Tabla 3. Coeficiente de resistencia K para contracción súbita

D_2/D_1	v_2						
	0,6 m/s 2 ft/s	1,2 m/s 4 ft/s	1,8 m/s 6 ft/s	2,4 m/s 8 ft/s	3 m/s 10 ft/s	4,5 m/s 15 ft/s	6 m/s 20 ft/s
1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
1,2	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09
1,4	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
1,6	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25
1,8	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,31
2,0	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,34	0,33
2,2	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,37	0,35
2,5	0,42	0,42	0,41	0,40	0,40	0,38	0,37
3,0	0,44	0,44	0,43	0,42	0,42	0,40	0,39
4,0	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44	0,42	0,41
5,0	0,48	0,47	0,47	0,46	0,45	0,44	0,42

10,0	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,43
Infinito	0,49	0,48	0,48	0,47	0,47	0,45	0,44

Fuente: (Mott & Untener, 2015).

2.11.3 Válvulas y accesorios

En un sistema de fluidos existen accesorios y válvulas que permiten regular pasos del fluido u otras modificaciones, sin embargo, estas generan pérdidas de energía en el flujo. Para obtener las pérdidas de energía se emplea la siguiente **Ecuación 15** (Çengel & Cimbala, 2010):

$$h_L = K_L * \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

Siendo K_L el coeficiente de resistencia y v velocidad promedio del fluido.

Para obtener valores de K_L representativas en flujo turbulento para válvulas y accesorios se puede usar la **Tabla 4**:

Tabla 4. Coeficiente de resistencia K_L representativa para accesorios y válvulas para flujo turbulento

Elemento	K_L
Codo suave de 90° embridado	0,3
Codo suave de 90° enroscado	0,9
Codo esquinado de 90° (sin álabes directores)	1,1
Codo esquinado de 90° (con álabes directores)	0,2
Codo enroscado de 45	0,4
Codo de retorno de 180° embridado	0,2
Codo de retorno de 180° enroscado	1,5
Conexión en T (flujo deriv.) embridado	1,0
Conexión en T (flujo deriv.) enroscado	2,0
Conexión en T (flujo en línea) embridado	0,2
Conexión en T (flujo en línea) enroscado	0,9
Unión enroscada	0,08

Válvula de globo, totalmente abierta	10
Válvula de ángulo, totalmente abierta	5
Válvula de bola, totalmente abierta	0,05
Válvula de charnela	2
Válvula de compuerta, totalmente abierta	0,2
Válvula de compuerta, ¼ cerrada	0,3
Válvula de compuerta, ½ cerrada	2,1
Válvula de compuerta, ¾ cerrada	17

Fuente: (Çengel & Cimbala, 2010).

Otra manera de obtener el valor de K_L es empleando el factor de fricción y la longitud equivalente, que representa la pérdida que existiría en una tubería imaginaria con geometrías definidas que sería sustituida por la válvula o accesorio. Se puede emplear la **Ecuación 16** para obtener el valor de K_L (Çengel & Cimbala, 2010):

$$K_L = f * \frac{L_{eq}}{D} \quad (16)$$

siendo K_L el coeficiente de resistencia, D el diámetro de la tubería y f el factor de fricción y L_{eq} la longitud equivalente del accesorio.

Se brindan en la **Tabla 5** valores de longitud equivalente en metros para accesorios empleados para régimen turbulento:

Tabla 5. Valores de longitud equivalente en metros de tubería recta para accesorios

Elemento	½"	1"	1 ½"	2"
Codo en L de 90°	0,46	0,82	1,31	1,68
Codo en L de 45°	0,24	0,40	0,61	0,76
Perfil T de paso recto	0,30	0,61	0,91	1,22
Perfil T-entrada o salida lateral o adaptador sin depresión	1,01	1,74	2,74	3,65
Válvula de bola o compuerta abierta	0,12	0,21	0,3	0,6

Válvula angular abierta	2,56	4,57	6,71	8,53
Unión universal	0,00	--	--	--

Fuente: (EngineeringToolBox, 2010; Esteban A. Vélez et al., 2020; Fesmex, 2020; PowderProcess, n.d.)

2.12 Peso específico del aire

El gas aire puede variar su peso específico debido a cambios de temperatura o de presión. Una manera de calcular el peso específico es empleando la clásica *Ley de los gases ideales* de la termodinámica, como se representa en la **Ecuación 17** (Mott & Untener, 2015):

$$\frac{P}{R*T} = \rho \quad (17)$$

con p la presión absoluta, ρ la densidad, T la temperatura absoluta y R la constante del gas en cuestión (para aire $287,0 \frac{J}{kg \cdot K}$ a $300 K$).

2.13 Ecuación de Darcy, constante K en función de la geometría y características del fluido

A partir de datos experimentales Darcy logró concluir que el flujo volumétrico a través de un sistema poroso es proporcional al gradiente de presión implementado y al área transversal. Se puede obtener la siguiente **Ecuación 18** (Darby & Chhabra, 2016):

$$Q = K * \frac{(-\Delta p)*A}{\mu*L} \quad (18)$$

siendo Q el caudal que pasa por el medio poroso, A el área transversal de la membrana, K la constante de permeabilidad, Δp es la caída de presión entre la salida y entrada del medio poroso, L el largo del medio poroso y μ la viscosidad dinámica del fluido (visualizar **Figura 4**).



Figura 4. Ejemplificación de variables para la ecuación de Darcy.

Fuente: Darby & Chhabra 2016.

Siempre siguiendo el texto de Darby & Chhabra, (2016), usando la ecuación de Blake-Kozeny para determinar las pérdidas de fricción en un flujo laminar, equiparándolo con $\Delta P/\rho$ de la ecuación de Bernoulli, se obtiene la siguiente **Ecuación 19** para el caudal (Darby & Chhabra, 2016):

$$Q = \frac{-\Delta P * A}{\mu * L} * \left[\frac{d^2 * \varepsilon^3}{180 * (1 - \varepsilon)^2} \right] \quad (19)$$

siendo ε la porosidad volumétrica del medio y d el diámetro de la partícula del medio poroso (ver **Figura 5**).

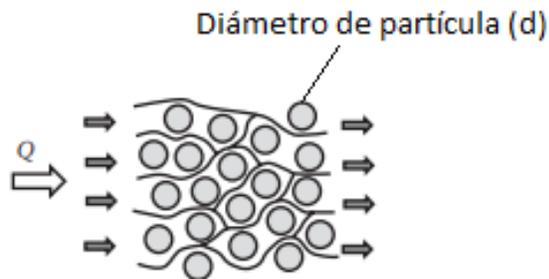


Figura 5. Ejemplificación de variable d para la ecuación de Darcy.

Fuente: Darby & Chhabra 2016.

El valor que se encuentra encerrado en llaves en la ecuación 19 se puede definir como la constante K que compone el medio poroso.

Para la porosidad volumétrica del medio se emplea la siguiente **Ecuación 20**:

$$\epsilon = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (20)$$

siendo ϵ la porosidad volumétrica del medio, V_t es el volumen total del medio y V_s el volumen de los sólidos.

Para calcular el valor d empleado en la ecuación 19, se utiliza la magnitud del diámetro de la partícula si es de forma esférica. Si por lo contrario no presenta forma esférica se puede emplear la siguiente **Ecuación 21**:

$$d = \psi * d_s = \frac{6}{a_s} \quad (21)$$

donde d_s es el diámetro de la esfera con el mismo valor de volumen de la partícula, ψ el factor de esfericidad, a_s el área de superficie específica de cada partícula (área de superficie de la partícula por unidad de volumen de la partícula).

Para obtener el valor de ψ se puede emplear la siguiente **Ecuación 22**:

$$\psi = \frac{\text{área superficial de una esfera con el mismo volumen de la partícula}}{\text{área superficial de la partícula}} \quad (22)$$

Para el número de Reynolds de flujos en medios porosos, que permite conocer cómo se comporta el fluido, se emplea la siguiente **Ecuación 23**:

$$Re_{PM} = \frac{d * V_s * \rho}{(1 - \epsilon) * \mu} \quad (23)$$

siendo Re_{PM} el número de Reynolds para medios porosos, ρ la densidad del fluido, μ la viscosidad del fluido, V_s la velocidad superficial del fluido, d el diámetro de la partícula y ϵ la porosidad volumétrica. Para emplear la **Ecuación 18** el número de Reynold para medios porosos (Re_{PM}) debe estar entre 1 y 10 debido a que es un rango establecido para implementar la ecuación de la Ley de Darcy (Macini et al., 2011; Sobieski & Trykozko, 2014).

Para calcular la velocidad superficial del fluido se puede emplear la siguiente **Ecuación 24**:

$$V_s = \frac{Q}{A} \quad (24)$$

Siendo Q el caudal que pasa por el medio poroso y A el área transversal del medio poroso.

Si se desea conocer la velocidad del flujo real a través del medio poroso se emplea la **Ecuación 25**:

$$V_i = \frac{V_s}{\epsilon} \quad (25)$$

Una expresión que adecuadamente representa el factor de fricción en el medio poroso sobre todos los números de Reynolds del presente medio se brinda con la **Ecuación 26**:

$$f_{pm} = 1.75 + \frac{180}{Re_{pM}} \quad (26)$$

Si el valor del número de Reynolds para medios porosos (Re_{pM}) es menor a 10, las pérdidas se dan mayoritariamente por comportamiento laminar. Si, por el contrario, el valor es mayor a 1000, las pérdidas se darían mayoritariamente por comportamiento turbulento.

Para estimar la pérdida de energía friccional por unidad de masa del fluido en el medio poroso relacionándola con la *Ecuación de Ergun* (**Ecuación 26**), se emplea la siguiente **Ecuación 27**:

$$e_f = 1.75 * \frac{V_s^2 * (1-\epsilon)}{d * \epsilon^3} * L + 180 * \frac{V_s * \mu * (1-\epsilon)^2 * L}{d^2 * \epsilon^3 p} \quad (27)$$

La *ecuación de Ergun* es una extensión de la *ecuación de Kozeny-Carman* para números elevados de Reynolds (mayor a 10). Por lo que se obtiene la **Ecuación 28** (Comsol, 2020):

$$-\nabla p = \frac{150}{d^2} * \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \mu * u + \frac{1.75}{d} * \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \rho * u * |u| \quad (28)$$

Siendo u (igual que V_s) el campo de velocidad en m/s y ∇p el gradiente de presión por metro.

Para calcular K para la *ecuación de Ergun* se emplea la **Ecuación 29**:

$$K = \frac{d^2}{150} * \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \quad (29)$$

y para B la *ecuación de Ergun* se emplea la **Ecuación 30**:

$$B = \frac{1.75}{d} * \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (30)$$

Con relación al valor de u de le **Ecuación 28** se puede calcular a partir de la **Ecuación 31** siguiente:

$$u = -\frac{K}{\mu} * \frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4 * (\frac{K}{\mu})^2 * B \rho |\nabla p|}} * \nabla p \quad (31)$$

También puede ser calculada empleando la **Ecuación 32**:

$$u = -\frac{K}{\mu} * \left(1 - \frac{1,75}{\frac{d * \rho * |u|}{(1-\epsilon)\mu} + 1,75}\right) * \nabla p \quad (32)$$

2.14 Precisión, exactitud e incertidumbre en la medición

Cuando se realizan mediciones existen conceptos que se deben definir para poder interpretar los valores obtenidos con relación a los instrumentos y los valores teóricos. Uno de ellos es la precisión, la cual indica el grado de coincidencia entre los resultados que son independientes de una medición (Flexilatina, 2023), por lo que un instrumento tendrá alta precisión si obtiene los mismos resultados en cada repetición de medición. El otro concepto es la exactitud, la cual es la concordancia que existe entre el valor obtenido de la medición con un valor correcto o aceptado (Flexilatina, 2023), por lo que un instrumento tendrá alta exactitud en la medición si el valor obtenido es cercano al valor correcto o aceptado. Otra magnitud es la incertidumbre que está ligada con la instrumentación empleada, indicando el intervalo o rango de valores en donde existe una duda razonable que se encuentre el valor real de la medida realizada (CandelTEC, 2019). Los equipos de medición presentan una resolución que permite detectar y mostrar cambios o variaciones pequeñas en una magnitud o medida (SPC consulting group, 2017), si los equipos son analógicos presentarán una incertidumbre de medición igual a la división de la resolución entre dos, si por el contrario son digitales la incertidumbre es igual a la resolución del equipo (Universidad Autónoma de Madrid, 2013). En la **Figura 6** se obtiene una explicación visual de precisión, exactitud y resolución (los puntos verdes aumentan de tamaño con una baja resolución y viceversa):

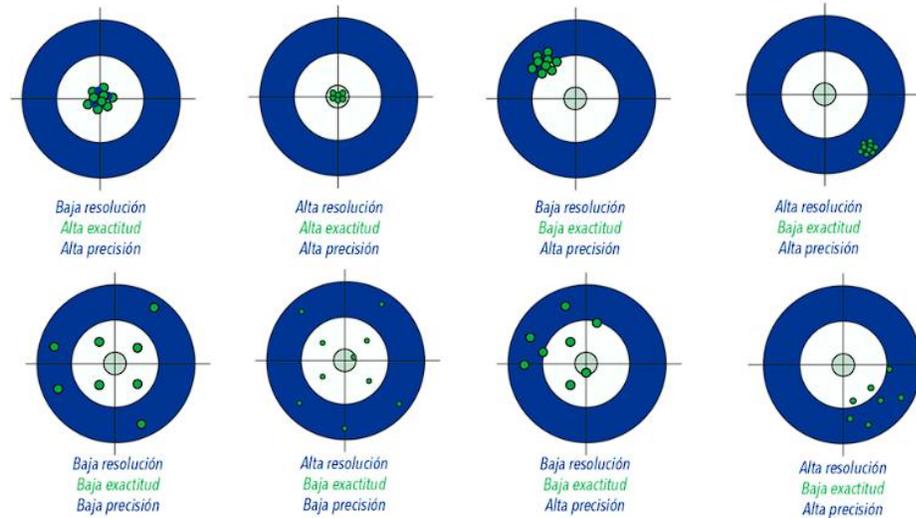


Figura 6. Explicación visual de precisión, exactitud y resolución.

Fuente: (AcMax Solución estratégica, 2023)

Cuando queremos calcular la incertidumbre total (σ) del total de incertidumbres (σ_n) en operaciones de sumas y restas podemos emplear la siguiente **Ecuación 33** (El Legado de Newton, 2018):

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \dots + \sigma_n^2} \quad (33)$$

Si las operaciones son divisiones y multiplicaciones se emplean la **Ecuación 34** llamada incertidumbre estándar combinada que relaciona la incertidumbre de cada medición (σ_n), su valor de medición (V_n) y el resultado de la operación con los valores de la medición (V) (El Legado de Newton, 2018):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{V_1} + \frac{\sigma_2^2}{V_2} + \frac{\sigma_3^2}{V_3} \dots + \frac{\sigma_n^2}{V_n}} \rightarrow \sigma * V = \sigma_{comb} \quad (34)$$

Usando la incertidumbre estándar combinada (σ_{comb}) se debe transformar a incertidumbre expandida para poder emplearla en resultados de operación en divisiones y multiplicaciones, por lo que se emplea la **Ecuación 35** (El Legado de Newton, 2018):

$$\sigma_{exp} = \sigma_{comb} * 2 \quad (35)$$

Para calcular el error de una medida ligado a su incertidumbre se emplea la **Ecuación 36** (El Legado de Newton, 2018):

$$\% Error = \frac{Incertidumbre}{valor} * 100 \quad (36)$$

Se busca que el valor del error sea menor a 5%.

3 Metodología

La presente investigación plantea comparar los resultados experimentales que se obtendrán en el circuito de flujo existente en el Laboratorio de Materiales Porosos y Celulares del CIEMTEC (**Figura 7**) con la teoría. Se plantea emplear técnicas e instrumentos que permitan obtener valores más precisos para compararlos con base teórica. En la presente sección se describirán los pasos respectivos para cumplir con los objetivos planteados en el presente proyecto.



Figura 7. Circuito experimental de prueba existente con manómetro de entrada (círculo naranja), manómetro de salida del filtro (círculo verde) y manómetro de alimentación (círculo rojo).

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Medición geométrica del circuito de prueba

Para medir las distancias del circuito desde el manómetro de entrada (**Figura 7**) hasta el manómetro de salida del filtro se empleará una cinta métrica marca Stanley de 5m/16' con una resolución de 0,1 cm, esto permitirá obtener el valor de la altura para la ecuación de Bernoulli y los valores del largo del material filtrante. Además, se recopilarán las dimensiones de las tuberías empleadas por medio de los códigos grabadas en dicha tubería y los elementos que se encuentren en el recorrido (válvulas, reductores o aumentadores de diámetro de la tubería) al compararlas con ficha técnica de la marca Amanco.

3.2 Verificación de flujo incompresible y características del fluido en el circuito

Se analizará si el flujo de aire presenta comportamiento no compresible o débilmente compresible empleando la **Ecuación 1**, usando los valores máximos definidos en la sección de alcances y limitaciones del presente proyecto, esto para poder tener certeza de que la información teórica recopilada en la sección del marco teórico es válida. Además, de las **Ecuaciones 2, 3, 8 y 17** se determinará la temperatura de estancamiento, la razón de masa del fluido, el número de Reynolds y el peso específico del aire, respectivamente.

3.3 Material filtrante para proceso experimental

Para el proceso experimental se emplearán cuatro tipologías de materiales filtrantes inertes principales con dimensiones geométricas tales que permitan variar el grado de porosidad del filtro. Se emplearán dos tipos de esferas, una de vidrio clásico con un diámetro de $16,320 \pm 0,017$ mm y la otra cerámica con un diámetro de $6,180 \pm 0,017$ mm. Los dos restantes materiales son polímeros fabricados con AC-ACETAL POM, los cuales presentan una geometría cilíndrica con un diámetro de $6,480 \pm 0,017$ mm y un largo de $12,350 \pm 0,017$ mm el primero; mientras el segundo un diámetro de $16,080 \pm 0,017$ mm y un largo de $16,420 \pm 0,017$ mm (datos de medición se encuentran en **Anexo A**).

Se aprecia en la **Figura 8** el material filtrante de vidrio clásico con un diámetro de $16,320 \pm 0,017$ mm (**8.A**), el cerámico de diámetro de $6,180 \pm 0,017$ mm (**8.B**), el

cilindro polimérico fabricado con AC-ACETAL POM con un diámetro de $6,480 \pm 0,017$ mm y un largo de $12,350 \pm 0,017$ mm (8.C) y el cilindro polimérico fabricado con AC-ACETAL POM con un diámetro de $16,080 \pm 0,017$ mm y un largo de $16,420 \pm 0,017$ mm (8.D):

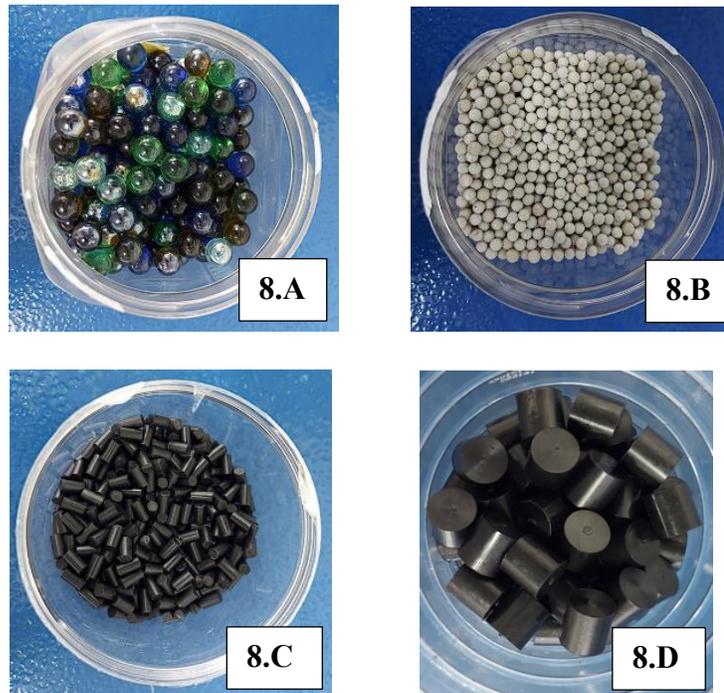


Figura 8. Material filtrante para experimentación.

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Optimización, experimentación y contraste con cálculos teóricos del circuito de prueba

En el sistema experimental original (**Figura 7**) existen tres manómetros, dos con escala máxima de 30,0 inH₂O y resolución de 0,5 inH₂O empleados en la entrada y salida del filtro; y uno en la alimentación del circuito de prueba con una escala máxima 15,0 psi y resolución de 0,1 psi. Para optimizar el circuito de prueba se cambiará el manómetro de alimentación por uno de escala máxima de 30,0 inH₂O y resolución de 0,5 inH₂O. En cambio, los de entrada y salida del filtro se sustituirán con un par de manómetros con escala máxima de 15,0 en un caso o de 10 inH₂O en un segundo caso, con resolución de 0,2 y 0,1 inH₂O, respectivamente, seleccionando

al par que mejor se adapte a los valores de la etapa experimental. En efecto, se realizarán ensayos variando el porcentaje de llenado del filtro y modificando la presión de alimentación de 1,0 hasta 15,0 inH₂O. El flujo en el circuito será controlado además mediante la apertura de la válvula de aguja SS-V4F8-5 que se instala en la salida del aire del circuito de prueba, la cual se completa con un goniómetro diseñado con resolución de 1° y un indicador en la manija, para leer el grado cierre/apertura, como se indica en la **Figura 10**. Además, se sustituirá el rotámetro de la marca Dwyer por el flujómetro marca Masterflex con número de tubo 014-96 y material del flotante de vidrio con una densidad de 2,53 g/mL, la cual presenta una escala máxima de 65,0 y resolución de 0,5 sin unidades. A partir de una tabla de ficha técnica del flujómetro Masterflex se podrán convertir los valores que se obtienen del instrumento por unidades de mL/min. En caso de necesitar una modificación del circuito para mejorar la obtención de datos experimentales para su posterior contraste, se realizarán las optimizaciones adicionales pertinentes con un análisis de tipo teórico.

Mejorado el circuito de prueba experimental, se seleccionarán los grados de apertura de la válvula de aguja y de llenado del filtro para la obtención de resultados que serán graficados para su análisis y comparación con la teoría. Con respecto al llenado del filtro con material filtrante, se empleará una balanza analítica marca Mettler Toledo con resolución de 0,00001 g para determinar la cantidad de masa de material filtrante utilizado en función del porcentaje de llenado del filtro. Además, se determinará el volumen del material sólido filtrante correspondiente a ese grado de llenado mediante el principio de Arquímedes, usando un Probeta marca Nalgene con una resolución de 10 mL u otro método de comparación de masa y densidad de la partícula.

Utilizando las dimensiones geométricas del circuito de pruebas, la porosidad volumétrica, el largo del filtro con el material filtrante, el tipo de material filtrante y la temperatura ambiente estándar, se emplearán las ecuaciones teóricas necesarias y recopiladas para poder estimar las pérdidas de presión y comportamiento fluidodinámico tanto del circuito de prueba como del filtro. Dichos valores serán comparados con los resultados experimentales.

4. Resultados y su Análisis

En la presente sección se brindan los resultados experimentales obtenidos y que tienen relación con los objetivos establecidos para el presente proyecto.

4.1 Medición geométrica del circuito de prueba

En la sección de **Anexo E** y **G** se encuentra el plano y dimensiones del circuito de prueba y la ficha técnica para tubería SCH 40 de Amanco, respectivamente. En función de emplear los valores importantes para las ecuaciones del marco teórico se reportan los siguientes datos:

- La diferencia de altura entre los manómetros de entrada y salida del filtro para la **Ecuación 7** es de $65,82 \pm 0,05$ cm.
- Existen 4 uniones T de 0,5 pulgadas, 4 uniones roscadas universal de 0,5 pulgadas, 1 válvula de bola para tubería de 0,5 pulgadas, 1 unión roscada universal de 1,5 pulgadas, 1 codo de 90 grados de 0,5 pulgadas y unión T reductora de 1,5 a 0,5 pulgadas.
- En la entrada del filtro se presenta una ampliación súbita de 0,5 a 1,5 pulgadas y en la salida del filtro una unión T reductora de 1,5 a 0,5 pulgadas.
- La altura del filtro llena de material filtrante es de $30,50 \pm 0,05$ cm.
- El diámetro interno de la tubería SCH40 0,5 pulgadas es de $15,70 \pm 0,08$ mm y un diámetro externo de $21,30 \pm 0,11$ mm.
- El diámetro interno de la tubería SCH40 1,5 pulgadas es de $40,90 \pm 0,20$ mm con un diámetro externo de $48,30 \pm 0,24$ mm.

4.2 Verificación de flujo incompresible y características del fluido en el circuito

Debido a que la sección transversal más pequeña en el circuito de prueba es la de la conexión del flujómetro (diámetro de $4,00 \pm 0,01$ mm), esta se empleará en la **Ecuación 1** para la obtención del número de Mach:

$$Ma = \frac{6,33 \frac{L}{min} * 0,001 \frac{m^3}{L} * \frac{1 min}{60 s}}{\pi * \frac{0,004^2}{4} \frac{m^2}{s}} = 0,024 < 0,3$$

Como el valor es mucho menor de 0,3, según literatura se puede indicar como flujo incompresible o débilmente compresible. Por lo que se puede emplear la literatura recopilada en el marco teórico para los cálculos del circuito de prueba, considerando que los valores que se obtendrán en el flujómetro son los que representan a todo el circuito de prueba.

Se usa la **Ecuación 2** para determinar el aumento de temperatura del flujo (velocidad más alta según alcances y limitaciones) en el caso se detenga por completo (por ejemplo, entrando al filtro) y sin liberar energía en forma de calor por las paredes del circuito:

$$T_0 = 25 \text{ °C} + 273,15 + \frac{\left(\frac{6,33 \frac{L}{min} * 0,001 \frac{m^3}{mL} * \frac{1 min}{60 s}}{\pi * \left(\frac{0,004}{2} \right)^2} \right)^2}{2 * 1007 \frac{J}{Kg * K}} = 298,18 K$$

Si se realiza la resta de T_0 con la temperatura ambiente de 298,15 K, se aprecia que el aumento es de 0,03 K, dando un valor despreciable, por lo que se puede descartar este aumento de temperatura en el sistema y un aumento de presión por la teoría de los gases ideales.

Posteriormente se desarrolla el cálculo para la densidad del fluido en estas condiciones máximas de velocidad y presión, usando la **Ecuación 17** para obtener el valor teórico:

$$\frac{0,54 \text{ psi} * 6894,76 \frac{Pascal}{psi} + 101325 \text{ pascal}}{29,2 \frac{N \cdot m}{N \cdot K} * 298,15 K} = 12,06 \frac{N}{m^3} \rightarrow \frac{12,06 \frac{N}{m^3}}{9,8 \frac{m}{s^2}} = 1,23 \frac{Kg}{m^3}$$

Si comparamos la densidad del aire a 1 atm ($1,18 \frac{Kg}{m^3}$) con el valor calculado en condiciones máximas de velocidad y presión, podemos observar que la diferencia es de $0,05 \frac{Kg}{m^3}$, por lo que también se puede despreciar el aumento de densidad del flujo de aire en el circuito de prueba.

Considerando una densidad constante, se puede emplear la **Ecuación 3** para determinar las velocidades promedio en función del área transversal:

$$\dot{m} = 1,18 \frac{Kg}{m^3} * V_{prom} * A_c$$

Debido a que el flujo es incompresible o débilmente compresible, el flujo másico aumenta conforme aumenta el caudal y no se ve involucrado el aumento de presión ya que la densidad no varía. Como el área transversal de la tubería se mantiene constante en el tramo considerado del circuito de prueba se cumple que, si aumenta el flujo másico, la velocidad del flujo también aumenta.

Sucesivamente se determina el número de Reynolds en correspondencia con la velocidad máxima por medio de la **Ecuación 8**. Se emplean los dos diámetros presentes entre los manómetros de entrada y salida del filtro, los cuales para las tuberías de PVC SCH 40 de 0,5 in y 1,5 in, son respectivamente:

$$Re = \frac{\frac{6,33 \frac{L}{min} * 0,001 \frac{m^3}{L} * \frac{1 min}{60 s}}{\pi * (\frac{0,0157}{2})^2} * 0,0157 m * 1,18 \frac{Kg}{m^3}}{1,849 * 10^{-5} \frac{Kg}{m * s}} = 546,02 < 2000$$

$$Re = \frac{\frac{6,33 \frac{L}{min} * 0,001 \frac{m^3}{L} * \frac{1 min}{60 s}}{\pi * (\frac{0,0409}{2})^2} * 0,0409 m * 1,18 \frac{Kg}{m^3}}{1,849 * 10^{-5} \frac{Kg}{m * s}} = 209,60 < 2000$$

Como el número de Reynolds es menor a 2000 para ambos tipos de tuberías, las pérdidas por fricción serán del régimen laminar.

4.3 Optimización, experimentación y contraste de cálculos teóricos del circuito de prueba

4.3.1 Modificaciones iniciales del circuito de prueba y desarrollo de mediciones experimentales

El circuito de prueba original presentaba un equipo de medición de la presión estática con resolución no adecuada, lo cual, al trabajar con presiones estáticas bajas (menores a 30 inH₂O), existían cambios que dificultaban su detección con esta instrumentación. Además, para el control de la alimentación de presión estática al circuito de prueba se tenía un manómetro con escala máxima de 15,0 psi, que servía para evitar sobrecargar el circuito de prueba y dañar los equipos de medición instalados. Por lo tanto, se decidió modificar los manómetros del circuito de prueba. En la **Figura 9** se presenta el cambio del manómetro de alimentación, de arriba hacia abajo (**9.A** y **9.B**),

de 15,0 psi (equivalente a 416 inH₂O aproximadamente) a uno de 30,0 inH₂O respectivamente, de igual forma los manómetros de entrada y salida de filtro siendo los de arriba (9.C y 9.E) de 30,0 inH₂O y los de abajo (9.D y 9.F) de 15,0 inH₂O (ver **Figura 7** para ubicación de los manómetros):

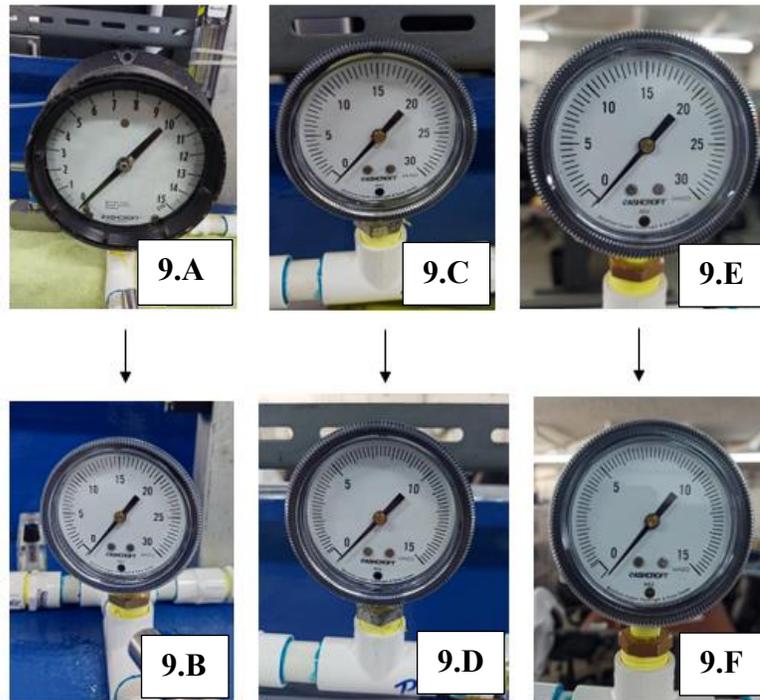


Figura 9. Cambio de los manómetros del circuito de prueba para la primera prueba piloto.

Fuente: Elaboración propia.

Otra mejora del circuito ha sido requerida para poder generar curvas específicas de presión en función del caudal ensayado, del orden de L/min usado en las instalaciones de Biogás. Además, se ha podido regular el valor del flujo del sistema en función de los más bajos valores de presión que era posible medir por los manómetros, que son del orden de inH₂O, de acuerdo a los valores típicos de las instalaciones reales. En efecto, debido a los valores muy reducidos de presión y flujo que era necesario ensayar, los manómetros de entrada y salida empleados en el filtro no lograban generar una indicación precisa respecto a la presión estática. Se ha mejorado el

circuito insertando una contrapresión en la salida del flujo mediante una válvula de aguja SS-V4F8-5, que reduce el caudal en el circuito de prueba. Para poder tener un mejor control del grado de apertura de esta válvula y poder tener un valor numérico, se ha instalado un goniómetro con un indicador metálico, permitiendo realizar aperturas cuantitativas. Se aprecia en la **Figura 10** el goniómetro elaborado para la válvula de aguja empleando una impresión y posteriormente un emplastado para una mejor flexibilidad de este (**10.A**), además de la instalación de la válvula con el indicador metálico (**10.B** y **10.C**):

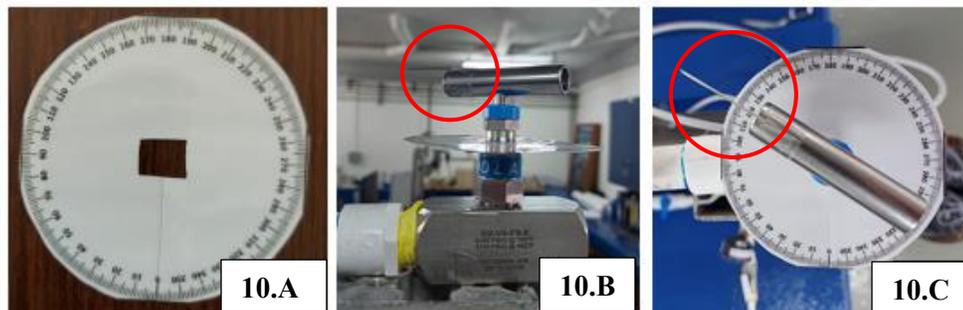


Figura 10. Goniómetro elaborado e instalación de válvula con indicador metálico (encerrado en círculo rojo).

Fuente: Elaboración propia.

El circuito de prueba existente presentaba un flujómetro marca Dwyer, el cual ocasionaba pérdidas de presión por fugas en el equipo y además con una menor sensibilidad, por lo tanto, se instaló un caudalímetro marca Masterflex con una escala máxima adimensional de $65,0 \pm 0,5$. Se aprecian en la **Figura 11** el flujómetro marca Dwyer en el lado izquierdo (**11.A**) y el caudalímetro marca Masterflex en el lado derecho (**11.B**) de la figura:

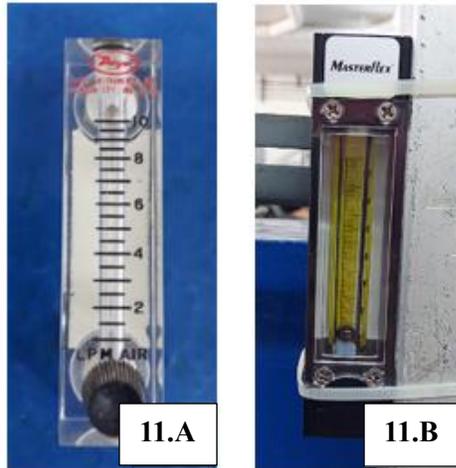


Figura 11. Cambio del flujómetro marca Dwyer por caudalímetro marca Masterflex.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 12** se presenta un material filtrante piramidal con una base de $5,990 \pm 0,017$ mm y altura de $6,440 \pm 0,017$ mm (datos de medición se encuentran en **Anexo A**), el cual se emplea para las primeras pruebas piloto para verificar las mejoras realizadas. Esto nos permite generar una resistencia en el medio poroso y una eventual caída de presión:

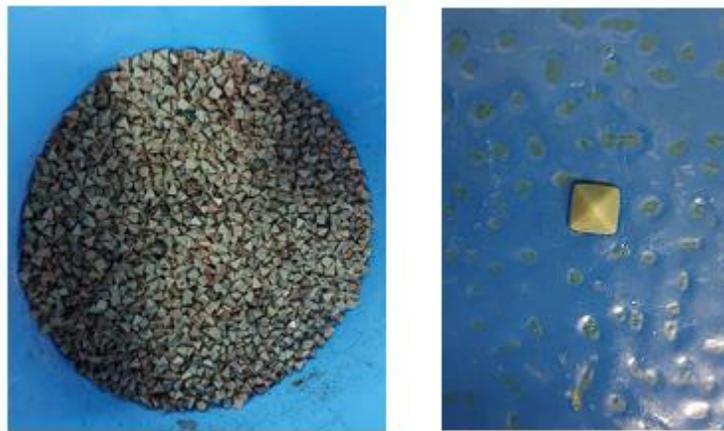


Figura 12. Material filtrante de forma piramidal para la prueba piloto.

Fuente: Elaboración propia.

Instalados los manómetros de 15,0 inH₂O en la entrada y salida del filtro, se desarrolla la prueba piloto con un llenado del 100% de material filtrante piramidal en el filtro. Se usan grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba de 75,0°, 120,0°, 165,0°, 210,0° y 255,0° ± 0,5°, con un aumento gradual de la presión de alimentación al circuito de prueba a partir de 1,00 ± 0,25 inH₂O con paso 1,00 ± 0,25 inH₂O. Se obtienen los resultados de la **Figura 13**:

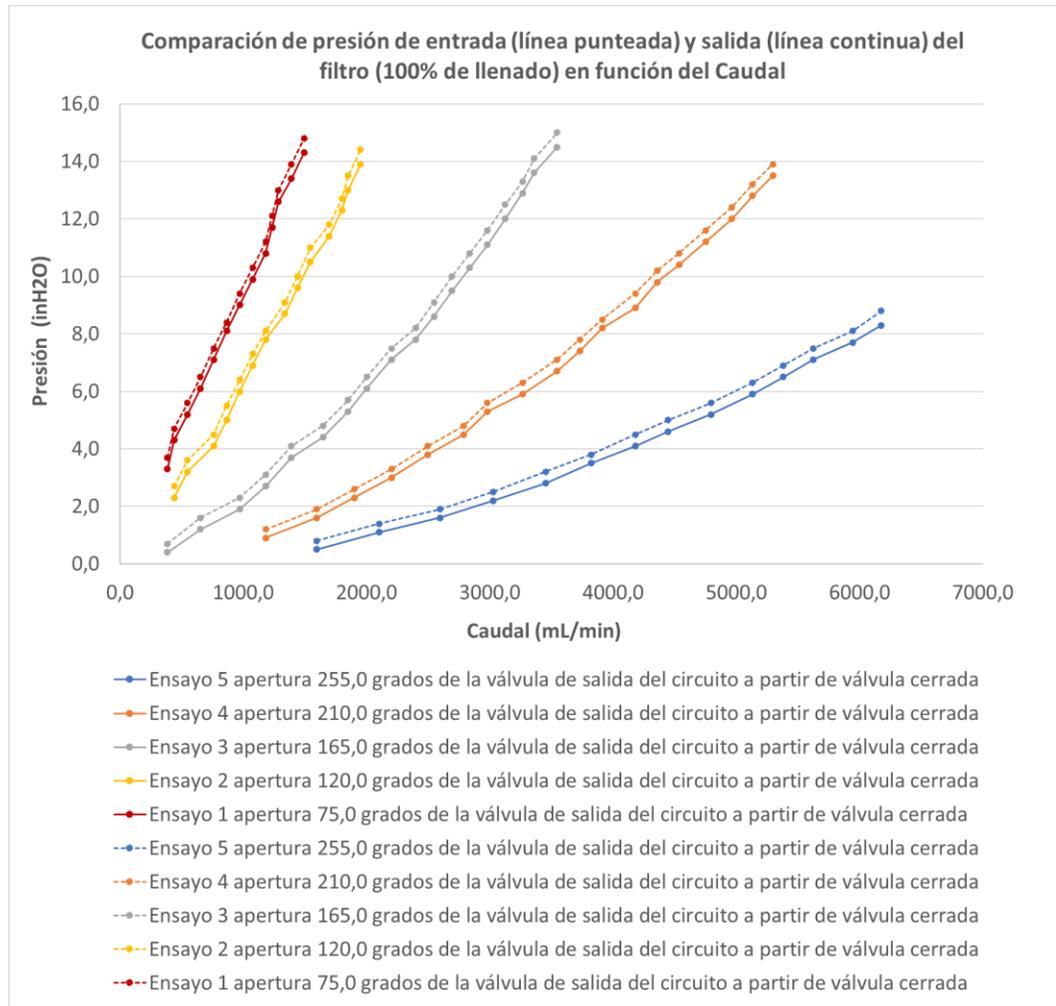


Figura 13. Gráfica de resultados de las presiones de entrada y salida del filtro en función del caudal con incertidumbre de resolución de manómetros ± 0,05 inH₂O e incertidumbre de válvula de salida de circuito ± 0,5°.

Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados experimentales con las **Ecuaciones 13, 14 y 15**, se observa que el aumento en el caudal, que corresponde a un aumento de la velocidad del fluido, conlleva un incremento en las pérdidas de presión (entrada menos salida del filtro) debido a la fricción y los cambios en la sección transversal presente en el circuito. Además, se observa un comportamiento exponencial cuadrático de la presión en la entrada y salida del filtro en relación con el caudal

Esta tendencia se alinea cualitativamente con la **Ecuación 5**, donde se aprecia que la presión estática (obtenida a través de los manómetros) se ve influenciada por el aumento en la velocidad del flujo (representada por el valor elevado al cuadrado en el circuito). Esta relación implica que, al aumentar la velocidad, la presión estática debe disminuir para lograr mantener la igualdad de la energía del fluido, lo cual concuerda con respecto a los resultados obtenidos.

Sucesivamente a la prueba piloto con los manómetros de 15,0 inH₂O, se realiza la sustitución de los manómetros de entrada y salida del filtro por los de 10,00 inH₂O, con el propósito de mejorar las lecturas de los valores de presión en el filtro.

En la **Figura 14** se muestran los manómetros de entrada y salida de filtro siendo los de arriba (**14.A y 14.B**) de 15,0 inH₂O y los de abajo (**14.C y 14.D**) de 10,00 inH₂O:

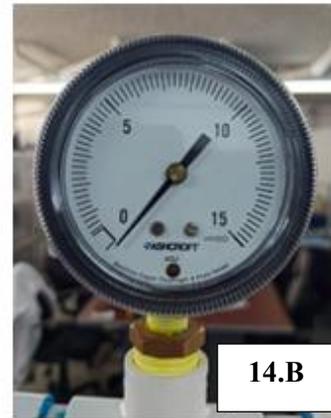


Figura 14. Cambio de manómetros de entrada y salida del filtro de 15 inH₂O a 10 inH₂O.

Fuente: Elaboración propia.

Instalados los manómetros de 10,00 inH₂O en la entrada y salida del filtro, se realizará la prueba piloto con un llenado del 100% de material filtrante piramidal en el filtro y grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba de 75,0°, 120,0°, 165,0°, 210,0° y 255,0° ± 0,5°, con un aumento gradual de la presión de alimentación al circuito de prueba a partir de 1,00 ± 0,25 inH₂O con paso 1,00 ± 0,25 inH₂O. Se obtienen los resultados en la **Figura 15:**

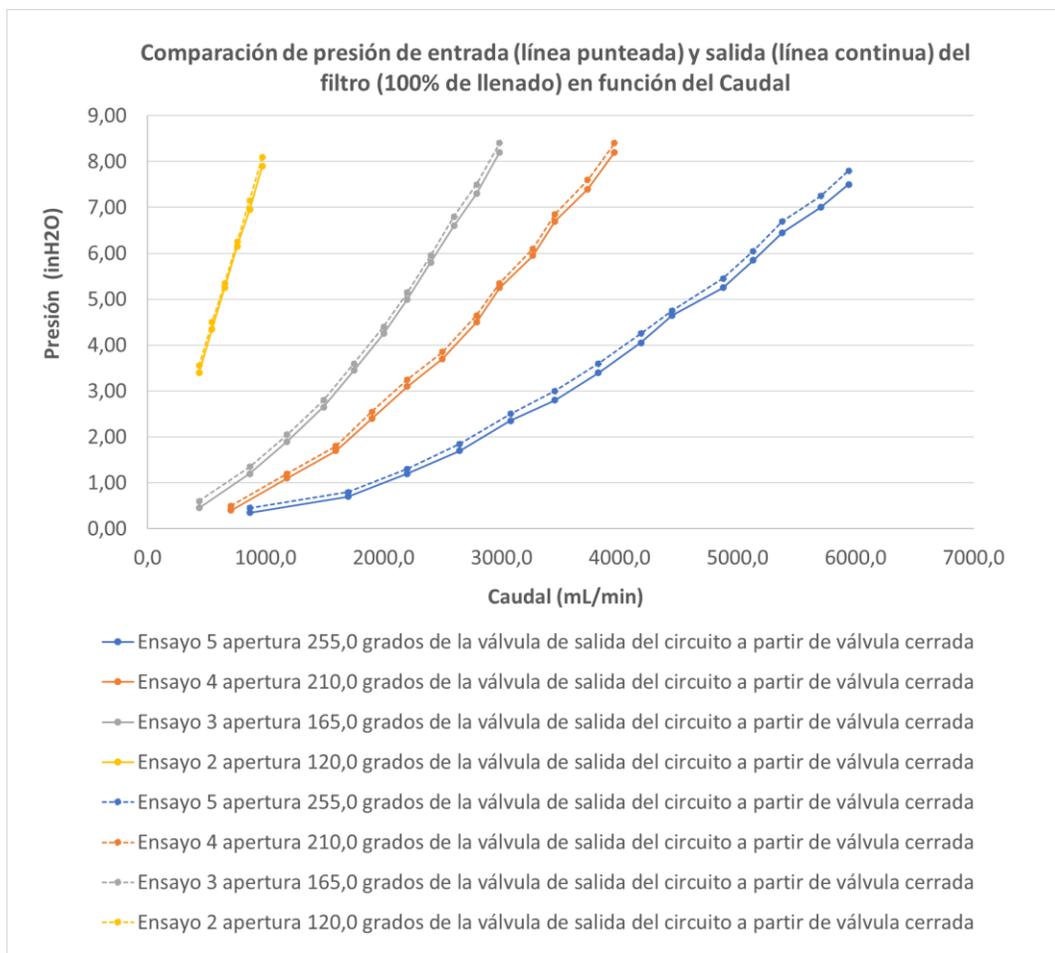


Figura 15. Gráfica de resultados de las presiones de entrada y salida del filtro en función del caudal con incertidumbre de resolución de manómetros $\pm 0,05 \text{ inH}_2\text{O}$ e incertidumbre de válvula de salida de circuito $\pm 0,5^\circ$.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 15** no se reportan los valores del caudal para el ensayo 1 con apertura $75,0^\circ$, ya que no existía indicación en el caudalímetro, además, no se trazan los valores recopilados cuando estos brindan alguna incoherencia. También no se reportan aquellos valores experimentales que no era posible medir con el caudalímetro. De manera comparativa existe una relación con el comportamiento presentado por los resultados de la **Figura 13**, por lo que la **Figura 15** concuerda con la teoría.

Debido a la mayor escala, los manómetros de 15,0 inH₂O permiten obtener mayor cantidad de puntos experimentales, evidenciando el comportamiento teórico de la pérdida de presión y curvatura cuadrática, confirmado sucesivamente por los manómetros de 10,00 inH₂O.

Una vez finalizada las pruebas piloto, se identifican y se eliminan las eventuales fugas de aire presentes en el circuito experimental de prueba.

En la **Figura 16** se muestra el circuito de prueba optimizado con los manómetros de 15,0 inH₂O de entrada y salida del filtro encerrados con color rojo, el de alimentación de 30,0 inH₂O con color verde y la válvula de aguja en la salida del circuito con color azul. El manómetro de alimentación nos permite determinar la presión de alimentación al sistema, mientras que para los valores de pérdida de presión del filtro y el circuito serán medidos con los manómetros encerrados en color rojo:

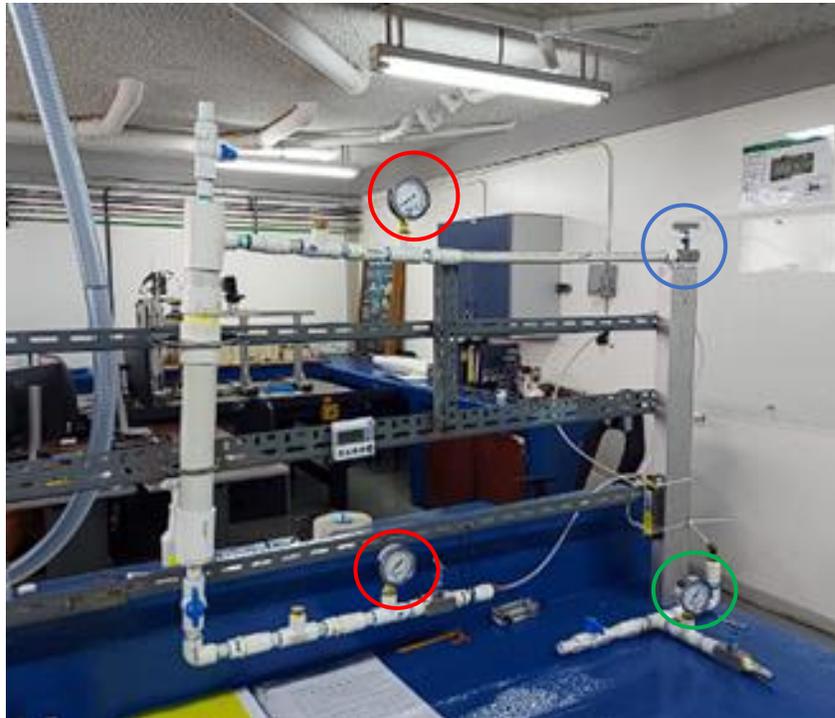


Figura 16. Circuito de prueba optimizado para ensayos experimentales.

Fuente: Elaboración propia.

Se realizan los ensayos empleando los materiales filtrantes de interés determinados para el proyecto con la selección de un grado de llenado del 100% y 0% para luego compararlos entre ellos. Además, se fija un aumento gradual de la presión de alimentación al circuito de prueba de 1,00 en $1,00 \pm 0,25$ inH₂O. Para los materiales filtrantes se usa la siguiente cantidad en gramos (ver **Anexo C** para cálculos de incertidumbre):

- para esferas de vidrio clásico, $594,14360 \pm 0,00002$ g;
- para esferas cerámicas, $661,31451 \pm 0,00003$ g;
- para cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro, $382,88460 \pm 0,00002$ g.

En la **Figura 17** se brindan los resultados de la presión de salida del filtro, al variar la tipología de material filtrante y con el filtro al 0% y 100% de llenado:

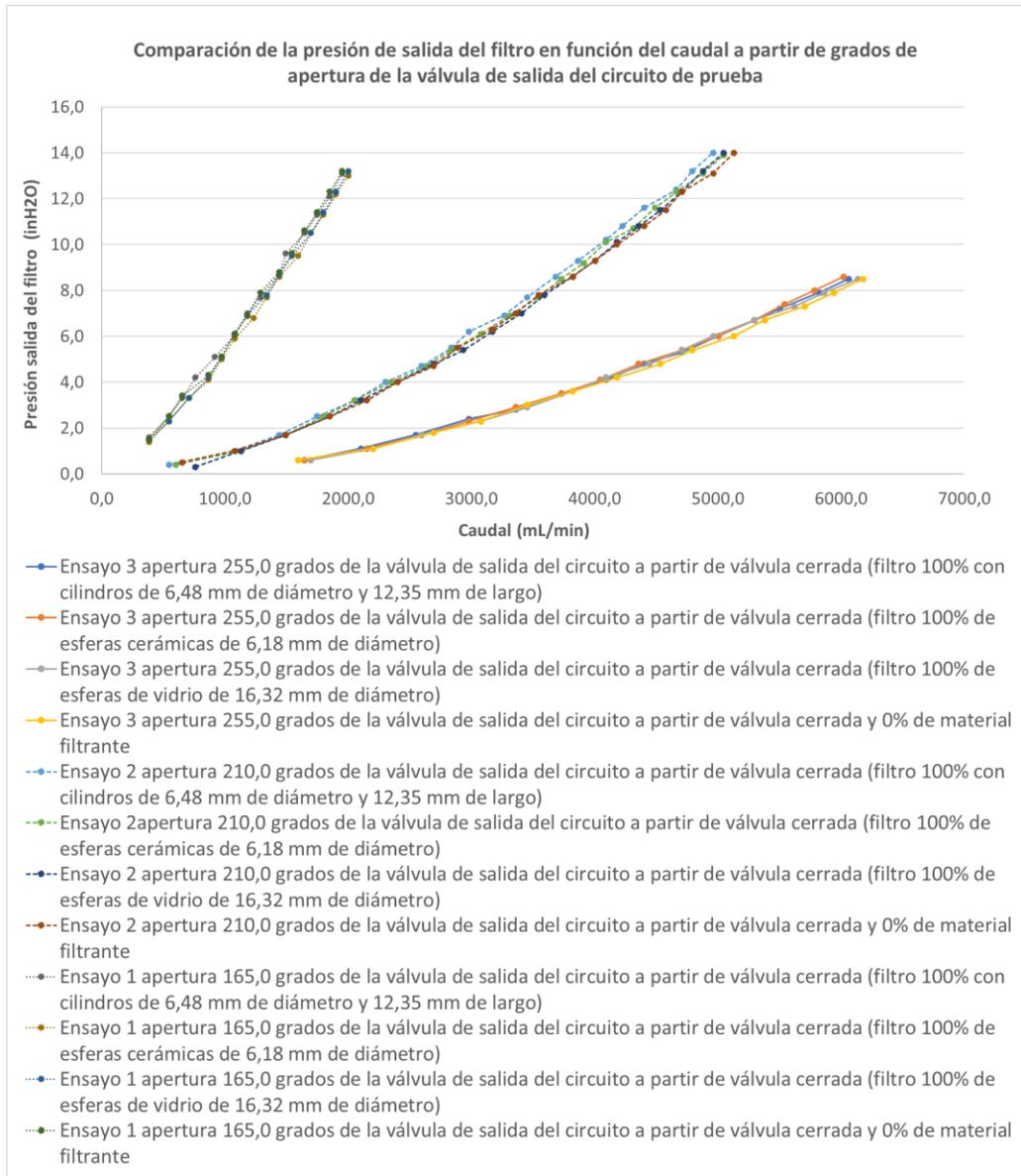


Figura 17. Presión de salida del filtro, al variar el material filtrante y en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O) y de la apertura de la válvula de salida del circuito (incertidumbre de resolución $\pm 0,5^\circ$).

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente la **Figura 18** traza los resultados de la presión de entrada del filtro variando el material filtrante y el filtro al 0% y 100% de llenado:

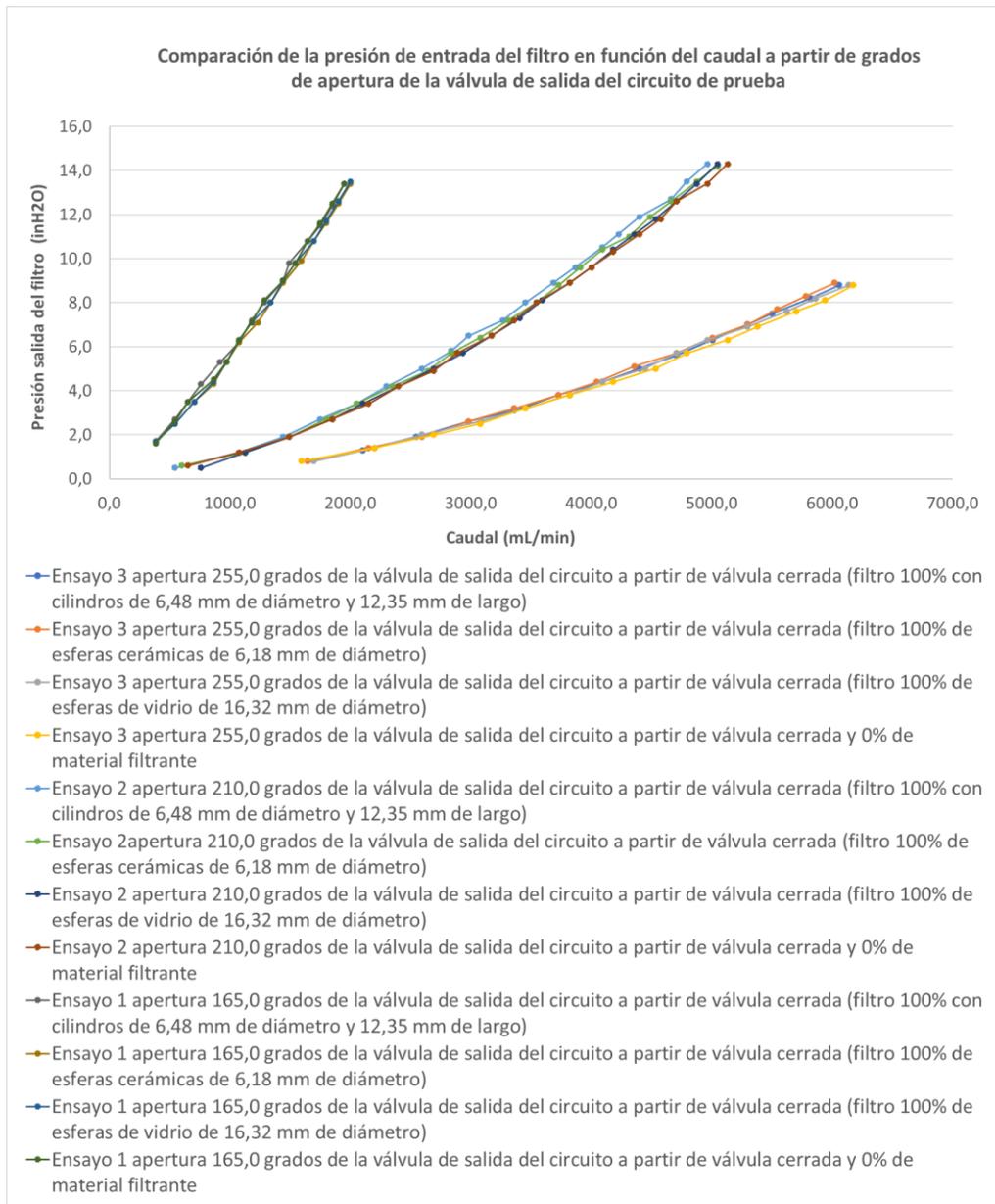


Figura 18. Presión de entrada del filtro, al variar el material filtrante y en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O) y de la apertura de la válvula de salida del circuito (incertidumbre de resolución $\pm 0,5^\circ$).

Fuente: Elaboración propia.

En esta etapa de experimentación no se realizaron los ensayos para los cilindros de un diámetro de $16,080 \pm 0,017$ mm y un largo de $16,420 \pm 0,017$ mm. De todas maneras, los resultados obtenidos en las **Figuras 17 y 18**, al variar el material filtrante, presentan una interposición entre cada valor de apertura de válvula (Ensayo 1, 2 y 3), con un 100% y 0% de llenado. Esto no permite distinguir los valores de pérdida de presión por el material filtrante y se puede asumir que se podría presentar un comportamiento similar también en el caso de los cilindros de mayor diámetro. Además, debido a la incertidumbre de $\pm 0,1$ inH₂O de los manómetros, se puede indicar que las diferencias entre las curvas obtenidas estarían dentro del rango de incertidumbre de resolución, con una similitud de resultados y con ello una pérdida de presión en el sistema debida a otros factores, no originados por el material filtrante. Para analizar estas pérdidas de presión se brindan en la **Figura 19** las curvas de entrada y salida del filtro en ausencia de material filtrante (0% de llenado):

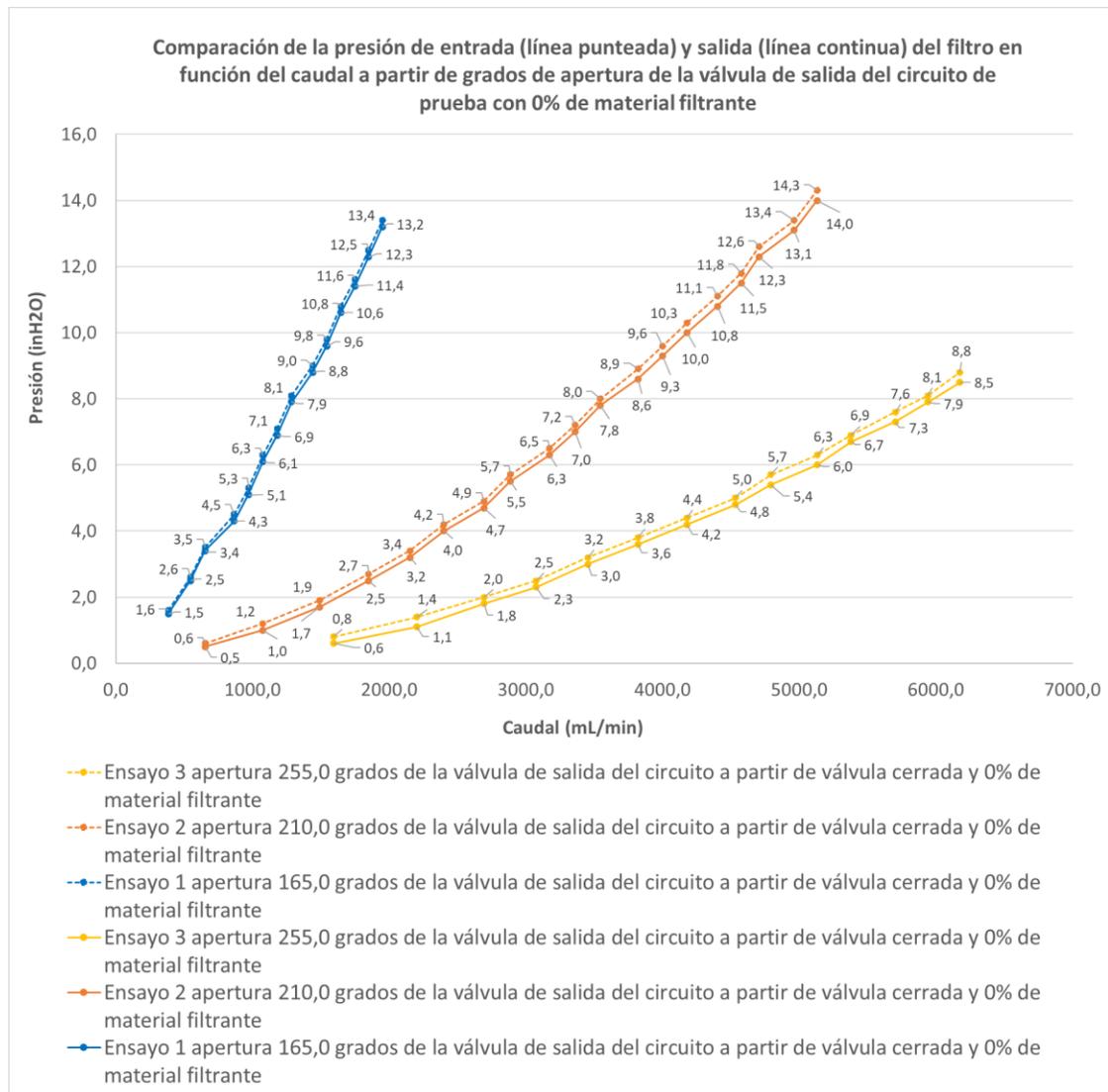


Figura 19. Resultados de las presiones de entrada y salida del filtro en función del caudal, para filtro con 0% de material filtrante (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O para el manómetro y $\pm 0,5^\circ$ para el goniómetro).

Fuente: Elaboración propia.

Se observa en la **Figura 19** que al aumentar el caudal aumentan las pérdidas de presión, esto debido a que las curvas de la presión de entrada y salida del filtro se van alejando entre ellas. El rango de pérdidas de presión conforme aumentaba el caudal van de $0,1 \pm 0,1$ a $0,3 \pm 0,1$ inH₂O. Para poder comprobar teóricamente las pérdidas de presión obtenidas en la **Figura 19** y determinar eventuales otras correcciones del

sistema experimental, se calculan las pérdidas de presión por la tubería empleando los resultados del filtro con 0% de llenado. En este caso se considerarán solamente las pérdidas en la tubería de 1,5 in, ya que el material filtrante no presenta pérdidas de presión.

Se desarrolla un cálculo teórico (ver en **Anexo A y B**) para las pérdidas de presión entre la entrada y la salida del filtro usando las **Ecuaciones 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15 y 16**. Para emplear las **Ecuaciones 13 y 14** se recurre a las **Figuras 20 y 21** para determinar la constante K, a partir de una regresión por medio de los datos obtenidos en las **Tablas 2 y 3** empleando un valor para D_2/D_1 de 2,5 ya que el valor calculado es de $2,6 \left(\frac{0,0409 \text{ m}}{0,0157 \text{ m}} \right)$.

Se traza, en la **Figura 20**, la curva de mejor ajuste utilizando una regresión basada en los valores de ampliación súbita de la **Tabla 2** y para D_2/D_1 igual a 2,5:

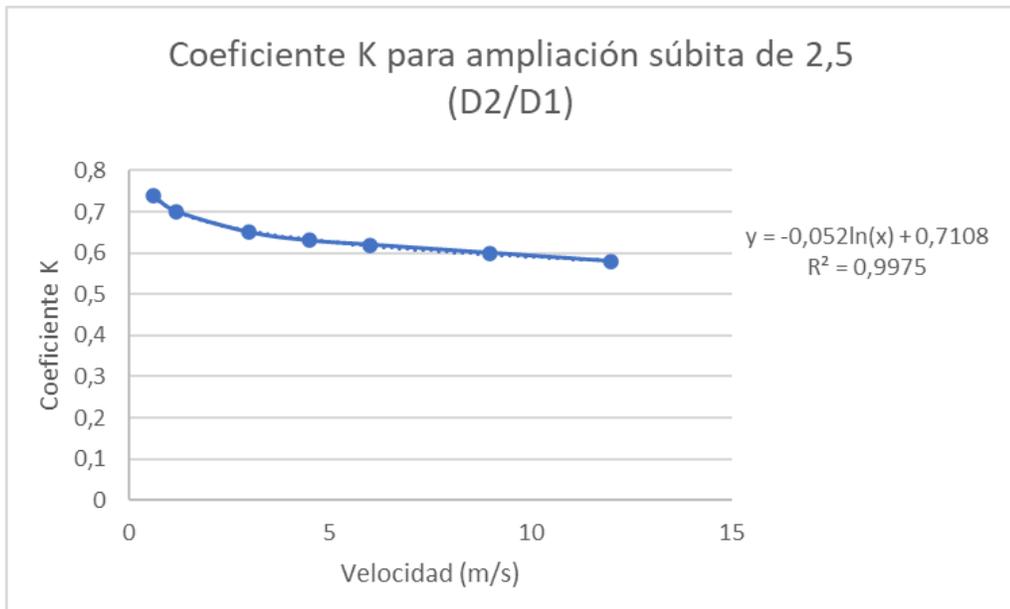


Figura 20. Curva con regresión de los valores obtenidos en la **Tabla 2**.

Fuente: Elaboración propia.

Se traza también, en la **Figura 21**, la curva de mejor ajuste utilizando una regresión basada en los valores de contracción súbita de la **Tabla 3** para D_2/D_1 igual a 2,5:

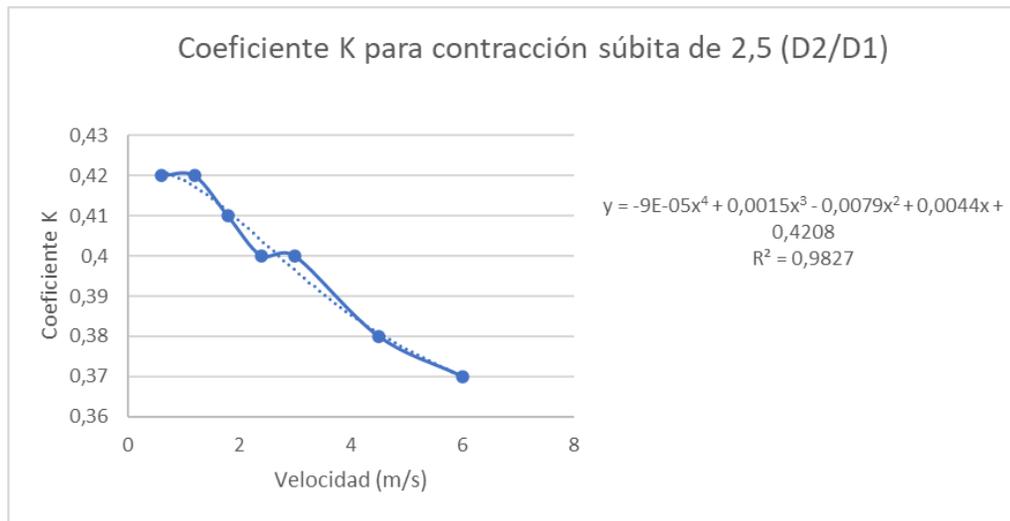


Figura 21. Curva con regresión de los valores obtenidos en la **Tabla 3**.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los valores de las pérdidas por accesorios para la **Ecuación 15** se emplearán los valores de la **Tabla 5** de manera conservadora, asumiendo régimen turbulento. Lo anterior justificado por el hecho que este régimen de flujo presenta mayores pérdidas y que existe una limitación de información respecto a las pérdidas generadas por los accesorios en régimen laminar. Además, las uniones roscadas, de tope o universales se considerarán con un coeficiente de 0,00 relacionándolo con el valor obtenido en la **Tabla 5**.

En la **Figura 22** se encuentran los resultados de las pérdidas de presión entre la entrada y salida del filtro usando la ecuación de Bernoulli y variando la apertura de la válvula situada al final del circuito de prueba.



Figura 22. Cálculos teóricos de la pérdida de presión entre la entrada y salida del filtro por ecuación de Bernoulli con 0% de material filtrante.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 22** se puede apreciar que las curvas obtenidas se interponen entre ellas, lo que significa que sin importar la relación de presión de alimentación con el caudal obtenido se obtiene el mismo comportamiento. Esto permite concluir que se puede realizar solo un ensayo con una apertura de la válvula en específico, ya que el comportamiento será el mismo. Además, las pérdidas de presión teóricas obtenidas son menores en comparación con los resultados trazados en la **Figura 19**, por lo que el sistema experimental está generando un resultado de pérdida de presión mayor entre la entrada y salida del filtro.

4.3.2 Nuevo dispositivo de filtración y desarrollo de pruebas experimentales

De acuerdo con los resultados de la sección anterior, se debe realizar una modificación adicional en el sistema experimental, que permita medir con más precisión las pérdidas generadas específicamente por el material filtrante y obtener las generadas por el circuito por separado. Por lo que se diseña un nuevo dispositivo de filtración, con un desmontaje del filtro más rápido y ergonómico y acercando, mediante dos nuevas conexiones, los manómetros en la entrada y en la salida del filtro, respectivamente. En la **Figura 23** se encuentra el circuito de prueba anterior encerrado en rojo (**23.A**), el subensamble optimizado con las conexiones de instrumentos de presión estática encerradas en rojo (**23.B**) y el circuito de prueba con el mismo subensamble instalado, encerrado en rojo (**23.C**).

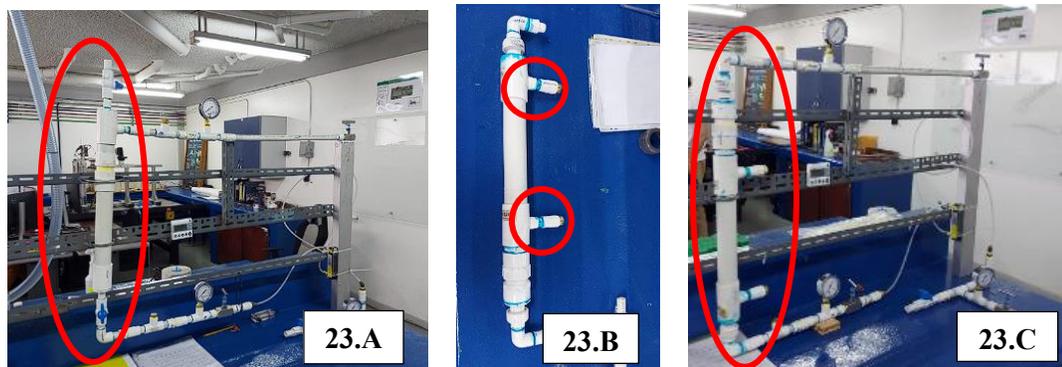


Figura 23. Optimización del circuito de prueba con nuevo subensamble del filtro.

Fuente: Elaboración propia.

Dentro del dispositivo de filtración de la **Figura 23.B** se coloca una malla circular polimérica impresa en 3D con PLA negro (**Figura 24**), de diámetro igual a 48,3 mm y altura de 10,0 mm, con poros cuadrados de lado de 0,4 mm. La malla se posiciona al inicio del filtro, justo después de la primera conexión del manómetro, con el propósito de retener al material filtrante.



Figura 24. Instalación de la malla polimérica de PLA para retención del material filtrante.

Fuente: Elaboración propia.

En el dispositivo de filtración se instalan los manómetros de 10,00 inH₂O en las dos entradas mostradas en la **Figura 23.B**. Posteriormente, se realiza la verificación de los manómetros empleados e instalados para determinar si estos funcionan correctamente debido a que los resultados obtenidos en la **Figuras 19** presentan discrepancias con la **Figura 22** respecto a las pérdidas de presión. Cuando se desenrosca la carátula a los manómetros de 15,0 y 10,00 inH₂O, se aprecia que la aguja indicadora se mueve conforme se va removiendo, por lo que genera alteraciones en el manómetro y con ello errores de medición. Por lo tanto, se procede a remover las caratula totalmente y calibrarlos para que la aguja indicadora se mantenga en el rango que establece el fabricante. En la **Figura 25** se aprecia el circuito de prueba con los manómetros instalados, los cuales en la entrada y salida del filtro están encerrados de color rojo, la entrada y salida del circuito están encerrados de color verde y el manómetro de alimentación del circuito está encerrado de color azul.

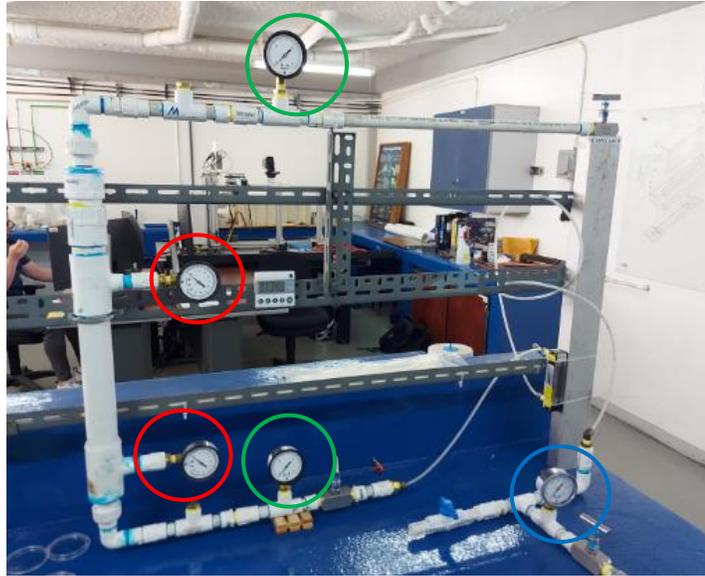


Figura 25. Instalación y ubicación de los manómetros en el dispositivo de filtración.

Fuente: Elaboración propia.

En el **Anexo E** se encuentra el plano de las dimensiones de longitud del nuevo dispositivo de filtración de la **Figura 23.B**. Los valores requeridos para las ecuaciones investigadas en el marco teórico se reportan a continuación.

- La altura entre los manómetros de entrada y salida del filtro para la **Ecuación 7** es de $32,50 \pm 0,05$ cm, mientras que los manómetros de entrada y salida del circuito se encuentran a una altura de $74,19 \pm 0,05$ cm.
- Existen 4 uniones T de 0,5 pulgadas, 4 uniones roscadas universal de 0,5 pulgadas, 2 uniones de tope con rosca para tubería de 0,5 pulgadas, 1 unión roscada universal de 1,5 pulgadas, 2 codos de 90 grados de 0,5 pulgadas y 2 uniones T reductoras de 1,5 a 0,5 pulgadas. Los presentes accesorios se ubican entre el manómetro de entrada y de salida del circuito experimental.
- En la entrada del filtro se presenta una ampliación súbita de 0,5 a 1,5 pulgadas y en la salida del filtro una reducción súbita de 1,5 a 0,5 pulgadas.
- La altura del nuevo dispositivo de filtración disponible para la ubicación del material filtrante es de $28,50 \pm 0,05$ cm.

- El diámetro interno de la tubería SCH40 0,5 pulgadas es de $15,70 \pm 0,08$ mm, con un diámetro externo de $21,30 \pm 0,11$ mm.
- El diámetro interno de la tubería SCH40 1,5 pulgadas es de $40,90 \pm 0,20$ mm y un diámetro externo de $48,30 \pm 0,24$ mm.

A partir de los valores recopilados en las **Figuras 17 y 18** se desarrollan los cálculos teóricos (ver en **Anexo B**) empleando los datos de la **Figura 19**, para determinar las pérdidas de presión entre la entrada y salida del circuito. Se usan los resultados del ensayo 3, apertura de 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada y 0% de material filtrante. Además, se consideran las pérdidas en la tubería de 1,5 in. y los cálculos consideran los nuevos valores geométricos del circuito de pruebas de la **Figura 25**.

En la **Figura 26** se obtienen los resultados teóricos de pérdida de presión del circuito.

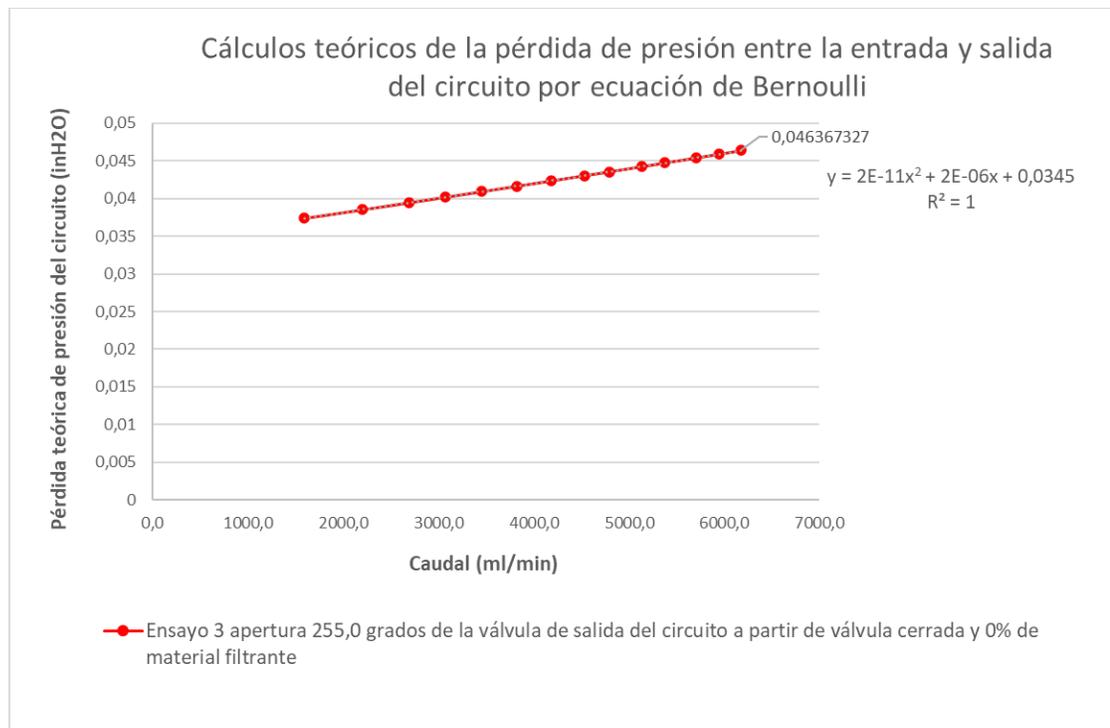


Figura 26. Cálculos teóricos de la pérdida de presión entre la entrada y salida del circuito usando la ecuación de Bernoulli, con 0% de material filtrante.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Nuevas pruebas experimentales

Usando el nuevo dispositivo de filtración, se lleva a cabo una nueva serie de pruebas experimentales variando la tipología del material filtrante (esferas y cilindros) y regulando la válvula de salida del circuito en 255,0 grados. Esto permite establecer un rango de presión-caudal adecuado para aplicaciones en flujo de Biogás y correspondiente a los rangos de medición de los instrumentos presentes en el circuito experimental.

Para determinar la porosidad de cada volumen de material filtrante ensayado en el interior del filtro, se mide primeramente el volumen de agua desplazado por este. En este caso se usa el método de Arquímedes, empleando la probeta de la **Figura 27**:



Figura 27. Probeta marca Nalgene con resolución de 10mL e incertidumbre de \pm 5ml, con material filtrante y agua en su interior.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos de volumen desplazado para cada material filtrante son, respectivamente:

- $225,00 \pm 7,07$ mL de esferas de vidrio clásico;
- $265,00 \pm 7,07$ mL esferas cerámicas;
- $270,00 \pm 7,07$ mL cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de diámetro menor;
- $215,00 \pm 7,07$ mL cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de diámetro mayor.

Empleando los valores geométricos recopilados del circuito con el subensamble optimizado se procede a calcular el grado de porosidad usando la **Ecuación 20** (ver en **Anexo C**):

- porosidad de esferas de vidrio clásico: $0,400 \pm 0,039$;
- porosidad de esferas cerámicas: $0,290 \pm 0,033$;
- porosidad de cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de menor diámetro: $0,280 \pm 0,033$;
- porosidad de cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de mayor diámetro: $0,426 \pm 0,039$.

Para implementar la **Ecuación 19** se necesita determinar el diámetro (d) según la forma geométrica, por lo que los valores del diámetro para esferas es el mismo. Para otra configuración se recurre a las **Ecuaciones 21 y 22** (ver en **Anexo A y C**). Los resultados son:

- diámetro de esferas de vidrio clásico: $16,320 \pm 0,017$ mm;
- diámetro de esferas cerámicas: $6,180 \pm 0,017$ mm;
- diámetro de cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de menor diámetro: $7,60 \pm 0,26$ mm;
- diámetro de cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de mayor diámetro: $16,08 \pm 0,18$ mm.

Para cada material filtrante ensayado se mide la masa mediante una balanza analítica marca Mettler Toledo con resolución de $0,00001$ g, y se obtiene lo siguiente (ver **Anexo C**):

- masa de esferas de vidrio clásico: $573,2030 \pm 0,00002$ g;
- masa de esferas cerámicas: $638,14880 \pm 0,00003$ g;
- masa de cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de menor diámetro: $382.81080 \pm 0,00002$ g;
- masa de cilindros poliméricos fabricados con AC-ACETAL POM de mayor diámetro: $305.44740 \pm 0,00002$ g.

Con los valores medidos del caudal de la **Figura 19** se desarrollan los cálculos teóricos de pérdida de presión para cada material filtrante, empleando las **Ecuaciones 23, 28, 29 y 30**. Se asume flujo no Darciano, siendo el número de Reynolds para medios porosos mayor a 10 (ver **Anexo C**). Los resultados se brindan en la **Figura 28**:

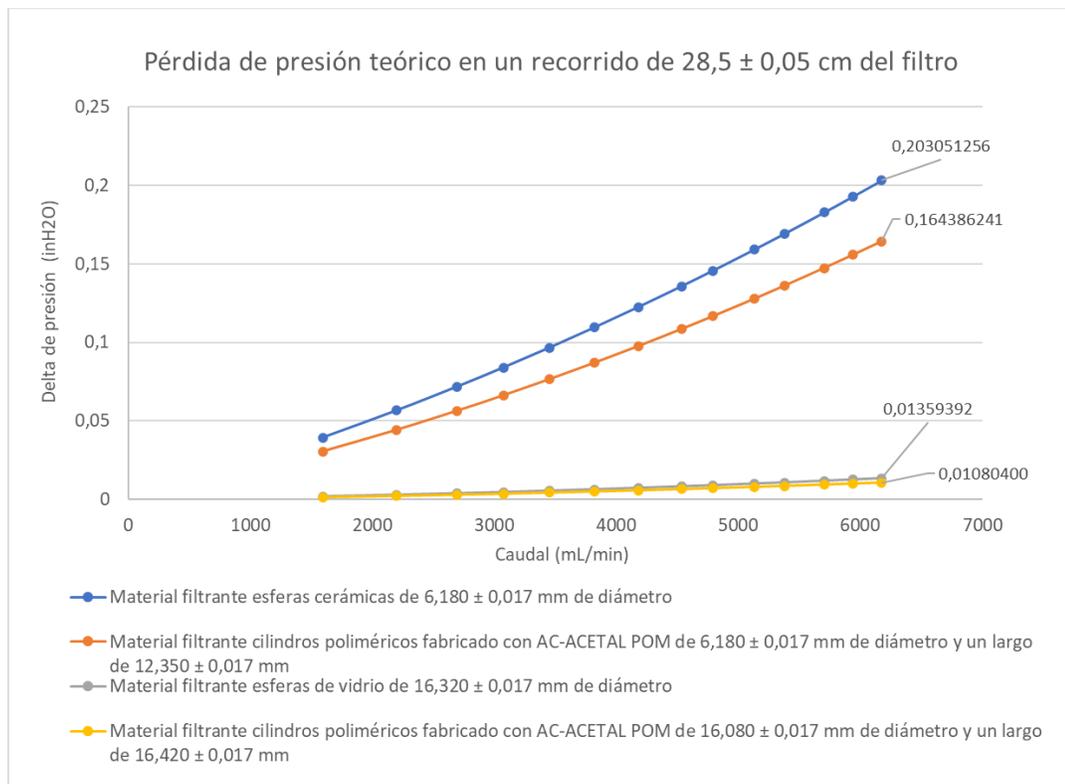


Figura 28. Pérdida de presión teórica con una distancia de $28,5 \pm 0,05$ cm en el filtro.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinada la pérdida de presión teórica se desarrollan las pruebas experimentales para medirla pérdida de presión tanto entre la entrada y salida del filtro como entre la entrada y salida del circuito. Se construyen los gráficos de las siguientes **Figuras 29, 30, 31, 32, 33 y 34** para un mejor análisis de los resultados.

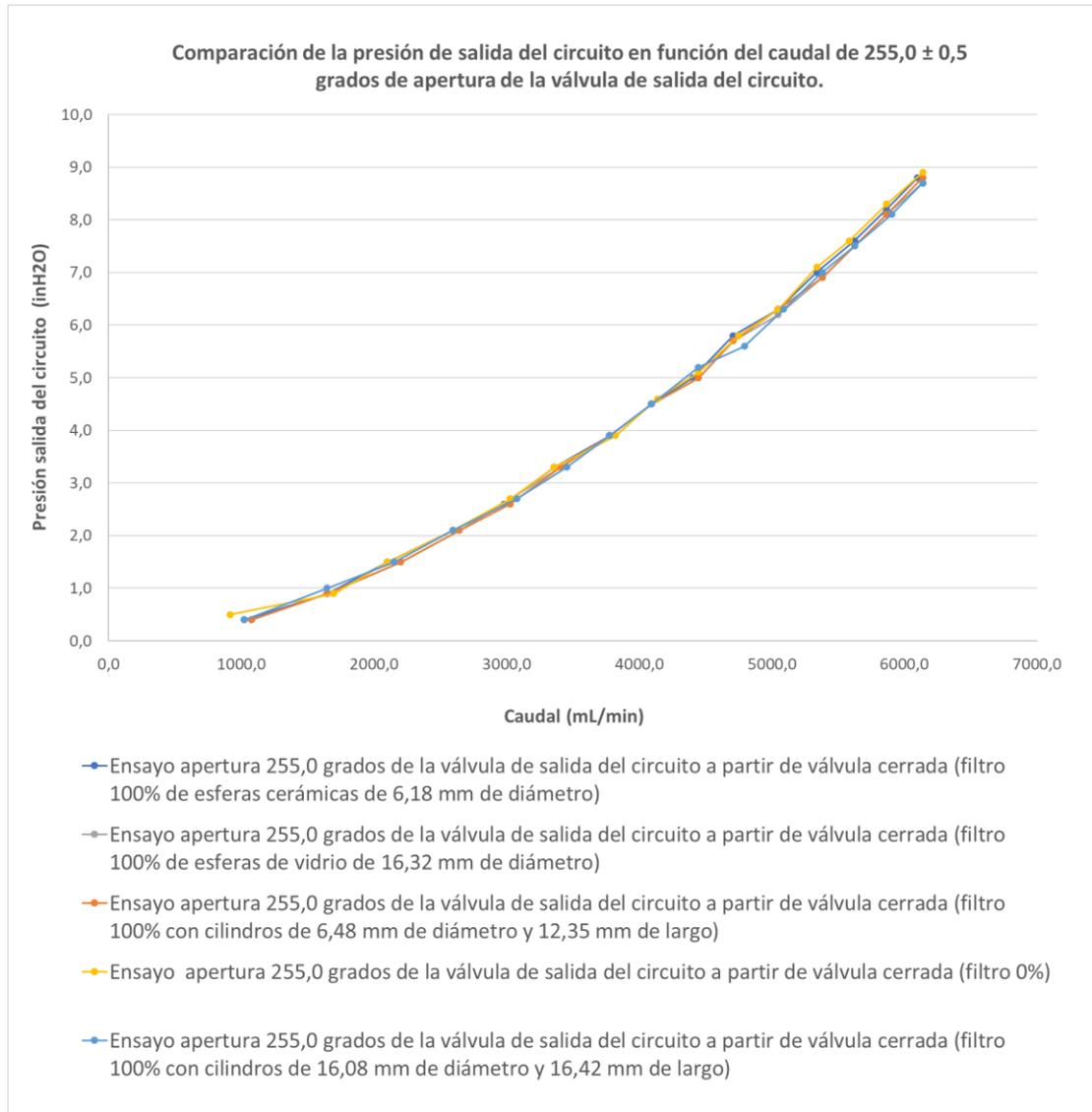


Figura 29. Presión de salida del circuito en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.

Fuente: Elaboración propia.

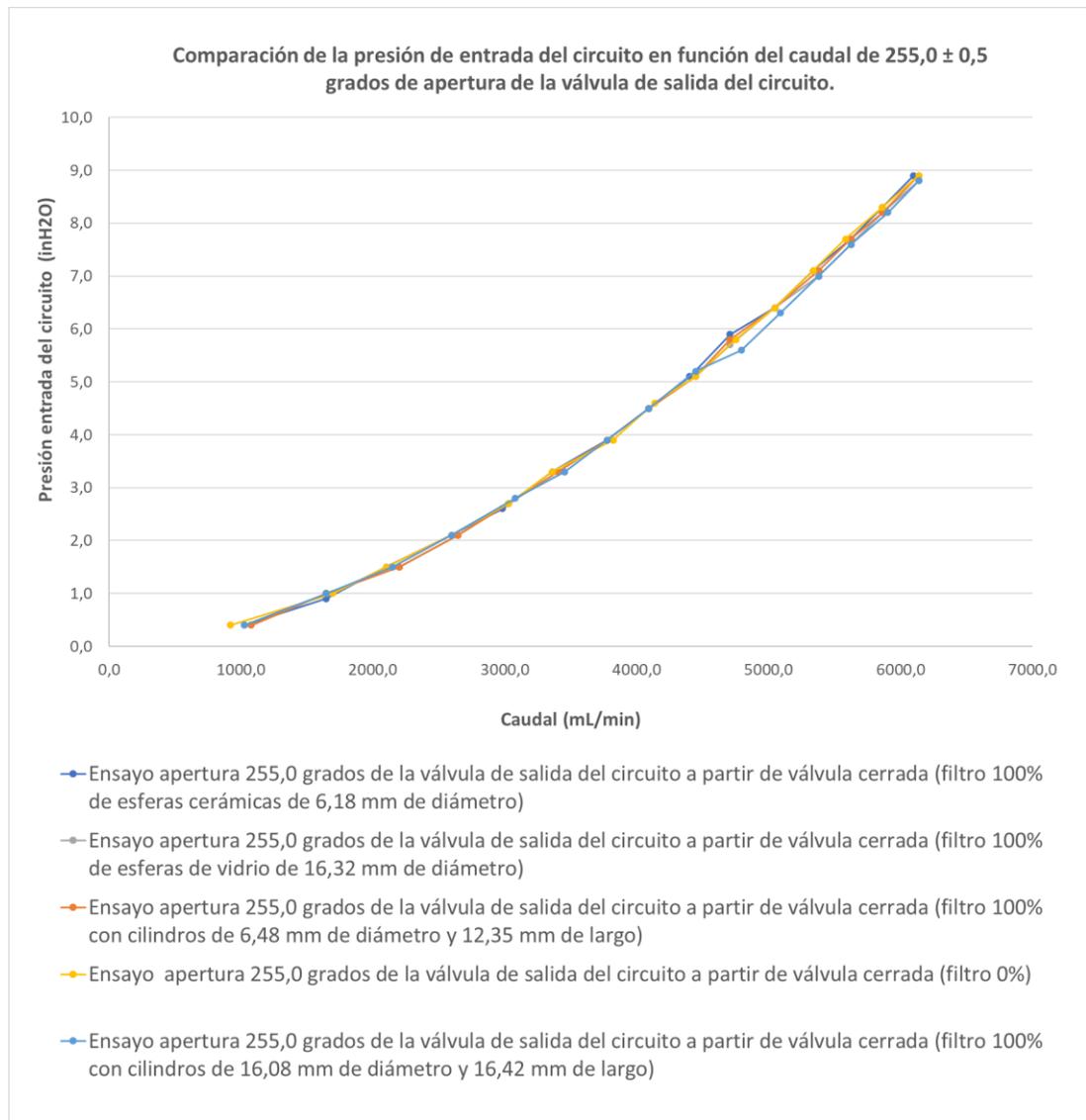


Figura 30. Presión de entrada del circuito en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.

Fuente: Elaboración propia.

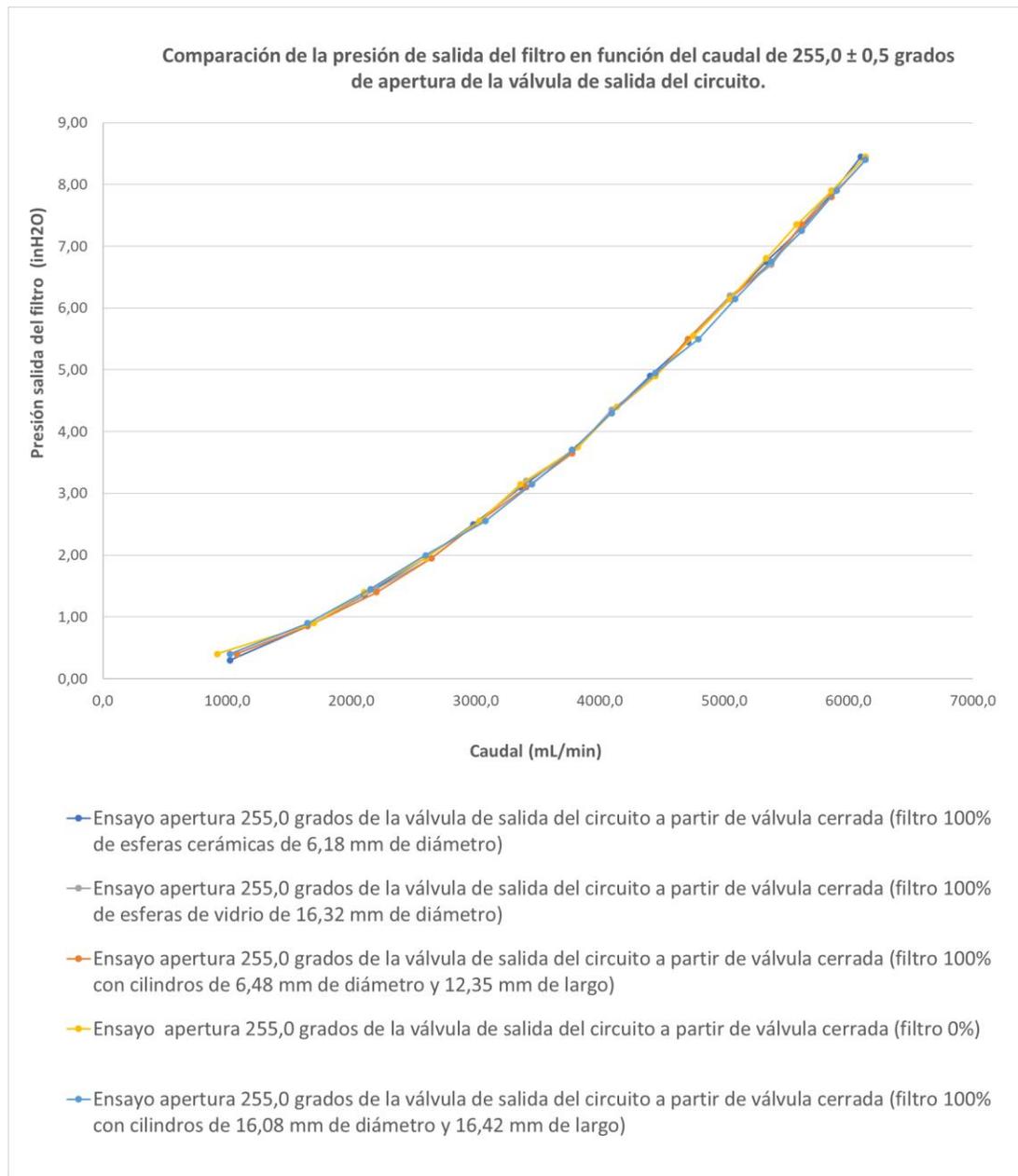


Figura 31. Presión de salida del filtro en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.

Fuente: Elaboración propia.

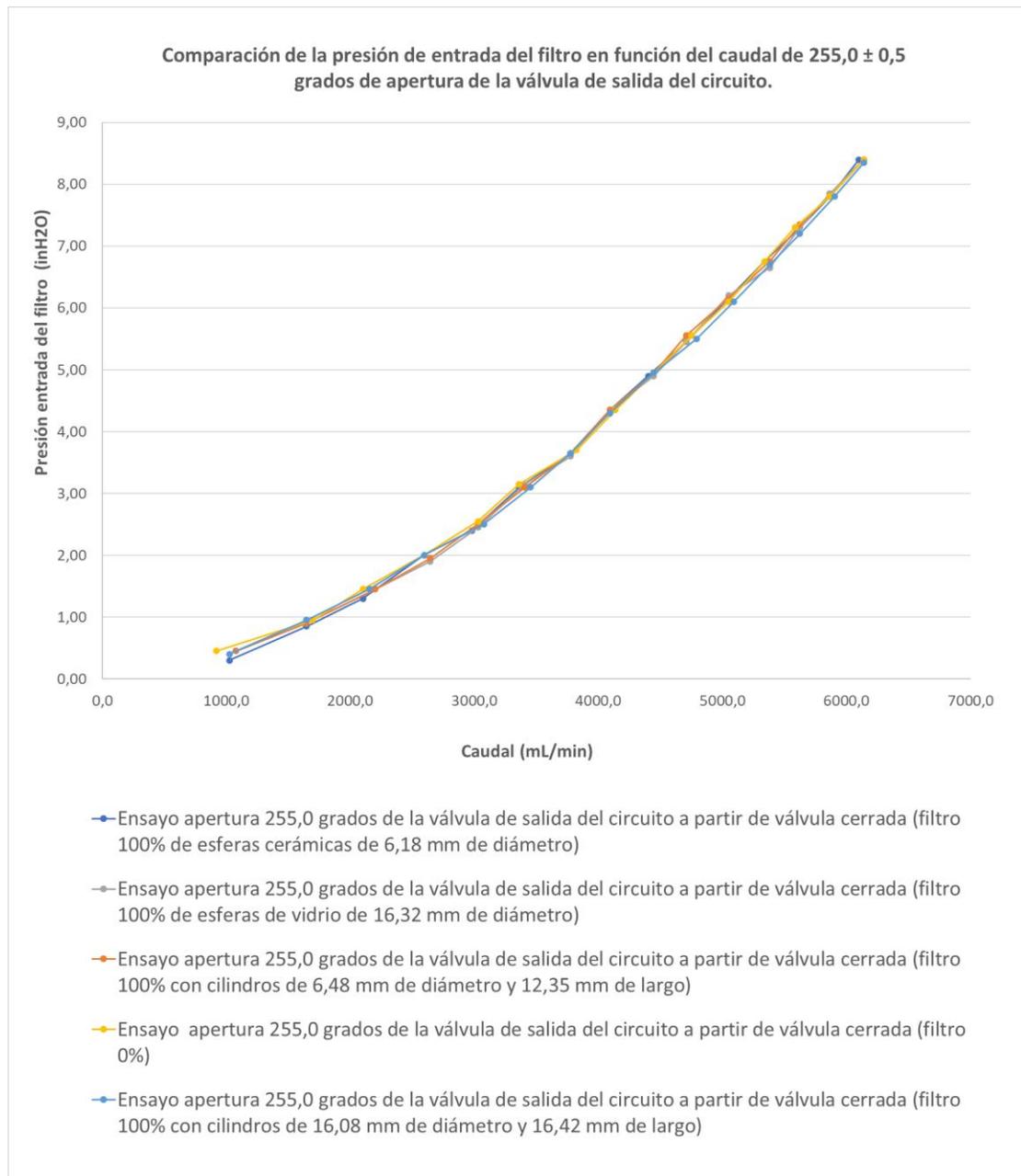


Figura 32. Presión de entrada del filtro en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.

Fuente: Elaboración propia.

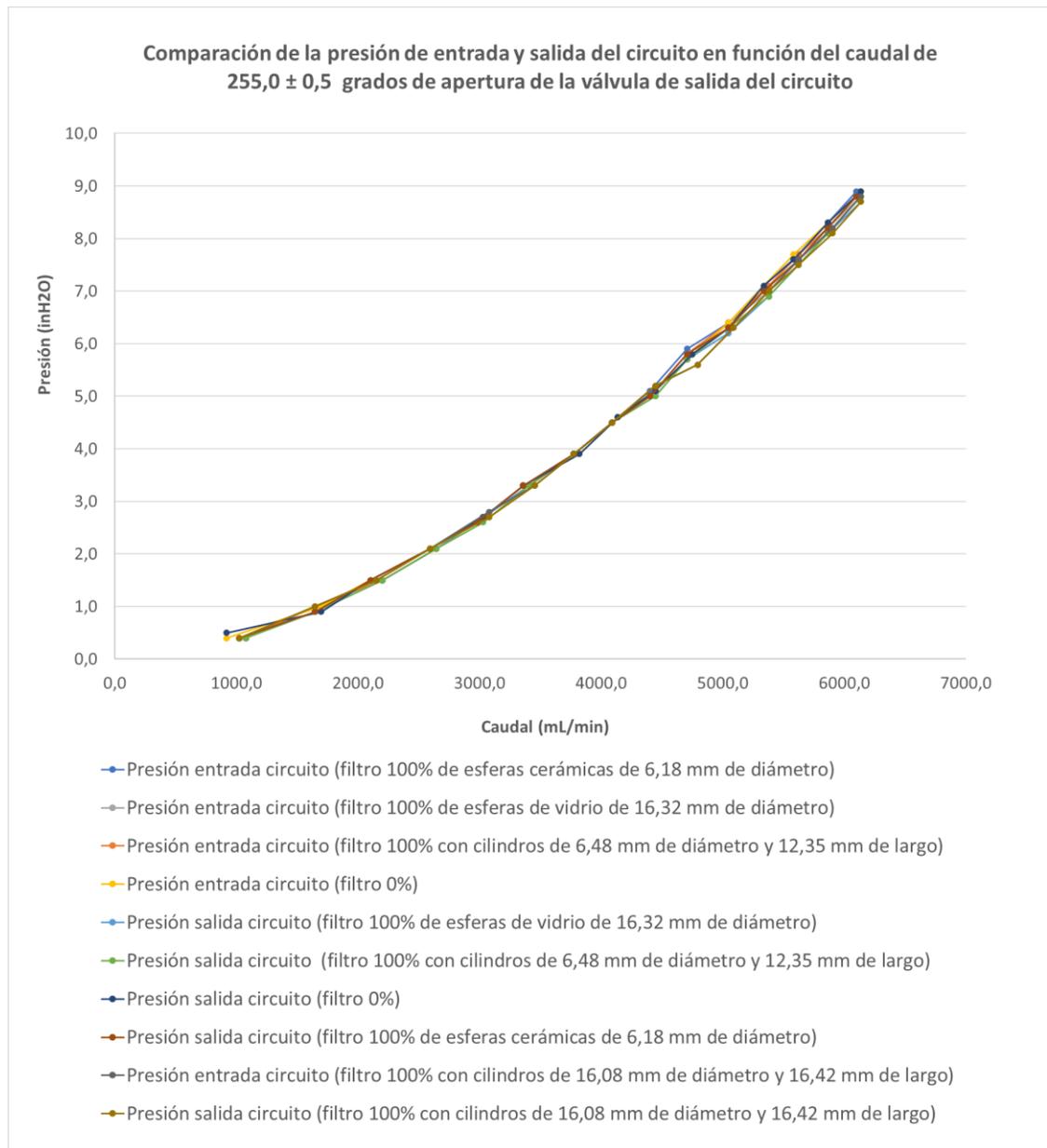


Figura 33. Presión de entrada y salida del circuito en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O), $255,0 \pm 0,5$ grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.

Fuente: Elaboración propia.

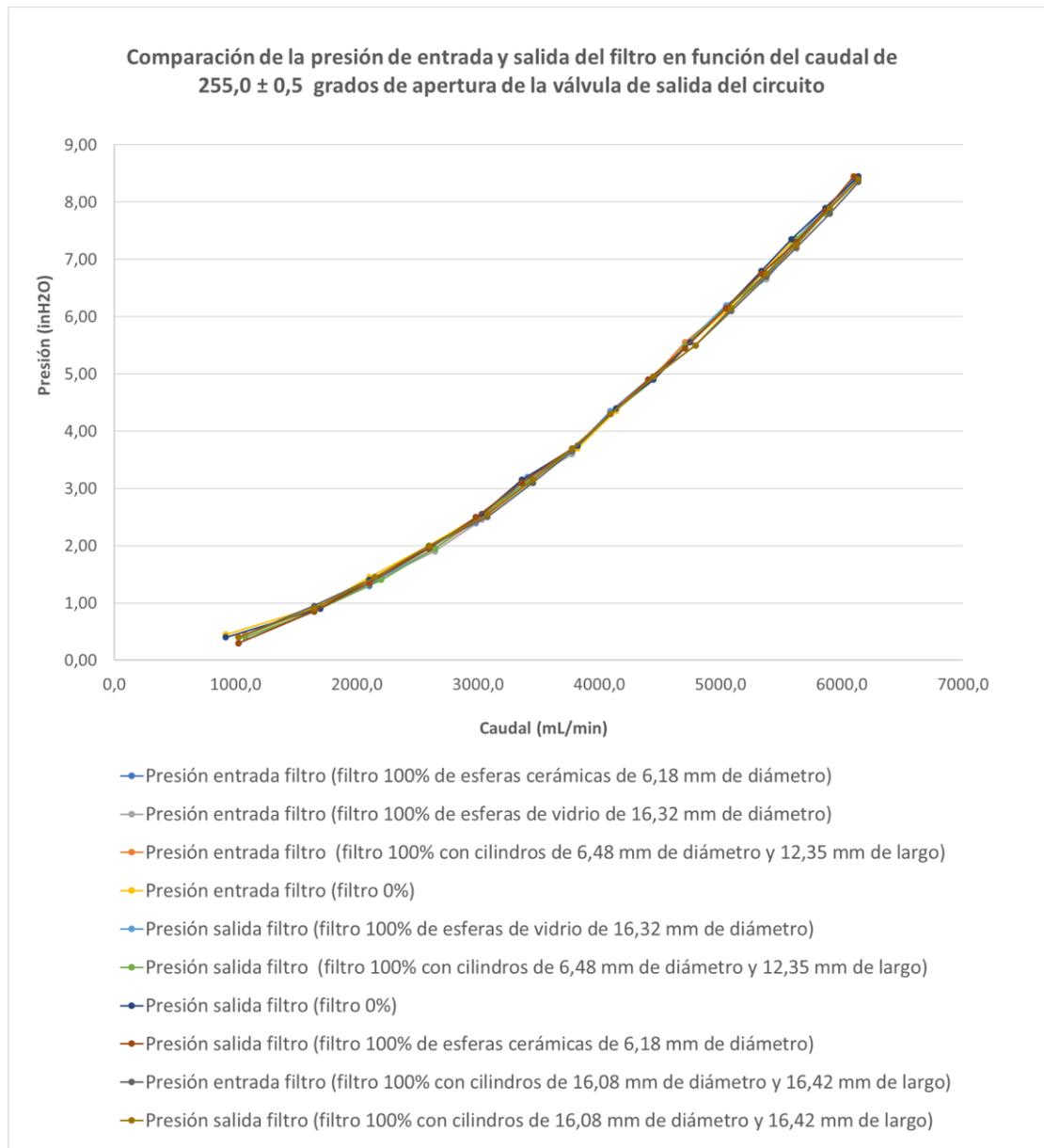


Figura 34. Presión de entrada y salida del filtro en función del caudal (incertidumbre de resolución $\pm 0,1$ inH₂O), 255,0 \pm 0,5 grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y cuatro diferentes medios filtrantes.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados experimentales de las **Figuras 29 y 30** indican que no existe variación apreciable entre la presión de entrada y salida del circuito, sin importar si presenta o no material filtrante de diferente geometría. Se puede indicar que la pérdida de presión

del circuito está dentro del rango de la incertidumbre de resolución de los manómetros empleados de 15,0 inH₂O, ya que el valor teórico máximo de la pérdida de presión es de aproximadamente 0,05 inH₂O según la **Figura 26**. Si analizamos la **Figura 33** vemos que las curvas de los datos se interponen entre ellas, por lo que la pérdida de presión en el circuito está dentro de la incertidumbre de resolución de los instrumentos empleados, que es de $\pm 0,1$ inH₂O. En efecto, este valor es muy cercano al valor determinado teóricamente de 0,05 inH₂O, que es bastante pequeño (equivalente a 0,125 KPa).

Los resultados teóricos de la **Figura 28** evidencian que existe una mayor pérdida de presión en el filtro cuando se disminuye el diámetro de las partículas o el grado de porosidad. Sin embargo, al comparar con los resultados experimentales en las **Figuras 31, 32 y 34** no se aprecia una variación entre las curvas experimentales variando el material filtrante o dejando el filtro vacío. En efecto, la pérdida de presión experimental está dentro del rango de la incertidumbre del equipo de medición, la cual en el caso del manómetro de 10,00 inH₂O es de $\pm 0,05$ inH₂O. Los valores obtenidos experimentalmente para las **Figuras 29, 30, 31, 32, 33 y 34** se brindan en el **Anexo D**. En conclusión, los resultados experimentales presentan una leve diferencia con los teóricos, estos últimos brindando una diferencia de presión teórica que varía entre 0.0 y 0.2 inH₂O, aproximadamente, en función de grado de porosidad del medio filtrante, como se puede apreciar en la **Figura 28** anterior.

Una variable que afectaría el valor calculado de la pérdida de presión en el medio poroso es el caudal, ya que si cambia localmente puede llevar a una variación de la presión en el filtro. En la **Ecuación 3 y 4** la masa que entra a una sección del circuito experimental es la misma que sale, no habiendo sumideros o fuentes de materia, sin embargo, si la densidad aumenta y el área transversal se mantiene constante, la velocidad debe bajar para mantener la relación de entrada y salida de masa. Para analizar la eventual variación de la densidad se usa la **Ecuación 1** que permite determinar si el valor del número de Mach calculado es mayor a 0,3. Se usa la velocidad máxima obtenida mediante la **Ecuación 25**, para las condiciones de 255,0

± 0,5 grados de apertura de la válvula de salida del circuito de prueba y el menor grado de porosidad. De acuerdo con estas condiciones:

$$Ma = \frac{V_i}{C} = \frac{0,078 \frac{m}{s}}{346 \frac{m}{s}} = 0,0008 < 0,3$$

Debido a que el número de Mach obtenido es menor a 0,3 se puede descartar el efecto del aumento de densidad del aire al pasar por el filtro.

La otra variable que puede modificar el cálculo de la pérdida de presión en el medio poroso es la viscosidad del aire ya que, al disminuir la viscosidad, disminuyen las pérdidas de presión de acuerdo con la relación de la **Ecuación 28**. Un eventual aumento de la temperatura en el circuito experimental incrementaría la viscosidad del aire, sin embargo, de acuerdo con la **Ecuación 28** anterior se necesitaría variar la viscosidad del aire 10 veces para poder obtener cambios de pérdida de presión del rango de 10^{-2} . Sin embargo, si verificamos en literatura las viscosidades reportadas en función a la temperatura se determina que deberíamos reducir la temperatura del aire de hasta 100 grados Celsius (Çengel & Cimbala, 2010), lo cual no ocurre en esta experimentación.

Finalmente, las últimas magnitudes que se usan para el cálculo de las pérdidas de presión en el medio poroso son las constantes K y B para el régimen Darciano y no Darciano, las cuales son función del grado de porosidad y tamaño de partícula del medio poroso, y que pueden presentar valores muy aproximados. Las mismas constantes podrían ser obtenida experimentalmente, sin embargo, al obtener datos que están dentro de la incertidumbre de resolución de los manómetros se dificulta obtener su estimación.

En conclusión, se puede afirmar que las eventuales perdidas de presión en el circuito experimental no superan el valor de 0,05 inH₂O en el filtro o de 0.2 inH₂O en el circuito en ausencia de material filtrante. Estos valores no son sobrepasados, pues no han sido detectados experimentalmente con los instrumentos de medición.

Con el propósito de verificar instrumentalmente una diferencia de presión en el filtro en condiciones más severas, se desarrollan unas últimas mediciones en correspondencia con un valor de porosidad del material filtrante aún menor. Los datos obtenidos se brindan a continuación.

4.3.4 Pruebas con material filtrante de menor porosidad

En la **Figura 35** se muestra el material filtrante compuesto por esferas de azúcar, seleccionado para efectuar pruebas experimentales en el dispositivo de filtración, en correspondencia con valores de porosidad menores que los ensayados anteriormente.



Figura 35. Material filtrante compuesto por esferas de azúcar para generar una menor porosidad en el dispositivo de filtración.

Fuente: Elaboración propia.

Las características de este material son:

- diámetro (d) de las esferas: $3,160 \pm 0,017$ mm;
- masa empleada de las esferas: $409,67660 \pm 0,00002$ g;
- masa de una esfera: $0,02398 \pm 0,00002$ g;
- volumen de una esfera: $0,0170 \pm 0,0017$ mL;

- porosidad empleando relación densidad entre masa empleada: $0,22 \pm 0,30$.

Debido a que el diámetro de las esferas es menor a 0,4 mm, se emplea otra malla para retener el material filtrante. Se usa una malla de acero inoxidable con un tamaño de poro cuadrado de 1,6 mm por lado y un grosor de 0,40 mm, la cual se dispone arriba de la malla anterior. En la **Figura 36** se aprecia la malla empleada.



Figura 36. Malla para retener el material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm.

Fuente: Elaboración propia.

Para el material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro, la **Figura 37** brinda la pérdida teórica de presión en el filtro, mientras que para el circuito los valores son los mismos de la **Figura 26**. Se evidencia una caída de presión en el filtro entre 0,5 y 2,0 inH₂O, en función del caudal. Además, se puede observar que para este material filtrante se obtiene una zona de régimen Darciano y posteriormente una no Darciano, pues el número de Reynolds para medios porosos calculado resulta ser mayor a 10 (ver cálculos en **Anexo D**).

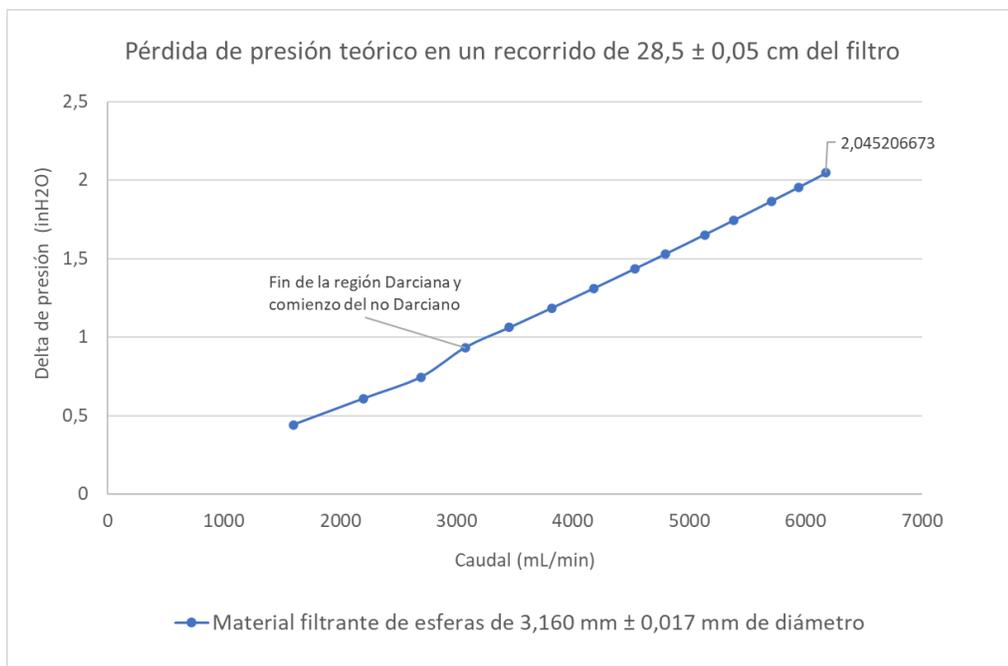


Figura 37. Cálculos teóricos de pérdida de presión en el filtro con material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro.

Fuente: Elaboración propia.

Las **Figuras 38 y 39** trazan los valores experimentales de las presiones del sistema experimental, donde primero se muestra la del circuito global, seguida del dispositivo de filtración, medidas por los manómetros, respectivamente.

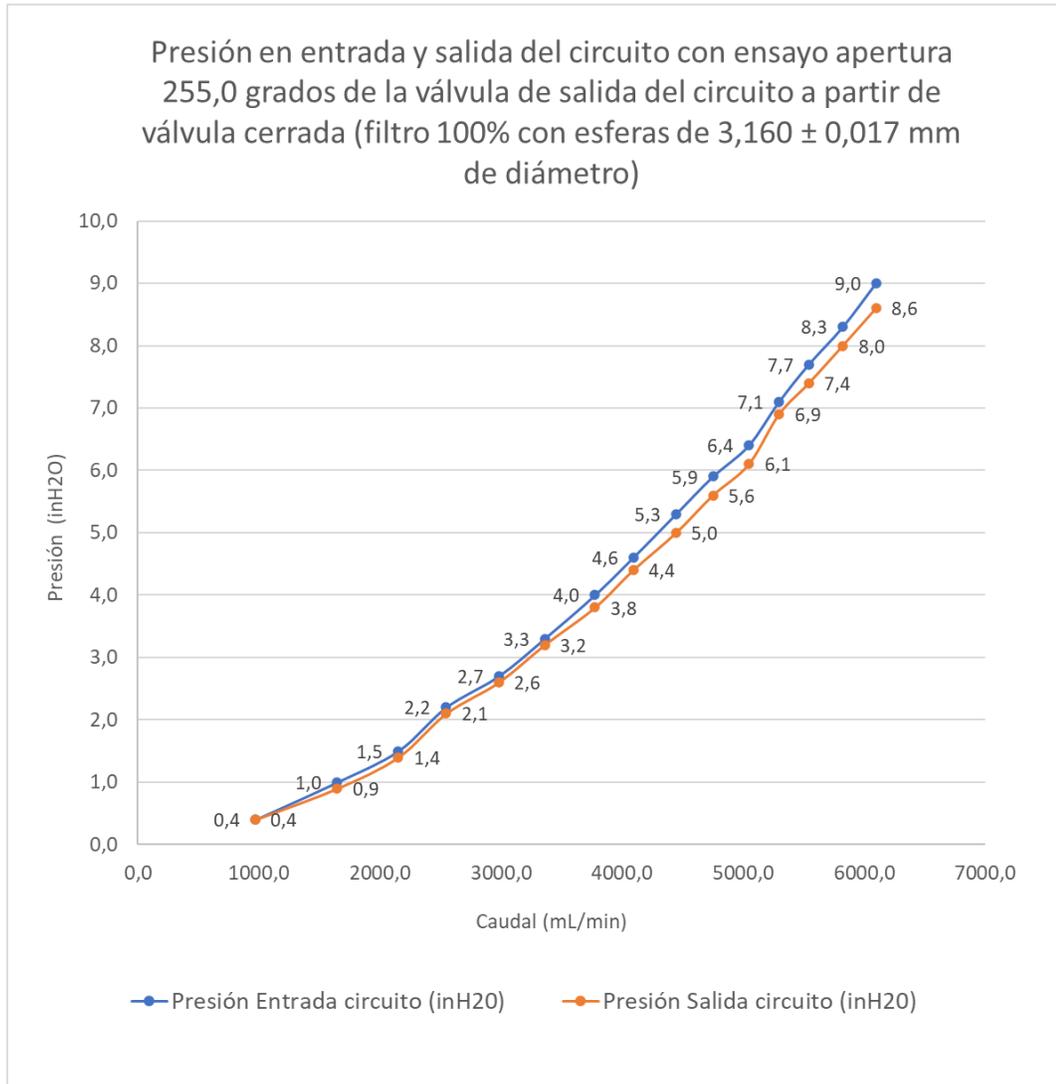


Figura 38. Presión de entrada y de salida en el circuito con material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro.

Fuente: Elaboración propia

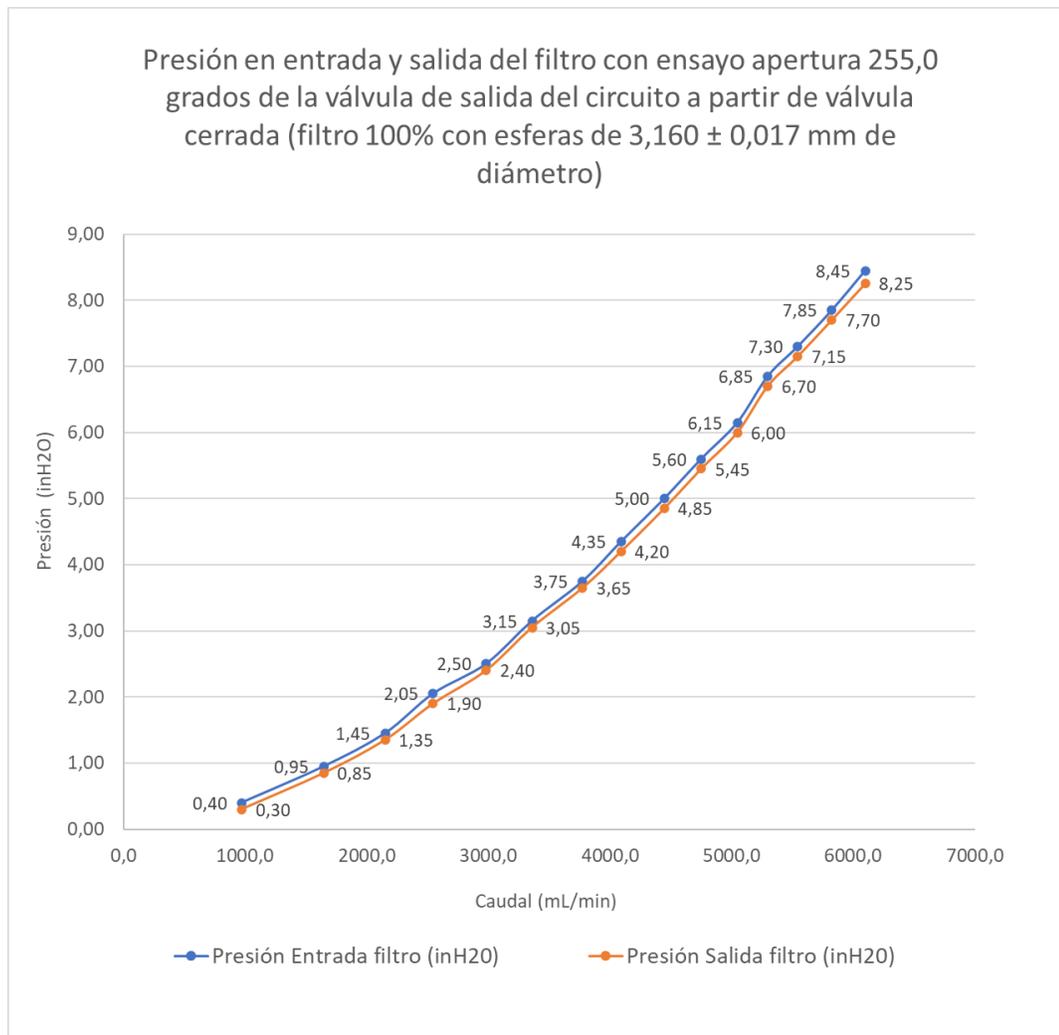


Figura 39. Pérdida de entrada y de salida del filtro en presencia de material filtrante esférico de $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 38** se aprecia que las diferencias de presión en el circuito van aumentando con el caudal desde un valor mínimo de 0 hasta un valor máximo de 0,4 inH₂O. En cambio, las pérdidas de presión en el filtro de **Figura 39** presentan una variación entre 0,1 y 0,2 inH₂O, también creciente con el caudal. Con respecto a las pérdidas de presión del circuito, se determina que las diferencias de presión están ocasionalmente dentro de la incertidumbre de resolución de los manómetros que es de $\pm 0,1$ inH₂O para cada instrumento. En el caso de las pérdidas de presión del filtro,

se miden diferencias muy frecuentemente mayores a la incertidumbre de resolución de los manómetros, donde para cada uno de ellos es de $\pm 0,05 \text{ inH}_2\text{O}$.

En la **Figura 40** se refigura lo que ocasiona la incertidumbre de resolución de los manómetros de $15,0 \text{ inH}_2\text{O}$, cuando el mesurando obtenido es por ejemplo de $0,2 \text{ inH}_2\text{O}$. La diferencia de presión se encuentra entre la incertidumbre global de los manómetros, así que la diferencia real podría llegar a ser menor, inclusive de $0,0 \text{ inH}_2\text{O}$, ya que el rango de incertidumbre contemplaría dicha diferencia.

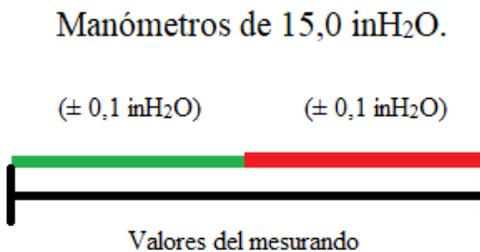


Figura 40. Rango de diferencia de la incertidumbre de resolución de los manómetros de $15,0 \text{ inH}_2\text{O}$.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la **Figura 41**, que se refiere a la incertidumbre de la medición efectuada para determinar la diferencia de presión en el filtro, el valor obtenido del mesurando es casi siempre mayor o igual que el rango de incertidumbre global de los dos manómetros, que es de $0,1 \text{ inH}_2\text{O}$.

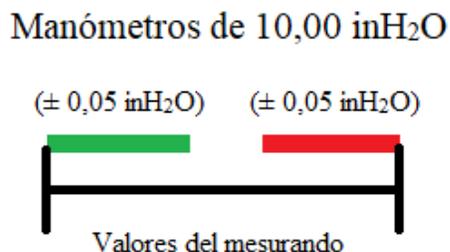


Figura 41. Rango de diferencia de la incertidumbre de resolución de los manómetros de $10,00 \text{ inH}_2\text{O}$.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados experimentales de la **Figura 38** se pueden asociar con las pérdidas de presión teóricas del circuito, trazadas en la **Figura 26** anterior, donde el valor teórico resultó ser aproximadamente entre 0,035 y 0,045 inH₂O, mientras que, en los experimentos, el valor medido esta entre 0 y 0,4 inH₂O. En el caso de la **Figura 39**, si comparamos los valores medidos con los teóricos de la **Figura 37** también se observa una diferencia, pues las diferencias teóricas de presión en el filtro varían entre 0,5 y 2 inH₂O, mientras las mediciones experimentales brindan valores entre 0,1 y 0,2 inH₂O. En ambos casos, se observa que el valor teórico es aproximadamente 10 veces mayor que el experimental, por lo que se puede concluir que las constantes teóricas *K* y *B* empleadas en las fórmulas de cálculo para el régimen Darciano y no Darciano han sido probablemente sobrestimadas.

La **Tabla 6** reporta la diferencia de presión máxima teórica y experimental para el dispositivo de filtración y el circuito de prueba, al variar el medio filtrante.

Tabla 6. Diferencia de presión máxima teórica y experimental en función del material filtrante.

Material filtrante	Filtro		Circuito	
	Teórico (inH ₂ O)	Experimental (inH ₂ O)	Teórico (inH ₂ O)	Experimental (inH ₂ O)
Esferas de vidrio clásico	0,01	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,05)	0,05	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,1)
Esferas cerámicas	0,20	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,05)	0,05	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,1)
Cilindros poliméricos de diámetro menor	0,16	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,05)	0,05	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,1)
Cilindros poliméricos de diámetro mayor	0,01	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,05)	0,05	Dentro de incertidumbre de resolución (± 0,1)

Esferas azucaradas	2,05	0,20	0,05	Dentro de incertidumbre de resolución ($\pm 0,1$)
--------------------	------	------	------	---

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible traer algunas otras conclusiones que pueden tener utilidad para el proceso de filtración del Biogás. Como en este proceso existen reacciones químicas en las superficies de los pellets usados para la purificación del gas metano, un factor a considerar es el área superficial de los materiales seleccionados, que pueda otorgar una mayor velocidad de las reacciones químicas. En correspondencia con los volúmenes ensayados de cada material filtrante, es posible determinar el área superficial total que tendrá cada medio filtrante particulado. En la siguiente **Tabla 7** se brindan los valores del área superficial total obtenidos en cada caso experimental.

Tabla 7. Área superficial según el material filtrante empleado.

Material Filtrante	Volumen (mL)	Cantidad de partículas aproximadamente	Área superficial (cm ²)
Esferas de vidrio clásico	255,00	112	937,15
Esferas cerámicas	265,00	2144	2572,47
Cilindros poliméricos de menor diámetro	270,00	662	2101,01
Cilindros poliméricos de mayor diámetro	215,00	64	790,81
Esferas azucaradas	290,43	17578	5514,33

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la **Tabla 7**, aunque se excluyeran las eventuales regiones de sobreposición de superficies de los medios cilíndricos, las esferas azucaradas aseguran la mayor área superficial disponible para las reacciones químicas de superficie. Además, según los resultados experimentales resumidos en la **Tabla 6**

podemos concluir que las esferas cerámicas presentan bajas pérdidas de presión y que son menores a aquellas de las esferas azucaradas, con la segunda mayor área superficial para reaccionar.

Finalmente, en la **Figura 42** se muestran las geometrías de los materiales filtrantes esféricos ensayados en comparación a los de forma cilíndrica que se han investigado anteriormente en las operaciones de filtración del metano. Las esferas cerámicas de los experimentos han mostrado pérdidas de presión en el filtro comparable a las de los cilindros poliméricos de menor tamaño, sin embargo, han otorgado mayores valores de área superficial, lo cual sería un criterio para considerar en el proceso de selección y manufactura de los materiales filtrantes.

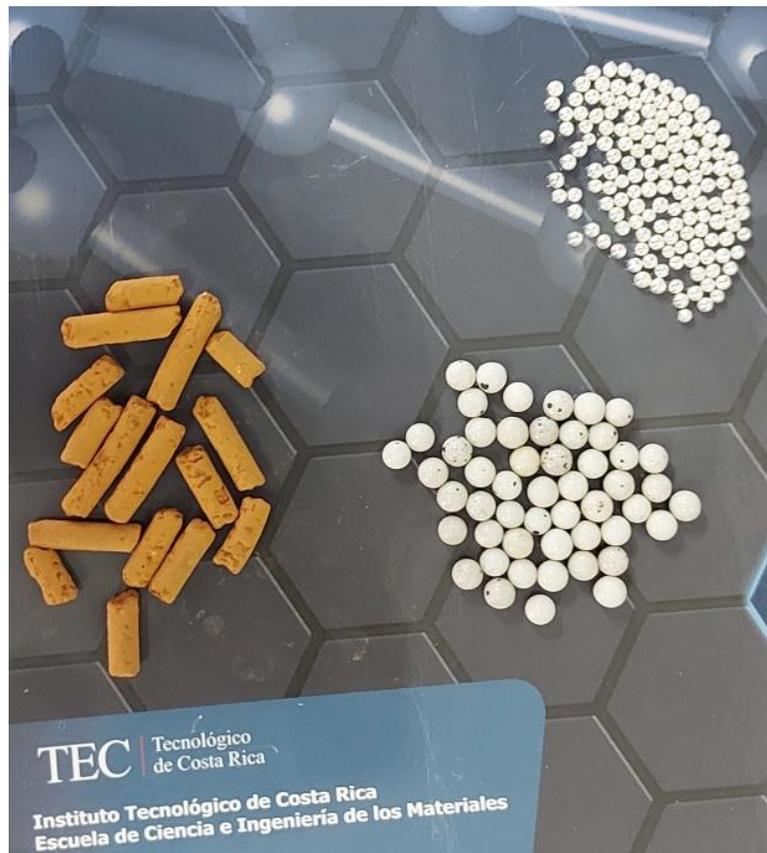


Figura 42. Visualización de algunos materiales filtrantes para aumentar el área superficial de las reacciones químicas de filtración del Biogás.

Fuente: Elaboración propia.

5. Conclusiones

- Se optimizó el circuito de prueba experimental, permitiendo obtener valores más precisos en comparación con el circuito anterior existente. Esta mejora facilitó la recopilación de datos para compararlos con la teoría de la fluidodinámica.
- Los cálculos teóricos realizados permitieron evaluar el comportamiento del flujo y la pérdida de presión en el circuito de prueba y en particular en el medio poroso del filtro.
- Se observaron pérdidas de presión apreciables en el filtro, por encima de la incertidumbre de los manómetros ($\pm 0,05$ inH₂O), utilizando material filtrante de geometría esférica con $3,160 \pm 0,017$ mm de diámetro. Las otras tipologías de material filtrante ensayado no mostraron pérdidas de presión apreciables en el filtro.
- Los valores de las constantes calculadas K y B , que se usan en las ecuaciones analíticas para los cálculos en regímenes Darcianos y no Darcianos, resultaron estar sobreestimadas cuando se comparan las pérdidas de presión teórica y experimental, para todos los materiales filtrantes utilizados.
- Se comprobó que, al disminuir el grado de porosidad y el diámetro de partícula del material filtrante, se obtienen mayores pérdidas de presión en el filtro.
- Se corroboró que el flujo se comporta de manera incompresible en los rangos ensayados de presión hasta 0,54 psi (aproximadamente 15 inH₂O) y caudal máximo de 6,33 L/min.
- Las pérdidas generadas por el filtro son bajas en comparación con los valores comunes de los sistemas de Biogás domésticos, que alcanzan presiones de hasta 1 kPa (aproximadamente 4,0 inH₂O) y caudales del orden de pocos L/min. Esto sugiere que otros factores del circuito del Biogás ocasionan las otras pérdidas mayores.

6. Recomendaciones

- Para futuros diseños de filtros y circuitos se pueden emplear de manera conservadora las ecuaciones empleadas en el presente proyecto, para presiones máximas de 0,54 psi y caudales de hasta 6,33 L/min.
- Para mejor exactitud en los resultados de las pérdidas de presión en el filtro y en el circuito se requiere recurrir a un sistema de medición que reduzca la incertidumbre de resolución a un valor menor de $\pm 0,05$ inH₂O.
- Para futuras fabricaciones de material filtrante, se puede recomendar aumentar el área superficial usando formas esféricas, inclusive se podría disminuir el diámetro de los elementos, ya que la pérdida de presión generada no es tan significativa.
- Para mejorar el sistema de purificación del Biogás, se podría aumentar la cantidad de material filtrante, usando filtros más largos y anchos, o variando el número de dispositivos de filtración.

7. Bibliografía

- AcMax Solución estratégica. (2023). *¿Qué es exactitud, precisión y resolución?*
<https://acmax.mx/que-es-exactitud-precision-y-resolucion>
- CandelTEC. (2019). *La importancia de conocer la incertidumbre de una medida.*
<https://www.candeltec.es/la-importancia-de-conocer-la-incertidumbre-de-una-medida>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2010). *MECANICA DE FLUIDOS; FUNDAMENTOS Y APLICACIONES* (2a. ed.). MCGRAW-HILL INTERAMERICANA.
- Comisión Europea. (2016). *Causas del cambio climático.*
https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es
- Comsol. (2020). *The Porous Media Flow Module User's Guide.*
www.comsol.com/blogs
- Conservatorio Internacional. (2020). *Cambio Climático.*
<https://www.conservation.org/mexico/clima>
- Darby, R., & Chhabra, R. P. (2016). *Chemical Engineering Fluid Mechanics* (Third edition).
- El Legado de Newton. (2018). *El Caso de la Propagación de Incertidumbres en las Medidas – Algo Ligero Para Leer.*
<https://ellegadodenewton.wordpress.com/2018/09/13/el-caso-de-la-propagacion-de-incertidumbres-en-las-medidas-algo-ligero-para-leer/>
- EngineeringToolBox. (2010). *PVC Pipes - Equivalent Length and Pressure Loss in Fittings.* https://www.engineeringtoolbox.com/pvc-pipes-equivalent-length-fittings-d_801.html
- Esteban A. Vélez, Brayan A. Muñoz, & Mauricio A. Salas. (2020). *Pérdidas de energía por fricción y accesorios.*
- Fesmex. (2020). *Perdidas por Fricción en Tuberías.*
<https://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/>
- Flexilatina. (2023). *Precisión, exactitud y clase de los instrumentos de medición - Flexilatina de Colombia.* <https://flexilatina.com/precision-exactitud-y-clase-de-los-instrumentos-de-medicion/>
- Macini, P., Mesini, E., & Viola, R. (2011). Laboratory measurements of non-Darcy flow coefficients in natural and artificial unconsolidated porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 77(3–4), 365–374.
<https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2011.04.016>

- Morales-Sánchez, R. E. (2023). *Diseño y evaluación de un dispositivo de filtración poroso para la purificación de biogás de uso doméstico*. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14953>
- Mott, R., & Untener, J. (2015). *Mecánica de Fluidos*. PEARSON EDUCACIÓN.
- Naciones Unidas. (2006). *La ganadería produce más gases contaminantes que el transporte* | Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2006/11/1092601>
- Naciones Unidas. (2022). *¿Qué son las energías renovables?* <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>
- PowderProcess. (n.d.). *Valves and fittings pressure drop equivalent length*. Retrieved April 7, 2024, from https://powderprocess.net/Tools_html/Piping/Pressure_Drop_Key_Piping_Elements.html
- Sobieski, W., & Trykozko, A. (2014). DARCYS AND FORCHHEIMER'S LAWS IN PRACTICE. PART 1. THE EXPERIMENT. *Technical Sciences*, 17(4), 322–322.
- SPC consulting group. (2017). *Resolución de Instrumento de Medición* | SPC Consulting Group. <https://spcgroup.com.mx/resolucion-de-los-instrumentos-de-medicion/>
- TEC. (2016, December 12). *Qué es el TEC*. <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>
- Universidad Autónoma de Madrid. (2013). *INCERTIDUMBRES DE MEDIDA Y TRATAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES*.
- Werkneh, A. A. (2022). Biogas impurities: environmental and health implications, removal technologies and future perspectives. *Heliyon*, 8(10). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E10929>

8. Anexos

Anexo A.

Datos de medición para los materiales filtrantes:

Material	Diámetro (mm)	Material	Diámetro (mm)		
Esferas de vidrio clásico	16,48	Esferas cerámicas	6,34		
	15,70		5,74		
	16,78		6,47		
Promedio	16,32	Promedio	6,18		
Material	Base (mm)	Altura (mm)	Material	Diámetro (mm)	Largo (mm)
Tetraédros	5,76	6,48	Cilindros grandes AC-ACETAL POM	16,08	16,70
	6,46	6,56		16,08	16,08
	5,74	6,28		16,08	16,48
Promedio	5,99	6,44	Promedio	16,08	16,42
Material	Diámetro (mm)	Largo (mm)	Material	Diámetro (mm)	Masa (g)
Cilindros pequeños AC-ACETAL POM	6,48	12,36	Esferas de azúcar	3,00	0,02000
	6,48	12,24		3,24	0,02596
	6,48	12,46		3,24	0,02598
Promedio	6,48	12,35	Promedio	3,16	0,02398

Cálculos teóricos para **Figura 21**:

- Coeficientes por accesorios en tubería de 0.5 in:
 - 1 codo de 90 grados con coeficiente de 0.46
 - 1 válvula de bola con coeficiente de 0.12
 - 4 perfiles T con coeficiente de 0.3
 - 2 uniones roscadas con coeficiente de 0.0 (incluye el estándar o de tope)
- Coeficientes por accesorios en tubería de 1.5 in:
 - 1 perfil T -entrada o salida lateral con coeficiente de 2.74
 - 1 unión roscada con coeficiente de 0.0

Cálculos teóricos para **Figura 25**:

- Coeficientes por accesorios en tubería de 0.5 in:
 - 4 codos de 90 grados con coeficiente de 0.46
 - 1 válvula de bola con coeficiente de 0.12
 - 4 perfiles T con coeficiente de 0.3
 - 4 uniones roscadas con coeficiente de 0.0 (incluye el estándar o de tope)
- Coeficientes por accesorios en tubería de 1.5 in:
 - 2 perfiles T con coeficiente de 0.91
 - 1 unión roscada con coeficiente de 0.0

Anexo B.

Ensayo apertura 165,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada y 0% de material filtrante para **Figura 22:**

inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	V1 (m/s) para tubo 0.5 in	V1 (m/s) para tubo 1.5 in	Número de Renolds tubo de 0.5 in	Número de Renolds tubo de 1.5 in	L/D (1,5 in)	L/D (0,5 in)	Factor de fricción tubo 0.5 in	Factor de fricción tubo 1.5 in
1,6	383,8	398,14	0,000006	0,033	0,005	33,10	12,71	8,14	12,48	1,93	5,04
2,6	545,5	646,98	0,000009	0,047	0,007	47,05	18,06	8,14	12,48	1,36	3,54
3,5	652,7	870,94	0,000011	0,056	0,008	56,30	21,61	8,14	12,48	1,14	2,96
4,5	865,5	1119,78	0,000014	0,075	0,011	74,66	28,66	8,14	12,48	0,86	2,23
5,3	971,2	1318,85	0,000016	0,084	0,012	83,78	32,16	8,14	12,48	0,76	1,99
6,3	1076,4	1567,69	0,000018	0,093	0,014	92,85	35,64	8,14	12,48	0,69	1,80
7,1	1181,2	1766,76	0,000020	0,102	0,015	101,89	39,11	8,14	12,48	0,63	1,64
8,1	1285,4	2015,60	0,000021	0,111	0,016	110,87	42,56	8,14	12,48	0,58	1,50
9	1440,8	2239,56	0,000024	0,124	0,018	124,28	47,71	8,14	12,48	0,51	1,34
9,8	1543,7	2438,63	0,000026	0,133	0,020	133,16	51,12	8,14	12,48	0,48	1,25
10,8	1646,2	2687,47	0,000027	0,142	0,021	142,00	54,51	8,14	12,48	0,45	1,17
11,6	1748,2	2886,54	0,000029	0,151	0,022	150,80	57,88	8,14	12,48	0,42	1,11
12,5	1849,7	3110,50	0,000031	0,159	0,023	159,55	61,24	8,14	12,48	0,40	1,04
13,4	1950,6	3334,46	0,000033	0,168	0,025	168,26	64,59	8,14	12,48	0,38	0,99
14,3	2051,1	3558,41	0,000034	0,177	0,026	176,93	67,92	8,14	12,48	0,36	0,94

hl tubería 1,5 in	hl tubería 0,5 in	hl aumento súbito	hl reducción súbita	hl accesorios (tubo 0.5 in)	hl accesorios (tubo 1.5 in)	V2 (m/s)	Factor estático (Z)	Pascal manómet ro salida filtro	Delta Presion pascal	Delta Presion inH2O
0,000050	0,0013	0,000049	0,00002	0,01	0,0004	0,033	0,6582	390,3697	7,77	0,031
0,000070	0,0019	0,000098	0,00005	0,02	0,0006	0,047	0,6582	639,1406	7,84	0,032
0,000084	0,0023	0,000139	0,00007	0,02	0,0007	0,06	0,6582	863,0507	7,89	0,032
0,000112	0,0030	0,000240	0,00012	0,03	0,0009	0,07	0,6582	1111,799	7,98	0,032
0,000125	0,0034	0,000300	0,00015	0,03	0,0010	0,08	0,6582	1310,825	8,03	0,032
0,000139	0,0038	0,000366	0,00018	0,03	0,0011	0,09	0,6582	1559,62	8,07	0,032
0,000153	0,0041	0,000438	0,00022	0,04	0,0013	0,10	0,6582	1758,646	8,12	0,033
0,000166	0,0045	0,000516	0,00026	0,04	0,0014	0,11	0,6582	2007,441	8,16	0,033
0,000186	0,0050	0,000643	0,00033	0,05	0,0015	0,12	0,6582	2231,329	8,23	0,033
0,000199	0,0054	0,000735	0,00038	0,05	0,0016	0,13	0,6582	2430,356	8,28	0,033
0,000213	0,0058	0,000833	0,00043	0,05	0,0018	0,14	0,6582	2679,151	8,32	0,033
0,000226	0,0061	0,000935	0,00049	0,06	0,0019	0,15	0,6582	2878,178	8,37	0,034
0,000239	0,0065	0,001043	0,00055	0,06	0,0020	0,16	0,6582	3102,089	8,41	0,034
0,000252	0,0068	0,001156	0,00061	0,06	0,0021	0,17	0,6582	3326,001	8,46	0,034
0,000265	0,0072	0,001274	0,00067	0,07	0,0022	0,18	0,6582	3549,912	8,50	0,034

Ensayo apertura 210,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada y 0% de material filtrante para **Figura 22:**

inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	V1 (m/s) para tubo 0.5"	V1 (m/s) para tubo 1.5"	Número de Renolds tubo de 0.5"	Número de Renolds tubo de 1.5"	L/D (1,5 pulgadas)	L/D (0,5 pulgadas)	Factor de fricción tubo 0.5"	Factor de fricción tubo 1.5"
0,6	652,7	149,30	0,000011	0,05619	0,008	56,30	21,61	8,14	12,48	1,14	2,96
1,2	1076,4	298,61	0,000018	0,09267	0,014	92,85	35,64	8,14	12,48	0,69	1,80
1,9	1492,3	472,80	0,000025	0,12847	0,019	128,72	49,41	8,14	12,48	0,50	1,30
2,7	1849,7	671,87	0,000031	0,15924	0,023	159,55	61,24	8,14	12,48	0,40	1,04
3,4	2151,1	846,06	0,000036	0,18519	0,027	185,55	71,23	8,14	12,48	0,34	0,90
4,2	2398,9	1045,13	0,000040	0,20653	0,030	206,93	79,43	8,14	12,48	0,31	0,81
4,9	2692,2	1219,32	0,000045	0,23177	0,034	232,23	89,14	8,14	12,48	0,28	0,72
5,7	2885,2	1418,39	0,000048	0,24839	0,037	248,88	95,53	8,14	12,48	0,26	0,67
6,5	3171,1	1617,46	0,000053	0,27300	0,040	273,53	105,00	8,14	12,48	0,23	0,61
7,2	3359,1	1791,65	0,000056	0,28919	0,043	289,75	111,23	8,14	12,48	0,22	0,58
8	3545,2	1990,72	0,000059	0,30521	0,045	305,81	117,39	8,14	12,48	0,21	0,55
8,9	3820,6	2214,68	0,000064	0,32892	0,048	329,56	126,51	8,14	12,48	0,19	0,51
9,6	4001,7	2388,86	0,000067	0,34451	0,051	345,18	132,50	8,14	12,48	0,19	0,48
10,3	4180,9	2563,05	0,000070	0,35994	0,053	360,64	138,44	8,14	12,48	0,18	0,46
11,1	4402,0	2762,12	0,000073	0,37897	0,056	379,71	145,76	8,14	12,48	0,17	0,44
11,8	4576,6	2936,31	0,000076	0,39401	0,058	394,78	151,54	8,14	12,48	0,16	0,42
12,6	4706,3	3135,38	0,000078	0,40518	0,060	405,96	155,83	8,14	12,48	0,16	0,41
13,4	4962,4	3334,46	0,000083	0,42722	0,063	428,05	164,31	8,14	12,48	0,15	0,39
14,3	5130,6	3558,41	0,000086	0,44170	0,065	442,56	169,88	8,14	12,48	0,14	0,38

hl tubería 1,5"	hl tubería 0,5"	hl aumento súbito	hl reducción súbita	hl accesorios (tubo 0.5")	hl accesorios (tubo 1.5")	V2 (m/s)	Factor estático (Z)	Pascal manómetro salida filtro	Delta Presion pascal	Delta Presion inH2O
0,00084	0,0023	0,000139	0,00007	0,02	0,0007	0,056	0,6582	141,4147	7,89	0,032
0,000139	0,0038	0,000366	0,00018	0,03	0,0011	0,093	0,6582	290,5358	8,07	0,032
0,000193	0,0052	0,000688	0,00036	0,05	0,0016	0,13	0,6582	464,5425	8,25	0,033
0,000239	0,0065	0,001043	0,00055	0,06	0,0020	0,16	0,6582	663,4574	8,41	0,034
0,000278	0,0075	0,001397	0,00074	0,07	0,0023	0,19	0,6582	837,5118	8,54	0,034
0,000310	0,0084	0,001725	0,00092	0,08	0,0026	0,21	0,6582	1036,473	8,65	0,035
0,000348	0,0094	0,002157	0,00116	0,09	0,0029	0,23	0,6582	1210,53	8,79	0,035
0,000373	0,0101	0,002466	0,00133	0,09	0,0031	0,25	0,6582	1409,515	8,87	0,036
0,000410	0,0111	0,002960	0,00160	0,10	0,0034	0,27	0,6582	1608,457	9,00	0,036
0,000434	0,0118	0,003308	0,00180	0,11	0,0036	0,29	0,6582	1782,559	9,09	0,037
0,000458	0,0124	0,003672	0,00201	0,11	0,0038	0,31	0,6582	1981,546	9,17	0,037
0,000494	0,0134	0,004243	0,00233	0,12	0,0041	0,33	0,6582	2205,376	9,30	0,037
0,000517	0,0140	0,004640	0,00255	0,13	0,0043	0,34	0,6582	2379,48	9,38	0,038
0,000540	0,0146	0,005050	0,00279	0,13	0,0044	0,36	0,6582	2553,585	9,47	0,038
0,000569	0,0154	0,005578	0,00309	0,14	0,0047	0,38	0,6582	2752,554	9,57	0,038
0,000591	0,0160	0,006014	0,00334	0,15	0,0049	0,39	0,6582	2926,66	9,65	0,039
0,000608	0,0165	0,006347	0,00353	0,15	0,0050	0,41	0,6582	3125,672	9,71	0,039
0,000641	0,0174	0,007031	0,00392	0,16	0,0053	0,43	0,6582	3324,623	9,83	0,040
0,000663	0,0180	0,007498	0,00419	0,16	0,0055	0,44	0,6582	3548,5	9,91	0,040

Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada y 0% de material filtrante para **Figura 22:**

inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	V1 (m/s) para tubo 0.5 in	V1 (m/s) para tubo 1.5 in	Número de Renolds tubo de 0.5 in	Número de Renolds tubo de 1.5 in	L/D (1,5 in)	L/D (0,5 in)	Factor de fricción tubo 0.5 in	Factor de fricción tubo 1.5 in
0,8	1595,0	199,07	0,000027	0,137	0,020	137,58	52,81	8,14	12,48	0,47	1,21
1,4	2200,9	348,38	0,000037	0,189	0,028	189,85	72,88	8,14	12,48	0,34	0,88
2,0	2692,2	497,68	0,000045	0,232	0,034	232,23	89,14	8,14	12,48	0,28	0,72
2,5	3076,3	622,10	0,000051	0,265	0,039	265,36	101,86	8,14	12,48	0,24	0,63
3,2	3452,4	796,29	0,000058	0,297	0,044	297,80	114,31	8,14	12,48	0,21	0,56
3,8	3820,6	945,59	0,000064	0,329	0,048	329,56	126,51	8,14	12,48	0,19	0,51
4,4	4180,9	1094,90	0,000070	0,360	0,053	360,64	138,44	8,14	12,48	0,18	0,46
5,0	4533,2	1244,20	0,000076	0,390	0,058	391,03	150,10	8,14	12,48	0,16	0,43
5,7	4792,2	1418,39	0,000080	0,413	0,061	413,37	158,68	8,14	12,48	0,15	0,40
6,3	5130,6	1567,69	0,000086	0,442	0,065	442,56	169,88	8,14	12,48	0,14	0,38
6,9	5379,2	1717,00	0,000090	0,463	0,068	464,00	178,11	8,14	12,48	0,14	0,36
7,6	5703,7	1891,18	0,000095	0,491	0,072	492,00	188,86	8,14	12,48	0,13	0,34
8,1	5941,9	2015,60	0,000099	0,512	0,075	512,54	196,75	8,14	12,48	0,12	0,33
8,8	6175,6	2189,79	0,000103	0,532	0,078	532,70	204,48	8,14	12,48	0,12	0,31

hl tubería 1,5 in	hl tubería 0,5 in	hl aumento súbito	hl reducción súbita	hl accesorios (tubo 0.5 in)	hl accesorios (tubo 1.5 in)	V2 (m/s)	Factor estático (Z)	Pascal manómet ro salida filtro	Delta Presion pascal	Delta Presion inH2O
0,000206	0,0056	0,000783	0,00041	0,05	0,0017	0,137	0,6582	190,7735	8,30	0,033
0,000284	0,0077	0,001460	0,00077	0,07	0,0023	0,190	0,6582	339,8097	8,57	0,034
0,000348	0,0094	0,002157	0,00116	0,09	0,0029	0,23	0,6582	488,8938	8,79	0,035
0,000397	0,0108	0,002791	0,00151	0,10	0,0033	0,26	0,6582	613,1402	8,96	0,036
0,000446	0,0121	0,003488	0,00190	0,11	0,0037	0,30	0,6582	787,1569	9,13	0,037
0,000494	0,0134	0,004243	0,00233	0,12	0,0041	0,33	0,6582	936,2918	9,30	0,037
0,000540	0,0146	0,005050	0,00279	0,13	0,0044	0,36	0,6582	1085,429	9,47	0,038
0,000586	0,0159	0,005904	0,00328	0,14	0,0048	0,39	0,6582	1234,569	9,63	0,039
0,000619	0,0168	0,006573	0,00366	0,15	0,0051	0,41	0,6582	1408,635	9,75	0,039
0,000663	0,0180	0,007498	0,00420	0,16	0,0055	0,44	0,6582	1557,779	9,91	0,040
0,000695	0,0188	0,008216	0,00461	0,17	0,0057	0,46	0,6582	1706,965	10,03	0,040
0,000737	0,0200	0,009199	0,00519	0,18	0,0061	0,49	0,6582	1880,998	10,19	0,041
0,000768	0,0208	0,009955	0,00563	0,19	0,0063	0,51	0,6582	2005,304	10,30	0,041
0,000798	0,0216	0,010725	0,00608	0,20	0,0066	0,53	0,6582	2179,379	10,41	0,042

Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada y 0% de material filtrante para **Figura 26:**

inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	V1 (m/s) para tubo 0.5"	V1 (m/s) para tubo 1.5"	Número de Reynolds tubo de 0.5"	Número de Reynolds tubo de 1.5"	L/D (1,5 pulgadas)	L/D (0,5 pulgadas)	Factor de fricción tubo 0.5"	Factor de fricción tubo 1.5"
0,8	1595,0192	199,07	0,000027	0,137	0,020	137,58	52,81	6,01	0,08	0,47	1,21
1,4	2200,9232	348,38	0,000037	0,189	0,028	189,85	72,88	6,01	0,08	0,34	0,88
2,0	2692,1922	497,68	0,000045	0,232	0,034	232,23	89,14	6,01	0,08	0,28	0,72
2,5	3076,2722	622,10	0,000051	0,265	0,039	265,36	101,86	6,01	0,08	0,24	0,63
3,2	3452,4098	796,29	0,000058	0,297	0,044	297,80	114,31	6,01	0,08	0,21	0,56
3,8	3820,6050	945,59	0,000064	0,329	0,048	329,56	126,51	6,01	0,08	0,19	0,51
4,4	4180,8578	1094,90	0,000070	0,360	0,053	360,64	138,44	6,01	0,08	0,18	0,46
5,0	4533,1682	1244,20	0,000076	0,390	0,058	391,03	150,10	6,01	0,08	0,16	0,43
5,7	4792,1888	1418,39	0,000080	0,413	0,061	413,37	158,68	6,01	0,08	0,15	0,40
6,3	5130,6000	1567,69	0,000086	0,442	0,065	442,56	169,88	6,01	0,08	0,14	0,38
6,9	5379,1962	1717,00	0,000090	0,463	0,068	464,00	178,11	6,01	0,08	0,14	0,36
7,6	5703,7082	1891,18	0,000095	0,491	0,072	492,00	188,86	6,01	0,08	0,13	0,34
8,1	5941,8800	2015,60	0,000099	0,512	0,075	512,54	196,75	6,01	0,08	0,12	0,33
8,8	6175,5842	2189,79	0,000103	0,532	0,078	532,70	204,48	6,01	0,08	0,12	0,31

hl tubería 1,5"	hl tubería 0,5"	hl aumento súbito	hl reducción súbita	hl accesorios (tubo 0.5")	hl accesorios (tubo 1.5")	V2 (m/s)	Factor estático (Z)	Pascal manómetro salida filtro	Delta presión pascal	Delta presión inH2O
0,000152	0,000035	0,000783	0,00041	0,06	0,0011	0,137	0,7419	189,3584	9,71	0,039
0,000210	0,000048	0,001460	0,00077	0,08	0,0016	0,190	0,7419	338,3667	10,01	0,0402
0,000257	0,000059	0,002157	0,00116	0,10	0,0019	0,23	0,7419	487,4281	10,25	0,0412
0,000294	0,000067	0,002791	0,00151	0,12	0,0022	0,26	0,7419	611,6568	10,44	0,042
0,000330	0,000075	0,003488	0,00190	0,13	0,0024	0,30	0,7419	785,6559	10,63	0,0427
0,000365	0,000083	0,004243	0,00233	0,14	0,0027	0,33	0,7419	934,7736	10,82	0,0435
0,000399	0,000091	0,005050	0,00279	0,16	0,0030	0,36	0,7419	1083,894	11,00	0,0442
0,000433	0,000099	0,005904	0,00328	0,17	0,0032	0,39	0,7419	1233,017	11,18	0,0449
0,000457	0,000104	0,006573	0,00366	0,18	0,0034	0,41	0,7419	1407,071	11,32	0,0455
0,000490	0,000112	0,007498	0,00420	0,19	0,0036	0,44	0,7419	1556,2	11,49	0,0462
0,000513	0,000117	0,008216	0,00461	0,20	0,0038	0,46	0,7419	1705,374	11,62	0,0467
0,000544	0,000124	0,009199	0,00519	0,22	0,0040	0,49	0,7419	1879,392	11,79	0,0474
0,000567	0,000130	0,009955	0,00563	0,23	0,0042	0,51	0,7419	2003,686	11,92	0,0479
0,000589	0,000135	0,010725	0,00608	0,23	0,0044	0,53	0,7419	2177,75	12,04	0,0484

Anexo C.

Cálculo para incertidumbre de diámetros y largos de esferas, tetraedros y cilindros:

- $\sqrt{(0,01)^2 + (0,01)^2 + (0,01)^2} = \pm 0,017$

Cálculo para incertidumbre del manómetro de 10 inH₂O:

- $\frac{0,1}{2} = 0,05$

Cálculo para incertidumbre del manómetro de 15 inH₂O:

- $\frac{0,2}{2} = 0,1$

Cálculo para incertidumbre del manómetro de 30 inH₂O:

- $\frac{0,5}{2} = 0,25$

Cálculo para incertidumbre del volumen obtenido en probeta:

- $\sqrt{(5)^2 + (5)^2} = \pm 7,07$

Cálculo para incertidumbre de la diferencia de manómetros de 10,00 inH₂O:

- $\sqrt{(0,05)^2 + (0,05)^2} = \pm 0,07$

Cálculo para incertidumbre y grado de porosidad del material filtrante:

- porosidad de esferas de vidrio clásico:

$$\frac{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} - \frac{225,00 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} = 0,400$$

- incertidumbre de las esferas de vidrio clásico:

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{7,07}{225,00}\right)^2} * 0,60 * 2 = \pm 0,038$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2} * 1 * 2 = \pm 0,0066$$

$$\sqrt[2]{(0,038)^2 + (0,0066)^2} = \pm 0,039$$

- porosidad de esferas cerámicas:

$$\frac{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} - \frac{265,00 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} = 0,290$$

- incertidumbre de esferas cerámicas:

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{7,07}{265,00}\right)^2} * 0,60 * 2 = \pm 0,032$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2} * 1 * 2 = \pm 0,0066$$

$$\sqrt[2]{(0,032)^2 + (0,0066)^2} = \pm 0,033$$

- porosidad de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro:

$$\frac{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} - \frac{270,00 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} = 0,280$$

- incertidumbre de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro:

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{7,07}{270,00}\right)^2} * 0,60 * 2 = \pm 0,032$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2} * 1 * 2 = \pm 0,0066$$

$$\sqrt[2]{(0,032)^2 + (0,0066)^2} = \pm 0,033$$

- porosidad de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de mayor diámetro:

$$\frac{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} - \frac{215,00 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} = 0,426$$

- incertidumbre de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro:

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{7,07}{215,00}\right)^2} * 0,57 * 2 = \pm 0,038$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2} * 1 * 2 = \pm 0,0066$$

$$\sqrt[2]{(0,038)^2 + (0,0066)^2} = \pm 0,039$$

Cálculo para cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro:

- $\pi \left(\frac{6,350 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 12,350 \text{ mm} = \frac{4}{3} \pi * r^3 \rightarrow r = 4,540 \text{ mm}$
- *Área superficial esfera con mismo volumen de partícula* = $4\pi * (4,540 \text{ mm})^2 = 259,013 \text{ mm}^2$

- $\text{Área superficial de partícula} = 2\pi * \left(\frac{6,350\text{mm}}{2}\right) * 12,350\text{mm} + 2\pi * \left(\frac{6,350\text{mm}}{2}\right)^2 = 309,710 \text{ mm}^2$
- $\psi = \frac{259,013\text{mm}^2}{309,710\text{mm}^2} = 0,836$
- $d = \psi * d_s = 0,836 * 4,540\text{mm} * 2 = 7,591 \text{ mm}$
- *Incertidumbre:*

$$\sqrt{\left(\frac{0,017}{10,081}\right)^2 + \left(\frac{0,017}{38,799}\right)^2} * 4,540 * 2 = \pm 0,016$$

$$\sqrt{\left(\frac{0,017}{3,175}\right)^2 + \left(\frac{0,017}{77,598}\right)^2} * 246,372 * 2 = \pm 2,64$$

$$\sqrt{(2,64)^2 + (0,017)^2} = \pm 2,64$$

$$\sqrt{\left(\frac{0,017}{259,013}\right)^2 + \left(\frac{2,64}{309,710}\right)^2} * 0,836 * 2 = \pm 0,014$$

$$\sqrt{\left(\frac{0,014}{0,836}\right)^2 + \left(\frac{0,017}{9,080}\right)^2} * 7,591 * 2 = \pm 0,26$$

Cálculo para cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de mayor diámetro:

- $\pi\left(\frac{16,080\text{mm}}{2}\right)^2 * 16,080\text{mm} = \frac{4}{3}\pi * r^3 \rightarrow r = 9,204 \text{ mm}$
- $\text{Área superficial esfera con mismo volumen de partícula} = 4\pi * (9,204\text{mm})^2 = 1064,543 \text{ mm}^2$
- $\text{Área superficial de partícula} = 2\pi * \left(\frac{16,080\text{mm}}{2}\right) * 16,080\text{mm} + 2\pi * \left(\frac{16,080\text{mm}}{2}\right)^2 = 1218,465 \text{ mm}^2$
- $\psi = \frac{1064,543\text{mm}^2}{1218,465\text{mm}^2} = 0,874$
- $d = \psi * d_s = 0,874 * 9,204\text{mm} * 2 = 16,089 \text{ mm}$
- *Incertidumbre:*

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,017}{64,64}\right)^2 + \left(\frac{0,017}{50,52}\right)^2} * 9,204 * 2 = \pm 0,0079$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,017}{8,040}\right)^2 + \left(\frac{0,017}{101,034}\right)^2} * 812,310 * 2 = \pm 3,45$$

$$\sqrt[2]{(3,45)^2 + (0,017)^2} = \pm 3,45$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,017}{1064,543}\right)^2 + \left(\frac{3,45}{1218,465}\right)^2} * 0,874 * 2 = \pm 0,0049$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,0049}{0,874}\right)^2 + \left(\frac{0,017}{18,480}\right)^2} * 16,089 * 2 = \pm 0,18$$

Cálculo incertidumbre y masa de esferas cerámicas para optimización:

- $\sqrt[2]{9 * (0,00001)^2} = \pm 0,00003$
- $55.09362+84.3577+73.32076+69.29321+74.69125+80.01604+84.5219+80.66180+59.35823=661.31451 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de esferas de vidrio clásico para optimización:

- $\sqrt[2]{4 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $190.6513+190.9718+197.0578+15.46270=594.14360 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro para optimización:

- $\sqrt[2]{3 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $109.8796+104.0522+168.9528=382.88460 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de esferas cerámicas para optimización de subensamble:

- $\sqrt[2]{8 * (0,00001)^2} = \pm 0,00003$
- $79.6318+77.7306+76.3913+77.4396+76.6223+74.3961+89.5766+86.3605=638.14880 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de esferas de vidrio clásico para optimización de subensamble:

- $\sqrt[2]{3 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $199.1277+197.4359+176.6394=573.20300$

Cálculo incertidumbre y masa de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de menor diámetro para optimización de subensamble:

- $\sqrt[2]{3 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $145.9007+134.6069+102.3032=382.81080 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de mayor diámetro para optimización de subensamble:

- $\sqrt[2]{3 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $183.8770+58.7446+62.8258=305.44740 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de esferas de 3,160 mm de diámetro para optimización de subensamble:

- $\sqrt[2]{3 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $138,8467+142,4247+128,4052= 409.6766 \text{ g}$

Cálculo incertidumbre y masa de una esfera de 3,160 mm de diámetro para optimización de subensamble:

- $\sqrt[2]{3 * (0,00001)^2} = \pm 0,00002$
- $(0,02000+0,02596+0,02598) / 3 = 0,02398 \text{ g}$

Volumen total e incertidumbre empleado de esferas de 3,160 mm de diámetro:

$$\frac{409,67660g * 0,0170mL}{0,02398g} = 290,4296 \text{ mL}$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,00002}{409,67660}\right)^2 + \left(\frac{0,0017}{0,0170}\right)^2 + \left(\frac{0,00002}{0,02398}\right)^2} * 290,4296 * 2 = \pm 58,09$$

- porosidad de esferas de 3,160 mm de diámetro:

$$\frac{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} - \frac{290,43 \text{ cm}}{\pi * \left(\frac{40,9 \text{ mm}}{2}\right)^2 * 28,50 \text{ cm}} = 0,2243$$

- incertidumbre de porosidad de esferas de 3,160 mm de diámetro:

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{58,09}{290,43}\right)^2} * 0,76 * 2 = \pm 0,30$$

$$\sqrt[2]{\left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2 + \left(\frac{0,02}{13,14}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{28,50}\right)^2} * 1 * 2 = \pm 0,0066$$

$$\sqrt[2]{(0,30)^2 + (0,0066)^2} = \pm 0,30$$

Anexo D.

Cálculos teóricos de caída de presión para el filtro para apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada y 100% de materiales filtrantes:

Material filtrante esferas de vidrio de 16,320 ± 0,017 mm de diámetro										
inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	Vs (m/s) para tubo 1.5"	Constante K para esferas de 16,32 mm diámetro	Grado de porosidad	Número de Reynolds	Constante B	Pérdida de presión región no Darciano (pascal)	Pérdida de presión (inH2O)
0,8	1595,019	199,07	0,000027	0,020	3,15665E-07	0,4	35,12305292	1005,284926	0,47619129	0,00191364
1,4	2200,923	348,38	0,000037	0,028	3,15665E-07	0,4	48,46533635	1005,284926	0,729635293	0,00293215
2	2692,192	497,68	0,000045	0,034	3,15665E-07	0,4	59,28330462	1005,284926	0,964453352	0,00387580
2,5	3076,272	622,10	0,000051	0,039	3,15665E-07	0,4	67,74092203	1005,284926	1,16632819	0,00468706
3,2	3452,41	796,29	0,000058	0,044	3,15665E-07	0,4	76,02364416	1005,284926	1,379585437	0,00554407
3,8	3820,605	945,59	0,000064	0,048	3,15665E-07	0,4	84,13147101	1005,284926	1,6032499	0,00644289
4,4	4180,858	1094,90	0,000070	0,053	3,15665E-07	0,4	92,06440258	1005,284926	1,836366977	0,00737971
5	4533,168	1244,20	0,000076	0,058	3,15665E-07	0,4	99,82243886	1005,284926	2,078002661	0,00835076
5,7	4792,189	1418,39	0,000080	0,061	3,15665E-07	0,4	105,526191	1005,284926	2,264269507	0,00909930
6,3	5130,6	1567,69	0,000086	0,065	3,15665E-07	0,4	112,9781606	1005,284926	2,518627228	0,01012147
6,9	5379,196	1717,00	0,000090	0,068	3,15665E-07	0,4	118,4523627	1005,284926	2,713417145	0,01090426
7,6	5703,708	1891,18	0,000095	0,072	3,15665E-07	0,4	125,5982655	1005,284926	2,977809923	0,01196677
8,1	5941,88	2015,60	0,000099	0,075	3,15665E-07	0,4	130,8429175	1005,284926	3,179149061	0,01277588
8,8	6175,584	2189,79	0,000103	0,078	3,15665E-07	0,4	135,989191	1005,284926	3,382711279	0,01359392

Material filtrante esferas cerámicas de 6,180 ± 0,017 mm de diámetro										
inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	Vs (m/s) para tubo 1.5"	Constante K para esferas de 6,18 mm diámetro	Grado de porosidad	Número de Reynolds	Constante B	Pérdida de presión región no Darciano (pascal)	Pérdida de presión (inH2O)
0,8	1595,019	199,07	0,000027	0,020	1,23186E-08	0,29	11,23966793	8243,543398	9,790601067	0,039344965
1,4	2200,923	348,38	0,000037	0,028	1,23186E-08	0,29	15,50930917	8243,543398	14,10472299	0,056681896
2	2692,192	497,68	0,000045	0,034	1,23186E-08	0,29	18,97114864	8243,543398	17,84309702	0,0717051
2,5	3076,272	622,10	0,000051	0,039	1,23186E-08	0,29	21,67765628	8243,543398	20,91579482	0,084053186
3,2	3452,41	796,29	0,000058	0,044	1,23186E-08	0,29	24,32819599	8243,543398	24,05252268	0,096658587
3,8	3820,605	945,59	0,000064	0,048	1,23186E-08	0,29	26,92276775	8243,543398	27,24528384	0,109489165
4,4	4180,858	1094,90	0,000070	0,053	1,23186E-08	0,29	29,46137158	8243,543398	30,48625037	0,122513464
5	4533,168	1244,20	0,000076	0,058	1,23186E-08	0,29	31,94400746	8243,543398	33,76776319	0,135700704
5,7	4792,189	1418,39	0,000080	0,061	1,23186E-08	0,29	33,76925542	8243,543398	36,25099414	0,145679931
6,3	5130,6	1567,69	0,000086	0,065	1,23186E-08	0,29	36,15394741	8243,543398	39,58554126	0,159080298
6,9	5379,196	1717,00	0,000090	0,068	1,23186E-08	0,29	37,90573744	8243,543398	42,10019637	0,169185808
7,6	5703,708	1891,18	0,000095	0,072	1,23186E-08	0,29	40,19248554	8243,543398	45,46574398	0,182710754
8,1	5941,88	2015,60	0,000099	0,075	1,23186E-08	0,29	41,87081765	8243,543398	47,99563727	0,192877501
8,8	6175,584	2189,79	0,000103	0,078	1,23186E-08	0,29	43,51766779	8243,543398	50,52727452	0,203051256

Material filtrante cilindros poliméricos fabricado con AC-ACETAL POM de 6,180 ± 0,017 mm de diámetro y un largo de 12,350 ± 0,017 mm										
inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	Vs (m/s) para tubo 1.5"	Constante K para cilindros de 7,63 mm diámetro	Grado de porosidad	Número de Reynolds	Constante B	Pérdida de presión región no Darciano (pascal)	Pérdida de presión (inH2O)
0,8	1595,019	199,07	0,000027	0,020	1,63059E-08	0,28	13,63026972	7552,36305	7,578894517	0,030456898
1,4	2200,923	348,38	0,000037	0,028	1,63059E-08	0,28	18,80803494	7552,36305	11,00296695	0,044217035
2	2692,192	497,68	0,000045	0,034	1,63059E-08	0,28	23,00618439	7552,36305	13,9995237	0,056259137
2,5	3076,272	622,10	0,000051	0,039	1,63059E-08	0,28	26,28834801	7552,36305	16,47968373	0,066226024
3,2	3452,41	796,29	0,000058	0,044	1,63059E-08	0,28	29,50263969	7552,36305	19,02543079	0,076456481
3,8	3820,605	945,59	0,000064	0,048	1,63059E-08	0,28	32,64905942	7552,36305	21,62943858	0,086921068
4,4	4180,858	1094,90	0,000070	0,053	1,63059E-08	0,28	35,72760721	7552,36305	24,28453551	0,097590964
5	4533,168	1244,20	0,000076	0,058	1,63059E-08	0,28	38,73828305	7552,36305	26,9837047	0,108437971
5,7	4792,189	1418,39	0,000080	0,061	1,63059E-08	0,28	40,95174897	7552,36305	29,03287014	0,116672843
6,3	5130,6	1567,69	0,000086	0,065	1,63059E-08	0,28	43,84364891	7552,36305	31,79274667	0,127763811
6,9	5379,196	1717,00	0,000090	0,068	1,63059E-08	0,28	45,96803291	7552,36305	33,87979131	0,136150905
7,6	5703,708	1891,18	0,000095	0,072	1,63059E-08	0,28	48,74115695	7552,36305	36,68018882	0,147404713
8,1	5941,88	2015,60	0,000099	0,075	1,63059E-08	0,28	50,77645901	7552,36305	38,79028378	0,155884439
8,8	6175,584	2189,79	0,000103	0,078	1,63059E-08	0,28	52,77358311	7552,36305	40,9058721	0,164386241

Material filtrante de esferas de 3,160 mm ± 0,017 mm de diámetro

inH2O	ml/min	Pascal manómetro entrada filtro	Caudal (m3/s)	Vs (m/s) para tubo 1.5"	Constante K para esferas de 3,16 mm diámetro	Grado de porosidad	Número de Reynolds	Constante B	Pérdida de presión región Darciano (pascal)	Pérdida de presión región no Darciano (pascal)	Pérdida de presión (inH2O)
0,8	1595,019	199,07	0,000027	0,020	9,70913E-10	0,22	5,231374774	0	109,8195176	0	0,441325822
1,4	2200,923	348,38	0,000037	0,028	9,70913E-10	0,22	7,218630415	0	151,5369371	0	0,608973385
2	2692,192	497,68	0,000045	0,034	9,70913E-10	0,22	8,829903968	0	185,361561	0	0,744902592
2,5	3076,272	622,10	0,000051	0,039	9,70913E-10	0,22	10,08961697	40567,43288	0	232,5828551	0,934668281
3,2	3452,41	796,29	0,000058	0,044	9,70913E-10	0,22	11,32328033	40567,43288	0	263,871903	1,060407905
3,8	3820,605	945,59	0,000064	0,048	9,70913E-10	0,22	12,53089406	40567,43288	0	295,1019536	1,185910439
4,4	4180,858	1094,90	0,000070	0,053	9,70913E-10	0,22	13,71245815	40567,43288	0	326,2344849	1,311021077
5	4533,168	1244,20	0,000076	0,058	9,70913E-10	0,22	14,8679726	40567,43288	0	357,2318056	1,435588352
5,7	4792,189	1418,39	0,000080	0,061	9,70913E-10	0,22	15,71751337	40567,43288	0	380,3688593	1,528567993
6,3	5130,6	1567,69	0,000086	0,065	9,70913E-10	0,22	16,82744096	40567,43288	0	411,0413666	1,651829958
6,9	5379,196	1717,00	0,000090	0,068	9,70913E-10	0,22	17,64279158	40567,43288	0	433,8937113	1,743665453
7,6	5703,708	1891,18	0,000095	0,072	9,70913E-10	0,22	18,7071323	40567,43288	0	464,1329744	1,865186362
8,1	5941,88	2015,60	0,000099	0,075	9,70913E-10	0,22	19,48829277	40567,43288	0	486,620957	1,955557615
8,8	6175,584	2189,79	0,000103	0,078	9,70913E-10	0,22	20,25480032	40567,43288	0	508,9292285	2,045206673

Resultados experimentales apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada, 100% y 0% de materiales filtrantes:

Uso de 4 manómetros, los de 10inh2o en filtro y los de 15 inh2o en circuito								
Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada (filtro 0%)								
Presión Alimentación (inH2O)	Presión Entrada circuito (inH2O)	Presión Salida circuito (inH2O)	Presión Entrada filtro (inH2O)	Presión Salida filtro (inH2O)	Caída de presión circuito (inH2O)	Caída de presión filtro (inH2O)	Flujómetro	Conversión Flujómetro
1,0	0,4	0,5	0,45	0,40	-0,1	0,05	5,5	918,5
2,0	1,0	0,9	0,95	0,90	0,1	0,05	13,0	1697,2
3,0	1,5	1,5	1,45	1,40	0,0	0,05	17,0	2101,2
4,0	2,1	2,1	2,00	1,95	0,0	0,05	22,0	2594,9
5,0	2,7	2,7	2,55	2,55	0,0	0,00	26,5	3028,7
6,0	3,3	3,3	3,15	3,15	0,0	0,00	30,0	3359,1
7,0	3,9	3,9	3,70	3,75	0,0	-0,05	35,0	3820,6
8,0	4,6	4,6	4,35	4,40	0,0	-0,05	38,5	4136,3
9,0	5,1	5,1	4,95	4,90	0,0	0,05	42,0	4445,8
10,0	5,8	5,8	5,55	5,55	0,0	0,00	45,5	4749,3
11,0	6,4	6,3	6,10	6,15	0,1	-0,05	49,0	5046,7
12,0	7,1	7,1	6,75	6,80	0,0	-0,05	52,5	5338,1
13,0	7,7	7,6	7,30	7,35	0,1	-0,05	55,5	5582,9
14,0	8,3	8,3	7,80	7,90	0,0	-0,10	59,0	5863,0
15,0	8,9	8,9	8,40	8,45	0,0	-0,05	62,5	6136,9

Uso de 4 manómetros, los de 10inh2o en filtro y los de 15 inh2o en circuito

Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada (filtro 100% de esferas cerámicas de 6,18 mm de diámetro)

Presión Alimentación (inh20)	Presión Entrada circuito (inh20)	Presión Salida circuito (inh20)	Presión Entrada filtro (inh20)	Presión Salida filtro (inh20)	Caída de presión circuito (inh20)	Caída de presión filtro (inh20)	Flujómetro	Conversión Flujómetro
1,0	0,4	0,4	0,30	0,30	0,00	0,00	6,5	1023,9
2,0	0,9	0,9	0,85	0,85	0,00	0,00	12,5	1646,2
3,0	1,5	1,5	1,30	1,35	0,00	-0,05	17,0	2101,2
4,0	2,1	2,1	2,00	1,95	0,00	0,05	22,0	2594,9
5,0	2,6	2,6	2,40	2,50	0,00	-0,10	26,0	2981,0
6,0	3,3	3,3	3,10	3,10	0,00	0,00	30,0	3359,1
7,0	3,9	3,9	3,65	3,70	0,00	-0,05	34,5	3775,0
8,0	4,5	4,5	4,35	4,30	0,00	0,05	38,0	4091,5
9,0	5,1	5,0	4,90	4,90	0,10	0,00	41,5	4402,0
10,0	5,9	5,8	5,45	5,45	0,10	0,00	45,0	4706,3
11,0	6,4	6,3	6,15	6,15	0,10	0,00	49,0	5046,7
12,0	7,1	7,0	6,75	6,75	0,10	0,00	52,5	5338,1
13,0	7,7	7,6	7,30	7,30	0,10	0,00	56,0	5623,3
14,0	8,3	8,2	7,80	7,85	0,10	-0,05	59,0	5863,0
15,0	8,9	8,8	8,40	8,45	0,10	-0,05	62,0	6098,2

Esferas grandes								
Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada (filtro 100% de esferas de vidrio de 16,32 mm de diámetro)								
Presión Alimentación (inH2O)	Presión Entrada circuito (inH2O)	Presión Salida circuito (inH2O)	Presión Entrada filtro (inH2O)	Presión Salida filtro (inH2O)	Caída de presión circuito (inH2O)	Caída de presión filtro (inH2O)	Flujómetro	Conversión Flujómetro
1,0	0,4	0,4	0,45	0,40	0,0	0,05	7,0	1076,4
2,0	1,0	0,9	0,90	0,85	0,1	0,05	12,5	1646,2
3,0	1,5	1,5	1,45	1,45	0,0	0,00	18,0	2200,9
4,0	2,1	2,1	1,90	1,95	0,0	-0,05	22,5	2643,6
5,0	2,7	2,7	2,45	2,55	0,0	-0,10	26,5	3028,7
6,0	3,3	3,3	3,15	3,20	0,0	-0,05	30,5	3405,8
7,0	3,9	3,9	3,60	3,65	0,0	-0,05	34,5	3775,0
8,0	4,5	4,5	4,35	4,35	0,0	0,00	38,0	4091,5
9,0	5,1	5,0	4,90	4,90	0,1	0,00	42,0	4445,8
10,0	5,7	5,7	5,45	5,50	0,0	-0,05	45,0	4706,3
11,0	6,4	6,2	6,20	6,20	0,2	0,00	49,0	5046,7
12,0	7,0	6,9	6,65	6,70	0,1	-0,05	53,0	5379,2
13,0	7,6	7,5	7,30	7,35	0,1	-0,05	56,0	5623,3
14,0	8,2	8,1	7,85	7,90	0,1	-0,05	59,0	5863,0
15,0	8,8	8,7	8,40	8,45	0,1	-0,05	62,5	6136,9

Cilindros pequeños								
Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada (filtro 100% con cilindros de 6,48 mm de diámetro y 12,35 mm de largo)								
Presión Alimentación (inH2O)	Presión Entrada circuito (inH2O)	Presión Salida circuito (inH2O)	Presión Entrada filtro (inH2O)	Presión Salida filtro (inH2O)	Caída de presión circuito (inH2O)	Caída de presión filtro (inH2O)	Flujómetro	Conversión Flujómetro
1,0	0,4	0,4	0,45	0,40	0,00	0,05	7,0	1076,4
2,0	1,0	0,9	0,90	0,85	0,10	0,05	12,5	1646,2
3,0	1,5	1,5	1,45	1,40	0,00	0,05	18,0	2200,9
4,0	2,1	2,1	1,95	1,95	0,00	0,00	22,5	2643,6
5,0	2,7	2,6	2,50	2,55	0,10	-0,05	26,5	3028,7
6,0	3,3	3,3	3,10	3,10	0,00	0,00	30,5	3405,8
7,0	3,9	3,9	3,65	3,65	0,00	0,00	34,5	3775,0
8,0	4,5	4,5	4,35	4,30	0,00	0,05	38,0	4091,5
9,0	5,1	5,0	4,95	4,90	0,10	0,05	42,0	4445,8
10,0	5,8	5,7	5,55	5,50	0,10	0,05	45,0	4706,3
11,0	6,4	6,3	6,15	6,15	0,10	0,00	49,0	5046,7
12,0	7,1	6,9	6,75	6,75	0,20	0,00	53,0	5379,2
13,0	7,7	7,5	7,35	7,35	0,20	0,00	56,0	5623,3
14,0	8,2	8,1	7,80	7,80	0,10	0,00	59,0	5863,0
15,0	8,9	8,8	8,40	8,40	0,10	0,00	62,5	6136,9

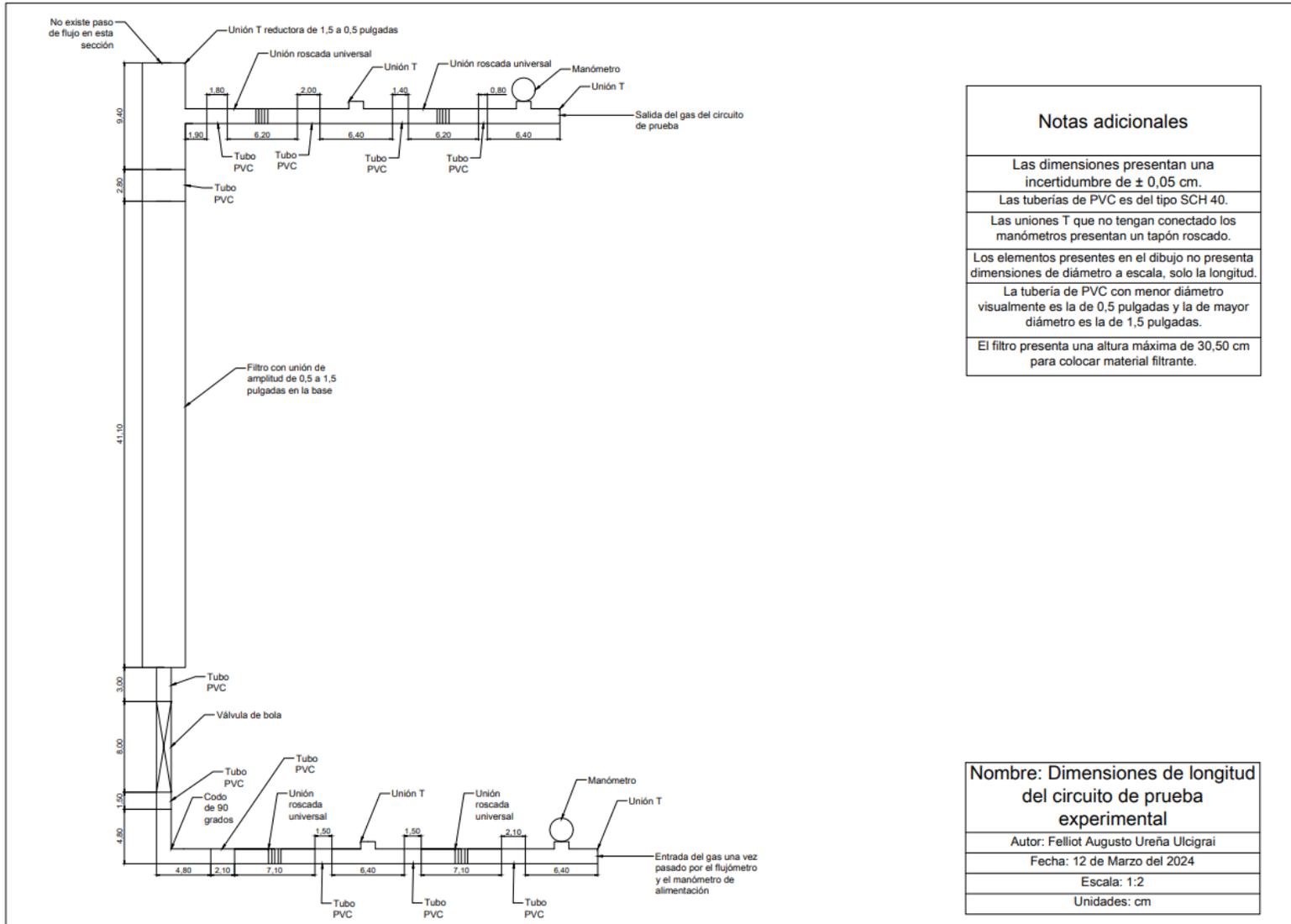
Cilindros poliméricos de mayor diámetro

Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada (filtro 100% con cilindros de 16,08 mm de diámetro y 16,42 mm de largo)

Presión Alimentación (inH2O)	Presión Entrada circuito (inH2O)	Presión Salida circuito (inH2O)	Presión Entrada filtro (inH2O)	Presión Salida filtro (inH2O)	Caída de presión circuito (inH2O)	Caída de presión filtro (inH2O)	Flujómetro	Conversión Flujómetro
1,0	0,4	0,4	0,40	0,40	0,0	0,00	6,5	1023,9
2,0	1,0	1,0	0,95	0,90	0,0	0,05	12,5	1646,2
3,0	1,5	1,5	1,45	1,45	0,0	0,00	17,5	2151,1
4,0	2,1	2,1	2,00	2,00	0,0	0,00	22,0	2594,9
5,0	2,8	2,7	2,50	2,55	0,1	-0,05	27,0	3076,3
6,0	3,3	3,3	3,10	3,15	0,0	-0,05	31,0	3452,4
7,0	3,9	3,9	3,65	3,70	0,0	-0,05	34,5	3775,0
8,0	4,5	4,5	4,30	4,30	0,0	0,00	38,0	4091,5
9,0	5,2	5,2	4,95	4,95	0,0	0,00	42,0	4445,8
10,0	5,6	5,6	5,50	5,50	0,0	0,00	46,0	4792,2
11,0	6,3	6,3	6,10	6,15	0,0	-0,05	49,5	5088,7
12,0	7,0	7,0	6,70	6,75	0,0	-0,05	53,0	5379,2
13,0	7,6	7,5	7,20	7,25	0,1	-0,05	56,0	5623,3
14,0	8,2	8,1	7,80	7,90	0,1	-0,10	59,5	5902,5
15,0	8,8	8,7	8,35	8,40	0,1	-0,05	62,5	6136,9

esferas pequeñas de azúcar								
Ensayo apertura 255,0 grados de la válvula de salida del circuito a partir de válvula cerrada (filtro 100% con esferas de 3,160 mm de diámetro)								
Presión Alimentación (inH2O)	Presión Entrada circuito (inH2O)	Presión Salida circuito (inH2O)	Presión Entrada filtro (inH2O)	Presión Salida filtro (inH2O)	Caída de presión circuito (inH2O)	Caída de presión filtro (inH2O)	Flujómetro	Conversión Flujómetro
1,0	0,4	0,4	0,40	0,30	0,0	0,10	6,0	971,2
2,0	1,0	0,9	0,95	0,85	0,1	0,10	12,5	1646,2
3,0	1,5	1,4	1,45	1,35	0,1	0,10	17,5	2151,1
4,0	2,2	2,1	2,05	1,90	0,1	0,15	21,5	2546,1
5,0	2,7	2,6	2,50	2,40	0,1	0,10	26,0	2981,0
6,0	3,3	3,2	3,15	3,05	0,1	0,10	30,0	3359,1
7,0	4,0	3,8	3,75	3,65	0,2	0,10	34,5	3775,0
8,0	4,6	4,4	4,35	4,20	0,2	0,15	38,0	4091,5
9,0	5,3	5,0	5,00	4,85	0,3	0,15	42,0	4445,8
10,0	5,9	5,6	5,60	5,45	0,3	0,15	45,5	4749,3
11,0	6,4	6,1	6,15	6,00	0,3	0,15	49,0	5046,7
12,0	7,1	6,9	6,85	6,70	0,2	0,15	52,0	5296,8
13,0	7,7	7,4	7,30	7,15	0,3	0,15	55,0	5542,4
14,0	8,3	8,0	7,85	7,70	0,3	0,15	58,5	5823,4
15,0	9,0	8,6	8,45	8,25	0,4	0,20	62,0	6098,2

Anexo E.



Notas adicionales

Las dimensiones presentan una incertidumbre de $\pm 0,05$ cm.

Las tuberías de PVC es del tipo SCH 40.

Las uniones T que no tengan conectado los manómetros presentan un tapón roscado.

Los elementos presentes en el dibujo no presenta dimensiones de diámetro a escala, solo la longitud.

La tubería de PVC con menor diámetro visualmente es la de 0,5 pulgadas y la de mayor diámetro es la de 1,5 pulgadas.

El filtro presenta una altura máxima de 30,50 cm para colocar material filtrante.

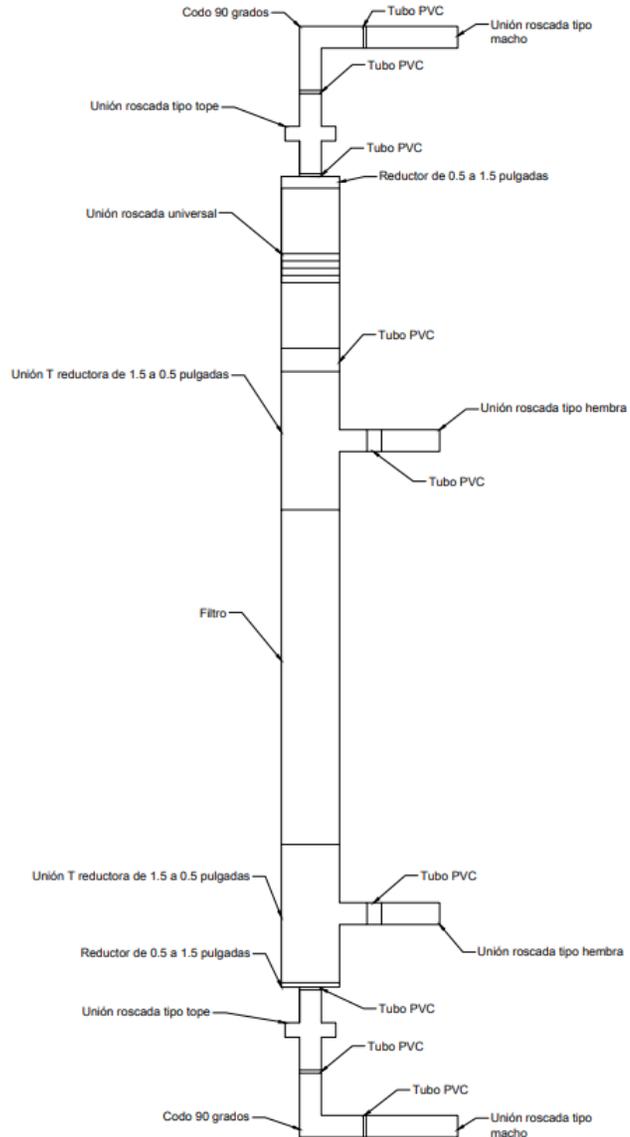
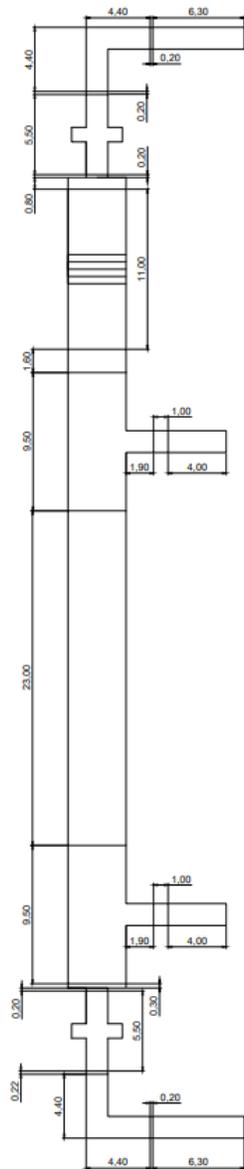
Nombre: Dimensiones de longitud del circuito de prueba experimental

Autor: Felliott Augusto Ureña Ulcigrai

Fecha: 12 de Marzo del 2024

Escala: 1:2

Unidades: cm



Notas adicionales
Las dimensiones presentan una incertidumbre de $\pm 0,05$ cm.
Las tuberías de PVC es del tipo SCH 40.
Los elementos presentes en el dibujo no presenta dimensiones de diámetro a escala, solo la longitud.
La tubería de PVC con menor diámetro visualmente es la de 0,5 pulgadas y la de mayor diámetro es la de 1,5 pulgadas.
El filtro presenta una altura máxima de 28,50 cm para colocar material filtrante.

Nombre: Dimensiones de longitud del subensamblado optimizado
Autor: Felliott Augusto Ureña Ulcigrai
Fecha: 18 de abril del 2024
Escala: 1:2
Unidades: cm

Anexo F.

Tabla del caudalímetro empleado en la optimización

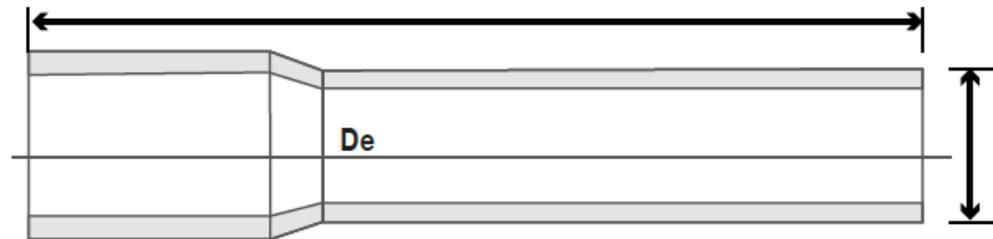
Tube Number: 014-96(GL,SA,ST,CA,TA)
Units : std ml/min

Float Material: Glass (GL) Sapphire (S)
Float Density : 2.53 g/ml 3.98 g/ml

AIR		WATER	
Scale Readings	Flow [ml/min]	Scale Readings	Flow [ml/min]
65 ---	6318	65 ---	217
60 ---	5940	60 ---	205
55 ---	5550	55 ---	191
50 ---	5143	50 ---	177
45 ---	4712	45 ---	163
40 ---	4271	40 ---	147
35 ---	3824	35 ---	128
30 ---	3350	30 ---	112
25 ---	2882	25 ---	97
20 ---	2385	20 ---	74
15 ---	1901	15 ---	54
10 ---	1389	10 ---	32
5 ---	875	5 ---	10

Anexo G.

Tabla de Amanco:



Tubo con casquillo.

Dimensiones y presiones máxima de trabajo.

Tubería Cédula 40							
Diámetro Nominal		Diámetro Exterior Promedio		Espesor Mínimo de Pared		Presión de trabajo a 23 °C	
Pulgadas	mm	Pulgadas	mm	Pulgadas	mm	PSI	kg/cm ²
1/2"	13	0.84	21.3	0.15	2.8	594.6	41.8
3/4"	19	1.05	26.7	0.15	2.9	478.6	33.6
1"	25	1.32	33.4	0.18	3.4	449.6	31.6
1 1/4"	32	1.66	42.2	0.19	3.6	377.1	26.5
1 1/2"	38	1.90	48.3	0.20	3.7	333.6	23.4
2"	50	2.38	60.3	0.22	3.9	275.6	19.3
2 1/2"	60	2.88	73.0	0.28	5.2	304.6	21.4
3"	75	3.50	88.9	0.30	5.5	261.1	18.3
4"	100	4.50	114.3	0.34	6.0	217.6	15.3
6"	150	6.63	168.3	0.43	7.1	174.0	12.2
8"	200	8.63	219.1	0.50	8.2	159.5	11.2

Nota: La longitud de la tubería se suministra en tramos de 6.0 m, con una tolerancia de +/- 0.5%