

Desarrollo de una nueva versión del dispositivo dilutor de gases de referencia TGD 2000
del CDT de Gas

Leslie Tatiana Rincón Eugenio 2130815

Cristian David Mojica Cabeza 2130768

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Químico

Director

Carlos Eduardo García Sánchez

Ph. D en Ingeniería Química

Codirectora

Diana Marcela Castillo Blanco

Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A mis padres, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional en cada decisión y etapa de mi vida.

Mamá, gracias por llenar mi vida de amor, por ser un gran ejemplo y, sobre todo, por escucharme y entenderme en cada momento que lo he necesitado.

Papá, gracias por tus consejos, por darme alas para cumplir mis sueños e impulsarme siempre a tomar el mejor camino.

A mi hermano Diego Alejandro, por motivarme a ser cada día una mejor persona y así llegar a ser un gran ejemplo y apoyo en su vida.

A todos mis compañeros de carrera, en especial a Oskar quién siempre fue mi compañero de estudio y un gran apoyo durante todos mis años de universidad.

A mi compañero de tesis Cristian, por su entrega y dedicación en este proyecto.

¡GRACIAS, TOTALES!

Leslie.

Dedicatoria

A mi madre por ser mi apoyo incondicional, mi despertador, mi guía, mi confidente, mi
todo.

A mi padre, sin su apoyo y confianza en mí no sería quien soy.

A mis tíos y tías por su constante interés en mi realización personal y profesional.

A mi primer y único sobrino, que me motiva a querer ser un ejemplo que seguir.

A mis compañeros a lo largo de la carrera, me prestaran apuntes o no, a cada persona que
me enseñó algo nuevo o me corrigió cuando me equivoqué.

A mi amigo Carlos Ulloa, un referente y fuente de conocimiento en los últimos semestres
de la carrera y la realización de este proyecto.

A mi parche del colegio, por prevalecer a pesar del tiempo.

Cristian.

Agradecimientos

Al profesor Carlos García por la oportunidad que nos dio al entregarnos este proyecto, por su interés en que se llevara a buen término, sus constantes correcciones y aportes.

A Diana Castillo, nuestra codirectora, por su apoyo y dedicación. Por estar pendiente de nosotros cada vez que íbamos a las instalaciones del CDT en Guatiguará.

A Oscar Salah y William Porras, por permitirnos usar el dispositivo que desarrollaron en la toma de datos necesaria para el proyecto.

Al Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT de Gas) y al Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE) por abrirnos las puertas y participar activamente en el encausamiento y desarrollo del proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Antecedentes	19
2. Objetivos	22
2.1 objetivo general.....	22
2.2 objetivos específicos	22
3. Metodología	23
3.1. Evaluación preliminar del equipo.....	24
3.2. Modelo matemático	25
3.3. Elección y adquisición de los materiales y componentes necesarios para la nueva versión del equipo dilutor	27
3.4. Pruebas experimentales	27
4. Resultados y análisis	29
4.1. Modelado matemático	29
4.2. Revisión del rango actual del dilutor bajos las restricciones y evaluación de la pertinencia de nuevo(s) capilar(es).....	31
4.3. Elección y adquisición de los materiales y componentes necesarios para la nueva versión del equipo dilutor	33
4.4. Consolidación del diseño del equipo	34
4.5. Descripción del nuevo pfd del dilutor de gases tgd 2000	35

4.6.	Diseño manifold	36
4.7.	Montaje manifold	37
4.8.	Análisis de pruebas experimentales.....	39
5.	Conclusiones	43
6.	Recomendaciones	44
	Referencias bibliográficas.....	45
	Apéndices.....	49

Lista de Tablas

Tabla 1. Rangos de concentración de CO cubiertos por los capilares de 50(amarillo),75(verde) y 100(naranja) μm de acuerdo con la ecuación de Hagen-Poiseuille, empleando el capilar de 250 μm (Celeste) para dilución.....	32
Tabla 2. Materiales requeridos para el nuevo montaje del manifold	35
Tabla 3. Comparación ajuste cúbico, cuadrático y lineal para capilar de 100 μm , 10 cm	40
Tabla 4. Comparación ajuste cúbico, cuadrático y lineal para capilar de 100 μm , 5cm	40
Tabla 5. Abanicos de concentraciones de CO cubiertos por los capilares de 50(amarillo),75(verde) y 100(naranja) μm empleando los ajustes a datos experimentales, empleando el capilar de 250 μm (Celeste) para dilución.....	42

Lista de Figuras

Figura 1. Equipo dilutor de gases TGD 2000 del CDT de Gas.	18
Figura 2. Esquema metodología	23
Figura 3. Comparación ajuste cuadrático capilar 50 μm , 5 cm con ecuación de Hagen - Poiseuille.....	30
Figura 4. Características de los diferentes materiales para capilares.....	33
Figura 5. Nuevo PFD dilutor de gases TGD 2000.....	36
Figura 6. Montaje final manifold	38
Figura 7. Montaje final manifold junto con el medidor de flujo Honeywell Zephyr™	39
Figura 8. Aproximación cuadrática para Capilar de 100 μm , 10cm.....	41

Lista de Apéndices

Apéndice A: Diseño actual del equipo dilutor TGD 2000.....	49
Apéndice B: Regulador manipulado y sensor que da el caudal de acuerdo con el cambio en la caída de presión.....	50
Apéndice C: Curvas de comparación entre la fórmula aproximada y la ecuación de flujo de Hagen-Poiseuille	51
Apéndice D: Definición de rangos cubiertos con la ecuación de Hagen-Poiseuille para CO y CH ₄	53
Apéndice E: Nuevo diseño del equipo dilutor y del <i>manifold</i>	54
Apéndice F: Montaje y adecuación del <i>manifold</i>	55
Apéndice G: Ajustes cúbicos, cuadráticos y lineales para los capilares de 100 μm , 5cm y 100 μm , 10cm	56
Apéndice H: Curvas de comparación entre el ajuste cuadrático y la ecuación de flujo de Hagen-Poiseuille para los nuevos capilares.....	59
Apéndice I: Abanico de concentraciones empleando los ajustes a datos experimentales	60

Lista de abreviaturas

MRC	Material de referencia certificado
TGD 2000	<i>Trace generator device 2000</i>
PEEK	<i>Polyether Ether Ketone</i>
MGC	Mezcla de Gases de Calibración
VIM	Vocabulario Internacional de Metrología
%LEL	<i>Lower Explosive Limit</i>

Resumen en español

TÍTULO: DESARROLLO DE UNA NUEVA VERSIÓN DEL DISPOSITIVO DILUTOR DE GASES DE REFERENCIA TGD 2000 DEL CDT DE GAS.¹

AUTORES: LESLIE TATIANA RINCÓN EUGENIO, CRISTIAN DAVID MOJICA CABEZA.**

PALABRAS CLAVE: MATERIAL DE REFENCIA, POLIETERETERCETONA, MEZCLA DE CALIBRACIÓN, DILUTOR, CAPILAR.

DESCRIPCIÓN:

El *Trace Generator Device 2000* (TGD 2000) desarrollado por el CDT de Gas, presenta oportunidades de mejora en su diseño, por lo cual se generó una nueva versión a partir de los requisitos definidos. Dichos requisitos consistían en una reorganización de los componentes para un uso más dinámico del equipo, el uso de un diferencial de presión máximo que no exceda los 400 kPa, y la posibilidad de abarcar el rango de concentraciones requerido: 1 a 100% del Límite inferior de Explosividad (LEL, por sus siglas en inglés) para el Metano (CH₄) y 3 a 100 partes por millón (ppm) para Monóxido de Carbono (CO), partiendo de las composiciones de los MRGC que posee el CDT de Gas: 1500 ppm CO y 18% mol (360% LEL) Metano.

La nueva versión del dilutor está compuesto por dos (2) líneas, una de Material de Referencia (MR) que consta de dos (2) capilares de Polietereetercetona (PEEK) de 5 cm de longitud, de 50 y 75 μ m de diámetro respectivamente, y otra de Material de Dilución (MD), con un capilar de Acero Inoxidable de 5 cm de longitud y 250 μ m de diámetro. Con ayuda de la ecuación de Hagen-Poiseuille (ISO 6145-5:2009) se realizó una predicción del comportamiento de los capilares, y, con base en estos resultados se evaluó la pertinencia de implementar un tercer capilar de 5 cm de longitud y 100 μ m de diámetro en la línea de Material de Referencia. Se empleó un diseño provisional con el objetivo de generar un modelo empírico para el caudal a través del capilar como función de la caída de presión, siendo el ajuste cuadrático, con un R² ajustado de 0,999968, el que mejor describe el comportamiento de los datos. Finalmente, con el modelo obtenido, válido para un rango de 30 a 195 kPa, se estimaron los rangos de concentraciones cubiertos por el diseño propuesto, la totalidad del rango para el CO y un 43,74% LEL para CH₄.

¹ Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: PhD. Carlos Eduardo García Sánchez

Resumen en inglés

TITLE: DEVELOPMENT OF A NEW VERSION OF THE DILUTOR GAS DEVICE OF REFERENCE TGD 2000 BY THE CDT DE GAS.*

AUTHORS: LESLIE TATIANA RINCÓN EUGENIO, CRISTIAN DAVID MOJICA CABEZA.**

KEY WORDS: REFERENCE MATERIAL, POLYETERETERCETONE, CALIBRATION MIXTURE, DILUTOR, CAPILLARY.

DESCRIPTION:

The Trace Generator Device 2000 (TGD 2000) developed by the CDT de Gas, presents opportunities for improvement in its design, for which a new version was generated from the defined requirements: a reorganization of the components for a more dynamic use of the equipment, a maximum pressure that does not exceed 400 KPa and cover the range of concentrations required: 1 to 100% of the Lower Explosive Limit (LEL) for Methane (CH₄) and 3 to 100 parts per million (ppm) for Carbon Monoxide (CO), starting from the compositions of the MRGC that have the CDT de Gas: 1500 ppm and 18% mol (360%LEL) Methane.

The dilutor is composed of two (2) lines, one of Reference Material (MR) that is conformed by two (2) capillaries of Polyether ether ketone (PEEK) of 5 cm long, 50 and 75 μm in diameter respectively, and another of Dilution material (MD), with a stainless steel capillary of 5 cm long and 250 μm in diameter. With the help of the Hagen-Poiseuille equation (ISO 6145-5: 2009), a prediction of the behavior of the capillaries was made, and, based on these results, the relevance of implementing a third capillary of 5 cm long and 100 μm in diameter was evaluated in the Reference Material line. A provisional design was used in order to generate an empirical model for the capillary, being the quadratic adjustment, with an adjusted R^2 of 0,99968, the one who describes in a better way the behavior of the data. Finally, with the model obtained, valid for a range of 30 to 195 KPa, the ranges of concentrations covered by the proposed design were estimated, the entire range for CO and 43,74% LEL for CH₄.

* Degree work.

** Faculty of Physic-Chemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: PhD. Carlos Eduardo García Sánchez.

Introducción

La microfluídica es un campo multidisciplinar el cual se encarga del estudio de flujos simples o complejos que circulan en un sistema utilizando canales con dimensiones de diez a varios cientos de micrómetros. Esta disciplina ofrece nuevas alternativas para el control de concentraciones de los compuestos presentes en un fluido. En la actualidad, existen diferentes tipos de microbombas, microválvulas y micromezcladores que son usados en aplicaciones microfluídicas. Por tal motivo, la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas (CDT de Gas) ha incursionado en el desarrollo de dispositivos microfluídicos con el diseño e implementación de un dispositivo dilutor de gases de referencia, el *Trace Generator Device* (TGD 2000) (**Figura 1**), el cual puede generar múltiples mezclas de gases de calibración, empleadas en la calibración de detectores de gases, a partir de un solo Material de Referencia Certificado (MRC), usando varios capilares en los que se puede manipular el flujo controlando la caída de presión. La dilución se realiza por medio de una mezcla dinámica del MRC, que tiene una composición conocida y estable del analito de interés y una baja incertidumbre, y la matriz de dilución del MRC (N_2 o aire). Este dispositivo se diseñó con el objetivo de lograr la generación de caudales másicos con una relación hasta de 2000:1 entre el gas de dilución y el MRC, respectivamente. (Pedraza y García, 2015).

El *manifold* del dispositivo dilutor de gases de referencia está compuesto por tres capilares con una longitud de 5 cm: dos por los cuales fluye el material de referencia, de 50 y 75 μm de diámetro interno; y uno de 250 μm de diámetro interno, por el que fluye la matriz de dilución (N_2 o Aire). Para generar los caudales necesarios que permiten producir las concentraciones más altas se necesita de una caída de presión relativamente alta a través de dichos capilares,

lo que puede ocasionar fugas en el sistema. Por esto, se hace imperativo un rediseño del *manifold*, de manera que las presiones requeridas para generar el rango de concentraciones deseado no generen fugas.

Actualmente, se utiliza un modelo empírico para describir el comportamiento de los capilares y sus elementos adyacentes. Esta ecuación modela de manera satisfactoria el comportamiento de los microflujos a través de los capilares y el *tubing* contiguo, entre los puntos de toma de presión, pero su rango de validez se limita a la actual conformación del sistema de capilares y a los rangos de valores de las variables de influencia en los que se llevó a cabo la experimentación. Por otra parte, la norma ISO 6145-5:2009 propone una ecuación para modelar el flujo a través de un capilar basada en una aproximación de flujo incompresible que depende de las características del capilar y el fluido como la presión, viscosidad dinámica, diámetro y longitud del capilar, entre otros. Esta ecuación es de gran utilidad para estimar el comportamiento del flujo a través de los nuevos capilares que se desean adquirir, de modo que se pueda llevar a cabo una adecuada selección. El modelo que describe la norma se basa en la ecuación de Hagen-Poiseuille, y en nuestro caso de estudio se espera que permita decidir cuáles y cuantos son los capilares necesarios para el nuevo sistema, teniendo en cuenta los objetivos y las restricciones que sean impuestas sobre los rangos de dilución y la operación del equipo.

En un comienzo, se pensó en el desarrollo del dilutor TGD 2000 para la calibración de equipos de medición de gases contaminantes en el gas natural, como lo son H_2S y CO_2 , y gases presentes en el ambiente como CO , SO_2 , NO_2 y O_3 . Por tanto, los capilares que se escogieron están elaborados en un polímero de alta gama denominado *Polyether Ether Ketone* (PEEK), que posee baja adsorción y alta resistencia a la corrosión. Adicionalmente,

los capilares tienen un recubrimiento interno de sílice con el fin de minimizar el contacto entre el gas y las paredes de PEEK. Este arreglo de capilares se encuentra sobre un soporte sumergido en un baño de agua, con el fin de mantener constante la temperatura de los capilares. Actualmente, el dispositivo dilutor solo está calibrando equipos de medición de CO y CH₄, y por tanto no se hace estrictamente necesario el uso de capilares de este material, dado que los compuestos que se están manejando no son corrosivos. Por otra parte, se desea evaluar la necesidad de mantener el sistema de capilares sumergido en el baño de agua, pues el dispositivo dilutor se encuentra en un ambiente de temperatura controlada.

Por lo presentado anteriormente, se evidencia la necesidad de generar una serie de ajustes al dilutor TGD 2000 actual. Por tanto, dentro de los objetivos planteados para este proyecto se propuso en primera instancia la caracterización y consolidación de los requisitos de diseño del equipo dilutor TGD 2000. A partir de esto, se buscaron posibles soluciones a los principales problemas evidenciados como las fugas presentadas en los capilares, la posibilidad de prescindir del baño en el que se encuentran sumergidos los capilares y también, la conveniencia de mantener o cambiar el material constituyente de los capilares con respecto a los gases a diluir.

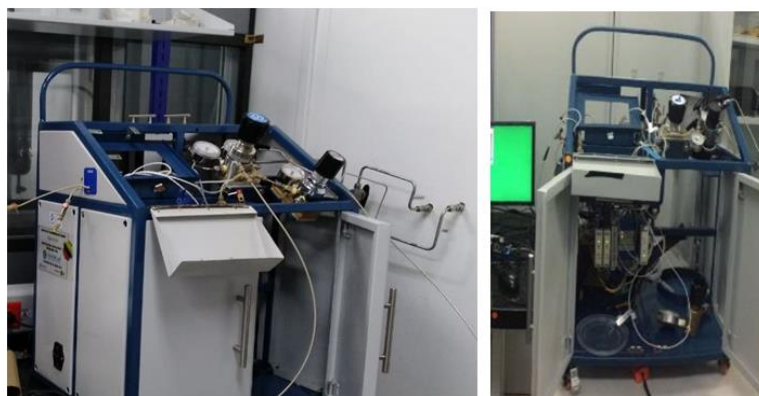


Figura 1. Equipo dilutor de gases TGD 2000 del CDT de Gas.

1. Antecedentes

La microfluídica es un campo de investigación relativamente nuevo que comenzó su estudio y desarrollo a comienzos de los años ochenta. La fluídica, rama de la cual se desprende la microfluídica, tuvo su mayor auge en los años sesenta y setenta, teniendo su primera aparición en la URSS en 1958. Posteriormente, se desarrolló en los Estados Unidos y Europa, primero con fines militares y más tarde en aplicaciones civiles. En aquel entonces, la fluídica se ocupaba principalmente de los flujos de gas en dispositivos que involucraban tamaños milimétricos o submilimétricos (Kandlikar et al., 2018).

A partir de los años noventa, se aceleró el desarrollo de diferentes tecnologías microfluídicas. Las principales áreas de aplicación de los microfluidos incluyeron intercambiadores de calor miniaturizados para refrigerar circuitos integrados, sistemas portátiles de cromatografía de gases para la detección de contaminantes transmitidos en el aire, micro-reactores para generar pequeñas cantidades de productos químicos peligrosos o costosos, entre otras (Barber, Emerson, 2006).

El rápido desarrollo industrial y el uso y manejo cada vez más frecuentes de sustancias químicas tóxicas e inflamables en la industria, así como la creciente preocupación por la seguridad industrial y salud ocupacional por parte de los organismos gubernamentales, llevaron a la creación de una serie de instrumentos para detectar gases y vapores, así como aparatos para monitorear cuerpos hídricos que alertan inmediatamente cuando las

concentraciones sobrepasan los parámetros aceptables (Pioli, Nobre, Ribeiro de Vasconcellos, 1996).

Con el paso del tiempo, se ha tenido que hacer un estudio más riguroso del uso de microcapilares debido a que la mecánica de fluidos en dispositivos pequeños no necesariamente es la misma que se presenta a escala macroscópica. Esto se debe principalmente a los efectos de rarefacción, que normalmente se manifiestan cuando las longitudes características son del orden de $1\ \mu\text{m}$ en condiciones normales de temperatura y presión (Barber, Emerson, 2006).

Una de las aplicaciones de la microfluídica es la preparación de materiales de referencia, que son mezclas de sustancias con una composición definida con baja incertidumbre, y son empleados para verificar la calidad y la trazabilidad de los productos de metrología, para validar los métodos de medición analíticos, o para calibrar instrumentos. En 1915, Holmes desarrolló, para un informe de minería, uno de los primeros estudios relacionados con la preparación dinámica de MRG (materiales de referencia gaseosos) utilizando SO_2 como analito de interés. Sin embargo, los resultados no fueron los esperados ya que se obtuvieron errores entre el 6% y 33% para concentraciones de 5 ppm y 6 ppm respectivamente (Holmes, 1915).

En 1966, Thomas Moyer y Richard Amtower presentaron uno de los primeros métodos de preparación de MRG basado en dilución dinámica. Las pruebas fueron desarrolladas con contaminantes atmosféricos como SO_2 y H_2S los cuales eran inyectados en una corriente de

NO (primera dilución) por medio de una jeringa y posteriormente mezclada con el flujo de aire en el tubo (segunda dilución) (Moyer, Amtower, 1966).

En la actualidad, países como Alemania, España y Reino Unido ofrecen una amplia variedad de equipos generadores de mezclas de calibración. Por ejemplo, el TELEDYNE modelo T750 es un calibrador portátil basado en un microprocesador para analizadores de gases de precisión, que puede generar gases de calibración precisos para SO₂, H₂S, NO, NO₂, CO y O₃ con una precisión de medición de flujo de $\pm 1\%$ de escala completa (Teledyne, 2018).

En Colombia, el desarrollo de dispositivos generadores de mezclas de calibración es prácticamente nulo pues no se cuenta con los suficientes estudios y avances tecnológicos para el desarrollo de éstos. Es por esto por lo que es necesario importar MRG en cilindros de diferentes concentraciones, de acuerdo con los intervalos de operación de los analizadores y su aplicación.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar una nueva versión del dispositivo dilutor de gases de referencia TGD 2000 del CDT de Gas, con mejoras en la estabilidad de la presión, la distribución de componentes y la conveniencia de operación.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el dispositivo dilutor de gases de referencia TGD 2000 del CDT de Gas y consolidar sus requisitos de diseño.
- Evaluar la pertinencia de los materiales constituyentes de los capilares con respecto a los gases a diluir, la presión necesaria para generar las concentraciones requeridas y los capilares necesarios para producirlas.
- Plantear un rediseño del equipo a escala de laboratorio priorizando seguridad y un uso más dinámico del mismo.
- Realizar las pruebas necesarias para la puesta a punto del equipo y la validación del diseño, para su posterior acreditación.

3. Metodología

En el esquema que se presenta a continuación se muestran las etapas que conformaron la realización de este proyecto.



Figura 2. Esquema metodología

3.1. Evaluación preliminar del equipo

En un primer momento, con el uso constante del equipo se evidenció que este presentaba fugas al tratar de generar determinadas concentraciones de MC, que inciden en la precisión y repetibilidad de los experimentos realizados y genera problemas de seguridad. Dichas fugas se deben a las altas presiones necesarias para generar las concentraciones más altas de MC.

Como estos aspectos son fundamentales para un laboratorio de metrología, se dio la necesidad de evaluar la relación entre la causa de dichas fugas y una posible solución; llegando, con ayuda de la persona encargada del manejo diario del equipo, a plantear una hipótesis que relaciona la variable independiente (configuración del *manifold*), de alguna manera controlable, de forma directa o indirecta, con la variable causal del problema (las altas presiones necesarias para las concentraciones más grandes).

De acuerdo con lo anterior, como hipótesis de partida se sostiene que: puede reducirse la presión máxima necesaria para generar el abanico de concentraciones requeridas para calibración, cambiando la configuración del *manifold* (número, dimensiones y material de los capilares) del dispositivo dilutor TGD 2000.

En cuanto a la manipulación del equipo, existen ciertos aspectos mejorables con respecto a su diseño, en el **Apéndice A, Figura A1**, se puede observar que el *manifold* presenta inconvenientes al momento de utilizarlo pues al estar sumergido en un baño, cuya función es conservar su temperatura constante, es difícil manipular sus partes con buena precisión ya que el espaciamiento entre líneas de flujo es mínimo y las válvulas se encuentran muy cerca las unas de las otras. Por esto, se evalúa la pertinencia de mantener sumergido el *manifold* en un baño y se plantea un rediseño que tome a consideración las falencias presentes en el equipo actual.

3.2. Modelo matemático

Como el objetivo de la intervención al equipo es reducir las fugas, mediante una disminución en la presión máxima requerida, así como generar un flujo de salida menos variable que favorezca la repetibilidad del método, se realiza un análisis sobre la pertinencia de incluir un capilar adicional que cubra los rangos para los cuales era necesaria dicha presión máxima.

Para tal efecto, se cuenta con las aproximaciones empíricas de los capilares que se encuentran actualmente en uso, proporcionadas por el CDT de Gas, y con la ecuación (1), tomada de la norma ISO 6145-1, que tiene como condición que el gas de dilución no contenga el analito de interés, por lo cual es pertinente su uso.

Donde:

$$\text{(Ecuación 1)} \quad \varphi_{i,M} = \varphi_{i,A} \left(\frac{q_A}{q_A + q_B} \right)$$

$\varphi_{i,M}$	Concentración MGC
$\varphi_{i,A}$	Concentración MRGC
q_A	Caudal de CO
q_B	Caudal de N ₂

A sabiendas de que los capilares deben calibrarse en el patrón primario tipo pistón, normalmente empleado por el CDT de Gas para calibrar los medidores de flujo de caudales bajos, para poder usarse posteriormente; invertir demasiado en una aproximación ajustada para la mera evaluación de la pertinencia de un nuevo capilar no se justifica, por lo cual se decidió recurrir a modelos disponibles para el caudal a través de los capilares en cuestión para la etapa de diseño de la nueva versión del equipo. Los modelos que se usarán serán el modelo

empírico desarrollado en el CDT de Gas para cada línea de los capilares, y la ecuación de Hagen-Poiseuille.

Con ayuda de la herramienta Excel, y la ecuación (2) de flujo de Hagen-Poiseuille, conociendo las concentraciones iniciales del material de referencia y de dilución usados en el CDT de Gas, se calculan los parámetros necesarios para la ecuación de la norma.

$$\text{(Ecuación 2)} \quad \dot{m} = \frac{\pi \rho r^4 (P_1 - P_2)}{8 \eta L}$$

Donde:

r	Radio del capilar
P ₁	Presión de entrada al capilar
P ₂	Presión de salida del capilar
η	Viscosidad dinámica del gas a la temperatura de uso
L	Longitud del capilar

Una vez obtenidos estos datos se grafica Caudal vs Delta de Presión, para la aproximación empírica y los resultados obtenidos de la ecuación de la norma, evaluando la concordancia de los datos para los rangos de presión necesarios.

Finalmente, teniendo en cuenta que los diámetros de los capilares que se consiguen comercialmente son un conjunto discreto. se busca la combinación de capilares que genere el rango de concentraciones requeridas sin exceder la nueva presión máxima del sistema, con especial énfasis en si los capilares actualmente en uso logran cubrir todo el abanico de concentraciones o se hace necesaria la implementación de uno o más capilares.

3.3. Elección y adquisición de los materiales y componentes necesarios para la nueva versión del equipo dilutor

Como parte de la búsqueda de mejoras para el equipo dilutor TGD 2000 se decide estudiar la posibilidad y conveniencia de cambios en el material y número de los capilares de la línea de material de referencia. Por otra parte, el capilar de 250 micras de acero inoxidable usado para la línea de dilución no requiere altas presiones para generar las concentraciones requeridas, siendo innecesario cambiar o añadir capilares en esta línea. Para la elección de los nuevos capilares se tuvieron en cuenta factores claves tales como disponibilidad en el mercado, facilidad de manipulación, costos y rendimiento.

3.4. Pruebas experimentales

Con el propósito de calibrar los capilares del nuevo montaje del *manifold*, se conecta este a la línea de material de dilución (aire) proveniente del equipo, ya que, por cuestiones de seguridad, es preferible no trabajar con la línea que contiene metano y monóxido de carbono. Después, se procede a revisar si existen fugas con ayuda de una solución de agua con jabón, que, ante la presencia de fugas, generaría burbujas. Una vez abierta la válvula principal de la línea y el regulador de presión (**Apéndice B, Figura B1**) se comprueba que no existan fugas mediante la estabilización de la presión.

Con el equipo libre de fugas, se procede a realizar la toma de datos teniendo en cuenta los límites establecidos por el medidor de flujo que se va a emplear y la presión mínima de estabilización. El medidor que se usó para registrar la variación del caudal a diferentes caídas de presión fue un medidor desarrollado por el CDT de Gas, por los funcionarios Oscar Salah y William Porras, que consta de una placa programable, una pantalla para presentar el valor

medido y el cableado correspondiente conectados al sensor *Honeywell Zephyr™* (**Apéndice B, Figura B2**). Este dispositivo es un sensor digital el cual funciona bajo el principio de transferencia de calor, está conformado por un sistema microelectrónico y microelectromecánico con resistencias sensibles a la temperatura depositadas en delgadas películas de platino y nitruro de silicio. El dispositivo está diseñado para medir flujos de aire y otros gases no corrosivos a condiciones estándar (0 °C y 1 atm) y maneja un rango de caudal de $\pm 50 \text{ cm}^3/\text{min}$. El porcentaje de error para caudales hasta $14,3 \text{ cm}^3/\text{min}$ es de $\pm 1\%$ y de $14,3 \text{ cm}^3/\text{min}$ hasta $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ el error es de $\pm 7\%$ (Honeywell International Inc, 2015).

La toma de datos para el capilar de $100 \mu\text{m}$ y 5 cm, inicia con un barrido de menor a mayor presión, empezando en un delta de presión de 30 kPa y llevándolo a la presión a la que se genere un caudal aproximado de $50 \text{ cm}^3/\text{min}$. Seguidamente, se divide el rango de presiones de manera que se obtengan al menos 15 puntos para el posterior ajuste a una curva. Finalmente, se realiza una toma de datos por triplicado en cada uno de los puntos definidos de la siguiente manera: para la primera toma, se empieza en 30 kPa, se asciende hasta el valor máximo, para la segunda toma, se hace el barrido contrario, del valor máximo hasta el valor mínimo y para la toma final se hace de manera análoga a la primera toma.

Para el capilar de $100 \mu\text{m}$ y 10 cm, se realiza un procedimiento similar al descrito anteriormente, esperando que el valor de presión correspondiente a los $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ sea mayor.

4. Resultados y Análisis

4.1. Modelado matemático

Teniendo en cuenta los parámetros y el procedimiento descrito anteriormente en la metodología, se evaluaron los caudales correspondientes a diferentes valores de caídas de presión para los dos modelos que se compararon para cada capilar. El primer modelo fue el modelo empírico ajustado a datos experimentales para cada capilar, que tiene en cuenta los diferentes aditamentos presentes entre los dos puntos de toma de presión, y el segundo fue la ecuación de flujo de Hagen- Poiseuille, modela únicamente al capilar.

En la gráfica del capilar de 50 μm (**Figura 2**) se observa un comportamiento similar en ambos modelos para caídas de presión bajas, teniendo en cuenta que los valores de interés van hasta los 400 kPa, y con las consideraciones anteriormente mencionadas, puede asumirse que el comportamiento del flujo a través de los capilares es en cierta medida bien descrito por la ecuación de Hagen-Poiseuille para el límite inferior de la caída de presión. Para valores más altos, se cumple que la aproximación experimental se aleja cada vez más, excediendo en más de un 100% el valor predicho por la ecuación de Hagen-Poiseuille para un diferencial de presión de 400 kPa. Esta diferencia se debe a que el diferencial de presión para el modelo empírico se ajustó al diferencial de presión entre dos puntos que además del capilar incluyen una sección de *tubing* de un diámetro diferente, mientras que la ecuación de Hagen-Poiseuille asume que el diferencial de presión se presenta justo entre los extremos del capilar.

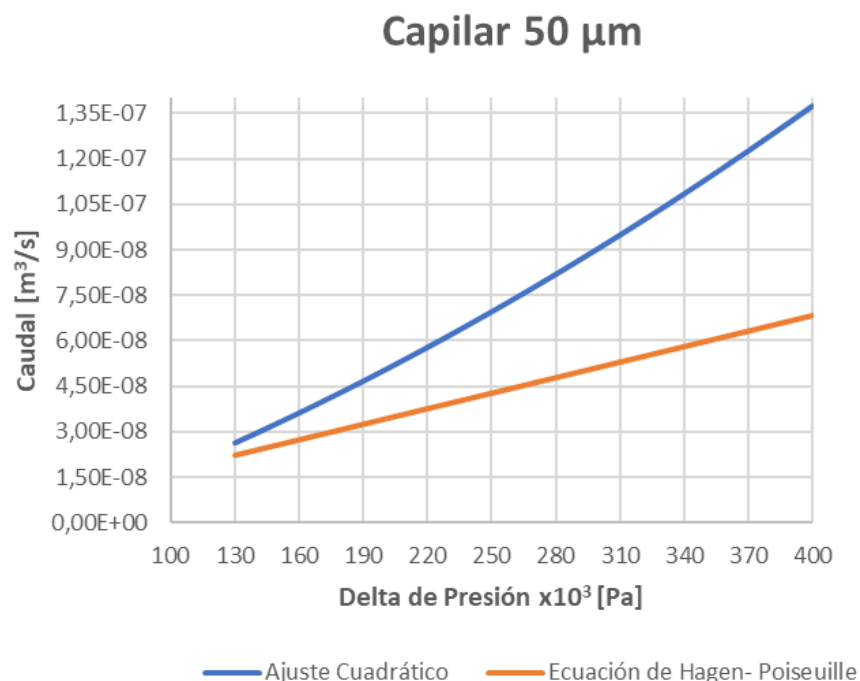


Figura 3. Comparación ajuste cuadrático capilar 50 μm , 5 cm con ecuación de Hagen - Poiseuille

En la gráfica del capilar de 75 μm (**Apéndice C, Figura C1**), el comportamiento de ambas curvas se asemeja aún más presentando variaciones relativamente pequeñas en caídas de presión bajas, y comportándose de manera similar al capilar de 50 micras para caídas de presión cercanas al límite superior.

Contrariando, el capilar de 250 μm (**Apéndice C, Figura C2**) presenta un desvío notable del comportamiento descrito por los otros capilares, ya que para el ajuste experimental los valores de caudal son más bajos que para el ajuste de la ecuación de Hagen-Poiseuille, incluso para caídas de presión cercanas a los 400 kPa. Teniendo en cuenta que este es el capilar de dilución, bajo la condición de caudal constante que se pretende trabajar, este capilar es el que aporta el mayor porcentaje de dicho caudal, porque para la mayor parte del rango de concentraciones excede en uno o dos rangos de magnitud el caudal generado por los

capilares de material de referencia. Por consiguiente, opera en un rango de presiones relativamente pequeño, lo que hace necesario acoplar una aproximación teórica de otro capilar obtenida a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille, pero utilizando 200 μm como diámetro del capilar y 5 cm de longitud, (**Apéndice C, Figura C3**).

4.2. Revisión del rango actual del dilutor bajos las restricciones y evaluación de la pertinencia de nuevo(s) capilar(es)

Partiendo de la ecuación de Hagen-Poiseuille para el rango de presiones, se plantea un diseño en el que para el material de dilución se emplea el capilar de 250 μm (200 μm) y para el material de referencia, los capilares de 50, 75, 100 y 150 μm , todos estos de 5 cm de longitud. Al conocer el comportamiento real de dos capilares con dicha longitud, resulta conveniente mantener fijo el parámetro longitud, y para diámetros superiores a 75 μm se encuentran disponibles en presentaciones de 100 y 150 μm . De esta manera, se busca obtener dos tablas, una para concentraciones de CH_4 y otra para concentraciones de CO , en las que para valores de caudal total cercanos a $8,33 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, caudal mínimo requerido registrado en los manuales de los dispositivos a calibrar (0,5 l/min), se logren alcanzar los abanicos de concentración descritos en los manuales, 0,03 a 5% molar (0,6 a 100% LEL) para el CH_4 y 3 a 100 ppm para el CO . Dichos cálculos se realizan basándose en las composiciones de los MRGC que posee el CDT de Gas: 1500 ppm CO y 18% mol Metano.

Como se observa en la tabla de CO (**ver Tabla 1**) el capilar de 50 μm cubre aproximadamente de 4 a 12 ppm y el de 75 μm de 16 a 61 ppm, lo que corresponde a más de la mitad del rango total, si se tiene en cuenta que el caudal que realmente producen los

capilares es mayor al mostrado por la formula (indicado en recuadros rojos), quedaría por cubrir un rango bastante pequeño (se llegaría hasta 90 ppm), para lo que sería más que suficiente añadir solo el capilar de 100 μm y 5cm.

Tabla 1. Rangos de concentración de CO cubiertos por los capilares de 50(amarillo),75(verde) y 100(naranja) μm de acuerdo con la ecuación de Hagen-Poiseuille, empleando el capilar de 250 μm (Celeste) para dilución

Capilar para MRGC [μm]	DeltaP [KPa]	QA[m ³ /s]	DeltaP [KPa]	QB[m ³ /s]	[CO] [ppm]	QT [m ³ /s]
50	200,00	3,41E-08	190,20	8,30E-06	6,14	8,33E-06
50	305,00	5,20E-08	189,79	8,28E-06	9,36	8,33E-06
50	395,00	6,73E-08	189,42	8,27E-06	12,12	8,33E-06
75	105,00	9,06E-08	188,89	8,24E-06	16,31	8,33E-06
*	75	157,00	187,86	8,20E-06	24,39	8,33E-06
75	295,00	2,55E-07	185,13	8,08E-06	45,82	8,33E-06
75	395,00	3,41E-07	183,17	7,99E-06	61,35	8,33E-06
100	120,00	3,27E-07	183,49	8,01E-06	58,90	8,33E-06
**	100	185,00	179,40	7,83E-06	90,82	8,33E-06
100	200,00	5,45E-07	178,46	7,79E-06	98,19	8,33E-06

* Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 50 μm

**Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 75 μm

QA= Caudal de material de referencia con su respectiva caída de presión, QB= Caudal de dilución,

[CO]= Concentración de CO, QT= Caudal total = QA + QB

Para la tabla de CH₄ (**Apéndice D, Tabla D1**), el capilar de 50 μm cubre de 1% LEL hasta aproximadamente 3% y el de 75 μm de 4% hasta 15% aproximadamente. Teniendo en cuenta que, en la práctica, el capilar puede producir un caudal mayor al descrito por la fórmula de Hagen- Poiseuille, se llegaría a un 22% LEL con el capilar de 75 μm ; con la predicción hecha para el capilar de 100 μm y 5cm se llega a cubrir hasta un 47% del rango, pero teniendo en cuenta que en la práctica este rango aumentaría, debe evaluarse la pertinencia de si añadir o no un cuarto capilar.

Si bien para hacer un montaje de tres capilares en una línea se requiere de una cruz, para hacer un montaje de cuatro capilares, se requerirían aditamentos extras que para no entorpecer la manipulación del equipo, requerirían de un mayor espacio, además, teniendo en cuenta que las concentraciones no son independientes y que una concentración de 100% LEL corresponde a 500 ppm de CO, siendo el máximo de los detectores 100 ppm, trabajar por largos periodos de tiempo generando flujos con estas concentraciones, podría ser perjudicial para el operario, por lo que realmente no se usarían tales concentraciones para efectos de calibración, siendo así, relativamente baja la utilidad de añadir el cuarto capilar de 150 μ m.

4.3. Elección y adquisición de los materiales y componentes necesarios para la nueva versión del equipo dilutor

Las opciones que se analizaron y sus respectivas características se presentan en el siguiente esquema.

Vidrio de borosilicato

- Alta resistencia a la corrosión por agua, ácidos, soluciones salinas, álcalis y sustancias orgánicas para productos duraderos en entornos corrosivos.
- Buena resistencia al choque térmico (pequeños coeficientes de dilatación térmica)
- Químicamente inerte y no combustible.
- En las dimensiones requeridas, su rigidez lo hace quebradizo.

Acero inoxidable

- Es dúctil y utilizando las herramientas adecuadas, no es difícil de doblar y cortar.
- Puede soportar caudales muy altos, que superan los 40m/s
- No se encuentra disponibilidad de capilares de orden nanométrico.

PEEK (Poliéter éter cetona)

- Al ser un material polimérico no se corroe.
- Tiene buenas propiedades mecánicas y resistencia a productos químicos, resistencia a la abrasión y resistencia a la hidrólisis.
- Como con la mayoría de los polímeros, la degradación de los rayos UV es preocupante.
- Excelente resistencia a la fatiga.

Figura 4. Características de los diferentes materiales para capilares

En un principio se tenía como factor decisivo el costo de los capilares, pero, debido a la falta de información y la disponibilidad limitada de dimensiones métricas en los diferentes

materiales propuestos, no se encuentra forma de hacer una comparación directa entre costos, por tanto, no se tiene en cuenta este factor al momento de elegir el nuevo material de los capilares.

De acuerdo con lo anterior, se descartan los capilares de acero, ya que la disponibilidad en los diámetros a escala micrométrica es mínima, limitando las opciones de capilares a escoger para generar los flujos requeridos con una caída de presión controlada.

Una vez analizadas las ventajas y desventajas de los materiales restantes, se decide trabajar con los capilares hechos en PEEK debido principalmente a que, en el montaje del equipo, los capilares están sometidos a un torque que se produce al manipular las válvulas y gracias a que el PEEK es bastante flexible, soporta este torque y recupera su forma original sin riesgo de quebrarse.

4.4. Consolidación del diseño del equipo

Después de un análisis detallado del funcionamiento del dilutor, se logra identificar ciertos puntos clave, donde la manipulación (principalmente de las válvulas) se dificulta, por lo que el nuevo diseño incluye un reordenamiento del montaje actual, priorizando una mejor distribución de los componentes, además de la practicidad y comodidad a la hora de manejar el equipo.

Se seleccionó el programa EDRAW MAX en su versión de prueba para crear el nuevo PFD del dilutor TGD 2000 ya que es una herramienta bastante práctica que permite crear diagramas de flujo de manera detallada y precisa. En este PFD se logró plasmar el nuevo reordenamiento que se pensó para el equipo dilutor.

Una vez se tiene consolidado el diseño del nuevo *manifold*, se genera una orden de compra en donde se piden los materiales y aditamentos requeridos, teniendo en cuenta que los

aditamentos que tienen contacto directo con los capilares deben ser necesariamente del mismo material (PEEK) y para aquellos que no, se prefiere acero inoxidable por ser lo habitual en montajes de este estilo (**Tabla 2**). La base de la nueva estructura se mandó a hacer en MEGA TONOS en la ciudad de Bucaramanga, se decidió hacer la placa en aluminio debido a que este material es bastante liviano y resistente. Posteriormente, con ayuda de herramientas facilitadas por el CDT de Gas se realizan las adecuaciones necesarias para el montaje.

Tabla 2. *Materiales requeridos para el nuevo montaje del manifold*

CANTIDAD (unidades)	PRODUCTO
4	Válvula 1/8 in PEEK
5	Codos 1/8 in PEEK
2	Cruces 1/8 in Acero inoxidable
2	Tubing 1/8 in (metros)
1	Te 1/8 in Acero inoxidable
1	Cruz 1/8 PEEK
1	Paquete de férulas (10 unidades)
1	Capilar de 50 μm y 5 cm (5 unidades)
1	Capilar de 75 μm y 5cm (5 unidades)
1	Capilar de 100 μm y 5 cm (5 unidades)

4.5. Descripción del nuevo PFD del dilutor de gases TGD 2000

En la **Figura 5** se puede observar el reordenamiento que se le dio a ciertos elementos del dilutor, de manera que la mayoría de los componentes estén visibles y aquellos que requieran manipulación sean fácilmente accesibles. El sistema consta de dos líneas, la línea de la matriz (línea de CO) está compuesta por un regulador de presión, válvulas de cierre y un manómetro y la línea de dilución (línea de N₂) se compone por un regulador de presión, filtros de gas, válvulas de cierre y un manómetro. Estas dos líneas llegan al *manifold* y allí, la línea de la matriz se divide en tres líneas más, cada una de estas líneas está compuesta por una válvula

de cierre y un capilar de PEEK de 5 cm de longitud, de 50, 75 y 100 μm respectivamente, las cuales se unen al final por medio de una cruz de PEEK. Por otra parte, la línea de dilución llega a un capilar de 250 μm de acero inoxidable y 5cm de longitud. Por último, todas estas líneas de flujo se unen por medio de una cruz de acero inoxidable, de la cual sale una línea hacia un medidor de presión, otra línea hacia una válvula de alivio y, por último, una línea hacia el dispositivo a calibrar. Teniendo en cuenta que para el *manifold* se van a hacer modificaciones más allá de una simple reorganización, se hará énfasis en su diseño.

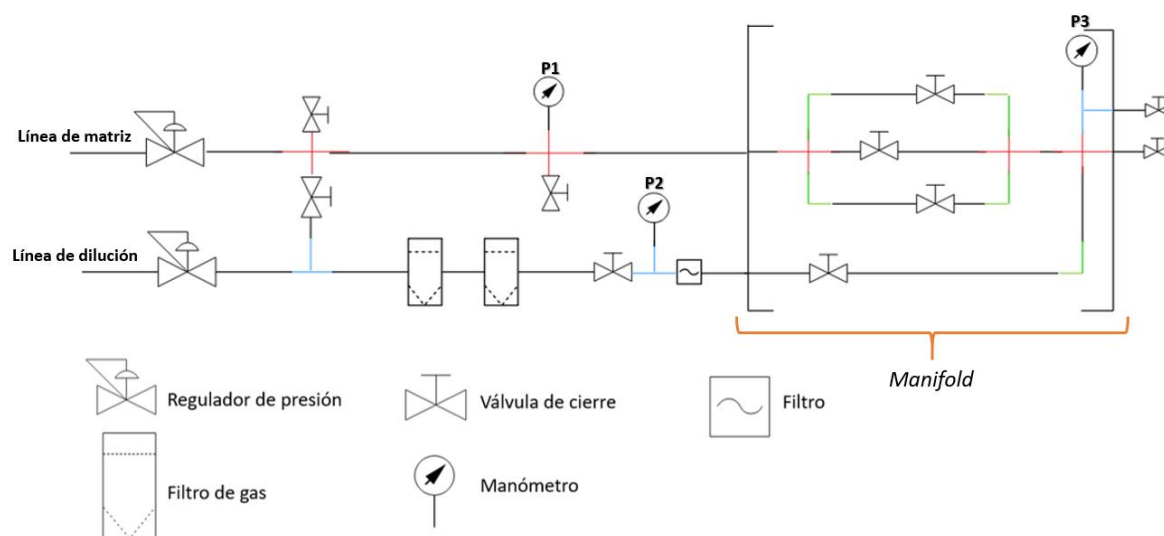


Figura 5. Nuevo PFD dilutor de gases TGD 2000

4.6. Diseño manifold

El montaje que se pensaba desarrollar inicialmente para el *manifold* es el que se describió anteriormente, pero debido a ciertos inconvenientes con los materiales disponibles, se construyó parcialmente dicho modelo. En la línea de flujo del material de referencia, compuesta por tres líneas, se habilitó una sola, junto con la línea de material de dilución totalmente funcional, para efectos de calibrar los nuevos capilares. En el **Apéndice E, figura**

E1 se puede observar la comparación entre el modelo inicial y el que se construyó finalmente. En dichas imágenes se observa la ubicación de los manómetros usados para tomar los valores de caída de presión para las posteriores pruebas. También, se puede observar que para el diseño provisional se reemplazó la cruz de PEEK por una unión simple puesto que, al dejar inhabilitadas dos líneas de flujo, ya no es indispensable el uso de este aditamento.

4.7. Montaje manifold

Con base en el diseño provisional, se ubican las diferentes partes sobre la placa, demarcando las perforaciones necesarias para asegurar estas mismas, de manera que con ayuda de un taladro de columna se realicen dichas perforaciones con el objetivo de asegurar las diferentes partes del montaje de la siguientes manera: para las válvulas de PEEK, se cuenta con dos tornillos para cada una de 18 cm de largo y de 1/16 in de diámetro que atraviesan la placa de lado a lado. Los aditamentos de metal, se aseguran por medio de abrazaderas de metal de 3/8 in de diámetro, aseguradas a su vez por tornillos a la placa. Por último, se asegura la unión de PEEK con ayuda de una abrazadera de plástico.

Después de realizar las perforaciones correspondientes, se deben unir los distintos componentes del montaje. Con ayuda de Diana Castillo (Codirectora) se realizan las uniones entre el *tubing* (metal o PEEK) con los diferentes aditamentos, teniendo en cuenta que para cada unión es necesaria una férula y una contraférula para asegurar las piezas y evitar futuras fugas. El procedimiento es el siguiente: se corta la cantidad de *tubing* necesaria y se introduce en el accesorio de manera que entre en la mayor medida posible sin forzarlo; posteriormente, con ayuda de una llave, se realiza un ajuste de un cuarto de vuelta con el propósito de activar la férula y que ésta se fije al *tubing*. Se sigue un procedimiento similar para asegurar los

capilares a los aditamentos teniendo en cuenta que las férulas son de diferente tamaño (**Ver Figura 6**).

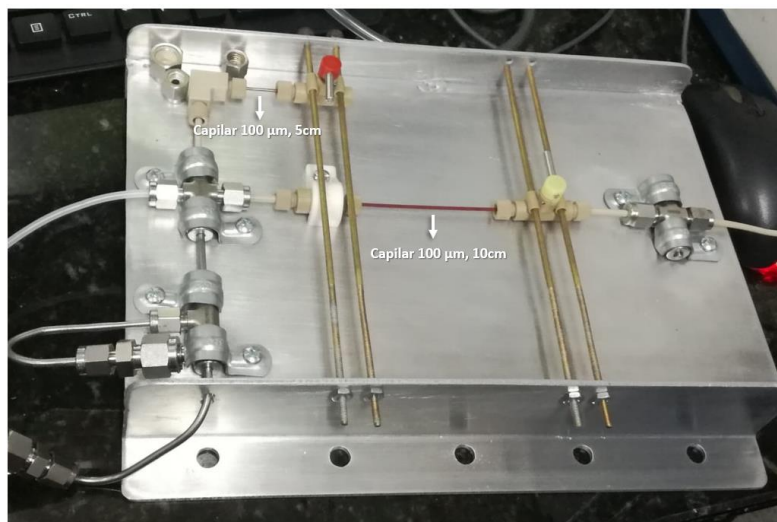


Figura 6. Montaje final manifold

Para realizar las pruebas con el montaje provisional es necesario conectarlo al dilutor actual, debido a que el gas debe pasar por los diferentes filtros presentes en el dilutor, y por el manómetro para obtener una medida de presión, para tal efecto, se toma la línea de material de dilución, del dilutor actual, que originalmente va al *manifold* y con ayuda de una manguera se conecta a una de las líneas del *manifold* provisional asegurandose de tener las válvulas correspondientes a la otra línea cerradas. También, es necesario conectar en la línea de salida del *manifold* el medidor de presión *Honeywell Zephyr™* con el fin de registrar la variación del caudal a diferentes deltas de presión (**Ver figura 7**). En el **Apéndice F, Figura F1 y F2**, se puede observar el montaje final tanto para el capilar de 100 μm , 5 cm como para el capilar de 100 μm , 10 cm.

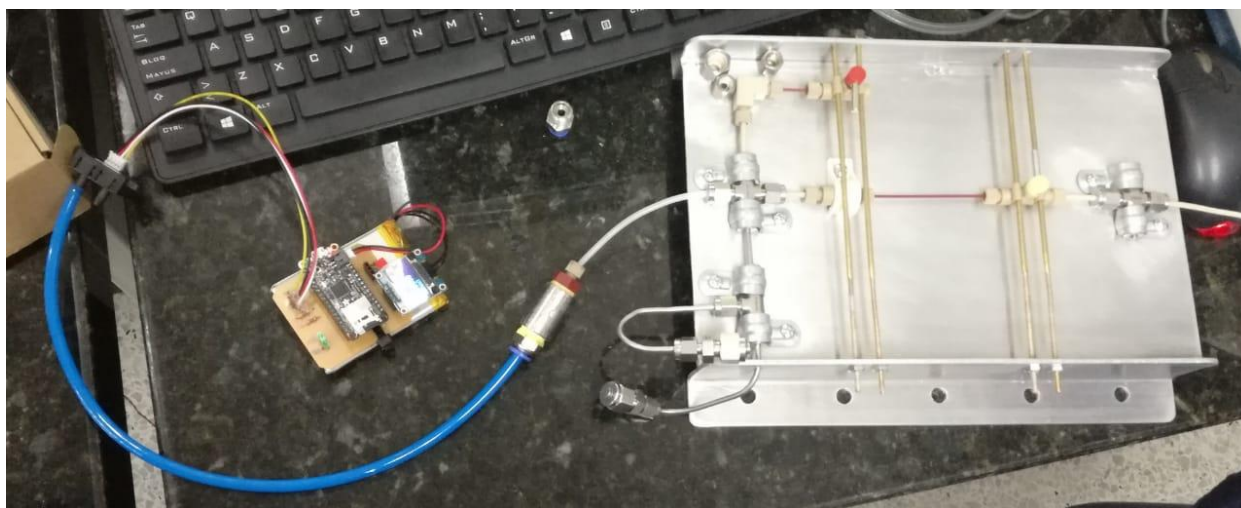


Figura 7. Montaje final manifold junto con el medidor de flujo Honeywell ZephyrTM

4.8. Análisis de pruebas experimentales

El experimento se realizó a condiciones no estándar (21,4°C y 90,85 kPa), lo que hace necesario una corrección para llevar los datos tomados por el medidor de flujo *Honeywell ZephyrTM* de condiciones estándar usadas por el medidor (0°C y 101,3kPa) a las condiciones que realmente se encontraba el sistema, ya que es necesario que los dos volúmenes (el volumen que atraviesa el sistema y el que indica el medidor) se encuentren a las mismas condiciones, y posteriormente se aplica una conversión al caudal para llevarlo de cm³/min a m³/s.

Con los datos obtenidos por medio de la metodología descrita, se realizan las gráficas correspondientes para cada uno de los capilares y se crea un modelo empírico, por medio de un ajuste por regresión lineal múltiple. Se compararon varios modelos (**Apéndice G**), y los coeficientes de dichas modelos figuran en las **Tabla 3 y 4**.

Tabla 3. Comparación ajuste cúbico, cuadrático y lineal para capilar de 100 μ m, 10 cm

COEFICIENTES	Ajuste cúbico	Ajuste cuadrático	Ajuste lineal
b0	2,4451E-08	-8,5332E-09	-1,3101E-07
b1	2,3496E-09	1,9224E-09	3,8824E-09
b2	3,0539E-12	6,1330E-12	-
b3	6,4333E-15	-	-
R ²	0,9998683	0,9998670	0,9890120
R ² ajustado	0,9998495	0,9998404	0,9880131

Tabla 4. Comparación ajuste cúbico, cuadrático y lineal para capilar de 100 μ m, 5cm

COEFICIENTES	Ajuste cúbico	Ajuste cuadrático	Ajuste lineal
b0	1,8004E-08	-1,0627E-08	-9,2718E-08
b1	3,9932E-09	3,7361E-09	5,4989E-09
b2	5,1948E-12	7,7209E-12	-
b3	7,3668E-15	-	-
R ²	0,9999730	0,9999720	0,9962390
R ² ajustado	0,9999668	0,9999680	0,9959883

Nota aclaratoria. Donde la forma general del ajuste es $Q=b_0+b_1(\Delta P)+b_2(\Delta P)^2+b_3(\Delta P)^3$

Se seleccionó el ajuste cuadrático, con un coeficiente de determinación ajustado (R^2_{AJ}) de 0,999840 (**Figura 8**) para el capilar de 10cm y de 0,999968 para el capilar de 5cm (**Apéndice G, Figura G1**), lo que indica una muy buena aproximación, teniendo en cuenta que son modelos de 3 parámetros que se ajustaron a 13 y 17 puntos respectivamente.

Se realiza una gráfica con los valores de la ecuación de Hagen-Poiseuille comparados con la aproximación cuadrática obtenida para ambos capilares (**Apéndice H, Figura H1 y H2**) observándose que siguen el mismo patrón de las gráficas hechas en primera instancia para los capilares de 50 y 75 μ m, lo que indica que el comportamiento de los capilares se asemeja.

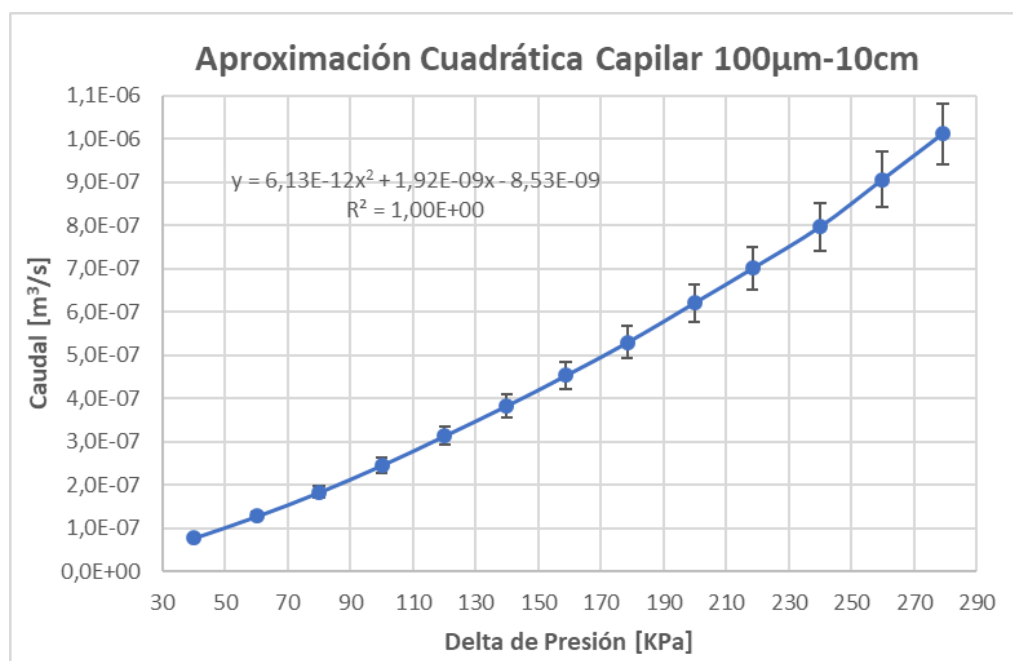


Figura 8. Aproximación cuadrática para Capilar de 100 µm, 10cm

Se emplea el ajuste cuadrático realizado, junto con los ajustes de los demás capilares, para estimar valores de caudal y revisar si se cubre o no el rango de concentraciones requerido. En la **Tabla 5 y Apéndice I, tablas I1**, se plasman para cada capilar el valor máximo y mínimo del rango de validez de caídas de presión y las concentraciones correspondientes, basándose en el modelado empírico. Para el capilar de 50 y 75 micras se observa una ligera superposición en las concentraciones abarcadas, cubriendo el capilar de 50 micras para CO, un rango de 4,72 a 24,31 ppm, y para el CH₄ un rango de 1,13 a 5,84 %LEL. El capilar de 75 micras para CO, permite cubrir un rango de 12,6 a 90,89 ppm y para CH₄ un rango entre 3,03 y 21,82 % LEL. Para el capilar de 100 micras, debido a que su rango de validez llega hasta 195 kPa para el caso de CO, es más que suficiente ya que este corresponde a aproximadamente 182 ppm siendo la concentración máxima requerida 100 ppm; para el caso del CH₄, dicha caída de presión corresponde a 43,7 % LEL. Sin embargo, si se toma el valor

de 395 kPa ignorando el rango de validez, este caudal permitiría, bajo las condiciones de caudal total constante, generar una concentración de 115% LEL, superando la concentración máxima requerida (100% LEL). Dichas superposiciones y rangos cubiertos por cada capilar se pueden apreciar de mejor forma en el **Apéndice I, Figuras I1 e I2**.

Tabla 5. Abanicos de concentraciones de CO cubiertos por los capilares de 50(amarillo),75(verde) y 100(naranja) μm empleando los ajustes a datos experimentales, empleando el capilar de 250 μm (Celeste) para dilución

Capilar MRGC [μm]	DeltaP [KPa]	QA[m ³ /s]	DeltaP [KPa]	QB[m ³ /s]	[CO][ppm]	QT [m ³ /s]
50	130,00	2,62E-08	131,46	8,31E-06	4,72	8,33E-06
50	395,00	1,35E-07	129,26	8,20E-06	24,31	8,33E-06
75	105,00	7,00E-08	130,57	8,26E-06	12,60	8,33E-06
75	395,00	5,05E-07	121,91	7,83E-06	90,89	8,33E-06
100	110,00	4,94E-07	122,11	7,84E-06	88,88	8,33E-06
100	121,00	5,54E-07	120,84	7,77E-06	99,86	8,33E-06
100	195,00	1,01E-06	112,09	7,32E-06	182,08	8,33E-06

* Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 50 μm

**Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 75 μm

QA= Caudal de material de referencia con su respectiva caída de presión, QB= Caudal de dilución,

[CO]= Concentración de CO, QT= Caudal total = QA + QB

5. Conclusiones

- La revisión bibliográfica del material suministrado por el CDT de Gas permitió consolidar las condiciones de operación idóneas para el dilutor. Se determinó la caída de presión máxima como 400 kPa, el caudal de salida ideal se fijó en $8,33 \text{ E-06 m}^3/\text{s}$, y las concentraciones necesarias a generar en un rango de 3 a 100 ppm para CO y 1 a 100% LEL para CH₄.
- Se optó por conservar el material de los capilares debido a la disponibilidad de diámetros a escala micrométrica. Se generó el abanico de concentraciones a partir de la ecuación de Hagen-Poiseuille, determinando así la necesidad de implementar un capilar de 100 μm y 5 cm al diseño.
- Se realizó un reordenamiento del equipo en el cual se expanden los componentes permitiendo un mejor acceso a los elementos manipulables, haciendo especial énfasis en el diseño del manifold provisional, su montaje y acoplamiento para las pruebas experimentales.
- Se ajustó una aproximación cuadrática, obteniendo un R^2 ajustado de 0,999968 para el capilar de 100 μm y 5 cm, en un rango de 30 a 195 kPa. Empleando los ajustes de datos experimentales se generó el abanico de concentraciones cubierto por los capilares, de manera que con el diseño anterior se lograban 90,89 ppm de CO y 21,82% LEL de CH₄ e implementando el nuevo capilar se llega a cubrir la totalidad del rango de CO (100ppm) y un 43,7% LEL sin exceder el rango de validez.

6. Recomendaciones

- Para la futura implementación del diseño realizado convendría calibrar los capilares una vez hecho el montaje final, para la totalidad del rango de presiones a trabajar; lo que haría que la variación en el flujo asociada a los distintos aditamentos o elementos del montaje se encuentre considerada en el ajuste correspondiente.
- Para trabajar con el equipo, en especial con concentraciones cercanas a 100% LEL, es recomendable contar con un sistema de extracción, o que la descarga de los MC sea hecha al exterior, ya que esta concentración corresponde a 500 ppm de CO, lo cual podría generar problemas en la salud del operario. Además, podría implementarse un detector de CO, como medida de seguridad adicional.

Referencias Bibliográficas

BARBER, Robert W y EMERSON, David R. Challenges in Modeling Gas-Phase Flow in Microchannels: From Slip to Transition. Warrington, UK.: Centre for Microfluidics and Microsystems Modelling, CCLRC Daresbury Laboratory, 2006.

BOZHONG GROUP. Stainless Steel Capillary tube. [Citado 9 abril, 2019]. Disponible en: http://www.bzstainless.com/stainless-steel-capillary-tube.html?gclid=CjwKCAiAv9riBRANEiwA9Dqv1TayBf7FbRCNP011caD9nTAbjVcr12Ph_e0r_LNA1H-djK5d5pHMSlBoCm3gQAvD_BwE

CHAVARRO DUARTE, Lucero. Medición y modelado empírico del caudal a través de capilares de un dispositivo dilutor en función de presión y temperatura. Tesis de grado en ingeniería química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2018.

CM SCIENTIFIC. VitroCom Quartz Capillary & Glass Capillary Tubing. [Citado 9 abril, 2019]. Disponible en: http://www.cmscientific.com/glass_capillaries.php

FERNÁNDEZ RIVAS, D. Microfluidos: Nuevas fronteras. Revista cubana de física, agosto 2011. Vol. 28, No. 1.

GIAMBIAGI, Juan José. Microfluídica. Universidad de Buenos Aires. Departamento de física. (Recuperado el 1 de noviembre de 2018). Disponible en: http://users.df.uba.ar/cobelli/Curso_Posgrado_Microfluidica/slides_del_curso/MF-1.pdf

HOLMES et al. Report of the Selby Smelter Commission. With Accompanying Papers. En: Department of the Interior, Bureau of Mines. Vol 98, 1915. P. 234 – 304.

HONEYWELL INTERNATIONAL INC. Honeywell Zephyr™ digital Airflow sensors. HAF series – High Accuracy ± 50 SCCM to ± 750 SCCM. Junio, 2015.

IDEX HEALTH & SCIENCE. Tubing - PEEK tubing. [Citado 9 abril, 2019]. Disponible en: <https://www.analytics-shop.com/media/pdf/U/P/UP1531/gb/UP1531.pdf>

JCGM. Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados, 3era edición. España: Centro Español de Metrología 2012. p. 37-38.

KANDLIKAR, Satish G; GARIMELLA, et al. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. Oxford, UK.: Elsevier, 2006. (Recuperado en 1 de noviembre de 2018). Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080445274/heat-transfer-and-fluid-flow-in-minichannels-and-microchannels>.

LENORMAND, Roland, TOUBOUL, Eric y ZARCONE, Cesar. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media, Journal of Fluid Mechanics, vol. 189, 1988, p 165-187.

MACOMBER, Joe y O'CONNOR, Kevin. The advantages of pure fused silica capillary tubing in medical applications. Molex, 2014.

MONTGOMERY, Douglas C. Diseño y análisis de experimentos, 2da ed. México: Limusa Wiley, 2004. p 692.

MORENO, Brayan S y VALDERRAMA, Jose L. Caracterización y modelado matemático de microflujos de diferentes mezclas CO/N₂ a través de capilares en un dispositivo generados de trazas desarrollado por el CDT de Gas. Tesis de grado en ingeniería química. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2016.

MOYER, Thomas y AMTOWER, Richard. Gas Dilution Apparatus for Preparing Reproducible Dynamic Gas Mixtures in any Desired Concentration and Complexity. En: Journal of the Air Pollution Control Association, 1966. P. 175-214.

PEDRAZA, Wilmer, GARCÍA, Luis, Generación de Microcaudales Mássicos Para La Preparación De Materiales De Calibración Gaseosos. En Revista MET&FLU, junio de 2015 Vol 11, no 2, p 26-35.

PIOLI, Andderson; NOBRE, Jorge Luiz; RIBEIRO DE VASCONCELLOS, Agnaldo.
Equipos portátiles de detección. BVSDE Desarrollo sostenible, 2008.

PTFEFABRICSTAPE. (Septiembre 24,2012) The advantages and disadvantages of the PEEK material. [Citado 9 abril, 2019] Recuperado de:
<https://ptfefabricstape.wordpress.com/2012/09/24/the-advantages-and-disadvantages-of-the-peek-material/>

TELEDYNE API. Modelo T750. [Citado 1 noviembre, 2018] (Colombia). Disponible en:
<http://www.teledyne-api.com/products/gas-calibrators-zero-air-generators/t750>

Apéndices

Apéndice A: Diseño actual del equipo dilutor TGD 2000

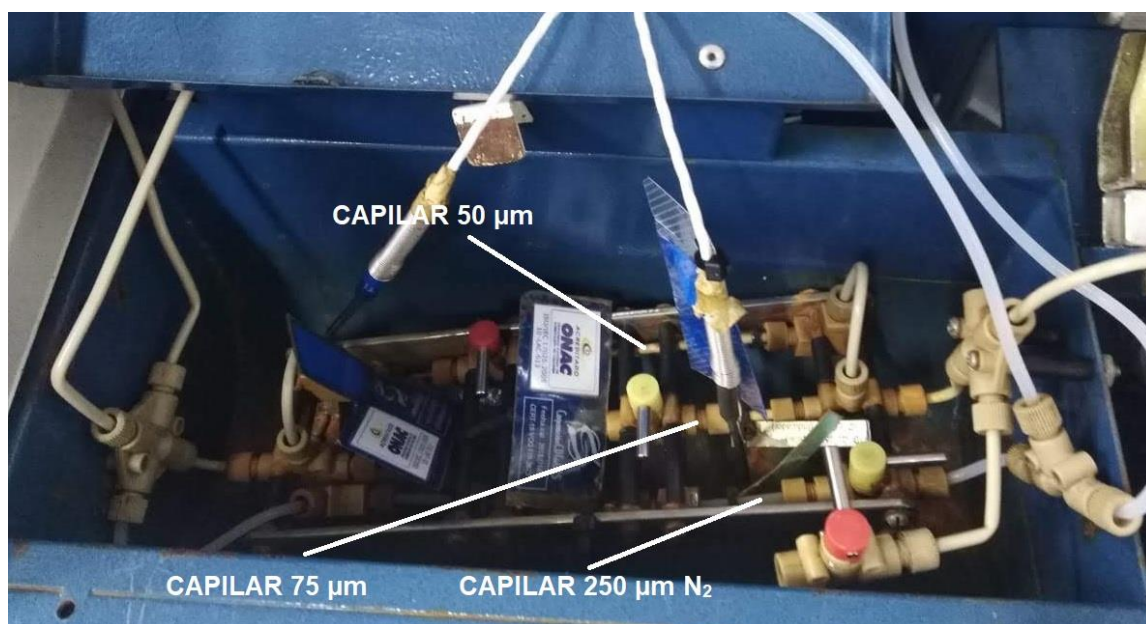


Figura A 1. *Diseño actual manifold*

Apéndice B: Regulador manipulado y sensor que da el caudal de acuerdo con el cambio en la caída de presión



Figura B 1. *Regulador de presión*



Figura B 2. *Sensor Honeywell Zephyr™*

Apéndice C: Curvas de comparación entre la fórmula aproximada y la ecuación de flujo de Hagen-Poiseuille

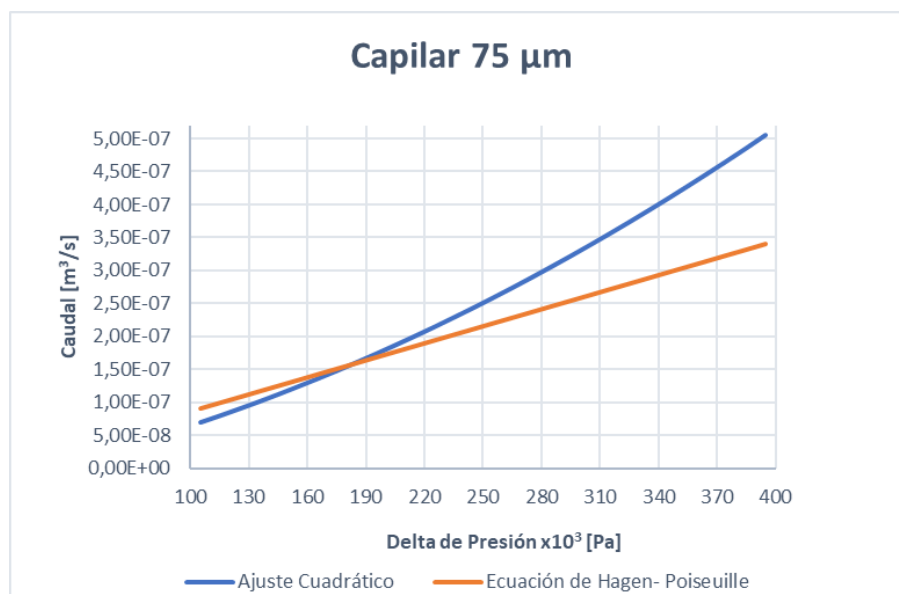


Figura C 1. Comparación ajuste cuadrático capilar 75 μm , 5 cm con ecuación de Hagen - Poiseuille

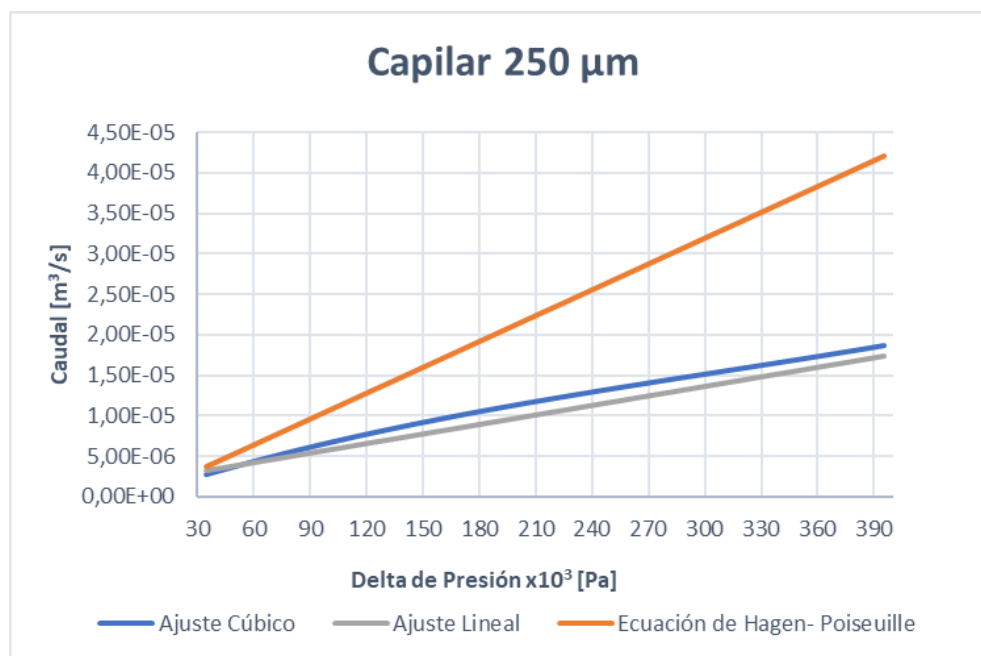


Figura C 2. Comparación ajuste cúbico y lineal capilar 250 μm , 5 cm con ecuación de Hagen - Poiseuille

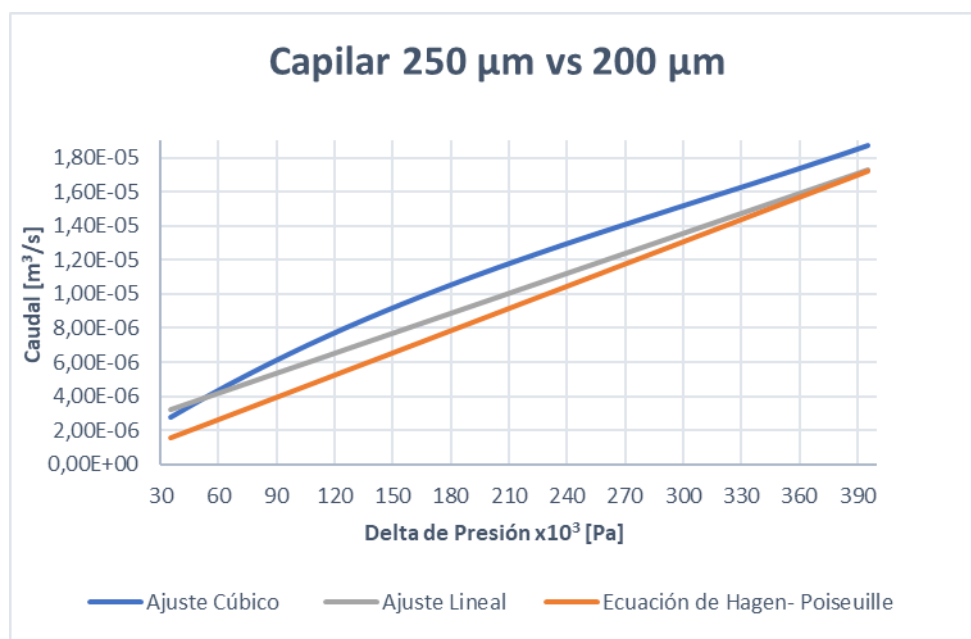


Figura C 3. Comparación ajuste cúbico y lineal capilar 250 μm , 5 cm con ecuación de Hagen - Poiseuille usando 200 μm como diámetro

Apéndice D: Definición de rangos cubiertos con la ecuación de Hagen-Poiseuille para CO y CH₄

Tabla D 1. Rangos de concentración de CH₄ cubiertos por los capilares de 50(amarillo),75(verde),
100(naranja) y 150(blanco) μm de acuerdo con la ecuación de Hagen-Poiseuille, empleando el capilar de 250 μm
(Celeste) para dilución

Capilar MRGC [μm]	DeltaP [KPa]	QA[m³/s]	DeltaP [KPa]	QB[m³/s]	[CH4] [%]	%LEL	QT [m³/s]	
50	200,00	3,41E-08	190,20	8,30E-06	0,07	1,47	8,33E-06	
50	300,00	5,11E-08	189,79	8,28E-06	0,11	2,21	8,33E-06	
50	395,00	6,73E-08	189,44	8,27E-06	0,15	2,91	8,33E-06	
*	75	105,00	9,06E-08	188,91	8,24E-06	0,20	3,91	8,33E-06
	75	157,00	1,35E-07	187,90	8,20E-06	0,29	5,85	8,33E-06
	75	295,00	2,55E-07	185,15	8,08E-06	0,55	11,00	8,33E-06
	75	395,00	3,41E-07	183,17	7,99E-06	0,74	14,72	8,33E-06
**	100	120,00	3,27E-07	183,49	8,01E-06	0,71	14,14	8,33E-06
	100	185,00	5,05E-07	179,42	7,83E-06	1,09	21,79	8,33E-06
	100	255,00	6,95E-07	175,03	7,64E-06	1,50	30,05	8,33E-06
	100	305,00	8,32E-07	171,92	7,50E-06	1,80	35,93	8,33E-06
	100	355,00	9,68E-07	168,78	7,36E-06	2,09	41,83	8,33E-06
	100	395,00	1,08E-06	166,30	7,26E-06	2,33	46,53	8,33E-06
150	80,00	1,10E-06	165,67	7,23E-06	2,39	47,71	8,33E-06	
150	95,00	1,31E-06	160,93	7,02E-06	2,83	56,66	8,33E-06	
150	105,00	1,45E-06	157,76	6,88E-06	3,13	62,62	8,33E-06	
150	120,00	1,66E-06	153,02	6,68E-06	3,58	71,57	8,33E-06	
150	137,00	1,89E-06	147,64	6,44E-06	4,09	81,71	8,33E-06	
150	150,00	2,07E-06	143,52	6,26E-06	4,47	89,46	8,33E-06	
150	165,00	2,28E-06	138,78	6,06E-06	4,92	98,41	8,33E-06	

* Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 50 μm

**Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 75 μm

QA= Caudal de material de referencia con su respectiva caída de presión, QB= Caudal de dilución,

[CH₄]= Concentración de CH₄, %LEL= Límite Inferior de Explosividad, QT= Caudal total = QA + QB

Apéndice E: Nuevo diseño del equipo dilutor y del manifold

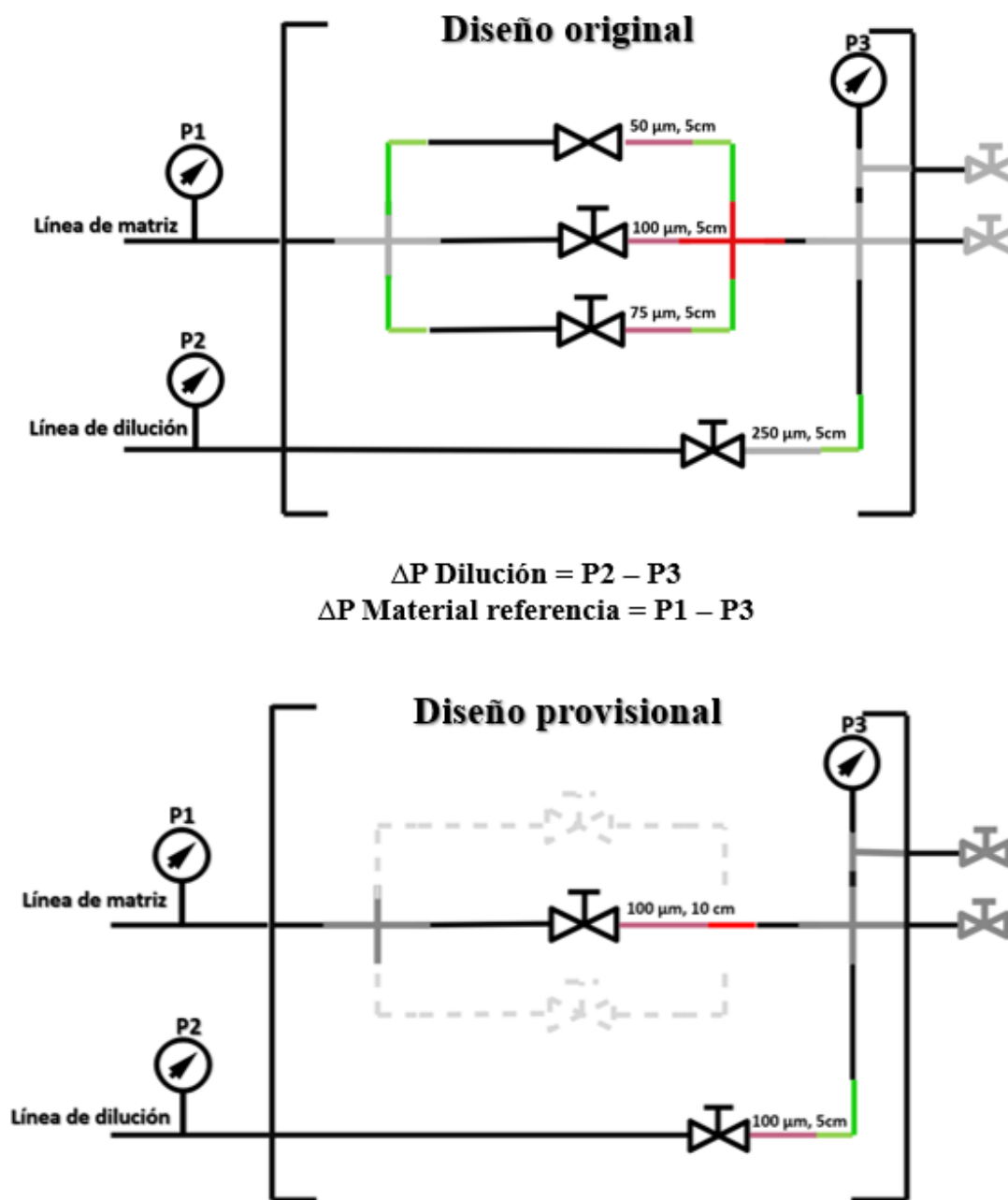


Figura E 1. Comparación entre el diseño del manifold propuesto y el diseño del manifold provisional

Nota aclaratoria: Las líneas de color púrpura corresponden a los capilares. Las líneas y figuras de color gris oscuro corresponden a aditamentos en acero inoxidable. Las líneas punteadas indican líneas y accesorios de los cuales se prescindieron para el diseño.

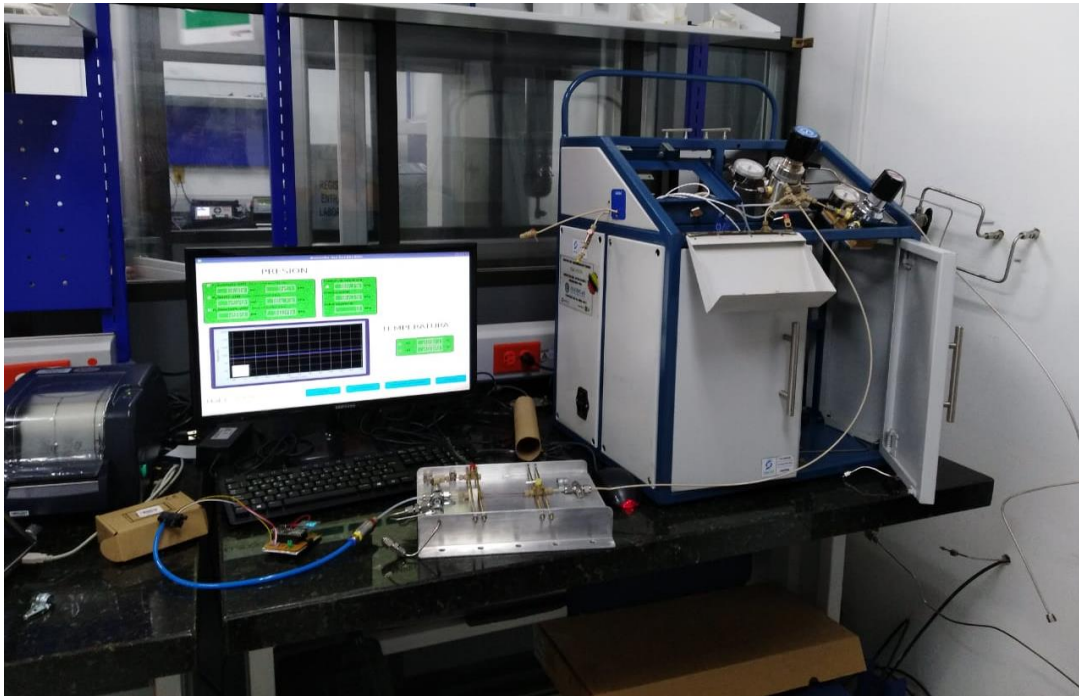
Apéndice F: Montaje y adecuación del *manifold*

Figura F 1. Montaje capilar 100 μm y 10 cm de longitud

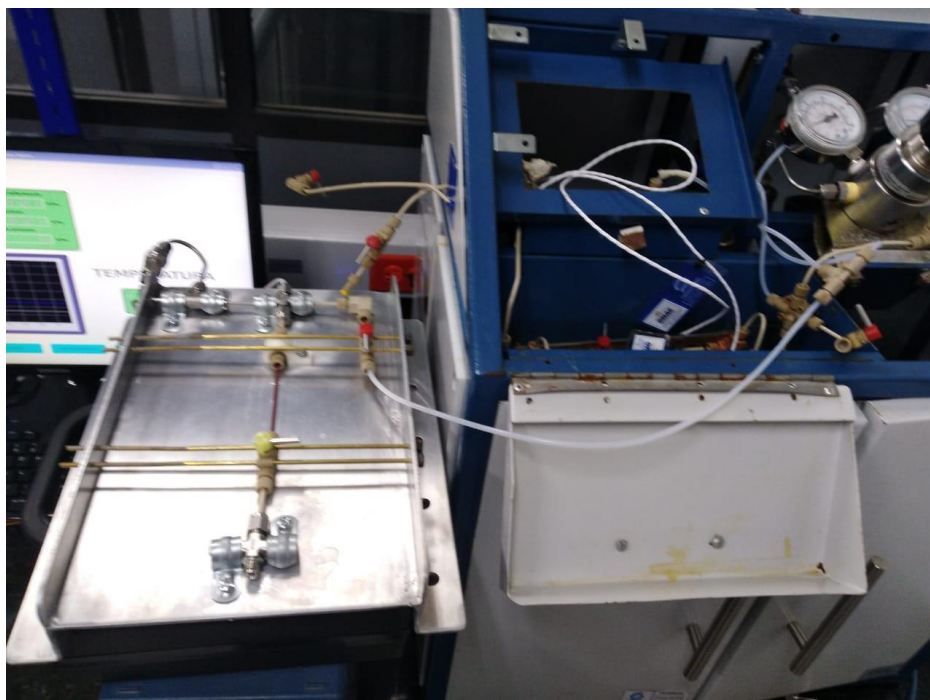


Figura F 2. Montaje capilar 100 μm y 5 cm de longitud

**Apéndice G: Ajustes cúbicos, cuadráticos y lineales para los capilares de 100 μm , 5cm
y 100 μm , 10cm**

Nota aclaratoria: Las barras de error representan un error asociado al medidor de flujo que asciende hasta un $\pm 7\%$ para los valores más altos de caudal

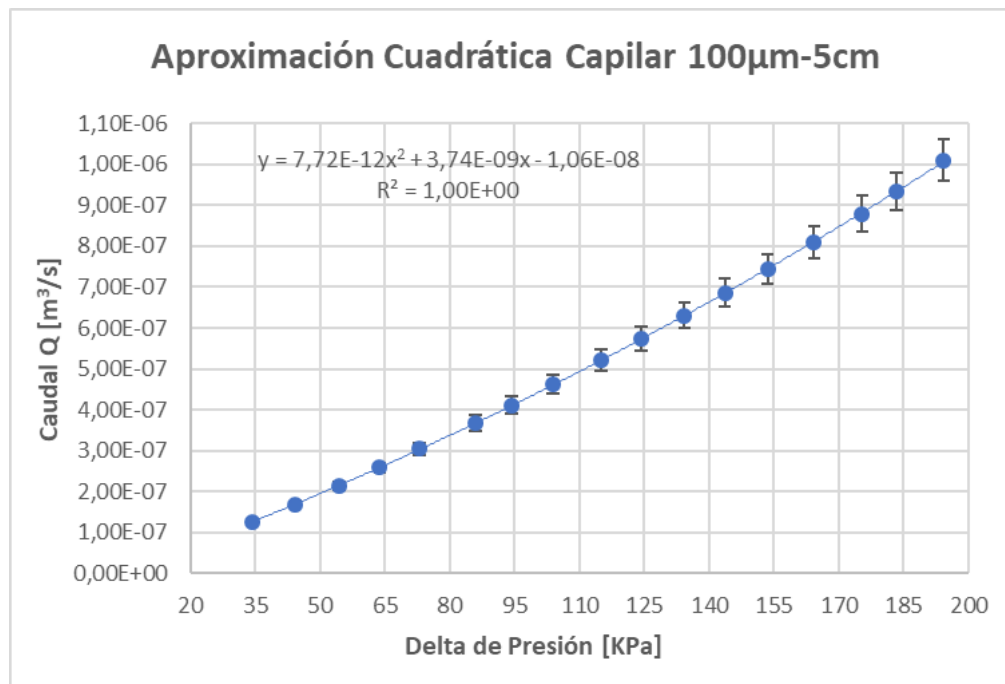


Figura G 1. Aproximación cuadrática para capilar de 100 μm , 5cm

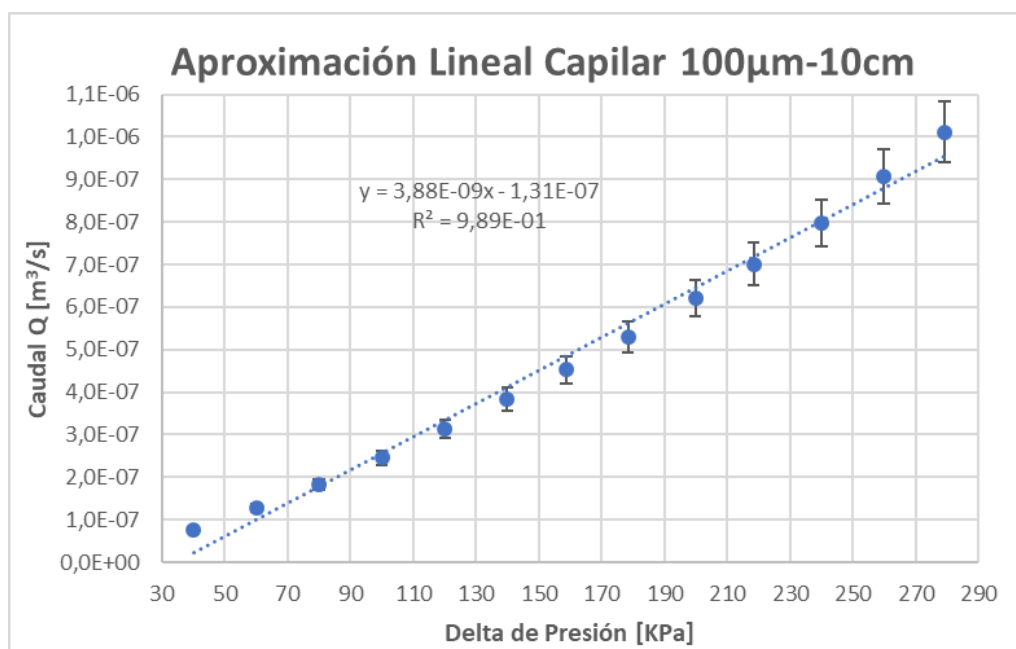


Figura G 2. Aproximación lineal para capilar 100 μ m, 10cm

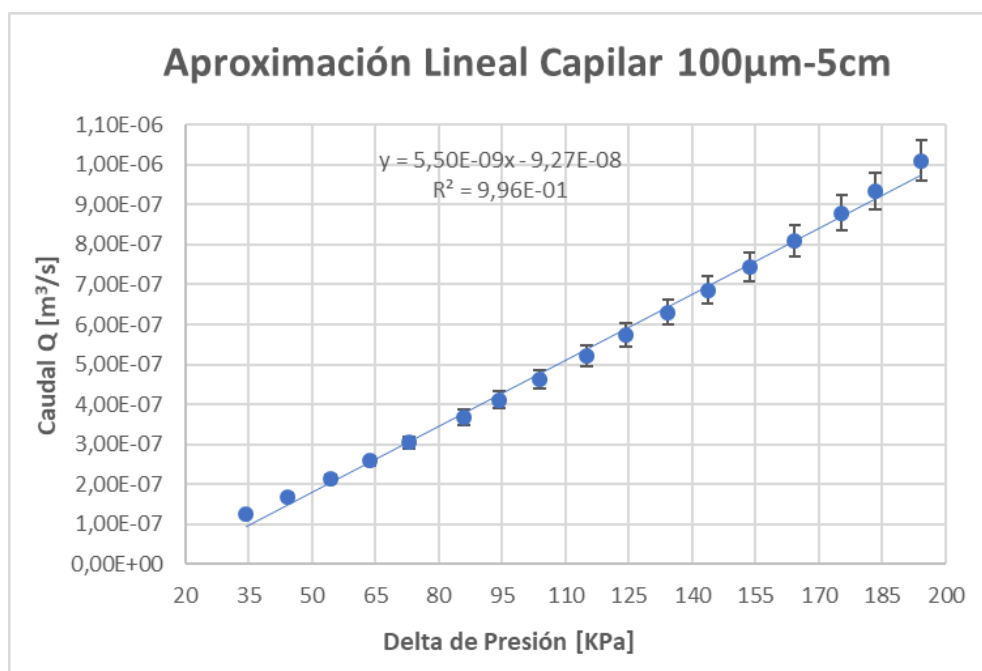
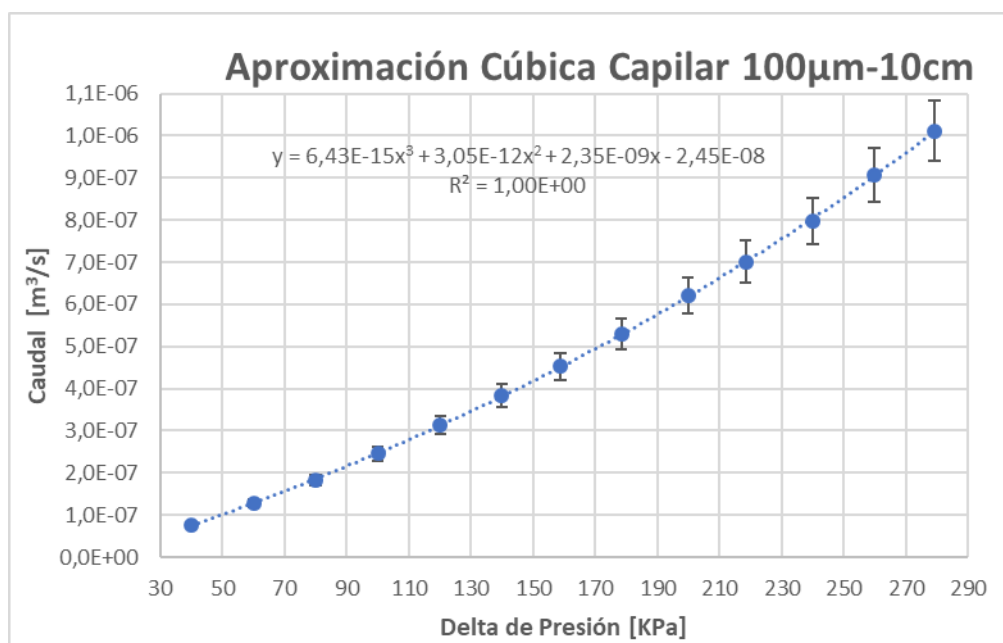
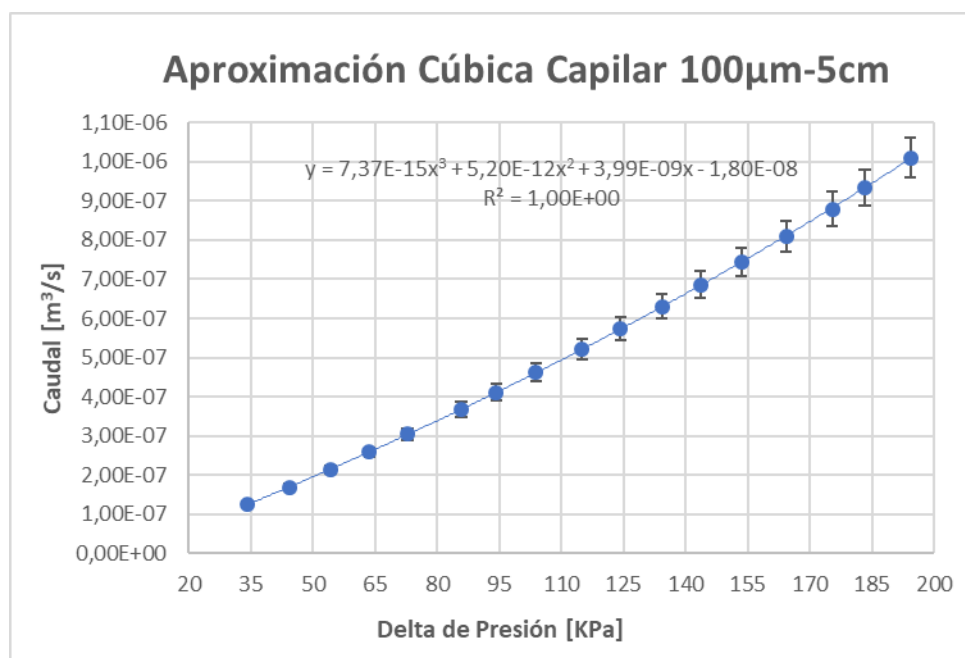


Figura G 3. Aproximación lineal para capilar de 100 μ m, 5cm

Figura G 4. Aproximación cúbica para Capilar de 100 μm , 10cmFigura G 5. Aproximación cúbica para Capilar de 100 μm , 5cm

Apéndice H: Curvas de comparación entre el ajuste cuadrático y la ecuación de flujo de Hagen-Poiseuille para los nuevos capilares.

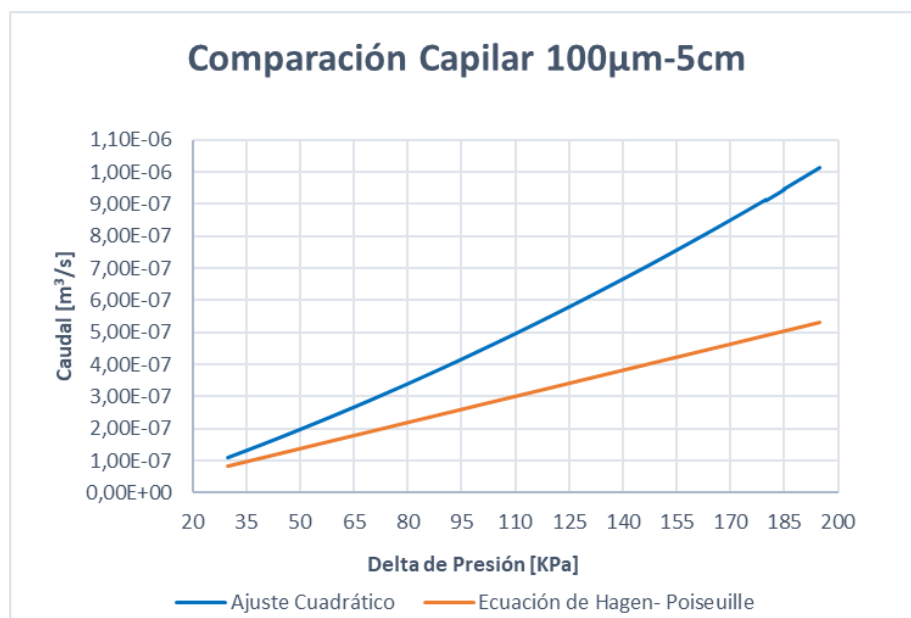


Figura H 1. Comparación ajuste cuadrático nuevo capilar 100 μ m, 5 cm con ecuación Hagen- Poiseuille

Apéndice I: Abanico de concentraciones empleando los ajustes a datos experimentales

Tabla I 1. Abanicos de concentraciones de CH_4 cubiertos por los capilares de 50(amarillo), 75(verde) y 100(naranja) μm empleando los ajustes a datos experimentales, empleando el capilar de 250 μm (Celeste) para dilución

Capilar para MRGC [μm]	DeltaP[KPa]	QA[m ³ /s]	DeltaP[KPa]	QB[m ³ /s]	[CH ₄] [%]	%LEL	QT [m ³ /s]
50	130,00	2,62E-08	131,44	8,31E-06	0,06	1,13	8,33E-06
50	395,00	1,35E-07	129,24	8,20E-06	0,29	5,84	8,33E-06
75	105,00	7,00E-08	130,54	8,26E-06	0,15	3,03	8,33E-06
75	395,00	5,05E-07	121,90	7,83E-06	1,09	21,82	8,33E-06
100	110,00	4,94E-07	122,11	7,84E-06	1,07	21,33	8,33E-06
100	195,00	1,01E-06	112,09	7,32E-06	2,18	43,70	8,33E-06
100	395,00	2,67E-06	81,95	5,66E-06	5,77	115,34	8,33E-06

* Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 50 μm

**Caudal generado por el ajuste cuadrático para el capilar de 75 μm

QA= Caudal de material de referencia con su respectiva caída de presión, QB= Caudal de dilución,

[CH₄]= Concentración de CH₄, %LEL= Límite Inferior de Explosividad, QT= Caudal total = QA + QB

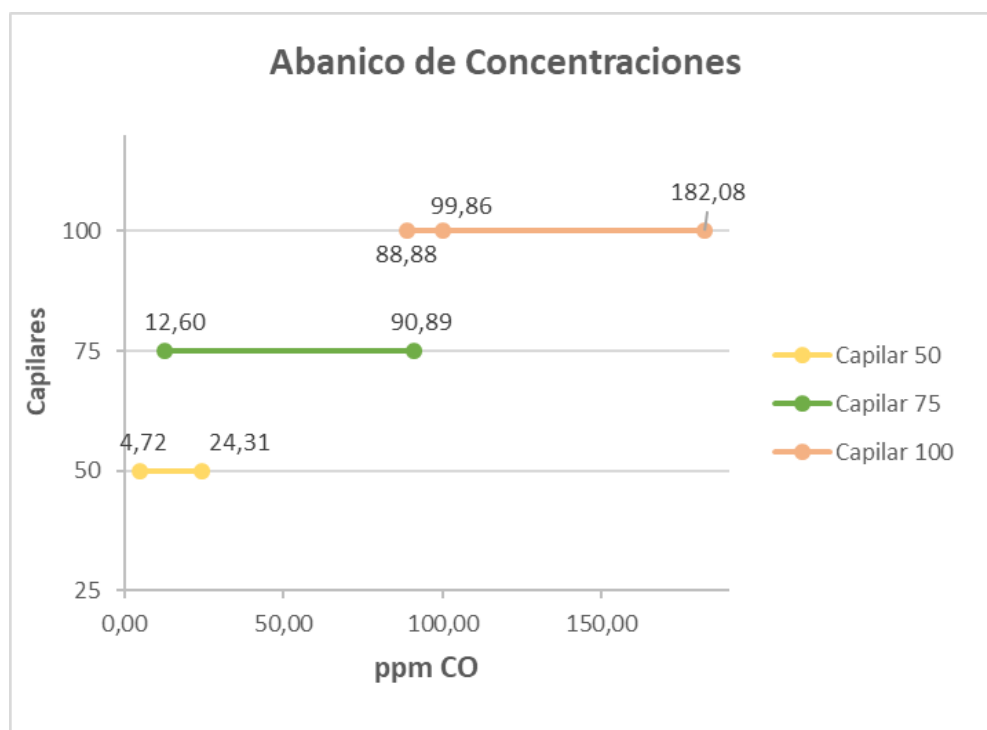


Figura I 1. *Abanico de concentraciones para CO*

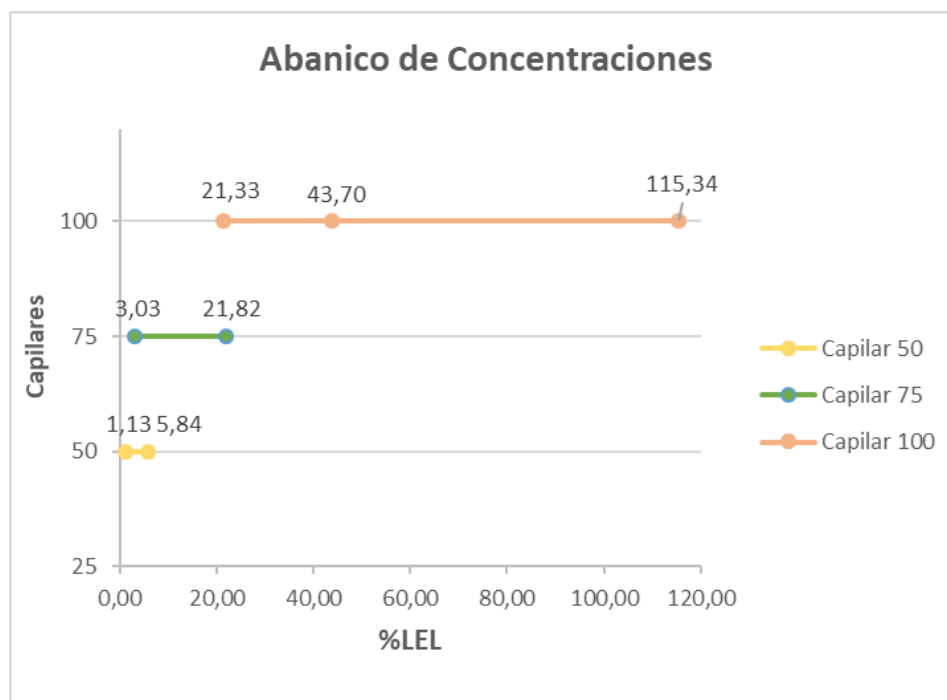


Figura I 2. *Abanico de concentraciones para CH₄*