

Article

Fabrication, circuit design and characterization of a flowmeter

Elena María Mosquera Guerrero¹ and Antonio Delgado Bejarano²¹ Dpto. Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla; emguerrero@us.es² Dpto. Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla; adelgado1@us.es

Abstract: In this work we describe an example of design, fabrication and characterization of a flowmeter. We approach this describing all the sections: from design equations and simulations to laboratory characterization. The main interest of this work is that the problem has been addressed as a whole and in all its stages. The reader will also find figures, tables and graphic representations of all stages, from the design to the manufacture of the flowmeter.

Keywords: Flowmeter; PDMS; SU-8; PCB; NTC; Microfluidic; Lab-On-Chip;

Citation: Mosquera Guerrero, E.; Delgado Bejarano, A. Fabrication, design and characterization of a flowmeter. *Micromachines* **2022**, *13*, 1. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Academic Editor: Francisco Antonio Perdigones Sánchez

Received: 28/01/2022

Accepted: 30/01/22

Published: 31/01/22

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En este documento vamos a describir la realización de un caudalímetro como parte de las prácticas de la asignatura de Biosensores y Bioelectrónica. Se abordará la realización de dicho caudalímetro desde el diseño teórico a nivel de ecuaciones que describan su comportamiento hasta la fabricación del dispositivo y su caracterización en laboratorio pasando por etapas de simulación, fabricación y caracterización para obtener los resultados experimentales. Se describirán secuencialmente todos los pasos seguidos en cada etapa, adjuntando imágenes, tablas y ecuaciones para facilitar la compresión de este documento.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño del caudalímetro

Para diseñar el caudalímetro utilizaremos el principio de funcionamiento de las NTCs, que nos permitirán traducir la diferencia de temperatura en los dos extremos del caudalímetro a una diferencia de tensión para una corriente eléctrica fija. Se utilizarán por tanto dos NTCs. La idea es medir la temperatura del agua a la entrada del caudalímetro, calentar dicho líquido mediante una resistencia y volver a medir la temperatura a la salida. Esta diferencia de temperatura nos permitirá conocer el caudal como se explicará posteriormente.

El caudalímetro constará de una base de PCB y un bloque de PDSM. El agua circulará por un conducto que pasará por encima de una resistencia de cobre, la cual aportará calor al líquido. Por tanto, tenemos como fuente de calor el que proporciona la resistencia, mientras que los sumideros de calor serán el líquido que circula (agua en este caso) y el

calor cedido tanto a los materiales como al ambiente. Teniendo todo esto en cuenta, podemos calcular el caudal. Para el cálculo tendremos en cuenta varios factores:

- Calor de conducción: El calor generado por la resistencia se traduce en un aumento de la temperatura:

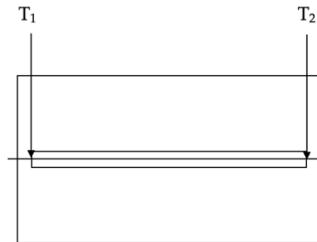


Figura 1. Representación del canal y las temperaturas de entrada (T_1) y salida (T_2).

$$T_2 - T_1 = \dot{Q} \cdot R_{termica} \quad (1)$$

- Calor por convección: Parte del calor generado por la resistencia se disipa en los materiales (PDMS y PCB) así como al ambiente:

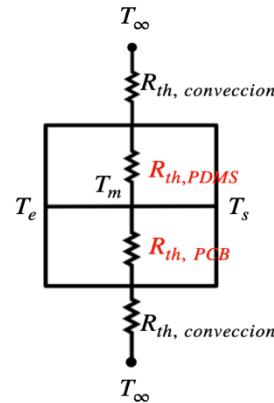


Figura 2. Descripción de las resistencias de convección del bloque.

donde T_∞ representa la temperatura ambiente, T_e la temperatura de entrada, T_s la temperatura de salida y T_m la temperatura en el centro del canal. Igualmente, $R_{th,PDMS}$ y $R_{th,PCB}$ son las resistencias de convección de dichos materiales y $R_{th,conveccion}$ es la resistencia de convección al ambiente.

Para el diseño se suponen las siguientes hipótesis:

- El circuito actúa en régimen permanente
- La temperatura es constante es constante en cada superficie
- Se supone que el canal está suspendido

- El calor solo se disipa en la dirección vertical 72
- No se cede calor a las conexiones 73
- Suponemos misma temperatura para el cobre y el agua 74
- Suponemos que T_∞ y T_e equivalen a la temperatura ambiente 75
- La temperatura media T_m es $T_m = \frac{T_s - T_{ambiente}}{2}$ 76

Si definimos una resistencia total como: $R_{th,TOTAL} = R_{th,inferior} || R_{th,superior}$ 78

siendo 79

$$R_{th,inferior} = R_{th,PCB} + R_{th,convección} \quad (2) \quad 80$$

$$R_{th,superior} = R_{th,PDMS} + R_{th,convección} \quad (3) \quad 81$$

Podemos hacer un balance de calor entre el que aporta la resistencia y el que se cede al líquido por una parte y a los materiales y al ambiente por convección: 84
85

$$\sum \dot{Q} = 0 \quad (4) \quad 87$$

$$\dot{Q}_{elec} = \dot{Q}_{agua} + \dot{Q}_{ambiente} \quad (5) \quad 88$$

Sustituyendo cada calor por su expresión obtenemos la siguiente ecuación: 91

$$I^2 R = Q \cdot \rho \cdot C_e \cdot (T_s - T_{amb}) + \frac{T_m - T_\infty}{R_{th,TOTAL}} \quad (6) \quad 93$$

Despejando adecuadamente de esta ecuación podemos modelar el caudal en función del parámetro que queramos (intensidad, temperatura...). En el caso de nuestro grupo se nos pidió realizar simulaciones para ver cómo variaba la temperatura de salida en función de la temperatura ambiente. Describiremos las simulaciones en el siguiente apartado. 94
95
96
97
98
99

2.2. Simulación del diseño anterior

Para la simulación se ha utilizado el software COMSOL Multiphysics. En primer lugar, realizamos simulaciones con un modelo que tiene una base de PCB, un bloque de PDMS y dentro la resistencia y el canal que contiene el agua. 101
102
103

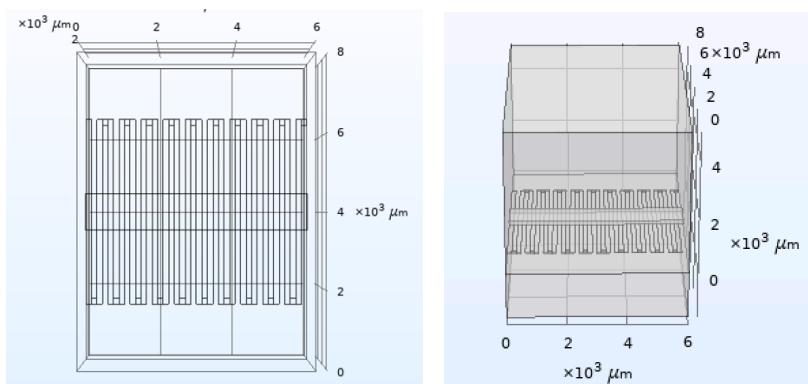


Figura 3. Representación en COMSOL del modelo básico. 105

El bloque de PCB tiene unas dimensiones de 6 mm de largo, 8 mm de ancho y 1.6 mm de alto. El bloque de PDMS tiene unas dimensiones de 6 mm de largo, 8 mm de ancho y 5 mm de alto. El canal por el que circula el agua tiene unas dimensiones de 6 mm de largo, 1 mm de ancho y 150 micras de altura. La tensión aplicada a la resistencia es de 200 mV y el caudal de agua será de $1 \mu\text{L}/\text{s}$.

Como decimos, queremos simular cómo varía la temperatura de salida en función de la temperatura ambiente. Para ello fijamos la temperatura exterior al parámetro T_{amb} y realizamos un barrido paramétrico donde la temperatura ambiente varía desde 0 °C hasta 35 °C. La temperatura de entrada del agua también coincide con la temperatura ambiente.

En este punto se crea en MATLAB un script que implemente las ecuaciones descritas anteriormente. Se introducen los datos de dimensiones, caudal, etc. que hemos usado en la simulación de COMSOL y despejamos de la ecuación (6) la temperatura de salida para representarla en función de la temperatura ambiente (que hemos supuesto que coincide con la de entrada). Por tanto, la ecuación que representamos es esta:

$$T_s = T_{ambiente} + \frac{2 * R_{th,TOTAL} * I^2 * R}{2 * Q * \rho * C_e * R_{th,TOTAL} + 1} \quad (7)$$

En la siguiente figura representamos los datos de la simulación paramétrica de COMSOL y superponemos la representación de la ecuación (7):

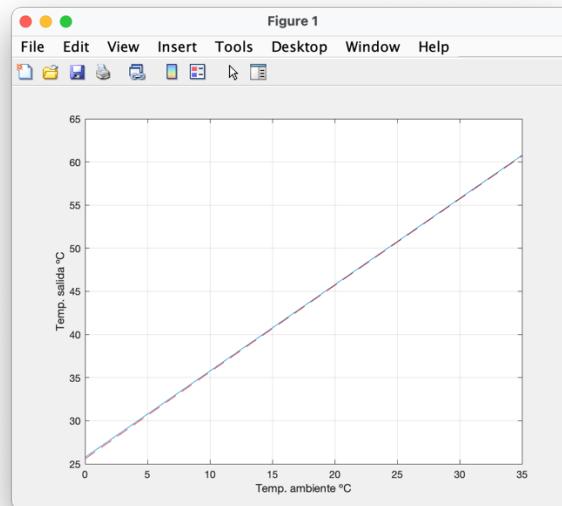
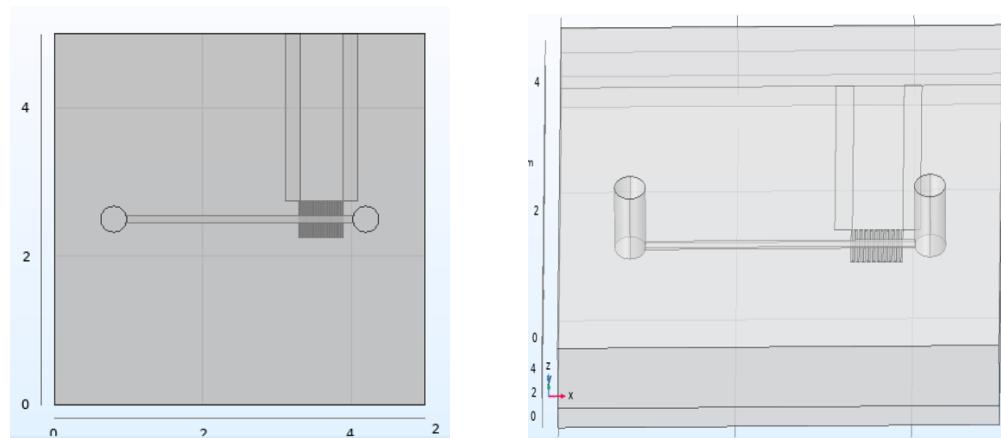


Figura 4. Comparativa entre el estudio teórico y la simulación de COMSOL.

Como vemos, la simulación de COMSOL en estas condiciones coincide con el estudio teórico realizado con las ecuaciones. Sin embargo, se hace necesario modificar el modelo de COMSOL para que represente fidedignamente el caudalímetro que se va a fabricar posteriormente. Presumimos que al modificar el modelo aparecerán discrepancias con el estudio teórico.

El modelo de COMSOL tras la modificación es este:



136

Figura 5. Representación del nuevo modelo en COMSOL.

137

138

139

Ahora el bloque de PCB aumenta su tamaño hasta los 5 cm de largo por 5 cm de ancho y 1.6 mm de alto. Igualmente, el bloque de PDMS aumenta también hasta 5x5 cm, manteniendo sus 5 mm de altura. Se han añadido también dos pistas de cobre para poder pasar la corriente a la resistencia, así como dos cilindros por donde entra y sale el fluido. Al ser mayor la distancia que recorre el líquido y al ser mayor también las superficies de disipación (por haber aumentado el tamaño de los bloques de PDMS y PCB) cabe esperar que los valores de temperatura de salida sean menores que los obtenidos en la simulación anterior. Para comprobar esto repetimos el barrido paramétrico en COMSOL y representamos todos los datos conjuntamente en MATLAB:

140

141

142

143

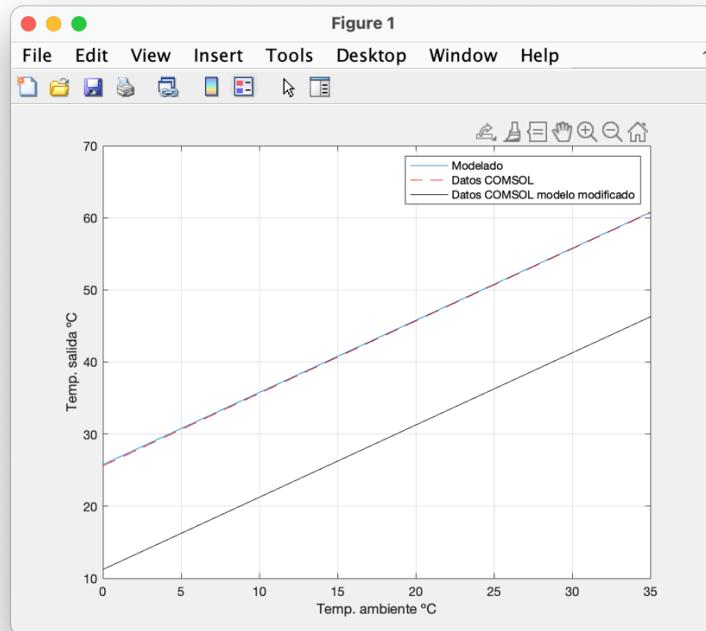
144

145

146

147

148



149

Figura 6. Comparativa entre el estudio teórico y las dos simulaciones de COMSOL

150

151

Efectivamente vemos que al modificar el modelo la temperatura de salida obtenida es menor que en la simulación anterior.

2.3. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación se dividió en varias sesiones. La primera sesión se llevó a cabo el jueves 9 de diciembre. En esta primera sesión estuvimos trabajando en la fabricación del molde para el caudalímetro que hemos modelado en la asignatura. Dicho molde constaba de una capa de sustrato de PCB más un par de capas de SU-8. La primera de ellas ya estaba puesta, mientras que la segunda de ella fue la que pusimos durante el desarrollo de la práctica.

El motivo de poner dos capas de SU-8 consecutivas es que ambas van a pegarse con facilidad. La primera capa (la que ya estaba puesta) tenía un grosor de $150 \mu m$, mientras que la segunda capa que íbamos a poner iba a tener un grosor de $150 \mu m$.



Figura 7. Bote de SU-8 empleado

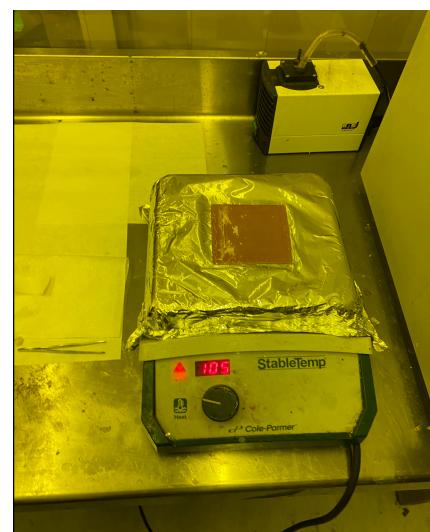
Resumimos a continuación el proceso realizado para poner la segunda capa de SU-8 sobre el bloque de PCB + SU-8 del que partimos:

En primer lugar, colocamos el rectángulo de PCB + SU-8 en una máquina llamada Spin-Coater y vertemos sobre esta base de nuevo SU-8 para formar la segunda capa. La proporción es unos 4 ml por pulgada. Esta segunda capa tendrá un espesor de aproximadamente $150 \mu m$. El SU-8 empleado (SU-8 - 2050) es una resina muy viscosa. El Spin-Coater es una máquina con una base rotatoria sobre la que situamos nuestro rectángulo de PCB + SU-8.

**Figura 8.** Spin-Coater

Al girar consigue eliminar tanto el exceso como las burbujas. Para conseguir el acabado y proporciones que buscamos primero haremos funcionar el Spin-Coater a 500 rpm durante 10 segundos y, posteriormente, a 700 rpm durante 50 segundos. Mencionar también que, a modo indicativo, para la primera capa de SU-8 la segunda velocidad fue de 1500 rpm durante 50 segundos.

Una vez finalizado este proceso pasamos el rectángulo de PCB con las dos capas de SU-8 a otra máquina llamada Cole Parmer. Esta máquina se emplea para calentar la capa recién puesta. Primero calentamos a 65°C durante 5 minutos y, posteriormente, a 105°C durante 40 minutos.

**Figura 9.** Cole Parmer

Una vez transcurrido ese tiempo esperamos que se enfríe y llevamos el preparado a la alineadora. Colocamos la máscara que ya estaba preparada en la alineadora y cerramos poniendo la máscara sobre el preparado.

180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195

196
197
198
199
200
201
202
203
204

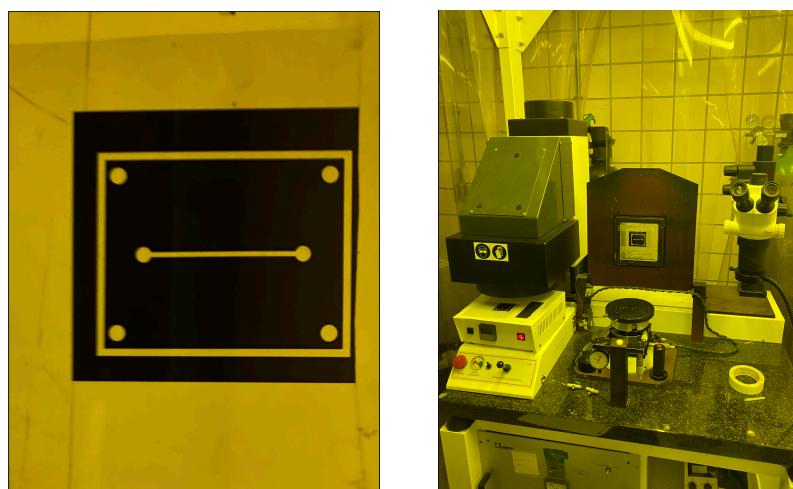


Figura 10. Máscara y máquina de alineado

Se aplican en ese momento varios ciclos de luz ultravioleta sobre el rectángulo de PCB + SU-8, lo que se conoce como insolación. En concreto fueron seis ciclos de 20 segundos, dejando intervalos de 10 segundos entre cada uno de los ciclos para evitar que la resina se caliente. Las zonas a las que le da la luz son las que posteriormente se van a endurecer.

Una vez terminados todos los ciclos llevamos de nuevo el preparado al Cole Parmer. En este caso lo calentamos durante 2 minutos a 65°C y después 5 min a 105°C. Con este segundo proceso de calentado conseguimos que se endurezcan las zonas a las que le ha llegado la luz ultravioleta, es decir, a las zonas donde la máscara ha dejado que pase la luz.

Por último, realizamos un revelado para eliminar la resina de aquellas zonas donde la máscara no ha permitido que llegue la luz ultravioleta. Para ello usamos un disolvente llamado Developer mr-Dev-600. Introducimos el rectángulo en un recipiente con suficiente disolvente como para cubrirlo.

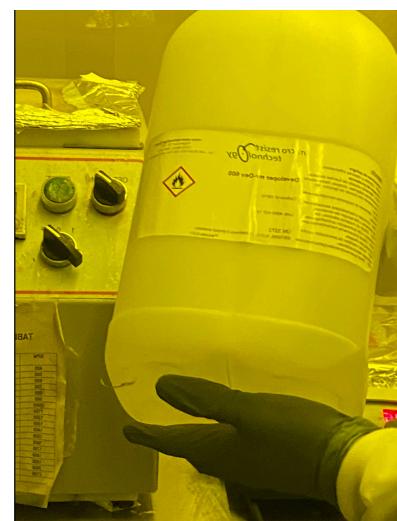


Figura 11. Disolvente mr-Dev-600

205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227

228
229
230

A continuación, movemos el recipiente con la mano haciendo círculos para conseguir eliminar la resina a la que no le ha dado la luz.

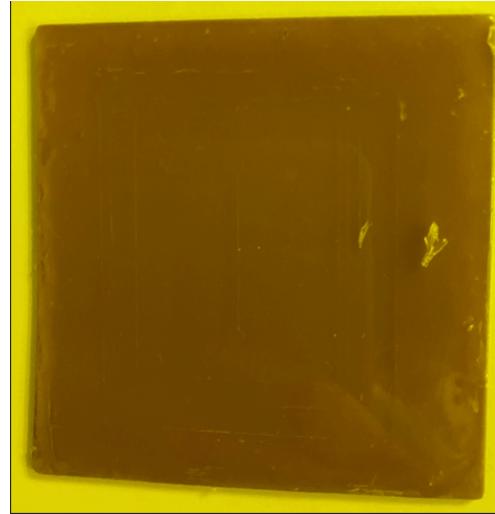


Figura 12. Resultado final de la primera sesión

Una vez tenemos el molde del caudalímetro, procedemos a llevarlo al material final, PDMS. Para ello utilizaremos dos botes: prepolímero (PDMS) y agente curante, los cuales se mezclarán y tratarán de manera que reaccionen para generar el material final.

Se prepararán dos mezclas que cumplirán una determinada relación de pesos según el esquema prepolímero:agente curante, una para el molde con una relación 1:10, en concreto 1.5g:15g, y otra para la oblea de vidrio que servirá como tapadera con una relación de 1:20, en concreto 0.3g:6g. Esto es precisamente para que la reacción se produzca del que tiene más agente curante al de menos. Se mezcla durante 6 minutos.

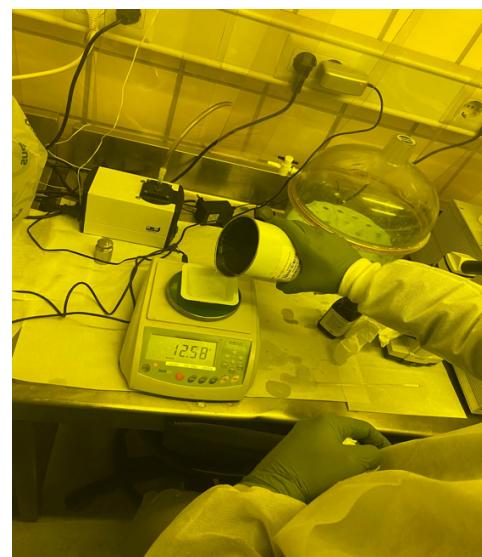


Figura 13. Echando el polímero y el agente curante

231
232
233

234
235

236
237
238
239

240
241
242
243
244
245

246

247
248

249

Posteriormente, se tienen que quitar las burbujas del material para que se genere bien la reacción, lo cual se consigue mediante la campana de vacío. Se hace la deposición de los materiales, el de la relación 1:10 en el molde y el de 1:20 en la oblea. Se introduce la oblea en el Spin-Coater para aplanar la mezcla, manteniéndola 10 segundos a 500 rpm y 50 segundos a 700 rpm.

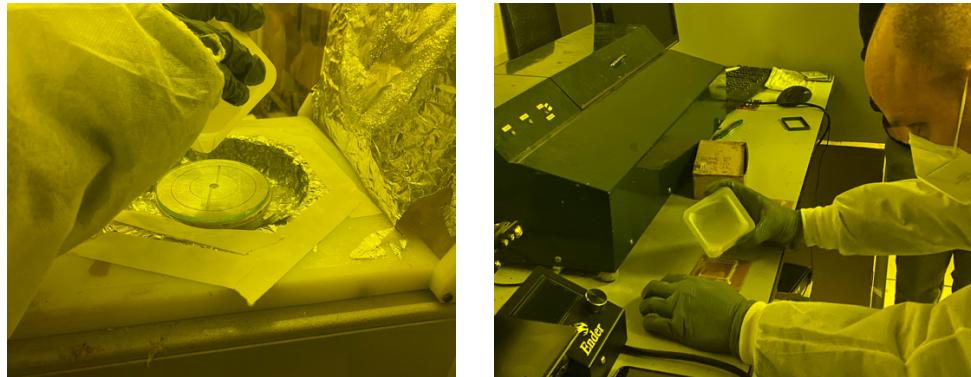


Figura 14. Deposición de materiales

Una vez pasado este tiempo se meten las soluciones al horno a 65°C durante 45 minutos estrictos, dado que lo que se pretende con este calentamiento es que los materiales queden parcialmente curados (están duros, pero no del todo curados). Con ello conseguimos poder montarlos posteriormente y que queden fijos.

Se desmolda y se hacen los agujeros de entrada y salida del canal y se vuelve a meter en el horno con un peso para producir la fijación a una temperatura mayor a 65°C hasta el día siguiente. No es muy importante la temperatura a la que lo dejemos porque el PDMS aguanta muy bien la temperatura, basta con que sea algo superior a 65°C.

Finalmente, se saca del horno, terminando con ello el proceso de fabricación del canal por donde va a pasar el líquido cuyo caudal se quiere medir. Se observa en el resultado final que la tapadera tiene muchas burbujas debido a que no se ha limpiado la superficie antes de depositarlo.

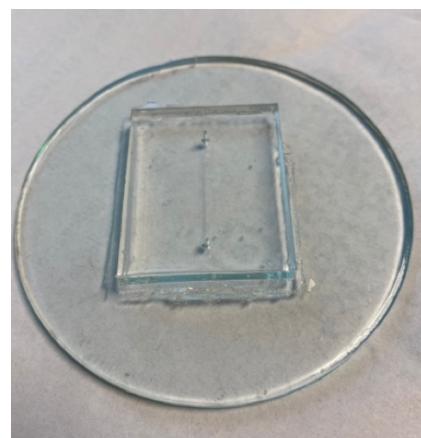


Figura 15. Resultado final PDMS

2.4. Diseño circuito electrónico

El siguiente paso en el proceso de generación del caudalímetro es el diseño, montaje y caracterización del circuito que nos permitirá finalmente calcular el caudal. Empezamos por diseñar el circuito que posteriormente implementaremos. Para su diseño utilizamos el software Microcap12 con la macro de NTC. El circuito diseñado es el siguiente:

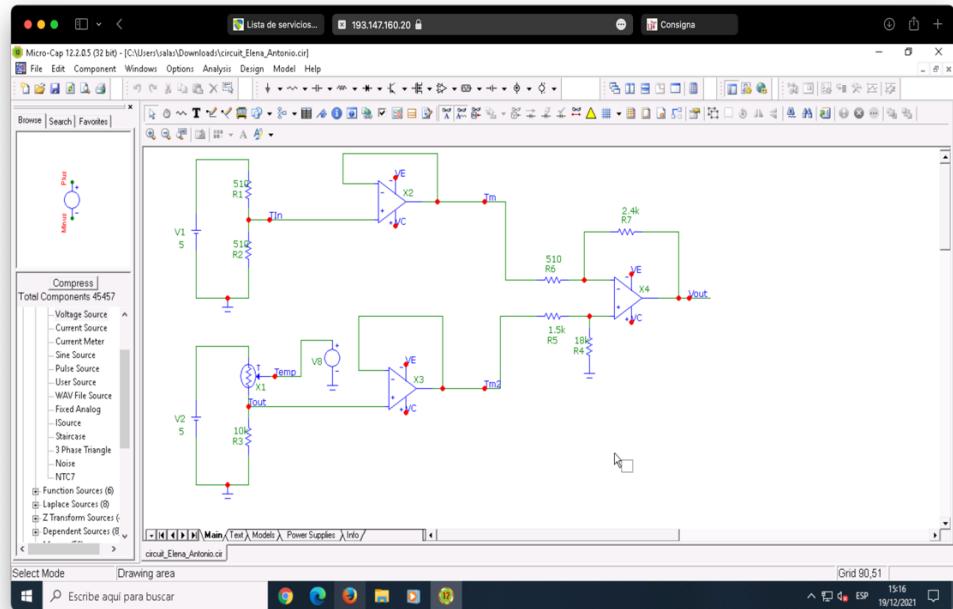


Figura 16. Diseño inicial del circuito.

Dicho circuito consta de varias partes. El bloque de arriba a la izquierda en la imagen es un divisor de tensión alimentado con una fuente de corriente continua de 5V. Ese divisor representa un bloque de temperatura constante. Se conecta a un amplificador operacional en configuración seguidor de tensión. En la rama de abajo tenemos otro divisor de tensión que cuenta con una NTC a la que se conecta una fuente sinusoidal. Con esta fuente sinusoidal y la NTC provocamos variaciones de tensión que se traducen en variaciones de la resistencia (que en el caso de la NTC se interpretan como variaciones de temperatura). Así, estamos consiguiendo en el bloque de abajo un comportamiento que simula las variaciones de temperatura a la salida, mientras que en el bloque de arriba tenemos una temperatura constante. El divisor de tensión de abajo se conecta a otro seguidor de tensión.

Ambos seguidores de tensión se conectan a otro amplificador operacional, en este caso en configurador restador. Esto nos permitirá obtener la diferencia de tensión entre el bloque que representa la temperatura de salida y el bloque que representa la temperatura de entrada (fija).

Para la elección de valores de las resistencias se han considerado únicamente valores normalizados, como los que figuran en la siguiente figura:

275
276
277
278
279
280

281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307

Standard Resistor Values ($\pm 5\%$)						
1.0	10	100	1.0K	10K	100K	1.0M
1.1	11	110	1.1K	11K	110K	1.1M
1.2	12	120	1.2K	12K	120K	1.2M
1.3	13	130	1.3K	13K	130K	1.3M
1.5	15	150	1.5K	15K	150K	1.5M
1.6	16	160	1.6K	16K	160K	1.6M
1.8	18	180	1.8K	18K	180K	1.8M
2.0	20	200	2.0K	20K	200K	2.0M
2.2	22	220	2.2K	22K	220K	2.2M
2.4	24	240	2.4K	24K	240K	2.4M
2.7	27	270	2.7K	27K	270K	2.7M
3.0	30	300	3.0K	30K	300K	3.0M
3.3	33	330	3.3K	33K	330K	3.3M
3.6	36	360	3.6K	36K	360K	3.6M
3.9	39	390	3.9K	39K	390K	3.9M
4.3	43	430	4.3K	43K	430K	4.3M
4.7	47	470	4.7K	47K	470K	4.7M
5.1	51	510	5.1K	51K	510K	5.1M
5.6	56	560	5.6K	56K	560K	5.6M
6.2	62	620	6.2K	62K	620K	6.2M
6.8	68	680	6.8K	68K	680K	6.8M
7.5	75	750	7.5K	75K	750K	7.5M
8.2	82	820	8.2K	82K	820K	8.2M
9.1	91	910	9.1K	91K	910K	9.1M

Figura 17. Valores normalizados de resistencias.

Se han elegido los valores de las resistencias para conseguir un rango de salida de 5V (mínimo en 0 V y máximo en 5V). Representamos a continuación la simulación realizada:

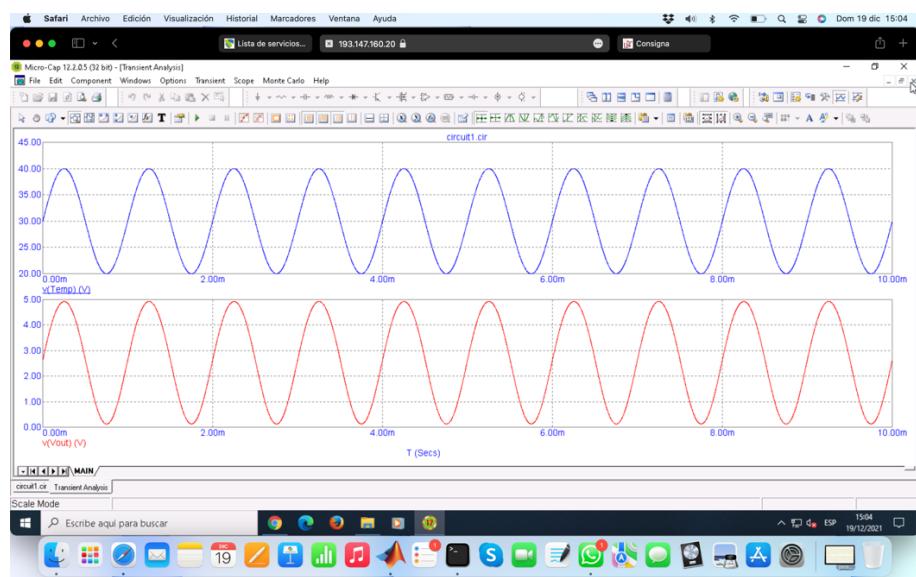


Figura 18. This is a figure.

En la simulación vemos que cuando la curva azul, que representa la temperatura de salida, alcanza su máximo valor (40V, que representan 40°C) la curva roja (tensión de salida) alcanza el mayor valor del rango (5V). Sin embargo, cuando la curva azul alcanza su mínimo (20V, que representan 20°C) la curva roja representa el mínimo valor del rango (0V, porque estamos restando a los 20V de la curva azul la tensión correspondiente a la temperatura ambiente).

308
309
310
311
312
313
314
315316
317
318
319
320
321
322
323
324
325

A pesar de conseguir el comportamiento deseado fueron necesarias varias modificaciones:

- Vamos a utilizar resistencias de 3 bandas, por lo que hemos de descartar el uso de las de 51, 510, 51k... y sustituirlas por las de 47, 470...
- Por otra parte, el divisor de arriba debería tener una NTC que simule la temperatura ambiente, o bien una resistencia de 10k, que es el valor de la NTC para temperatura ambiente. Esto se soluciona cambiando las dos resistencias de 510k del divisor de arriba por dos resistencias de 10k, así tenemos la resistencia que representa la NTC a temperatura ambiente y no alteramos la salida del divisor al mantener la misma proporción entre las resistencias que teníamos antes.

Una vez hechas las modificaciones y ajustados los valores de las resistencias el circuito quedó como se ve en la siguiente imagen, consiguiendo el comportamiento deseado:

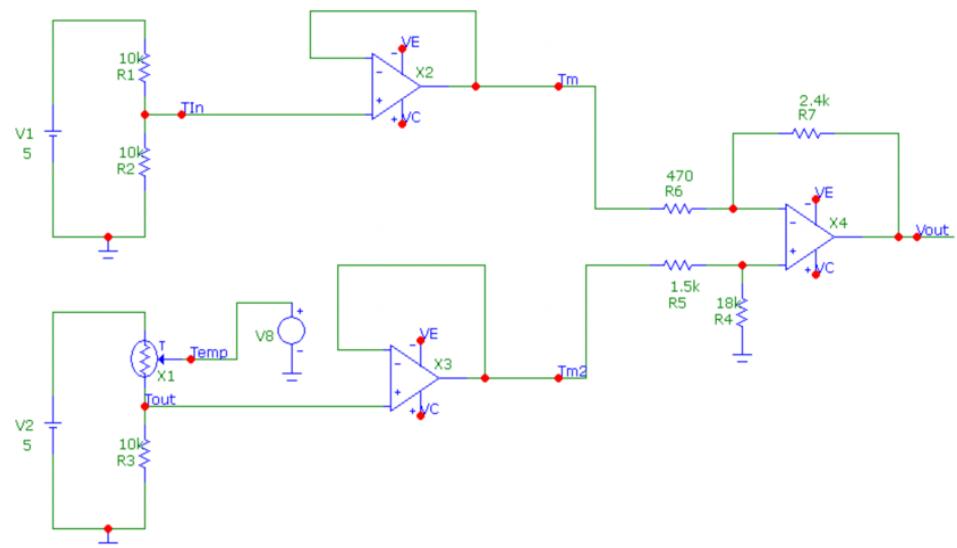


Figura 19. Diseño final del circuito, previo al montaje.

3. Resultados

3.1. Montaje del circuito

Primero, el circuito dispuesto en MicroCap para realizar las simulaciones de comportamiento se traspasa a una protoboard de la cual obtendremos las medidas para comparar la simulación con el comportamiento de los elementos reales. En la protoboard se montan los tres amplificadores operacionales y las resistencias escogidas para los circuitos seguidores y el circuito restador.

Sabemos, en primera instancia, que la temperatura tiene un rango entre 20°C y 40°C, lo que se hace corresponder con 0V y 5V respectivamente. En la simulación los elementos que se han planteado son ideales por lo que podemos prever que en el circuito real los valores cambiarán.

El principio de funcionamiento que seguimos para calcular el caudal se basa en la diferencia de temperatura de la entrada y de la salida. Para caracterizar el sistema en la

variación de la temperatura de la salida frente a una temperatura de entrada referencia podríamos disponer de una NTC –termistor, es decir, que sensa la temperatura en función de la resistencia–.

Sin embargo, simularemos su comportamiento con diferentes valores de resistencias que representarán el rango de temperatura a poner en la entrada y que proveerá al circuito de diferentes caídas de tensión. Sabemos que estas resistencias corresponden a una temperatura determinada según la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\beta}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) + \frac{\beta}{T_0}} \quad (8)$$

donde $\beta = 3410$ y $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

Utilizamos los amplificadores operacionales LT1490A, que dan lugar a tres diferentes casuísticas debido a que tienen un rango de operación de 0V a 5V:

- Saturación a 5V cuando la temperatura es mayor a 40°C y por tanto la resistencia es menor de determinado valor dado por la ecuación anterior.
- 0V en salida cuando la temperatura es menor a 20°C , lo que implica que la resistencia es menor al valor determinado por la ecuación anterior.
- Resto de voltajes del rango para aquellas resistencias intermedias.

Con estas consideraciones, recogemos los resultados y los disponemos en una tabla comparativa. En ella se muestran, por una parte, los resultados de la simulación con los valores ideales que nos da el circuito de MicroCap, en el que hemos obtenido el voltaje de salida y temperatura correspondiente y, por otra parte, los resultados obtenidos con los elementos reales cuyas resistencias se han medido con un multímetro para tener unos resultados más precisos.

Tabla 1. Resultados obtenidos en la caracterización del circuito seguidor de tensión

R ideal (Ω)	R real (Ω)	T ($^\circ\text{C}$)	V out_sim (V)	V out_real (V)	Error (%)
47 K	46.55 K	-10.30	-7.816	0.09	7.906
8.2 K	8.125 K	30.25	2.72	2.674	0.046
6.8 K	6.73 K	35.6827	4.01	3.9	0.11
5.6 K	5.57 K	41.061	5.3	4.9	0.4
3.3 K	3.28 K	57.1637	8.43	4.9	3.53

Vemos los resultados en la Tabla 1. Primero observamos una diferencia de valor entre las resistencias como ya suponíamos. Con respecto a la temperatura se ha calculado según la fórmula anteriormente dispuesta. En ella podemos ver que la primera resistencia

da una caída de tensión negativa. Esto en el circuito que se ha montado no tiene sentido ya que el rango de operación se encuentra entre 0 V y 5 V, por lo que todo por debajo de 0 V o, haciendo la correspondencia, por debajo de 20°C (a que hemos establecido como referencia), quedará en una tensión resultante de 0 V en la realidad (como se ve que ocurre). 391
392
393
394

Seguidamente observamos el rango de operación con 30.25°C y 35.68°C, aumentando la tensión de salida, pero manteniéndose en el rango correspondiente. En los dos siguientes casos observamos que las temperaturas que corresponden a un valor mayor a 40°C corresponden a la saturación en el umbral superior, es decir, 5 V. 395
396
397
398

Con esto se ratifica lo previamente supuesto. 399
400

3.2. Caracterización del circuito

En este apartado se pretende realizar la caracterización final del caudalímetro para comprobar su funcionamiento. 401
402
403
404

Con todos los resultados anteriormente explicados –el canal en PDMS, el diseño del circuito sensor de temperaturas y el montaje de la placa calentadora y los pines de entrada y salida–, procedemos a realizar la caracterización del sistema. 405
406
407

Para ello, por comodidad, se ha cambiado el circuito del sensor al modelo mostrado en la siguiente imagen. 408
409
410

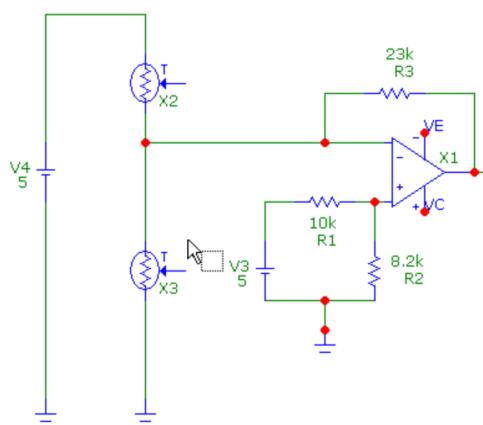


Figura 20. Circuito implementado para la caracterización. 411
412
413

Se utilizan los mismos elementos y se vuelve a montar en la protoboard, esta vez introduciendo el canal y las resistencias de calentamiento en el sistema, quedando el montaje que vemos en la siguiente imagen. 414
415
416
417

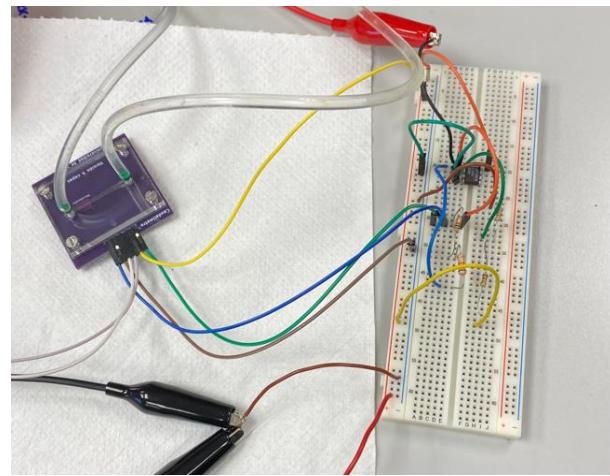


Figura 21. Montaje final

418
419
420
421
422
423
424
425
426

Para caracterizar el sistema dispondremos de un sistema de empuje de jeringa con agua, la cual será empujada a cierta intensidad de manera que pasará por el canal con un caudal determinado. Vemos el sistema completo en la siguiente imagen.

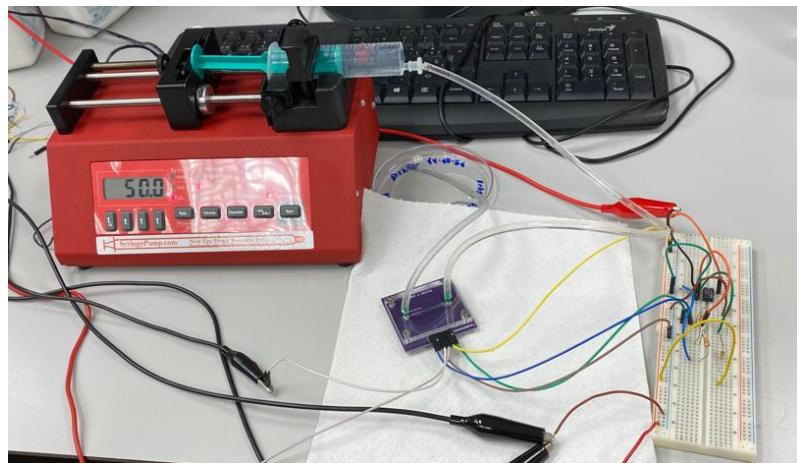


Figura 22. Sistema de empuje del caudal

427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437

Como se ha expuesto en apartados anteriores, la temperatura está intrínsecamente relacionada con el voltaje que se mide a la salida debido a los dispositivos NTC. La intensidad provista al circuito con la que el mismo calienta el agua (a través de la resistencia) se queda fija. De esta manera, se podrá simular el comportamiento del sistema. Cada grupo simuló para un cierto valor de corriente, en nuestro caso nos tocó con $I = 0.2 \text{ A}$. Con todo esto, disponemos los resultados obtenidos en la Tabla 2, donde adjuntamos los resultados de nuestra caracterización y la del resto de los compañeros.

438
439

Intensidad [A]	Caudal [$\mu\text{l}/\text{min}$]	Salida [V]		
		Mínimo	Máximo	Media
0.2	200	2.0074	2.0036	2.0055
	150	2.0947	2.0873	2.0910
	100	2.2030	2.1985	2.2008
	50	2.4644	2.4630	2.4637
0.3	200	2.47	2.5	2.4850
	150	2.78	2.81	2.7950
	100	3.06	3.1	3.08
	50	3.65	3.67	3.66
0.4	200	2.76	2.89	2.8250
	150	3.15	3.19	3.17
	100	3.6	3.69	3.645
	50	4.65	4.95	4.8

Tabla 2. Medida de la tensión para un caudal fijo

441

442

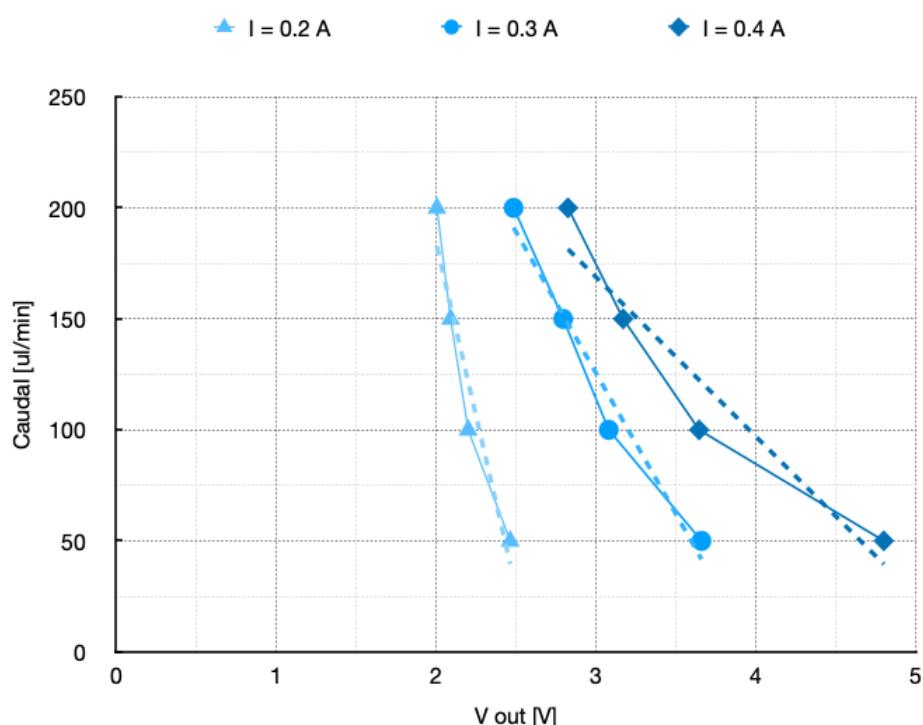
443

Mostramos las curvas que caracterizan el funcionamiento del sistema según los datos dispuestos, diferenciando por la intensidad que alimenta a la resistencia.

444

445

446

**Figura 23.** Caracterización del caudalímetro

447

448

4. Discusión y conclusiones	449
Vamos a hacer un análisis final sobre los resultados. Nos centraremos en la Figura 23, donde se puede ver la caracterización sobre cómo funciona el caudalímetro.	450 451 452
Destacar en primer lugar que cuanto más calor se cede al líquido –es decir, se da más intensidad a la resistencia– más voltaje se produce, lo que reafirma las hipótesis y fórmulas previamente dispuestas.	453 454 455 456
Debido a la disipación del calor, también se confirma en cada una de las representaciones que a más caudal menos temperatura y por tanto menos voltaje. Esto es, caudal y temperatura tienen una relación inversamente proporcional.	457 458 459 460
Por otro lado, si nos fijamos en las rectas de regresión de cada uno de los datos, tenemos que las pendientes son de -312.19, -12714 y -71.841 para $I = 0.2, 0.3$ y 0.4 A respectivamente. Si definimos la sensibilidad como la menor variación de magnitud que el sistema puede ser capaz de diferenciar, lo podemos relacionar directamente con esta, dado que la pendiente es precisamente la dependencia entre la variabilidad de las variables dadas. Su magnitud indica precisamente cuántos microlitros por minuto por voltio es capaz de sentir, por lo que tendremos una sensibilidad de $312.19\text{ }\mu\text{l/min/V}$ para $I = 0.2\text{ V}$, de $127.14\text{ }\mu\text{l/min/V}$ para $I = 0.3\text{ V}$ y de $71.841\text{ }\mu\text{l/min/V}$ para $I = 0.4\text{ A}$.	461 462 463 464 465 466 467 468 469
Como vemos, la sensibilidad va aumentando cuanto mayor sea la variación entre temperaturas de entrada y salida ya que el voltaje diferencia también va a ser mayor. Esto es acorde a lo anteriormente dispuesto.	470 471 472 473
Sin embargo, como hemos explicado en apartados anteriores, el sensor tiene un rango de funcionamiento de 0 V a 5 V , por lo que, si se hubiese hecho una simulación con una intensidad mayor, hubiese saturado en 5 V en varios de los puntos, por lo que hay que mantener una relación de compromiso entre la sensibilidad del sistema y la temperatura a la que se va a calentar el caudal.	474 475 476 477 478 479
Podemos destacar algunas conclusiones, como que en el caso de intensidad más baja (200mA) era relativamente complejo medir el voltaje máximo y mínimo porque las variaciones eran muy pequeñas. En los casos en los que la intensidad era mayor era más fácil medir estas variaciones. Además, vimos en el laboratorio que muchos factores influían, como el propio viento al tener ventanas y puertas abiertas por el protocolo COVID.	480 481 482 483 484
Mencionar también que en la simulación en Microcap teníamos que el rango era entre 0V (cuando no calentábamos nada y el líquido salía a la misma temperatura que entrada, que correspondía con la temperatura ambiente) y 5V (cuando el líquido salía a la mayor temperatura considerada, 40°C , o superior, saturando). Sin embargo, en las tres curvas anteriores vemos que ninguna proporciona un rango de salida de entre 0 y 5 V . En definitiva, el comportamiento sigue el descrito en las simulaciones, aunque lógicamente hay discrepancias propias entre simulación e implantación real.	485 486 487 488 489 490 491

En definitiva, a lo largo del proyecto se ha visto el proceso de fabricación, diseño y prueba de un caudalímetro, sistema que ahora podemos clasificar como Lab-on-Chip debido a su estructura. Durante el proceso de fabricación se han podido probar el funcionamiento de diferentes maquinarias de laboratorio, así como el tratamiento de diversos materiales que se utilizan en la tecnología LOC. Por otra parte, se ha deducido que no sería ésta la manera más eficiente de hacerlo para producción, dado que es un proceso muy laborioso y mediante otro tipo de materiales podría realizarse más rápido y en serie. Sin embargo, el diseño y caracterización se hicieron muy sencillos, de manera que tendríamos un caudalímetro con una sensibilidad aceptable en todos los casos con una tecnología y diseños sencillos a llevar a cabo. De esta manera, concluimos que la tecnología de Lab-On-Chip puede ser muy útil en muchos casos para hacer dispositivos electrónicos pequeños, baratos y rápidos de diseñar.

References

1. A. Ayoib, U. Hashim, M. K. M. Arshad and V. Thivina, Soft lithography of microfluidics channels using SU-8 mould on glass substrate for low cost fabrication. *IEEE EMBS (IECBES)*, 4-8 December 2016, pp. 226-229, doi: 10.1109/IECBES.2016.7843447. 492
2. Y. -J. Lin, K. -H. Lin, Y. -S. Juan and C. -H. Lin. Novel Pressure Sensor Capsule Produced in Silicone-Oil Modified PDMS Integrated with a Microflow Meter for Urinary Tract Obstruction Detection in Clinical Urology, 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 20-24 June 2021, pp. 1142-1145, doi: 10.1109/Transducers50396.2021.9495589. 493
3. A. S. Nezhad, M. Ghanbari, C. G. Agudelo, M. Packirisamy, R. B. Bhat and A. Geitmann. PDMS Microcantilever-Based Flow Sensor Integration for Lab-on-a-Chip. *IEEE Sensors Journal*, **2013**, 13, 2, pp. 601-609 , doi: 10.1109/JSEN.2012.2223667. 494
4. S. O. Aleksic, N. S. Mitrovic, M. D. Lukovic, S. G. Lukovic and N. T. Nikolic. Heat Loss Flowmeter for Water Based on Thick Film Thermistors in Power Save Regime. *IEEE Sensors Journal*, **2021**, 21, 1 , pp. 199-206, doi: 10.1109/JSEN.2020.3015023. 495
5. M. V. Nikolic, B. M. Radojcic, O. S. Aleksic, M. D. Lukovic and P. M. Nikolic. A Thermal Sensor for Water Using Self-Heated NTC Thick-Film Segmented Thermistors. *IEEE Sensors Journal*, **2011**, 11, 8, pp. 1640-1645, doi: 10.1109/JSEN.2010.2103309. 496
6. M. Cabello, C. Aracil, F. Perdigones and J. M. Quero. Conditioning lab on PCB to control temperature and mix fluids at the microscale for biomedical applications, Spanish Conference on Electron Devices (CDE), Barcelona, Spain, 8-10 February 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/CDE.2017.7905215. 497
7. Tarn, M.D.; Sikora, S.N.F.; Porter, G.C.E.; Shim, J.-u.; Murray, B.J. Homogeneous Freezing of Water Using Microfluidics. *Micromachines* **2021**, 12, 223. <https://doi.org/10.3390/mi12020223>. 498
8. Y. Mizuno, M. Liger and Yu-Chong Tai. Nanofluidic flowmeter using carbon sensing element, 17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Maastricht MEMS 2004 Technical Digest, 25-29 January 2004, pp. 322-325, doi: 10.1109/MEMS.2004.1290587. 499
9. A. Baquero-Larriva and G. Alvarez-Coello. Low Cost Data Acquisition System to Register Fuel Consumption in Diesel Engine Vehicles, Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI), 3-5 October 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/CONIITI.2018.8587057. 500
10. B. C. Cheah, A. J. Keating and J. M. Dell. Targeted machining during MEMS device fabrication using PDMS microfluidic cassettes. Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials & Devices, 14-17 December 2014, pp. 79-82, doi: 10.1109/COMMAD.2014.7038657. 501
11. Konari, P.R.; Clayton, Y.-D.; Vaughan, M.B.; Khandaker, M.; Hossan, M.R. Experimental Analysis of Laser Micromachining of Microchannels in Common Microfluidic Substrates. *Micromachines* **2021**, 12, 138. <https://doi.org/10.3390/mi12020138> 502