4. Diseño

4.1 Elección de tecnología, materiales y arquitecturas

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del presente proyecto es la fabricación de un microsensor térmico de flujo. Para ello se utilizará el principio calorimétrico debido a las ventajas que éste presenta respecto a los anemométricos y tiempo de vuelo.

Este dispositivo será fabricado sobre un PCB debido al bajo coste de este sustrato, su gran disponibilidad y el extendido uso que hay de las técnicas para tratarlo. De este modo, sobre dicho PCB se fabricará el microsensor de flujo y la electrónica de tratamiento de señal necesaria para manipular y convertir en variaciones de tensión los datos que suministra el sensor.

Para fabricar el sensor, primero se grabarán sobre el PCB mediante litografía las pistas de los circuitos de tratamiento de señal, así como las conexiones que serán necesarias para conectar el sensor a la placa. Tras este paso, se depositará sobre el PCB una capa de SU-8 que será el sustrato donde se fabricará el sensor. Esto tiene una doble finalidad: primero se aprovecharán las características térmicas que posee el SU-8, ya que es un buen aislante térmico (K= 0,3 W/m·K) y con ello se mejorarán las condiciones en las que trabaje el sensor, aislándolo de temperaturas exteriores. Y en segundo lugar, esta capa de SU-8 eliminará las rugosidades que pueda tener la placa del PCB, ofreciendo una superficie plana donde depositar los sensores de temperatura.

Una vez preparado el PCB con la capa de SU-8 tratada y curada, se pasará a depositar el metal con el que se fabricarán los sensores de temperatura. Para obtener el diseño deseado se utilizará una máscara con la forma de los sensores, de modo que fijándola sobre el SU-8 con cinta adhesiva y depositando encima oro mediante la máquina Sputter Coater, éste se filtre a través los orificios de la máscara para que una vez finalizada la deposición y retirada la máscara, se obtenga la estructura deseada.

El metal de deposición, el espesor de dicho metal y la estructura del sensor dependerá de las propiedades resistivas y térmicas de los dos metales estudiados, níquel y oro. Estos estudios se mostrarán a continuación y en función de los resultados obtenidos se seleccionarán los parámetros que optimicen las propiedades de los sensores de temperatura.

Una vez depositadas las pistas de los sensores de temperatura, sólo queda crear el microcanal por donde los fluidos circularán. Para ello se fabricará una capa de SU-8 sobre la que se grabará dicho canal mediante el proceso de revelado de este polímero. Se realizarán unos taladros al microcanal para introducir y pegar unos tubos de entrada y de salida donde se conectará la bomba de jeringa. Por último se colocará una tapadera de acetato sobre la estructura de SU-8 para cerrar el canal y hacerlo estanco.

Con este proceso se tendría fabricado el microsensor térmico de flujo y se encontraría preparado para la realización de pruebas y se caracterización.

a) Elección de material

Para la fabricación de los sensores de temperatura y el calentador se pueden utilizar diversos metales, cada uno con unas propiedades que los hacen específicos para cada aplicación. La elección del tipo de material dependerá de las condiciones de trabajo y las características que se deseen del microsistema. A continuación se justificará el material utilizado para la fabricación de los sensores de temperatura.

El sensor de temperatura se basa en el cambio de resistividad que sufren las estructuras cristalinas de los metales con la temperatura, la cual es aproximadamente lineal para ciertos metales.

Como se ha comentado anteriormente, el sensor de temperatura será un detector de temperatura por resistencia (Resistance Temperature Detector, RTD), el cual se fabrica para tener un valor nominal Ro a una temperatura dada (p.e. 100 Ω a 0°C). Al medir su resistencia a una temperatura desconocida y compararla con Ro puede conocerse la ΔR . Como la característica R=f(T) es conocida, el cambio de temperatura ΔT también lo será.

En una primera aproximación para discutir la selección del material se utilizará la ecuación de una termorresistencia considerando sólo el primer término, es decir,

$$R_T = R_o (1 + \alpha \cdot \Delta T) \tag{1}$$

Donde,

 R_o , es la *resistencia nominal* a la temperatura de referencia

 α , es el *coeficiente de temperatura* que cuantifica la relación entre la variación de la resistencia eléctrica y el cambio de temperatura.

A la hora de seleccionar el tipo de material que se utilizará como sensor de temperatura se deberán tener en cuenta algunas consideraciones:

- Deberá de poseer una resistividad medio/alta debido a que al tratarse de un microsistema, el tamaño del sensor es un factor muy importante. Por ello la resistividad debe de ser la adecuada en aras de reducir el tamaño del dispositivo.
- Poseer un coeficiente de temperatura elevado en el rango de temperaturas de funcionamiento para mejorar la sensibilidad y precisión del sensor con el fin de reducir de este modo la electrónica necesaria para el tratamiento de la señal.
- Tener un comportamiento lineal en el rango de temperaturas de trabajo.
- Ser estable químicamente para evitar que el sensor varía su resistencia nominal debido a la oxidación o corrosión.
- Ser económico, ya que uno de los objetivo del presente proyecto es fabricar un microsensor de bajo costo.

Una vez analizadas las características que le exigimos al material que formará el sensor de temperatura, se pasa a describir y justificar cada uno de los materiales más comunes.

<u>Platino</u>

El platino es por excelencia el material más utilizado por fabricantes de microsensores en el campo de los RTD. Las principales características que de este material son:

- Respuesta altamente lineal en un rango amplio de temperaturas
- Químicamente inerte a altas temperaturas
- Punto de fusión elevado (1772°C)
- Coste económico alto
- Coeficiente de resistividad relativamente elevado ($\approx 10 \ \mu\Omega \cdot cm$)
- Coeficiente de temperatura α elevado ($\approx 0,00393^{\circ}C^{-1}$)



Gracias a estas excelentes propiedades, el platino es un material muy importante en el campo de los sensores de temperatura. Sin embargo, este material no está disponible aún en el Laboratorio de Microsistemas de la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla por lo que no podrá ser utilizado.

Figura 4.1. Platino

<u>Níquel</u>

El níquel es un material menos utilizado por fabricantes comerciales pero que se está desarrollando mucho en varias líneas de investigación. Sus principales características son:

- Respuesta no lineal en un amplio rango de temperaturas
- Coeficiente de temperatura α muy elevado ($\approx 0,00586 \text{ °C}^{-1}$)
- Coeficiente de resistividad media ($\approx 6.85 \ \mu\Omega \cdot cm$)
- Punto de fusión elevado (1453 °C)
- Tienden a modificar su valor de resistencia con el tiempo por oxidación



Estas propiedades hacen al níquel un material muy interesante para nuestra aplicación, pero con la salvedad de que hay que saber manipular el material para sacarle el máximo partido. Éste se encuentra disponible en el Laboratorio de Microsistemas.

Figura 4.2. Níquel

Oro

El oro es un material interesante para fabricar sensores de temperatura, aunque no está tan ampliamente extendido como el platino o el níquel. Sus características más importantes son:

- Elevado coeficiente de temperatura ($\approx 0,003715 \text{ °C}^{-1}$)
- Resistente a la oxidación
- Resistividad muy baja ($\approx 2,24 \ \mu\Omega \cdot cm$)

En el laboratorio se encuentra en forma hilo de un diámetro de 25 µm y también como material para ser depositado en película delgada mediante Sputter Coater. Aunque el coeficiente de temperatura del oro es muy próximo al del platino ($\alpha_{Pt} \approx 0,00393 \text{ °C}^{-1}$) y la buena respuesta



química que presenta pueden hacer interesante este material para fabricar sensores de temperatura RTD, la baja resistividad que ofrece limita mucho su uso en microsistemas. Esto implicaría que una resistencia de oro, aunque su comportamiento térmico fuera muy próximo al del platino, tendría un tamaño mucho mayor que una resistencia de platino o níquel.

Figura 4.3. Oro

Tras analizar en detalle estos tres metales habrá que seleccionar uno para fabricar los sensores de temperatura. Como se ha comentado, aún no se dispone de platino para depositarlo mediante Sputtering, por lo tanto habrá que decantarse por oro o níquel.

Parámetro	Platino (Pt)	Níquel (Ni)	Oro (Au)	Cobre (Cu)
Resistividad	10.5	6,85	2,24	1,724
(μΩ·cm)				
α(ºC ⁻¹)	3,93 · 10 ⁻³	6,41 · 10 ⁻³	3,715 · 10 ⁻³	4,29 · 10 ⁻³
Margen (^o C)	-200 / +850	-80 /+320	-200/+250	-200/+120

Tabla 4.1. Características de diferentes materiales para fabricar RTDs.

A priori, el níquel cuenta con unas propiedades muy buenas para ser usado como sensor de temperatura, ya que tiene un elevado coeficiente de temperatura α y una resistividad media. Sin embargo, tiene el inconveniente de no ser un material inerte a la atmósfera y se oxida. Este problema puede provocar que al depositar níquel, fabricar los sensores y caracterizarlos se obtengan unos datos y que transcurrido un tiempo se oxiden las pistas de níquel debido al movimiento de flujo al que va a estar expuesto y esto provoque una variación en la resistencia de los sensores de temperatura que falsee todos los datos mostrados. Por ello el Níquel es, teóricamente, un material bastante adecuado para fabricar sensores de temperatura pero hay que saber controlar el fenómeno de la oxidación.

El oro no es un material tan utilizado como platino o níquel pero que posee unas propiedades interesantes. Posee un coeficiente de temperatura α muy similar al platino y es resistente a la oxidación, siendo estas dos propiedades muy importantes de cara a la buena caracterización de los sensores de temperatura. Sin embargo, su resistividad es bastante pequeña, del orden de cuatro veces menor que el platino. Esto hace que fabricar un sensor de temperatura de oro sea aproximadamente cuatro veces mayor que fabricarlo en platino para el mismo valor de resistencia. Al querer fabricar un microsistema, las dimensiones finales del dispositivo son un factor bastante crítico, por ello esta baja resistividad hace que fabricar el sensor de flujo de oro resulte de un tamaño bastante elevado. Sin embargo, esto puede ser resuelto mediante el uso de estructuras que aprovechen al máximo las superficies, como pueden ser serpentines u otras formas.

Aunque teóricamente, el níquel parece ser el material seleccionado para fabricar los sensores de temperatura antes que el oro, se deberán de caracterizar la resistencia y el coeficiente de temperatura α de ambos y en función de los valores obtenidos, decantarse por uno u otro.

4.2 Parámetros de diseño del principio calorimétrico

El microsensor térmico de flujo que se fabricará funcionará basándose en el principio calorimétrico. Como se ha comentado anteriormente, éste se basa en el desplazamiento del perfil de temperatura que realiza el fluido alrededor de un calentador central y que es medido mediante dos sensores de temperatura instalados a cada lado del calentador.

A continuación se muestran los parámetros fundamentales para poder diseñar el microsensor.

Principio de operación

Cada resistencia puede actuar tanto como elemento térmico basado en el efecto Joule, o como elemento sensor, siendo su resistencia función de la temperatura de acuerdo a:

$$R(T) = R(T_0) (1 + \alpha (T - T_0))$$
(2)

Siendo R(T) y R(T₀) los valores resistivos a la temperatura T y a la temperatura de referencia T_0 , respectivamente, y α el coeficiente de resistencia de temperatura (TCR).

De (2) se obtiene que el cambio de resistencia normalizado es proporcional al cambio de temperatura impuesto a la resistencia:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \alpha \cdot \Delta T \tag{3}$$

Donde $\Delta R = R(T_0) - R(T)$ y $\Delta T = T_0 - T$. Definiendo de este modo la operación del sensor se puede obtener directamente una relación directa y lineal de variación de resistencia frente a diferencia de temperatura.

Los resultados mostrados en (2) y (3) se refieren al comportamiento de un único sensor de temperatura y no dos como hay en el principio calorimétrico. Por ello se desarrolla la siguiente diferencia de cambios de resistencias normalizadas R_{down} y R_{up} :

$$\Delta R_a = \frac{\Delta R^{down}}{R_0^{down}} - \frac{\Delta R^{up}}{R_0^{up}} \tag{3}$$

Con $\Delta R^{down} = R^{down} - R_0^{down}$, $\Delta R^{up} = R^{up} - R_0^{up}$, donde R_0^{down} y R_0^{up} son los valores de la resistencia aguas-abajo y aguas-arriba a flujo cero respectivamente. Desarrollando la ecuación (3):

$$\Delta R_{a} = \frac{R^{down} - R_{0}^{down}}{R_{0}^{down}} - \frac{R^{up} - R_{0}^{up}}{R_{0}^{up}} = \frac{R^{down}}{R_{0}^{down}} - \frac{R^{up}}{R_{0}^{down}}$$
(5)

Utilizando la expresión (3) y (5) se obtiene:

$$\Delta R_a = \alpha \cdot \Delta T^{down} - \alpha \cdot \Delta T^{up} = \alpha \cdot \Delta T_c$$

Donde ΔT^{down} y ΔT^{up} son las variaciones de temperatura de los sensores aguas-abajo y aguasarriba del sensor, respectivamente, mientras que $\Delta T_c = \Delta T^{down} - \Delta T^{up}$ es la diferencia de temperatura de los elementos sensores. De este modo monitorizando la resistencia R_a podemos conocer la diferencia de temperatura entre las dos resistencias posicionadas a unas distancias específicas del heater.

Caracterización de la posición de R_{DOWN} y R_{UP}

En el principio calorimétrico, las distancias de los sensores de temperatura con respecto al calentador son muy importantes ya que pueden determinar el correcto funcionamiento del sensor. Son muchos los autores que se han centrado en este aspecto del diseño para poder encontrar las distancias óptimas con el objetivo de maximizar las propiedades del dispositivo.

El funcionamiento general del sensor es que ΔR_a es inicialmente una función que se incrementa con el caudal hasta un punto de saturación, el cual depende de la combinación y selección de las distancias de los sensores de temperatura.

Como es evidente, no existen unas distancias específicas que maximicen los resultados entregados por el sensor en términos de sensibilidad y rango de medida, ya que para cada sensor y diseño habrá muchos otros parámetros que tener en cuenta. Pero en general, grandes distancias de los sensores de temperatura aguas-arriba ofrece un rango de medida mayor del caudal que puede medir el sensor, aumentando de este modo el caudal al que se satura.

El efecto de la distancia del sensor de temperatura aguas-abajo está muy relacionado con la sensibilidad que poseerá el dispositivo. Como el principio calorimétrico se basa en deformar el perfil de temperatura con respecto al calentador, interesa situar este sensor de temperatura lo más cerca posible de la fuente de calor, para que de este modo el sensor de temperatura pueda medir cualquier cambio, por pequeño que sea, en el caudal del fluido.

En muchos artículos estas distancias óptimas del sensor de temperatura aguas-arriba con respecto al calentador están comprendidas entre 5 y 15 mm, obteniéndose en estos casos un caudal de saturación de 100 y 200 μ L/min, respectivamente. Con respecto a los sensores aguas-abajo las distancias utilizadas por varios autores se encuentran entre 200 y 500 μ m.

En muchos casos, para encontrar el óptimo de estas distancias con respecto al calentador, los investigadores crean una matriz de resistencias situadas a diferentes distancias con respecto al calentador y van realizando distintas mediciones para cada pareja de sensores. Esta idea se muestra a continuación en la Figura 4.4, donde se observan dos casos, en el de la izquierda la distancia del sensor aguas-abajo es de 0,475 mm mientras que en la derecha son 5 mm. Las distancias de los sensores aguas-arriba son las mostradas en la leyenda.



Figura 4.4. Dependencia de la sensibilidad y rango de medida con respecto a las distancias de los sensores de temperatura respecto del calentador.

En la figura de la izquierda, con $R_{DOWN} = 0,475$ mm, se observa como a mayor distancia de R_{UP} aumenta el punto de saturación y por tanto se puede medir un mayor caudal. Con una distancia de 1,125 mm se podría medir hasta aproximadamente 50 µL/min, sin embargo con 15 mm este valor se incremente hasta los 200 µL/min. Se observa que está última combinación ($R_{DOWN}=0,475$ mm y $R_{UP}=15$ mm) es la que ofrece mayores prestaciones, tanto de fondo de escala como de sensibilidad. Sin embargo, observando la imagen de la derecha, con $R_{DOWN}=5$ mm, se pueden medir caudales con las distancias mayores de 15 y 25 mm, pero que estas medidas, aunque tienen un fondo de escala elevado (aprox. 200 µL/min), tienen una sensibilidad bastante pequeña, dificultando de este modo la medida de pequeñas variaciones de caudal.

De este modo, se observa que el factor común que debe de tener el sensor de flujo es que el sensor de temperatura aguas-arriba se encuentre bastante separado del calentador (aprox. 15 mm) y el sensor de temperatura aguas-abajo esté lo más próximo a él (aprox. 0,5 mm).

4.3 Caracterización de Níquel y Oro

Para la realización del dispositivo se dispone en el Laboratorio de Microsistemas de la Escuela Superior de Ingeniería de Sevilla de los materiales níquel y oro. Dichos materiales serán depositados en los sustratos mediante la máquina Sputter Coater K550X, la cual tiene un rango de intensidad programable entre 0 y 50 mA para poder ajustar la velocidad de deposición del metal. El fabricante de esta herramienta proporciona una curva de deposición de oro en función de la intensidad programada, pero no ofrece ninguna característica de resistividad o variación con la temperatura ni de oro ni de níquel Por ello se realizó la caracterización de níquel y oro para abordar el diseño.

Caracterización de Níquel

Primero se optó por estudiar el níquel porque, como se vio anteriormente, posee unas propiedades muy interesantes de cara a su utilización para fabricar sensores de temperatura.

Como a priori se deseaba observar la variación de la resistividad del metal con la temperatura, este primer análisis del níquel se realizó sin máscara. El proceso de fabricación se muestra detallado en el "Capítulo 5. Proceso de fabricación" apartado número 3 "Proceso de SU-8 para caracterización de níquel y oro".

En resumen, lo que se realizó fue depositar sobre un PCB de una sola cara una capa de SU-8, obteniéndose las mostradas en la Figura 4.5.



Figura 4.5. Placas PCBs antes (izquierda) y después de depositar una capa de SU-8 encima (derecha).

Una vez preparada la placa, se pasó a depositar níquel sobre ella para caracterizar tanto la resistividad como el coeficiente de temperatura α .

En principio, antes de realizar una máscara y medir estas propiedades con un diseño previo se probaron mediante unas pistas realizadas con cintas adhesivas. Para ello se colocó una cinta adhesiva y junto a esta, a una distancia aproximada de 0,5 mm se colocó la otra, resultando de este modo una pista rectangular. Tras fabricar tres pistas y depositar níquel, se retiraron las cintas adhesivas y las pistas quedaron depositada sobre el SU-8. Con este procedimiento se pretendió verificar a priori si el material presentaba resistividad y si ésta variaba con la temperatura para que una vez comprobado, se fabricara una máscara para caracterizarlo correctamente.



En la Figura 4.6 se puede observar las pistas de níquel. Además de níquel hay oro en la misma placa debido a que fue reutilizada para caracterizalo.

Figura 4.6. Placa con pistas de oro y de níquel

Las condiciones en las que se realizó la deposición del níquel sobre el SU-8 se muestran en la Tabla 1 del "Anexo 1. Tablas de caracterización de níquel".

Analizando los datos de esta tabla, se observa como el tiempo total de deposición es muy elevado (1 hora). Esto se debe a que para un tiempo menor el níquel no es conductor de la



electricidad debido a que no se ha depositado una capa suficientemente gruesa. Tras analizar varios autores se ha observado que el vacío que se realiza en la cámara del Sputter Coater es un factor importante ya que cuanto mayor vacío haya mejor se arrancan los átomos de níquel y mejor es la deposición. Hay autores que utilizan un vacío de $6 \cdot 10^{-7}$ mbar, cinco órdenes de magnitud inferior a lo que puede proporcionar la bomba de vacío que se posee en el laboratorio.

Figura 4.7. Sputter Coater depositando Níquel

Una vez conseguida la deposición de níquel, se pasó a caracterizar su variación de resistividad con respecto a la temperatura. El procedimiento a seguir fue colocar la placa en el Hot-Plate e ir aumentando su temperatura para que una vez estuviera estabilizada se comprobara la resistencia del Níquel mediante el multímetro. Para mantener fijas las puntas del multímetro a la placa se utilizaron unos soportes con pinzas de cocodrilo y se fijaron en un trozo de pista de aproximadamente 40 mm con un ancho de 1,2mm. Debido a que el PCB y el SU-8 tienen propiedades térmicas bastante aislantes, la temperatura a la que se programaba el Hot-Plate no se correspondía con la temperatura en las pistas de níquel, por ello se utilizó un termómetro láser Non-contact Portable IR-88 con un rango de medida de -20°C hasta 270°C.

Se fabricaron tres pistas de una longitud de 480 mm y anchos de 1.2, 0.6 y 0.5 mm. aproximadamente, siendo su resistencia nominal a temperatura ambiente de 17,6 k Ω , 13,7k Ω y 12,8k Ω , respectivamente.

Se iniciaron las medidas con una resistencia inicial de 1,46 K Ω a 30°C y se fue incrementando la temperatura hasta aproximada de 105°C, observándose que la resistencia aumentaba con la temperatura hasta un valor de 7,31 k Ω . Tras alcanzar esta temperatura se apagó el Hot-Plate y se dejó que enfriar hasta temperatura ambiente con la placa encima y comprobando como al decrementar la temperatura, también disminuía la resistencia. Sin embargo, en vez de disminuir su resistencia hasta 1,46 K Ω , se paró a los 5,1 K Ω . Tras este fenómeno, se repitió el proceso de nuevo hasta 105°C y se dejó enfriar, comprobándose que la resistencia a 30°C en vez de 5,1K Ω tenía 7,59 K Ω . Una última comprobación se realizó, obteniéndose una resistencia a 30°C de 10,1 K Ω .



Figura 4.8. Pruebas de variación de la resistencia del níquel con la temperatura

Los valores de resistencia obtenidos para cada ciclo térmico se muestran en la Tabla 2 del "Anexo 1. Tablas de caracterización de níquel".

Tras estos análisis se observó una gran histéresis en cada ciclo térmico que se le realizaba al níquel. Ésta es debida a la oxidación del níquel, la cual se ve agravada al aumentar la temperatura. De este modo, al ir incrementando la temperatura del Hot-Plate y por tanto del níquel, aumentaba la resistencia debido al coeficiente de resistencia de temperatura α , pero también lo hacía porque se iniciaba un proceso de oxidación en la superficie de la pista de níquel. Este fenómeno hace que sea muy difícil caracterizar el comportamiento térmico del níquel para poder usarlo como sensor de temperatura.

Los valores obtenidos en el ensayo realizado al níquel para distintas temperaturas es mostrado en la Figura 4.9.



Figura 4.9. Curvas de variación de la resistencia del níquel con la temperatura

Hay autores que para solucionar este problema lo que hacen es forzar la oxidación de la superficie de la pista de níquel para que una vez oxidado se pueda caracterizar. Esto se logra porque al crearse una capa de óxido de níquel en la superficie, se aíslan el níquel y el oxígeno de la atmósfera frenándose de este modo el proceso de oxidación. Para ello lo que hacen es exponer el Níquel a un tratamiento térmico de recocido a la temperatura de 450°C durante varias horas. Esta técnica no podemos realizarla en el laboratorio debido a que el PCB no soporta esas temperaturas.



Figura 4.10 Variación de la resistividad de las películas delgadas de Níquel con el tiempo de tratamiento térmico de recocido a 450°C.

Tras estos análisis, se observa que el Níquel es un material complicado para trabajar con las herramientas que se disponen. Primero, porque para depositarlo se requiere aproximadamente una hora de deposición, que sumado a los tiempos que necesita la bomba para hacer vacío en la cámara, se corresponden a aproximadamente 2 horas y media de deposición continua. Este tiempo es demasiado elevado para cada prueba y puede provocar una avería por sobrecarga en

el Sputtering. Además las variaciones de la resistencia por oxidación superficial de las pistas hacen muy complejo la caracterización del comportamiento de este metal como sensor de temperatura.

Por todo ello, aunque el níquel es un material muy interesante debido a su gran coeficiente de temperatura α y a su resistividad media, tras los resultados obtenidos se probará caracterizar el oro como posible metal con el que fabricar los sensores de temperatura.

Caracterización de Oro

Tras analizar el níquel y comprobar su compleja caracterización, se pasó a depositar oro y analizar sus propiedades. Para ello se utilizó la metodología empleada anteriormente para níquel. Se fabricó un sustrato de SU-8 sobre un PCB y mediante la fabricación manual de pistas mediante cinta adhesiva, se depositó oro y se comprobó que ofrecía resistencia eléctrica y que ésta variaba con la temperatura. Tras confirmar que el comportamiento del oro era adecuado, se pasó a caracterizarlo.

Para ello se creó de nuevo una capa de SU-8 sobre un PCB cuadrado de aproximadamente 5 cm. de lado, siendo el método utilizado para depositar esta capa de SU-8 fue el mismo empleado anteriormente en níquel. En la Figura 4.11 se pueden observar las distintas capas que tendrían en el sustrato.



Figura 4.11. Distintas capas del PCB y del SU-8

Para caracterizar la resistividad del Oro y su variación con la temperatura se fabricó una máscara con unas pistas de diferentes longitudes y el mismo ancho. Esta máscara fue fabricada de SU-8 y mediante su método de revelado se pudieron grabar las dimensiones deseadas de las pistas. En este caso, en vez de fabricar la máscara sobre un sustrato rígido como PCB, se decidió fabricarla sobre el polímero PDMS. El motivo de la elección de este material es que tiene muy poca adherencia con el SU-8. De este modo, una vez fabricada la máscara sobre el PDMS, podrán despegarse la una de la otra sin que se queden adheridas y pueda romperse la máscara. Como el PDMS es un polímero que viene en forma líquida, fue depositado sobre acetato para facilitar la delaminación de la máscara y mediante un proceso de polimerización se curó para poder depositar sobre él la capa de SU-8.



Figura 4.12. Distintas capas con las que se fabricará la máscara de SU-8

El proceso de fabricación de la máscara en fotolito mediante Photoplotter se detalla en el "Capítulo 5. Procesos de fabricación", apartado 2 "Fabricación de máscaras". En ese mismo capítulo pero en el apartado 3 "Proceso de SU-8 para caracterización de níquel y oro" se detallan los procesos de fabricación de preparación del SU-8 sobre le PCB y la fabricación de la máscara de SU-8 con las pistas para depositar oro.

La estrategia que se siguió una vez realizada la máscara de SU-8 fue colocarla encima de la capa de SU-8 del PCB y dejarla fija mediante cinta adhesiva. Como el objetivo del estudio de las propiedades del oro es medir su resistencia y su variación con la temperatura para distintos espesores de película delgada de Oro depositado, se fueron cubriendo mediante acetato las zonas donde no se deseaba depositar más Oro.

Se programó el Sputtering a una corriente de 30 mA y se depositó Oro durante 8 minutos en dos sesiones de 4 minutos, alcanzándose un vacío en la cámara de $7 \cdot 10^{-2}$ mbar.

Una vez finalizado el tiempo de deposición se sacó la placa del Sputter Coater y se observó que la máscara de SU-8 se había deformado. Esto fue debido a que la máscara no es suficientemente rígida para soportar la tensión por insolación, temperatura y deposición de oro, por lo que acabó estresándose y deformándose. Esto provocó que la máscara no quedara paralela al sustrato de SU-8 y la deposición no se realizara correctamente, quedando las pistas demasiado gruesas.

En la Figura 4.13 se muestran la vista frontal y lateral de la máscara de SU-8 una vez depositado oro, donde se observa la gran deformación que ha sufrido la máscara durante la deposición. En Figura 4.14 se observan las pistas de oro que se han depositado sobre el sustrato, donde hay muchas pistas demasiado gruesas, otras que se han cortado y algunas muy difuminadas. Además se muestra la máscara realizado mediante Photoplotter y que sirvió de modelo para fabricar la máscara en SU-8.



Figura 4.13. Deformación de la máscara de SU-8 de 120 µm de espesor.



Figura 4.14. Máscara y placa tras deformarse la máscara de SU-8

Tras observar las dificultades que presentaba la realización de la máscara mediante SU-8, se estudió la posibilidad de fabricarla mediante el Láser Brilliant B de Quantel que se encuentra en el laboratorio.

El objetivo de utilizar el láser fue que se pudo utilizar de máscara un trozo de acetato, el cual presenta unas propiedades excelentes dada su gran rigidez y fácil adquisición. Para ello diseñaron las dimensiones de las pistas que se deseaban fabricar y mediante la programación del láser se perforó el acetato dando lugar a la máscara. Gracias a las propiedades del acetato se pudieron realizar muchas pruebas sin el consecuente deterioro de la máscara, fijándola al sustrato mediante cinta adhesiva.

La máscara resultante puede ser observada en la Figura 4.15 y estaba compuesta de cuatro pistas con longitudes de 2, 10, 15 y 22 mm. Cada pista disponía de dos pads cuadrados de 2 mm de lado para poder medir la resistencia mediante las pinzas del multímetro. Para comprobar el ancho de pista creado por el láser se usó una cámara especial de microscopio y se utilizó de referencia unos tubos de acero de 360 μ m de diámetro (Figura 4.15c). Comparando los resultados se confirmó un ancho de pista de 210 μ m.



Figura 4.15. Máscara para oro fabricada en acetato mediante el láser Brilliant B de Quantel

Una vez obtenida la máscara se pasó a caracterizar la resistividad del oro y su variación con la temperatura. Para ello se preparó un sustrato de SU-8 sobre un PCB cuadrado de 7 cm de lado, cuyo proceso de fabricación se detalla en el "Capítulo 5", apartado 3 "Proceso de SU-8 para caracterización de níquel y oro".

Con el sustrato de SU-8 preparado se pasó a depositar oro. Para ello se fijó la máscara al SU-8 mediante cinta adhesiva, procurando que quedase lo más plana y pegada al sustrato que se pudiera. Una vez fijada la máscara fue introducida en Sputtering.

Para preparar el Sputtering primero se encendió y luego se abrió la botella de Argón, ajustando su presión a 300 mbar. El Sputtering fue configurado con una corriente de 30 mA, tiempos de deposición de 4 minutos y tiempos de vacío de 5 minutos. Con estas características, cada minuto de deposición equivaldría a un espesor aproximado de 10 nm.

Para caracterizar el Oro se buscó observar como variaba la resistividad y el coeficiente de temperatura α en función del espesor depositado de Oro. Por lo tanto interesaba tener varios espesores para poder analizar la tendencia de ambas características. Los espesores utilizados fueron 40, 80, 120, 160 y 200 nm. También se depositaron 20 nm pero debido al espesor tan pequeño de Oro y a la gran esbeltez de las pistas no se consiguió que circulara la intensidad eléctrica.

Las condiciones en las fue depositado oro en el Sputter Coater para los distintos espesores se muestra en la Tabla 1 del "Anexo 2. Tablas de caracterización de oro".

Para aprovechar el espacio disponible de SU-8, tras terminar cada deposición para cada espesor, se desplazaba la máscara para seguir depositando en los huecos entre las pistas depositadas anteriormente.



Figura 4.16. PCB tras depositar Oro (a) y tras finalizar de depositar todos los espesores (b)

Una vez obtenidos todos los espesores se pasó a caracterizarlos. Para obtener la resistividad en función del espesor de película delgada depositada se utilizó la expresión de la resistencia en función de la resistividad:

$$R = \rho \frac{L}{W \cdot e} \tag{6}$$

Donde ρ es el valor que buscamos de resistividad, L es la longitud de la pista, W es el ancho de pista y 'e' es el espesor depositado. Tras medir la resistencia de cada pista se dispondrán de todos los parámetros de la ecuación necesarios para poder obtener el valor de la resistividad. Como para cada espesor se tienen cuatro pistas distintas de distinta longitud, se calculará la resistividad de cada una de ellas y se utilizará su valor medio. Los valores, tanto de resistencia como resistividad obtenidos para cada espesor se muestran en las Tablas 2 y 3 del "Anexo 2. Tablas de caracterización de oro", respectivamente.

A continuación se muestran en la Tabla 4.2 los resultados finales de calcular la resistividad para cada espesor de oro depositado

Espesor de pista (nm)	Resistividad media ($\mu m \cdot \Omega$)
40	0,2377441
80	0,2260006
120	0,2061793
160	0,1934455
200	0,1823754

Tabla 4.2. Valores de resistividad del Oro para distintos espesores

Analizando los datos se observa la tendencia decreciente que tiene la resistividad con el espesor depositada. Esta respuesta es característica de la película delgada y puede apreciarse en la Figura 4.16. Como dato comparativo la resistencia en volumen del Oro es 0,0224 μ m· Ω , aproximadamente un orden de magnitud menor de los valores que se consiguen mediante deposición de películas delgadas obtenidos en el ensayo.



Figura 4.17. Resistividad del oro frente al espesor de película depositada.

Tras caracterizar la resistividad del oro con el espesor depositado, se pasará a comprobar cuánto es la variación de éste con respecto a la temperatura. Para ello se colocará la placa en el Hot-Plate y se irá aumentando la temperatura del mismo, utilizando un multímetro conectado a los pads de la pista para medir su resistencia y un medidor láser de temperatura para comprobar la temperatura de la misma. Este ciclo se realizará varias veces sobre la misma pista para obtener distintos valores del coeficiente de temperatura α y calcular su valor medio.

Para el cálculo del coeficiente de temperatura α se utilizará la siguiente expresión, de la cual son conocidos todos los datos excepto el coeficiente α .

$$R(T) = R(T_0) (1 + \alpha (T - T_0))$$
(7)

Los valores obtenidos para el cálculo del coeficiente de temperatura α en función del espesor depositado se muestran en la Tabla 4 del "Anexo 2. Tablas de caracterización de oro". En dicha tabla se muestra el valor de temperatura y resistencia a dicha temperatura para cada espesor, calculándose el coeficiente de temperatura α para cada incremento de temperatura con respecto al valor R_o, obteniendo finalmente la media de los coeficientes anteriores.

En la Tabla 4.3 se muestran los valores medios de los coeficientes de temperatura para cada espesor.

Espesor depositado (nm)	Coeficiente de temperatura α (°C ⁻¹)
40	0,000844
80	0,000991
120	0,001140
160	0,001118
200	0,001167

Tabla 4.3. Valores medios de los coeficientes de temperatura a para cada espesor de Oro

Para apreciar mejor la tendencia que sigue el coeficiente de temperatura con el espesor se muestran los valores anteriores representados gráficamente en la Figura 4.18.



Figura 4.18. Variación del coeficiente de temperatura a con para distintos espesores de Oro

Analizando los datos anteriores se observa un claro incremento del coeficiente de temperatura α con el espesor de oro depositado. Esta tendencia es característica de las deposiciones de película delgada, aumentando el coeficiente de temperatura con el espesor hasta alcanzar los valores de volumen. También se observa un incremento bastante importante del coeficiente para los espesores de 40 y 80 nm, estabilizándose alrededor de 0,0011 °C⁻¹ para los espesores de 120, 160 y 200 nm.

Una vez caracterizada la resistividad y su variación con la temperatura para distintos espesores, se pasará a discutir qué espesor se ajusta mejor a nuestros requisitos. En principio se busca seleccionar un espesor que tenga una gran resistividad, para obtener así una resistencia nominal elevada, y un coeficiente de temperatura α lo más grande posible, para que el sensor sea muy sensible y las variaciones de esta resistencia sean apreciables. Para apreciar mejor la relación de resistividad y coeficiente de temperatura frente al espesor de oro, se han representado ambas características en la misma gráfica, como podemos observar en la Figura 4.19.

Observando esta figura se observa que se descartan los espesores de 160 y 200 nm debido a la baja resistividad que ofrecen, aunque su coeficiente α sea aceptable. Así mismo, el espesor de 40 nm se descarta también porque, aunque posea una elevada resistividad, su variación con la temperatura es pequeña. Así que sólo queda elegir entre 80 nm y 120 nm. El espesor de 80nm parece una buena opción ya que su resistividad es bastante alta y su coeficiente α se encuentra en un rango aceptable, sin embargo se seleccionará para fabricar los sensores de temperatura un espesor de 120 nm debido a que comprende un mayor coeficiente α . Para resolver el efecto de tener una resistividad menor que la de 80 nm se fabricará el sensor de temperatura en estructura de serpentín, por lo que se podrán fabricar las pistas más largas en un mínimo espacio.



Figura 4.19. Variación de resistividad y coeficiente de temperatura a para distintos espesores de oro

Así, tras esta discusión, se seleccionará un espesor de oro de 120 nm para fabricar los sensores de temperatura.

4.4 Distribución y dimensiones del prototipo

Como se estudió anteriormente, las distancias entre los sensores de temperatura y el calentador son muy importantes de cara al comportamiento del sensor de flujo. Por ello, la estrategia que se utilizará a la hora de fabricar el dispositivo será colocar distintos sensores aguas-arriba y aguasdebajo de modo que en un mismo sensor de flujo se puedan analizar distintas distancias de los sensores de temperatura sin tener que fabricar uno nuevo.

Se fabricarán tres sensores aguas-arriba y dos sensores aguas abajo. Los sensores aguas arriba influían en el fondo de escala que tendrá nuestro dispositivo y era conveniente no situarlo muy cerca del calentador. Por ello, éstos estarán separados 2 milímetros entre ellos y del calentador. Los sensores aguas arriba influían en la sensibilidad que tendrá nuestro sensor y es importante situarlos cerca del calentador. Se fabricarán dos sensores de temperatura aguas-abajo separados entre sí y del calentador una distancia de 0,5 milímetros.

Cabe destacar que en artículos analizados anteriormente donde se informaba de los resultados obtenidos por distintos investigadores que fabricaron sensores de flujo basándose en el principio calorimétrico las distancias entre los sensores de temperatura y el calentador eran bastante menores que las que se emplearan en el presente proyecto. No se podrán alcanzar esos niveles debido a las limitaciones en las herramientas que se disponen en el laboratorio a la hora de fabricar máscaras y depositar materiales.

Una vez decidida la distribución que se realizará de los sensores de temperatura se debe diseñar su geometría. El objetivo principal es conseguir que sean bastante resistivos y que varíen con la temperatura, es decir, que posean un elevado coeficiente de temperatura α . Esto último se consigue analizando la dependencia del coeficiente de temperatura con el espesor de oro depositado, donde se decidió anteriormente depositar un espesor de 120 nm que correspondía a un coeficiente α =0,00114 °C⁻¹. Para obtener una elevada resistencia se optó por diseñar un serpentín de modo que se obtenga una pista de oro larga en un mínimo de área. Este serpentín ocupará un área de 15 mm² y tendrá una longitud de 15 mm, siendo sus dimensiones las mostradas en la Figura 4.20.



Figura 4.20. Dimensiones del serpentín del sensor de temperatura

Los sensores de temperatura tendrán un espesor de oro de 120 nm, lo cual corresponde con una resistividad de $0,2061793 \ \mu m \cdot \Omega$ y un coefficiente de temperatura de $0,00114 \ {}^{\circ}C^{-1}$. Con las dimensiones del serpentín y la resistividad teórica se puede estimar el orden de magnitud que deberían tener las RTD que se depositen.

$$R_{Sensor} = \rho \frac{L}{e \cdot w} = 0,2061793 \ \mu m \cdot \Omega \ \frac{15000 \ \mu m}{0,12 \mu m \cdot 250 \mu m} = 103,089 \ \Omega$$

De este modo, una vez depositados los sensores de temperatura, su resistividad será del orden de 100 Ω y su variación de resistencia en el rango entre 25 y 80 °C será del orden de 6 Ω .

A continuación se muestra la distribución de los sensores de temperatura dentro del canal del sensor de flujo. Pueden observarse tres sensores a la izquierda separados 2 mm entre sí, éstos serán los sensores de temperatura aguas-arriba. Junto a ellos hay un serpentín que se ha situado para realizar la prueba de intentar fabricar el calentador de oro mediante deposición. En principio al ser una pista bastante resistiva disipará bastante más calor con menos energía que en el caso de un serpentín de otro metal menos resistivo, como por ejemplo cobre. Junto a este calentador, pueden observarse los dos sensores de temperatura aguas-abajo situados a una distancia de 0,5 mm. Esta distribución puede apreciarse mejor en la imagen 4.21.



Figura 4.21. Distribución de los sensores de temperatura en el canal

Para poder depositar oro y obtener las geometrías deseadas para el sensor de temperatura se utilizará un proceso análogo al empleado anteriormente para caracterizar la resistividad y el coeficiente de temperatura del oro. Se fabricará mediante láser una máscara en acetato donde se grabará la distribución que deseamos de los sensores y posteriormente se pegará al PCB con cinta adhesiva asegurando que la máscara quede unida al sustrato y no se levante. Así cuando se introduzca el PCB en el Sputtering, los átomos de oro se introducirán por el hueco de la máscara y grabarán en el sustrato la forma deseada.

Debido a que es complejo conocer el ancho de pista con el que el láser graba el acetato, una vez fabricadas las máscaras se calculó el ancho de pista mediante comparación con un patrón conocido. Para ello se colocó sobre las pistas unos conductos de acero de 360 μ m de diámetro para que mediante comparación se pudiera conocer el ancho de pista real de la máscara. Tras comparar se estimó el ancho de pista en, aproximadamente, 250 μ m. En la Figura 4.22 se muestran las imágenes de los serpentines.



Figura 4.22. Máscara de acetato para los sensores de temperatura (a) y zoom utilizando el microscopio (b, c y d)

4.5 Diseño y caracterización del calentador

Una parte muy importante del sensor de flujo es el calentador, ya que su funcionamiento dependerá en gran medida del calor que sea capaz de generar. Para fabricar el calentador se analizaron dos alternativas.

1) Calentador de Oro

La primera opción fue utilizar el serpentín destinado al calentador que tenía la máscara para los sensores de temperatura. Así, se depositarían a la vez tanto los sensores de temperatura como el calentador. A priori esta solución es muy viable ya que al ser bastante resistiva la pista de oro (aprox. 100 Ω), se conseguiría disipar bastante calor por efecto Joule con un consumo de energía no muy alto. Sin embargo nos encontramos con un problema a la hora de alimentar con energía eléctrica al sensor.

La estrategia que se siguió fue diseñar pistas de cobre para que hubiera continuidad eléctrica con el oro y así poder soldar cables para la realización las medidas. Para grabar estas pistas de cobre se utilizó el proceso clásico de fabricación de PCB, con su etapa de insolado, de revelado y de grabado. Estas etapas se describen con más detalle en el "Capítulo 5. Proceso de fabricación.", en el apartado 5."Sensor de flujo". Una vez que se obtuvieron las pistas de cobre, se depositó encima de éstos una fina capa de SU-8 de aproximadamente 40 µm para obtener un sustrato más plano, minimizando la rugosidad superficial del PCB. Por último se depositó oro sobre este sustrato de SU-8 para poder medir y hacer distintos ensayos con los sensores y el calentador. El problema mencionado antes radica en el hecho de unir el oro con la pista de cobre. Como se ha citado anteriormente, una de las grandes ventajas de fabricar PCB-MEMS es la eliminación de la etapa de Wire Bonding con la que se unían los microsistemas a las pistas de cobre mediante hilos de oro para poder alimentarlos con energía eléctrica. En nuestro caso, esta conexión se realizará mediante la propia deposición del oro. Es decir, los pads de los sensores de temperatura y el calentador estarán entre la pista de cobre y el SU-8 que cubre el canal, de modo que cuando se deposita oro, estos átomos se depositen entre el SU-8 y el cobre y así, para nuestro espesor de 120 nm, se obtenga continuidad eléctrica entre ambos metales. Un esquema de esta idea es la que se muestra en la Figura 4.22.

Tras depositar oro sobre el SU-8 y el cobre y comprobar que había conductividad entre ambos metales, se procedió a ir alimentando el calentador de oro y comprobar su temperatura mediante el termómetro láser. Para ello se conectó el calentador a una fuente de tensión donde aparece la corriente que está suministrando el aparato. Se procedió a ir aumentando la tensión, comprobando como también aumentaba la corriente que circulaba por el calentador y se midió al temperatura del calentador mediante el termométro láser.



Figura 4.23. Unión del oro con las pistas de cobre

El calentador estaba inicialmente a la temperatura de 27 °C y se comprobó como, aproxidamente, a los 200 mA su temperatura subió un grado centígrado. Se prosiguió a ir aumentando la tensión pero a los 300 mA la fuente marcó de repente que circulaban 0 mA. Esto fue debido a que la fina película delgada de oro de los sensores se rompió debido a la sobrecorriente, por lo que ya no había continuidad en la pista de oro. Por ello se descarta utilizar el calentador de oro y se procedió a analizar la otra alternativa.

2) Calentador de cobre

Se estudió fabricar el calentador de cobre porque es una alternativa muy ampliamente utilizada debido a que el espesor del cobre en los PCB es de 35 μ m y permite circular bastante corriente. Además, el gran dominio que se tiene en las técnicas de fabricación de PCBs hace posible realizar serpentines muy largos en áreas muy reducidas.

Por ello se diseñó una máscara en acetato mediante Photoplotter y el software L-Edit con un serpentín de 100 μ m de ancho de pista, con una separación entre pistas de 200 μ m y una longitud aproximada de 3,5 cm de largo.

El proceso de fabricación de la máscara mediante el Photoplotter se detalla en el "Capítulo 5. Proceso de fabricación" en el apartado 2. "Fabricación de máscaras". Tras este proceso de fabricación se obtuvo el serpentín y las pistas de cobre donde se conectaron los sensores de temperatura. En la figura 4.24 se muestra la máscara fabricada y la placa una vez revelada.



Figura 4.24. Serpentines de cobre de 100 µm de ancho de pista y 3,5 cm de largo

Tras fabricar el calentador y soldarle cables en los pads para poder alimentarlo se procedió a caracterizar la curva de corriente eléctrica frente a temperatura. Para ello se utilizó la misma técnica que en el caso del calentador de oro y fue alimentarlo mediante una fuente de tensión donde se mostraba en un display la corriente eléctrica que estaba suministrando. Esta fuente de tensión también disponía de un limitador de corriente que fue muy útil en nuestro caso para evitar un pico de corriente que pudiese provocar que el serpentín se quemase. Se empezó a alimentar desde 0 mA y mediante el termómetro laser se fue comprobando la temperatura a la que se encontraba el calentador en función de la corriente eléctrica que circulaba a través de él. Los datos de temperatura frente a corriente se recogen en la Tabla 1 del "Anexo 3. Tablas de caracterización del calentador", sin embargo, estos valores se representan en la Figura 4.24.

A partir de 0,7 A se observa una respuesta bastante lineal de la temperatura del calentador de cobre en función de la corriente eléctrica a la que es alimentado. Esta respuesta es creciente hasta un valor límite de corriente de 1,8 A donde el calentador se quema. Por ello, el calentador será alimentado con una corriente eléctrica inferior a este valor para evitar su deterioro.



Figura 4.25. Temperatura del calentador de cobre en función de la corriente suministrada

Como se puede comprobar en la Figura 4.24, utilizando un calentador de cobre se pueden conseguir temperaturas bastante elevadas en una zona muy puntual del sensor. Gracias a su sencilla fabricación y a su buena respuesta se utilizará en el sensor de flujo este serpentín de cobre.

Cuando se instale en el canal del sensor de flujo, se limitará la corriente suministrada a un valor aproximado de 1,5 A, para movernos de este modo en una zona segura donde no se exponga el serpentín a su corriente límite y a su vez obtengamos una temperatura máxima aproximada de 74 °C, valor a priori suficiente para poder caracterizar el caudal de flujo.

4.6 Resumen del diseño del sensor de flujo

Se muestra a continuación un breve resumen del diseño desarrollado anteriormente.

Se fabricará un sensor de flujo basándose en el principio calorimétrico debido a que ha sido demostrado que es la mejor configuración para medir pequeños caudales con bastante precisión.

Para ello se utilizará la tecnología PCB-MEMS porque permite fabricar prototipos de bajo coste, se fabrica mediante procesos sencillos y permite integrar en una misma placa tanto la microfluídica como la electrónica de tratamiento de señal.

Se fabricarán sensores de temperatura de oro, donde se utilizará una máscara de acetato con la geometría diseñada. Estos sensores serán serpentines, con un espesor de 120 nm y una longitud de 15 mm en un área de 15 mm². Según el análisis de la resistividad y el coeficiente de temperatura α desarrollado para este espesor, se obtendrá una resistividad próxima a 100 Ω con una variación de 6 Ω en un rango de 25-80°C.

Se optará por fabricar el canal y su base mediante la resina epoxi SU-8 debido a sus propiedades térmicas (baja conductividad térmica k=0,3 W/(m·K)) y mecánicas (buena rigidez). Este canal tendrá una profundidad de 300 µm y un ancho de 4 mm, siendo su sección transversal 1,2 mm².

Para cubrir el canal se utilizará un acetato ya que ofrece una gran resistencia y evitará que se pueda romper la tapadera al aumentar la presión en el canal debido al paso de los distintos fluidos. Esta tapadera será unida al marco del canal mediante un pegamento de dos componentes, asegurando la estanqueidad del sensor de flujo.

El calentador se fabricará en cobre debido a la dificultad que presenta hacerlo en oro. Su geometría será un serpentín de 35 mm de longitud con espacio entre pistas de 200 μ m, pudiendo suministrar una temperatura máxima de 95 °C.

4.7 Tratamiento de señal y adquisición de datos

Tras diseñar las geometrías de los sensores de temperatura y sus distancias con respecto al calentador se está en disposición de fabricar el sensor de flujo y comenzar a hacer pruebas para caracterizar su comportamiento.

Como ha sido detallado anteriormente, los sensores de temperatura se basan en RTD fabricadas en oro donde la resistencia del sensor de temperatura varía en función de la temperatura a la que se encuentre éste. Como las resistencias de estos sensores serán aproximadamente de 100 Ω y su variación en un rango de 50 °C será de 6 Ω es muy importante realizar un buen tratamiento de señal para poder medir pequeñas variaciones de esta resistencia.

En un principio se estudió la posibilidad de realizar una medida de la resistencia mediante la técnica de 4 hilos. Sin embargo, ante la dificultad de obtener una fuente de corriente que fuese muy estable se optó por buscar otras alternativas.

La opción clásica y más extendida para medir pequeñas variaciones de resistencia es utilizar los denominados Puentes de Wheastone. Esta técnica ofrece una tensión de salida que varía en función de las variaciones que sufren las resistencias que componen el puente. Como el puente lo componen cuatro resistencias, se suelen dejar 3 fijas y la cuarta es el sensor de temperatura. De este modo, si se configura bien este puente se pueden llegar a medir bastante bien las pequeñas variaciones de resistencia del sensor de temperatura. Debido a que nuestro sensor tendrá pequeñas variaciones se utilizará una topología de Puente de Wheastone que emplea amplificadores operacionales para linealizar y amplificar estas variaciones.

Una vez configurado el puente y diseñado el circuito de adaptación de señal se analizarán los datos obtenidos mediante el software LabView de National Instruments. Para ello se utilizará una tarjeta de adquisición de datos y mediante un programa diseñado exclusivamente para el sensor de flujo, se examinarán los datos de salida del puente de Wheatstone. Además, para poder posteriormente analizar los datos y volver a representarlos, en el programa fue incluido todo lo necesario para poder generar hojas de cálculo. Así, cada vez que se ejecutaba el programa y se ponía en funcionamiento el sensor, todos los datos de salida quedaban almacenados para su posterior estudio.

4.7.1 Circuito de tratamiento de señal

Debido a que nuestro sensor de temperatura tendrá un valor resistivo de $100 \pm 6 \Omega$ en función de la temperatura a la que se encuentre, es de vital importancia el diseño la electrónica necesaria para poder medir bien estos pequeños cambios.

Para ello se utilizará la topología de puente de Wheastone que es muy utilizada para medir resistencias y variaciones de ésta. Esta topología se usa mucho también para el tratamiento de señal de sensores resistivos como las RTD. La topología clásica del puente se muestra en la Figura 4.26.



Figura 4.26. Puente de Wheastone

Donde V_{cc} es la tensión de alimentación del puente, R_1 y R_2 son resistencias de polarización, R4 es una resistencia de calibración, R_3 es el sensor resistivo y V_d es la tensión diferencial de salida.

El puente de Wheastone fue diseñado originalmente para medir el valor de las resistencias. Para ello, se colocaba la resistencia cuyo valor se quería conocer y se variaba la resistencia de calibración R_4 hasta que la corriente por la salida V_d fuera nula. En ese momento, se comprobaba el valor de R_4 y se aplicaba la ecuación de equilibrio (7) del puente para obtener el valor de R_3 .

$$\frac{R1}{R4} = \frac{R2}{R3} \tag{8}$$

Sin embargo, utilizando esta misma topología se puede caracterizar el comportamiento de sensores resistivos. Para ello fijan los valores de R_1 , R_2 y R_4 y el valor de R_3 lo definire el sensor. Así, variaciones en el valor de resistencia de R_3 provocarán variaciones en la tensión diferencial de salida. Es importante ajustar bien los valores del puente para maximizar la sensibilidad del sensor. La tensión diferencial de salida viene dada por:

$$Vd = Vcc\left(\frac{R3}{R3+R2} - \frac{R4}{R4+R1}\right) \tag{9}$$

Se observa que la tensión diferencial de salida es una respuesta no lineal. Tras diversos estudios realizados de este circuito, se ha concluido que el puente de Wheastone es más sensible cuando está en equilibrio. En la Figura 4.26 podemos observarlo, donde K está definido como, siendo nuestro sensor de temperatura $R_0=R_{3,2}$:

$$k = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_0}$$
(10)



Figura 4.27. Sensibilidad del puente de Wheastone en función de K

Se observa que para k=1, es decir, cuando el puente se encuentra en equilibrio, se incrementa mucho la sensibilidad de éste. Por ello, cuando se diseñe el puente se deberán seleccionar resistencias cuyo valor se encuentre cerca del valor nominal de la resistencia del sensor de temperatura.

Debido a que la variación de resistencia del sensor es muy pequeña y la tensión de alimentación V_{cc} a la que se alimentará el puente de Wheastone no será muy alta para evitar corrientes elevadas por el sensor que provoquen autocalentamiento, se estudiará una topología activa del puente de Wheastone.

Existen muchas adaptaciones del puente de Wheastone utilizando amplificadores operacionales. Se seleccionó aquella que se adaptaba bien a los requisitos que se le exigían al sensor de temperatura y que no excedía demasiado en el número de componentes.

Mediante esta adaptación del circuito original de Wheastone se conseguirá obtener una tensión de salida que sea lineal y que esté amplificada. El circuito utilizado es el mostrado en la Figura 4.27.



Figura 4.28. Circuito de adaptación activo

El circuito activo utilizado para caracterizar el sensor de temperatura está formado por las 3 resistencias de polarización del puente R, dos amplificadores operacionales y la resistencia de realimentación Rg. El funcionamiento del circuito es muy simple ya que su comportamiento es análogo al del circuito original. Las tres resistencias de polarización son resistencias fijas cuyos valores se estiman para maximizar la sensibilidad del puente. Rs es el sensor de temperatura y en función de la temperatura a la que se encuentre tendrá un valor de resistencia. Estas variaciones provocarán una variación en la tensión de salida del punto 3 de la Figura 4.28. El primer amplificador operacional tiene como resistencia de realimentación el sensor de temperatura y su función es linealizar la variación de ésta. Como se observó anteriormente, la tensión de salida del puente de Wheastone es función no lineal del valor de la resistencia del sensor. Así, introduciendo este amplificador operacional se consigue que este valor se linealice. Esto puede ser observado en las Figura 4.29 y 4.30, donde se ha simulado mediante Pspice el circuito de la Figura 4.28 con este amplificador operacional y sin él, manteniendo el resto de parámetros constantes. Lo que se observa es la tensión de salida que se obtiene en función del valor de Rs.



Figura 4.29. Circuito de adaptación sin el amplificador operacional de linealización



Figura 4.30. Circuito de adaptación con el amplificador operacional de linealización

Se observa la gran linealidad que se obtiene en la tensión de salida al incluir este amplificador operacional.

La función del segundo amplificador operacional es amplificar la tensión de salida que genera el puente. Para ello se utiliza una topología inversora donde la ganancia depende del valor de Rg. Para los primeros análisis se utilizó un potenciómetro para Rg para poder ir ajustando la tensión de salida hasta unos niveles aceptables pero en el prototipo final se instaló una resistencia de precisión con el valor estimado de 3,3 k Ω para evitar desajustes en la caracterización de los sensores debido al potenciómetro. La dependencia de la tensión de salida del circuito con respecto a Rg y Rs puede ser observada en la Figura 4.31.



Figura 4.31. Tensión de salida en función de Rg y Rs

Del análisis del circuito de la Figura 4.28, supuestos los amplificadores operacionales ideales, se puede obtener su función de transferencia:

$$G(Rs) = -\frac{Rg}{R} \left(1 - \frac{Rs}{R} \right) \tag{11}$$

La ganancia de tensión del circuito es negativa debido a la etapa de amplificación inversora que introduce el segundo amplificador operacional.

Tras analizar y comprender el funcionamiento del circuito de adaptación de señal, se pasó a simular su comportamiento. Como se comentó en la etapa de diseño, la resistencia nominal del sensor de temperatura de oro que se fabricará será de 100 Ω aproximadamente. Conociendo este valor se pueden estimar los valores de las resistencias de polarización y de realimentación. Debido a que los amplificadores operacionales se alimentarán a ±20V, la máxima tensión de salida que podrán suministrar será 3V menos, es decir, la tensión de salida de saturación del sensor estará cerca de 17V. Como nuestro circuito es inversor, la máxima tensión de salida será -17V. Con esta restricción se simularon distintos valores de resistencias y se seleccionaron los que provocaron mayores variaciones en la tensión de salida.

Para una resistencia nominal del sensor de 100 Ω , se estimaron las resistencias del puente en 330 Ω y la resistencia de realimentación en 3,3 K Ω , con una tensión de alimentación V_{cc}=2V. Como la variación de la resistencia será aproximadamente 6 Ω , se realizó un análisis en continua donde se representó la tensión de salida en función de la variable Rs la cual variaba desde 100 hasta 106 Ω , siendo los resultados los mostrados en la Figura 4.32.



Figura 4.32. Simulación de la tensión de salida para un sensor con $Ro=100\Omega$

Puede observarse como el circuito de adaptación de señal proporciona una tensión de salida muy lineal con respecto a la variación de resistencia del sensor. Además, esta señal está bastante amplificada, siendo la diferencia de tensión de 360 mV para un rango de resistencia de [100,106] Ω .

Esta diferencia de tensión es bastante elevada, ya que cuando se adquieran los datos mediante la tarjeta de adquisición de National Instrument, se tendrá una resolución bastante alta, pudiéndose medir con mucha fiabilidad variaciones de tensión de hasta 1 mV.

Analizando la expresión teórica suponiendo los amplificadores operacionales ideales se obtiene:

$$Vo(Rs) = Vcc\left(-\frac{Rg}{R}\left(1 - \frac{Rs}{R}\right)\right) = 2\left(-\frac{3300}{330}\left(1 - \frac{100}{330}\right)\right) = -13,939V$$

Como cabía esperar, el valor teórico obtenido suponiendo los amplificadores operacionales ideales se asemeja bastante a los adquiridos simulando el circuito.

Tras diseñar el circuito y definir todos los parámetros se fabricó un circuito de prueba con el que comprobar el comportamiento real de los sensores de temperatura.

Para ello, primero se seleccionaron los circuitos integrados de los amplificadores operacionales. Como se analizarán dos sensores de temperatura a la vez serán necesarios dos puentes activos de Wheastone, por lo que se utilizarán cuatro amplificadores operacionales. Debido a que un enfoque importante del proyecto es minimizar el tamaño del sensor, se decidió utilizar un solo circuito integrado que estuviera compuesto por cuatro amplificadores operacionales independientes. Tras analizar las distintas alternativas que ofrecía el mercado se optó por instalar el circuito integrado LM324N de ST con encapsulado DIP14, que se compone de cuatro amplificadores operacionales independientes de baja potencia.

Para fabricar el circuito de prueba se soldaron los componentes a una placa de prueba. También se incluyeron 4 conectores de tornillo, dos para conectar los sensores de temperatura y dos para las resistencias de realimentación.



Figura 4.33. Circuito de prueba de la etapa de adaptación de señal

4.7.2 Programa para adquisición de datos

Tras definir el circuito de adaptación de señal que se utilizará para medir las variaciones de resistencia del sensor se pasará a describir el sistema de adquisición de datos empleado.

Se utilizará una tarjeta de adquisición de datos USB 6009 de National Instruments cuyas principales propiedades se numeran a continuación:

- DAQ Multifunción de bajo coste, 14-Bit, 48 kS /s
- 8 Entradas analógicas (14-Bit, 48 kS/s)
- 2 Salidas analógicas (12-Bit, 150 S/s)
- 12 Puertos digitales de entrada y salida
- Contador de 32 Bits
- Compatible con LabView, LabWindows/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET



Figura 4.34. DAQ NI USB 6009

De todos los puertos de los que se compone el módulo USB 6009 se utilizarán las entradas analógicas para medir la tensión de salida que suministra el puente activo de Wheastone. Estos puertos pueden medir hasta un máximo de $\pm 10V$ por cada pin, sin embargo, se dispone de un modo de entrada diferencial donde si en vez de conectar las señales respecto a GND, se conecta la tensión del puente entre dos pines de entrada del módulo, se duplica su capacidad para medir tensión, siendo entonces de $\pm 20V$.

Tras instalar todo el software que traía el módulo de adquisición de datos, se pasó a crear el programa con el que se tomarán los datos del sensor de flujo.

El programa que se creará tomará los datos de tensión a través del módulo USB 6009 y procesará esos datos para mostrarlos por pantalla. El módulo que se utilizará para realizar estas



mediciones será un módulo integrado que trae LabView denominado *DAQ Assistant*.

Dicho módulo será configurado para realizar mediciones de tensión en modo diferencial con un rango de señal de entrada \pm 20V. La frecuencia de muestreo establecida fue 2 kHz.

Figura 4.35. Módulo DAQ Assistant

Los datos de tensión tomados por este módulo serán tratados para mejorar la calidad de las señales adquiridas. Debido al modo de adquirir los datos de LabView y al ruido generado por los cables de conexión, si directamente se muestran por pantalla estos datos se aprecia un ruido bastante elevado, de aproximadamente 150 mV de amplitud. Hay que recordar que según los datos simulados anteriormente, la variación teórica de la tensión de salida que provocará el

sensor de temperatura será de unos 360 mV. Por ello es inviable tener un ruido de amplitud 150 mV ya que la fiabilidad de los datos será muy baja.

Para solventar este problema LabView cuenta con módulo denominado *Amplitude and Levlels* para medir valores DC y RMS de datos muestreados según una aproximación lineal o exponencial.



Además de medir valores RMS y DC se pueden medir valores de pico, tanto positivos como negativos, y valores pico a pico de una señal.

El modo de emplear este módulo será introducir por la entrada *input signal* los valores que entrega el módulo *DAQ Assistant* y representar gráficamente sus valores DC y RMS.

Figura 4.36. Módulo Amplitude and Levels

Para analizar mejor el efecto de introducir o no este módulo *Amplitude and Levels* se simuló el comportamiento del sensor de temperatura calculando el valor RMS de la salida del puente activo de Wheastone utilizando este bloque, y también sin utilizarlo. Para ello se hizo un ciclo térmico al sensor de temperatura aumentando su temperatura en el Hot-Plate desde temperatura ambiente (27 °C) hasta 70 °C, con incrementos de 10 °C. El tipo de aproximación utilizada fue Lineal.



Figura 4.37. Datos del puente de Wheastone sin tratamiento de señal en LabView



Figura 4.38 Datos del puente de Wheastone con tratamiento de señal en LabView

Analizando las Figuras 4.37 y 4.38 se puede observar la calidad con la que se obtienen los datos tomados del sensor de temperatura simplemente utilizando el módulo *Amplitude and Levels*.

Por ello fue integrado en los programas utilizados para caracterizar tanto los sensores de temperatura como el sensor de flujo.

Una vez explicado la función de los módulos más importantes utilizados, se muestra a continuación el programa creado para caracterizar los sensores de temperatura. Este programa no fue el definitivo para el sensor de flujo debido a que para éste es necesario medir dos sensores de temperatura a la vez y además, porque mediante las primeras medidas del sensor de temperatura se fue mejorando más la capacidad del programa.



Figura 4.39. Programa de LabView utilizado para el sensor de temperatura

El programa básicamente engloba los dos módulos descritos anteriormente. Todo se encuentra situado dentro de un bucle *While Loop* que se ejecuta continuamente hasta que no se pulsa el botón STOP. En el display *VOLTAGE* y en la gráfica *Voltage Singal* se muestran los valores medidos directamente de la tarjeta de adquisición de datos. Tras aproximar estos valores mediante el módulo *Amplitude and Levels* se muestran tanto númericamente como gráficamente los valores DC y RMS. Además, al valor DC se le añade su valor de tensión nominal (en el caso en el que se hizo la prueba fue -15V) para mostrar en la gráfica *V-Vo* las variaciones de tensión con respecto al valor nominal DC provocados por variaciones en la resistencia del sensor de temperatura. De este modo, cuando se simule el sensor de flujo, se podrán comparar las variaciones de tensión con respecto al valor nominal que se provocan en el sensor aguas-arriba y aguas-abajo.

Debido al tipo de programación que se usa en LabView, el código mostrado en la Figura 4.38 es el diagrama de bloques del programa, pero como puede apreciarse en él no se ven las gráficas con la tensión de salida del puente de Wheastone. Esto se observa en el panel frontal, donde sólo se muestran los indicadores, conmutadores y gráficas. En la Figura 4.40 se muestra el panel frontal tras un ciclo térmico realizado a un sensor de temperatura. En él se observan las cuatro gráficas descritas anteriormente y sus correspondiente displays con el valor actual de tensión que hay en cada uno.



Figura 4.40. Panel frontal del programa e LabView utilizado para el sensor de temperatura

Además del código mostrado en la Figura 4.39, el programa original cuenta con módulos para almacenar en una hoja de cálculo todos los datos mostrados en el panel frontal del programa. Estos bloques no se han añadido para no complicar la comprensión del programa y porque se mostrarán a continuación en el programa definitivo del sensor de flujo.

Una vez descrito el programa que se diseñó para caracterizar los sensores de temperatura, se muestra el utilizado para el prototipo del sensor de flujo.

Básicamente, la estructura utilizada es la misma que en la Figura 4.39 pero con la salvedad de que en el sensor de flujo se muestrearán dos sensores de temperatura a la vez, por lo que el código de tratamiento de señal deberá ser duplicado. Otra variación que incluye el programa del sensor de flujo es que para medir dos señales a la vez se utiliza el mismo módulo *DAQ Assistant*, suministrando a la salida un dato dinámico compuesto por los valores de tensión de los dos sensores de temperatura. Por ello, para manipular independientemente cada dato habrá que separarlos. Para ello se utilizan los bloques *Split Signals* y *Select Signals*.



Figura 4.41. Módulos Split Signals (izq) y Select Signals

Con estos dos bloques se conseguirá primero separar ambos datos de tensión mediante el *Split Signals* y seleccionar cada uno mediante el *Select Signals*. Tras separar cada señal de tensión se le realizará el tratamiento a cada una de ellas. Para ello primero se ajustarán sus valores utilizando el módulo *Amplitude and Levels*, y al valor DC de cada una se le sumará su valor nominal de tensión a temperatura ambiente. Hay que especificar que para cada sensor este valor nominal DC variará debido a que los valores nominales de resistencia de cada sensor difieren unos de otros. Por último, tras preparar cada señal por separado, se restarán para calcular la diferencia de tensión de los sensores aguas-abajo y aguas-arriba en función del flujo que circule por el sensor. El programa sin la parte de almacenamiento de datos en Hojas de Cálculo Excel se muestra a continuación en la Figura 4.42.



Figura 4.42. Diagrama de bloques del programa básico utilizado para el sensor de flujo

Como se ha comentado, además de los bloques principales para el tratamiento y adquisición de señales del puente, en el programa utilizado existen más elementos que son necesarios para generar una hoja de cálculo cada vez que se ejecute el programa. Este programa generará una hoja de cálculo con nombre de archivo la fecha y hora en la que se ejecutó. El programa muestrea la tensión dos veces por cada segundo, mostrándose cada uno en una fila de la hoja de cálculo. Los valores se almacenan en columnas independientes y son la tensión del sensor aguas-arriba, variación de tensión del sensor aguas-arriba, tensión del sensor aguas-abajo, variación de tensión del sensor aguas-abajo y la variación de tensión del flujo. Una vez que se para la ejecución del programa, se guarda automáticamente el archivo Excel con todos los datos generados.

La gran ventaja que ofrece almacenar estos datos de tensión es la posibilidad de volver a representarlos mediante cualquier programa de cálculo numérico y analizar los datos que se obtuvieron.

En el programa para generar la hoja de cálculo se distinguen dos partes bien diferenciadas, formado por dos estructuras secuenciales. La primera se ejecuta para generar el archivo con el nombre de la fecha y hora a la que se creó y luego en la segunda etapa es cuando se van almacenando los datos tomados con la tarjeta de adquisición de datos. Debido al gran tamaño de las dos etapas secuenciales y la dificultad de mostrarlas de un modo conjunto, se muestran separadas en las Figuras 4.43 y 4.44.



Figura 4.43. Primera etapa secuencial que se encarga de generar el archivo Excel



Figura 4.44. Segunda etapa secuencial donde se almacenan los datos muestreados

Tras describir el programa utilizado para analizar el comportamiento del sensor de flujo, se pasa a describir el panel frontal donde realmente se aprecia la respuesta del sensor. En este panel se pueden observar dos gráficas que se corresponden a la tensión de salida de los sensores de temperatura y a la diferencia entre estas dos señales. En la primera gráfica se muestran ambas tensiones a la vez, siendo la de color blanco la del sensor de temperatura aguas-abajo y la de color rojo es la del sensor aguas-arriba. En ambas gráficas los datos mostrados están manipulados mediante el bloque *Amplitude and Levels* para eliminar el ruido producido por la medida. Además de estas dos representaciones gráficas de las tensiones respecto al tiempo se

muestran distintos indicadores de tensión, tanto de los sensores de temperatura como del sensor de flujo. También se muestra un botón de paro para detener la ejecución del programa en el momento que se desee, así como la fecha en la que se inició la muestra de datos, la cual coincide con el nombre de la hoja de cálculo generada por el programa. En la Figura 4.45 se puede observar el panel frontal diseñado para el sensor de flujo.



Figura 4.45. Panel frontal generado para caracterizar el sensor de flujo

De este modo ya se tendría todo el hardware y el software listo para comenzar a hacer las pruebas del sensor de flujo. El programa está configurado para conectar los sensores de temperatura como medida diferencial, es decir, se instalará cada sensor en dos entradas analógicas. Concretamente, el sensor de temperatura aguas-abajo se conectará en los terminales 2 y 3 de las entradas analógicas, correspondientes a las entradas AIO y AI4, respectivamente. El sensor de temperatura aguas-arriba se conectará a las entradas analógicas AI1 y AI5, que son los conectores 5 y 6, respectivamente.