

3. Estado del arte

3.1 Introducción

En pocas décadas, los MEMS han pasado de ser un ejercicio académico a una parte integral muy interesante de muchos productos comunes. Pero como ocurre con todas las nuevas tecnologías se necesita un tiempo para que la tecnología madure y logre hacerse un hueco en el mercado.

Al principio esta tecnología se enfocaba desde un punto de vista multi-chip donde la estructura MEMS se encontraba en un solo chip y la electrónica de acondicionamiento de señal se encontraba en otro. Si bien este punto de vista del proceso era el más simple, tenía sus desventajas como la utilización de una gran área de silicio, módulos intermedios para interconectar diferentes bloques o que el rendimiento suele ser menor en diferentes módulos que en uno solo. Pero gracias a la integración se consiguió una solución económica de alto rendimiento y eficacia. Por ello, siguiendo esta tendencia hoy día se han desarrollado aplicaciones Lab-on-chip donde se integran todos los módulos de un sistema.

Muchos dispositivos MEMS son utilizados para la medida de temperatura en distintos puntos del proceso. Para ello existen distintos métodos y naturalezas para realizar esta medida. Como se comentó al comienzo del proyecto, uno de los objetivos es fabricar un sensor de temperatura que sea fiable y estable, por ello se presenta a continuación el estado del arte de esta tecnología.

Un caso similar ocurre con los sensores de flujo. En muchas aplicaciones Lab-on-chip o aplicaciones específicas MEMS que trabajan con dispositivos microfluidicos es necesario conocer el caudal que circula por los microcanales. Mediante tecnología MEMS se puede fabricar, en un área bastante reducida, un dispositivo que sea capaz de realizar esta función. A continuación también se describirá el estado del arte de estos sensores, ya que son el principal objetivo del presente proyecto, así como los distintos avances que se están llevando a cabo en investigación.

3.2 Sensores de temperatura

Probablemente sea la temperatura el parámetro físico más común que se mide en una aplicación electrónica, incluso en muchos casos en que el parámetro de interés no es la temperatura, ésta se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada.

Es fácil realizar medidas de la temperatura con un sistema de adquisición de datos, pero la realización de medidas de temperatura exactas y repetibles no es tan fácil.

La temperatura es un factor de medida engañoso debido a su simplicidad. A menudo pensamos en ella como un simple número, pero en realidad es una estructura estadística cuya exactitud y repetitividad pueden verse afectadas por la masa térmica, el tiempo de medida, el ruido eléctrico y los algoritmos de medida. [14]

Dicho de otra forma, la temperatura es difícil de medir con exactitud aún en circunstancias óptimas, y en las condiciones de prueba en entornos reales es aún más difícil. Entendiendo las ventajas y los inconvenientes de los diversos enfoques que existen para medir la temperatura, resultará más fácil evitar los problemas y obtener mejores resultados.

A continuación se compararán los cuatro tipos más comunes de sensores de temperatura que se usan en los sistemas de adquisición de datos: detectores de temperatura resistivos (RTD), termistores, termopares y sensores en circuitos integrados. La elección de los transductores de temperatura adecuados y su correcta utilización puede marcar la diferencia entre unos resultados equívocos y unas cifras fiables.

3.2.1 Tipos

Los sensores de temperatura se pueden clasificar principalmente en tres tipos dependiendo de la naturaleza de la medida. [15]

- Resistivos. Los constituyen las RTD (de sus siglas en inglés, Resistance Temperature Dectector) basadas en la dependencia de la resistividad de un conductor con la temperatura y caracterizado por un coeficiente de temperatura positivo PTC (Positive Termal Coefficient). También se incluyen las NTC (Negative Termal Coefficient) denominadas termistores y con un coeficiente de temperatura negativo.
- Termopares. Utilizan la tensión generada en la unión de dos metales en contacto debido a sus distintos comportamientos térmicos.
- Semiconductores. Se basan en la variación de la conducción de la unión p-n polarizada directamente.

Sensores de temperatura con elementos resistivos

Los *detectores de temperatura resistivos* (RTD, Resistance Temperature Detector) son sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Esto se debe a que al calentarse el metal se produce una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando de este modo su resistencia.

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado ‘coeficiente de temperatura de resistencia, α ’ que expresa la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado centígrado y con unidades $^{\circ}\text{C}^{-1}$.



Figura 3.1. Sensor de temperatura RTD de película delgada

Para modelar el comportamiento de una RTD se utiliza la ecuación de Callendar-Van Dunsen donde se refleja el comportamiento de la resistencia en función de la temperatura a la que se vea expuesta. Se hace una distinción en la ecuación en función de si la temperatura supera o no 0 °C.

Para el rango entre -200°C y 0°C la ecuación es:

$$R(t) = R(0)[1 + A(t) + B(t)^2 + (t - 100) \cdot C(t)^3]$$

Y entre 0°C y 661°C la ecuación es:

$$R(t) = R(0)[1 + A(t) + B(t)^2]$$

Donde los coeficientes A, B y C para los sensores estándar están reflejados en la norma DIN IEC 75.

Sin embargo, como una primera aproximación se suele utilizar la ecuación polinómica hasta su primer orden. Por lo general, la variación es bastante lineal en amplios márgenes de temperatura.

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

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

Los materiales empleados en la fabricación de sensores RTD suelen ser metales tales como oro, cobre, níquel o platino. Las propiedades de éstos se muestran en la siguiente tabla 3.1. [16]

Parámetro	Platino (Pt)	Níquel (Ni)	Oro (Au)	Cobre (Cu)
Resistividad ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	10.5	6,85	2,24	1,724
$\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$6,41 \cdot 10^{-3}$	$3,715 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$
Margen ($^{\circ}\text{C}$)	-200 / +850	-80 / +320	-200 / +250	-200 / +120

Tabla 3.1. Características de distintos metales para ser usados como RTD

De entre todos los materiales citados anteriormente, el platino es el que ofrece mejores propiedades tales como una alta resistividad, un margen de temperatura mayor y una amplia linealidad, aunque su coeficiente de temperatura no sea el más elevado. Además, es relativamente resistente al ataque químico, tiene buenas propiedades físicas a alta temperatura y unas buenas propiedades eléctricas. Por todo ello es el material más ampliamente utilizado en la industria para la fabricación de sensores de temperatura, siendo el más conocido el Pt100 (RTD de Platino con R=100 Ω a 0°C). En cuanto a sus inconvenientes, el platino encarece los RTD,

por lo que para la fabricación de sensores más económicos se utiliza Níquel o aleaciones del mismo, pero no son tan estables ni lineales como los que emplean Platino.

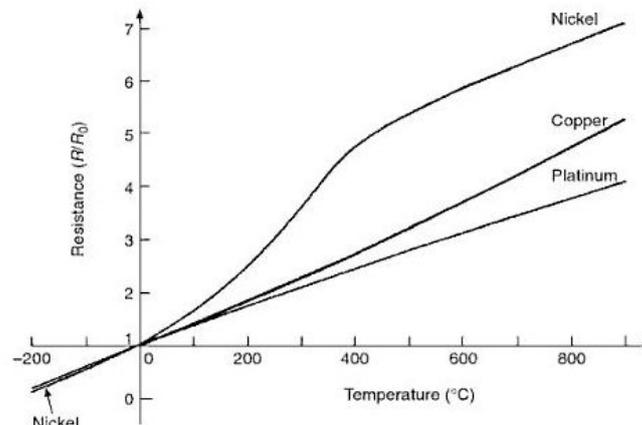


Figura 3 2. Variación de resistencia con la temperatura de distintos metales

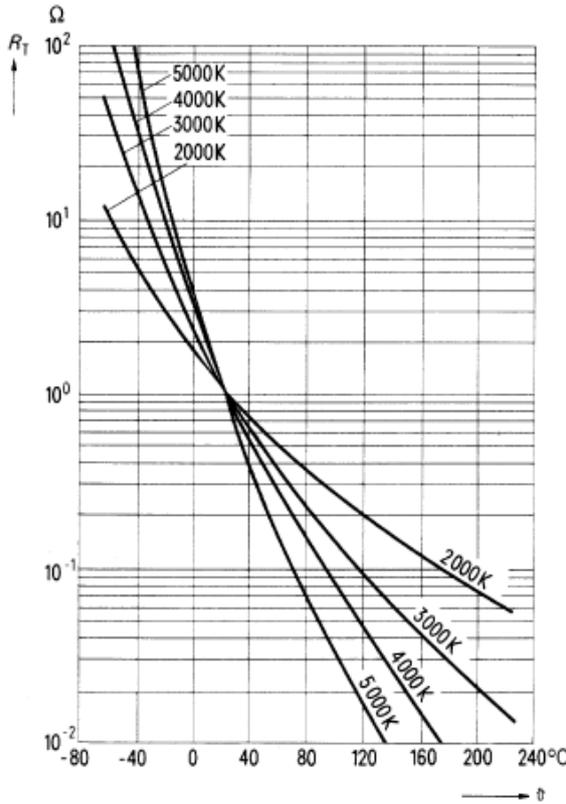
Los RTD ofrecen las siguientes ventajas frente a otros tipos de sensores de temperatura:

- Margen de temperatura bastante amplio
- Proporciona las medidas de temperatura con mayor exactitud y repetitividad.
- Los sensores RTD son los más estables con el tiempo, presentando derivas en la medida del orden de 0,1 °C/año.
- La relación entre temperatura y resistencia es muy lineal.
- Los sensores RTD tienen una sensibilidad mayor que los termopares. La tensión debida a cambios de temperatura puede ser diez veces mayor.
- La existencia de curvas de calibración estándar para los distintos tipos de sensores RTD (según el material conductor, R_0 y α), facilita la posibilidad de intercambiar sensores entre distintos fabricantes.
- A diferencia de los termopares, no son necesarios cables de interconexión especiales ni compensación de la unión de referencia.

Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes:

- Dado que el Platino y el resto de materiales conductores tienen una resistividad muy baja, para conseguir un valor significativo de resistencia será necesario devanar un hilo conductor bastante largo, por lo que, sumando el elevado coste de por sí de estos materiales, el coste de un RTD será mayor que el de un termopar o un termistor.
- El tamaño y la masa de un RTD será también mayor que el de un termopar o un termistor, limitando además su velocidad de reacción.
- Los sensores RTD se ven afectados por el autocalentamiento debido al efecto Joule, ya que para medir la resistencia hay que aplicar una corriente que producirá una cantidad de calor que distorsionará los resultados de medida.
- Los sensores RTD no son tan duraderos como los termopares ante vibraciones, golpes, etc.
- No tener en cuenta la resistencia de los hilos de interconexión puede suponer un grave error de medida. Al ser la resistencia de los RTD tan baja, la resistencia de los hilos conductores que lo conectan puede provocar errores importantes.

Otros sensores resistivos mucho más económicos que las RTD son los *termistores*, aunque no son lineales son mucho más sensibles y pueden tener un coeficiente de temperatura positivo o negativo, éstos últimos son los más usados y se denominan NTC.



Su funcionamiento se basa en la variación de la resistencia de un semiconductor con la temperatura, debido a la variación de la concentración de portadores. Para los termistores NTC, al aumentar la temperatura, aumenta también la concentración de portadores, por lo que la resistencia es menor, de ahí que el coeficiente sea negativo. Para los termistores PTC, en el caso de un semiconductor con un dopado muy intenso, éste adquiere propiedades metálicas, tomando un coeficiente positivo en un margen de temperatura limitado. Usualmente, los termistores se fabrican a partir de óxidos semiconductores, tales como el óxido férrico, el óxido de níquel, o el óxido de cobalto.

Figura 3.3. Curvas de un termistor

Sin embargo, a diferencia de los sensores RTD, la variación de la resistencia con la temperatura es no lineal. Para un termistor NTC, la característica es exponencial. Para pequeños incrementos de temperatura, se dan grandes incrementos de resistencia. El siguiente modelo caracteriza la relación entre la temperatura y la resistencia:

$$R_T = R_0 \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Donde R_T es la resistencia del termistor NTC a la temperatura T , R_0 es la resistencia del termistor NTC a la temperatura de referencia T_0 y β se conoce como la temperatura característica del material y es proporcionada por el fabricante de la misma.

Por analogía con los sensores RTD, podría definirse un coeficiente de temperatura equivalente α , que para el modelo resultaría:

$$\alpha = \frac{1}{T} \cdot \frac{dR_T}{dT} = -\frac{\beta}{T^2}$$

Puede observarse que a diferencia del caso RTD se obtiene un coeficiente que varía con la temperatura. El error de este modelo en el margen de 0 a 50 °C es del orden de $\pm 0.5^\circ\text{C}$, aunque para mayor precisión existen modelos más sofisticados que dan un error de aproximación menor.

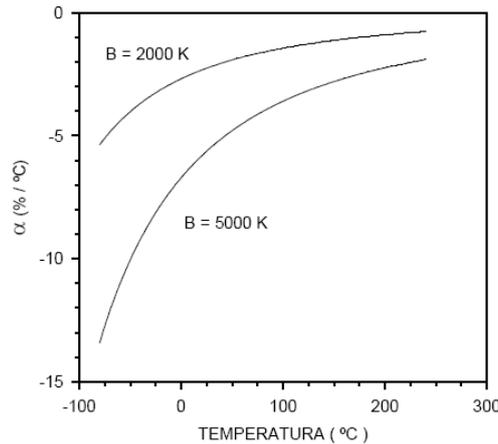


Figura 3.4. Variación del coeficiente de temperatura α con la temperatura para un termistor

Sensores de temperatura con termopares

Un termopar es un sensor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o de medida y el otro denominado "punto frío" o de referencia.

En instrumentación industrial, los termopares son ampliamente usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Además, no precisan alimentación de ningún tipo y su reducido precio los convierte en una opción muy atractiva para grandes sistemas de adquisición de datos. Su principal limitación es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a un grado Celsius son difíciles de obtener. [17]

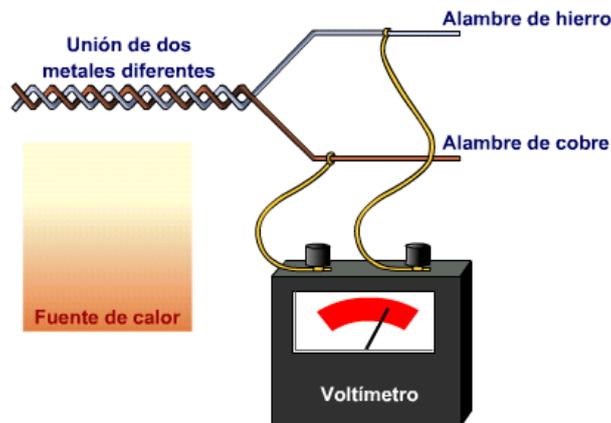


Figura 3.5. Diagrama de funcionamiento de un termopar

Los termopares son baratos y robustos, tienen una estabilidad bastante buena a lo largo del tiempo y debido a su pequeño tamaño, responden rápidamente a los cambios de temperatura. Además, funcionan sobre rangos de temperatura criogénos, con una linealidad y exactitud razonables.

Puesto que el termopar es básicamente un dispositivo de medida diferencial, se necesita una temperatura de referencia conocida para una de las uniones, así la temperatura de la otra unión es deducida del voltaje de salida. Los termopares están fabricados de materiales especialmente

seleccionados que se han caracterizado exhaustivamente en términos de voltaje con la temperatura de comparación, que normalmente es de 0°C.

Los termopares están disponibles en diferentes modalidades, como sondas. Estas últimas son ideales para diferentes aplicaciones de medición, por ejemplo, en la investigación médica, sensores de temperatura para los alimentos, en la industria y en otras ramas de la ciencia, etc.



A la hora de seleccionar una sonda de este tipo debe tenerse en consideración el tipo de conector. Los dos tipos son el modelo estándar, con pines redondos y el modelo miniatura, con pines chatos, siendo estos últimos (contradictoriamente al nombre de los primeros) los más populares.

Figura 3.6. Distintos tipos de conectores para termopares

Otro punto importante es la selección del tipo de termopar, su aislamiento y la construcción de la sonda. Todos estos factores tienen un efecto en el rango de temperatura a medir, precisión y fiabilidad en las lecturas. En la Tabla 3.2 se muestran los principales materiales de unión para termopares, así como sus principales características.

Material de la unión	Rango típico (°C)	Sensibilidad (µV/°C)	Designación
Cromo - Aluminio	-200 / +1372	41	K
Cromo - Constantán	0 / +982	68	E
Hierro - Constantán	-40 / +750	52	J
Cobre - Constantán	-200 / +260	43	T
Tungsteno - Renio	0 / +2300	16	C
Platino - Rodio	+38 / +1800	7.7	B
Platino - Rodio	0 / +1593	11.7	R
Platino - Rodio	0 / +1538	10.4	S

Tabla 3.2. Características de los distintos tipos de termopares

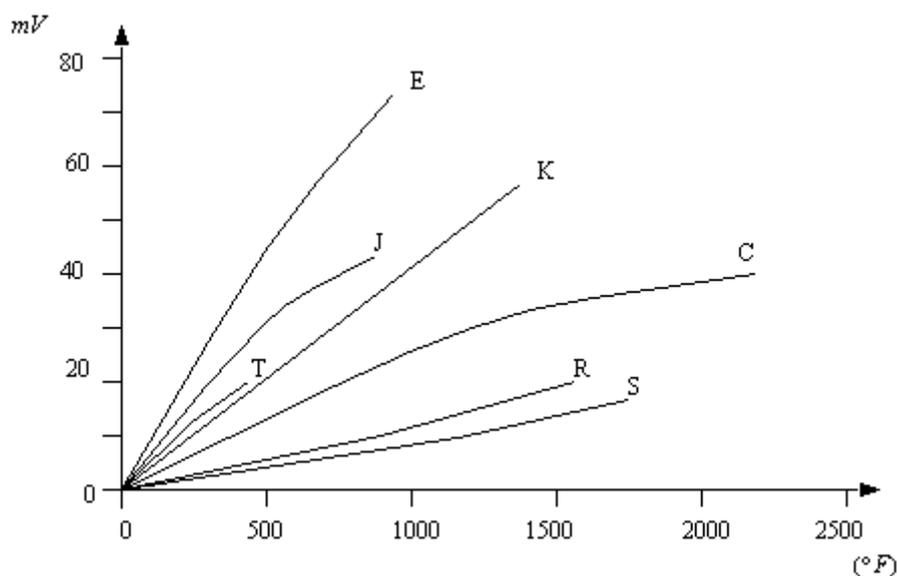


Figura 3.7. Curvas características de los distintos tipos de termopares

El hecho de que los termopares sean dispositivos de bajo nivel de tensión y baja impedancia hace que el acondicionamiento de señal sea totalmente imprescindible. Además, la linealidad en algunos tipos es pobre, aunque el hecho de ser predecible y repetible permita que puedan ser compensados analógicamente y/o digitalmente.

Sensor de temperatura con semiconductores

Además de sensores de temperatura basados en elementos resistivos o termopares, hay otro tipo basado en tecnología de semiconductores. Esto se debe a que la corriente que circula por una unión pn polarizada directamente es inversamente proporcional a la temperatura.

En el caso de los diodos, al aumentar la temperatura de trabajo su curva característica se desplaza a consecuencia de un aumento de la corriente inversa de saturación y de la tensión térmica. Si se mantiene la corriente constante, se demuestra que la tensión umbral del diodo disminuye aproximadamente 2 mV por cada incremento de grado centígrado.

Aunque menos utilizado debido a su poca linealidad, también se produce el mismo efecto en transistores bipolares configurados en emisor común. Observando la curva de transferencia del transistor en la Figura 3.9 se puede observar que en función de la temperatura a la que esté expuesto es necesaria una tensión de control para que se produzca la conducción, siendo en este caso entre 0,4 y 0,7 V. En el caso de un MOSFET ocurre algo similar, salvo porque la tensión mínima para que comience a conducir es algo mayor, entre 1 y 2V, también dependiente de la temperatura. [18]

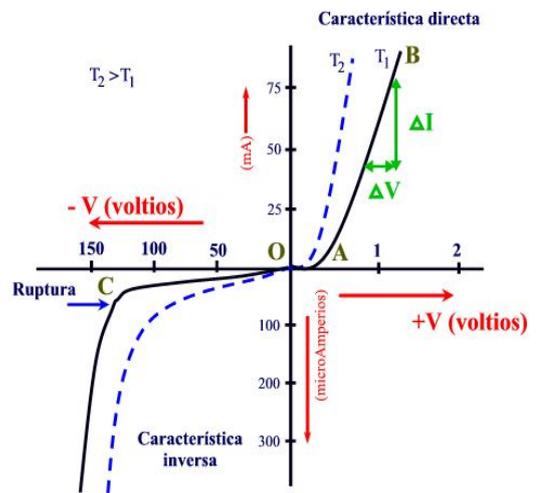


Figura 3.8. Dependencia de la temperatura en la respuesta de un diodo

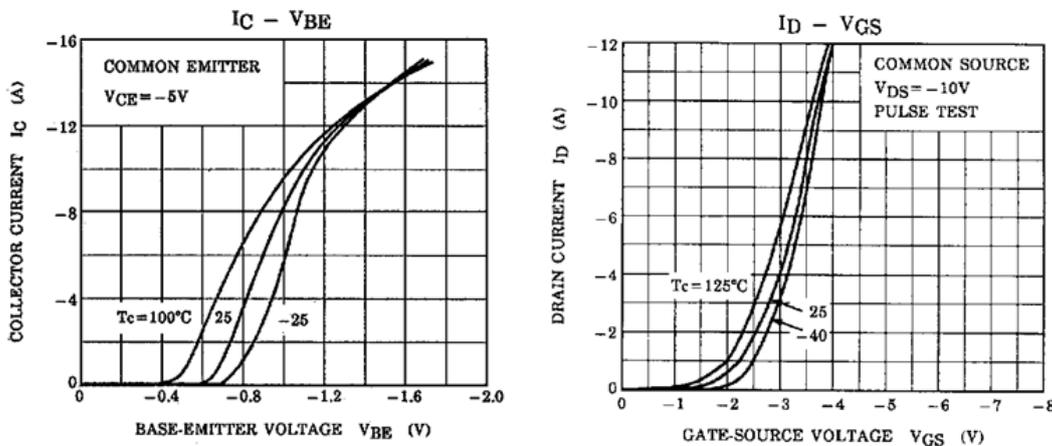


Figura 3.9. Dependencia de la temperatura en los transistores BJT (izq) y MOSFET (dcha)

caracterizar físicamente. Son usados en la industria óptica (para revestimientos reflectantes, anti-reflejo o de vidrio de auto-limpieza, por ejemplo), electrónica (capas de aislantes, semiconductores y conductores que forman circuitos integrados), envases (películas de aluminio recubierto), etc.

Las técnicas de deposición de película delgada se dividen en dos grandes categorías, dependiendo de si el proceso es principalmente químico o físico.

En sistemas de control y procesos donde la temperatura puede cambiar rápidamente se necesitan sensores de temperatura y elementos caloríficos que tengan un comportamiento lineal, una alta sensibilidad y con poca masa para que tengan una respuesta rápida y precisa. Los metales son los elementos más utilizados debido a su gran linealidad para medir temperaturas pero tienen la principal desventaja de que ofrecen una baja resistividad.

Además, los calentadores de capa fina fabricados con metales han emergido como la elección más acertada para aplicaciones específicas donde se necesitan aportaciones de calor en microsistemas. Junto a las ventajas descritas anteriormente, estos microcalentadores pueden ser fabricados fácilmente mediante técnicas estándar de microfabricación.

La resistividad en los metales varía con la temperatura, propiedad por la cual hay sensores de temperatura resistivos. Sin embargo también tiene una alta correlación con la pureza del material y la perfección de la red cristalina y puede variar con la inclusión de impurezas en el material. Además, las estructuras en película delgada contienen más imperfecciones y tensiones internas por lo que generalmente poseen resistividades más elevadas que las estructuras en volumen. También hay tratamientos térmicos de recocido a altas temperaturas que pueden reducir el número de imperfecciones, decrementando por ello la resistividad de estas películas delgadas. En la imagen se observa la curva característica de la resistividad frente al espesor de película delgada para el níquel realizado por investigadores del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad Kaohsiung en Taiwan.[19] Puede observarse la tendencia que toma la curva donde para pequeños espesores la resistividad es elevada, pero a medida que se va aumentando este espesor la resistividad se va acercando a sus valores en volumen.

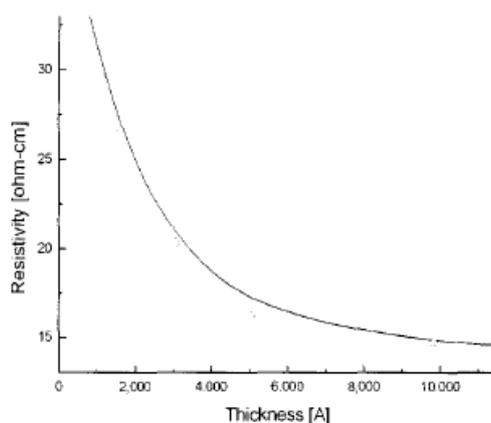


Figura 3.11. Variación de la resistividad con el espesor depositado

En general, el coeficiente de temperatura α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) para metales es menor en películas delgadas que en volumen. Sin embargo mediante sucesivas deposiciones y tratamientos térmicos se pueden conseguir valores de α cercanos al de los materiales en volumen. En la imagen siguiente

se observa la relación entre espesor y coeficiente de temperatura para el platino en un estudio realizado por la Universidad de Seattle.[20]

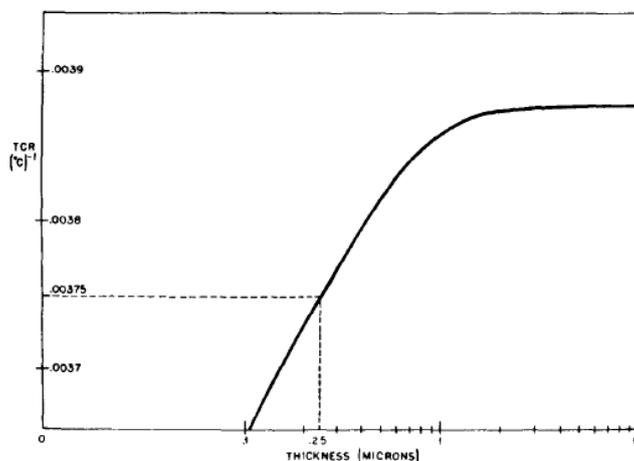


Figura 3.12. Variación del coeficiente de temperatura α con el espesor depositado

En Tabla 3.4 se pueden apreciar las propiedades de película fina con respecto a las mismas estructuras con espesores mucho mayores y que responden a las características comunes de volumen. Se observa como para película delgada la resistividad aumenta bastante y el coeficiente térmico se ve atenuado, no estando estos parámetros muy acotados debido a que dependen de muchos factores tales como el tipo de deposición, la rugosidad del sustrato, la calidad del vacío de la deposición, el tamaño de grano de la película depositada, etc. Por ello, si se trabaja con estructuras de este tipo, deberán ser caracterizadas previamente. [21]

Metal	Resistividad Volumen ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	Resistividad Película ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	TCR Volumen (ppm/°C)	TCR Película (ppm/°C)
Cobre (Cu)	1,73	2-4	4290	1700-2900
Oro (Au)	2,249	3-5	4190	1600-2800
Niquel (Ni)	7,16	10-20	5500	3000-5000
Platino (Pt)	10,6	20-100	3930	1500-2800

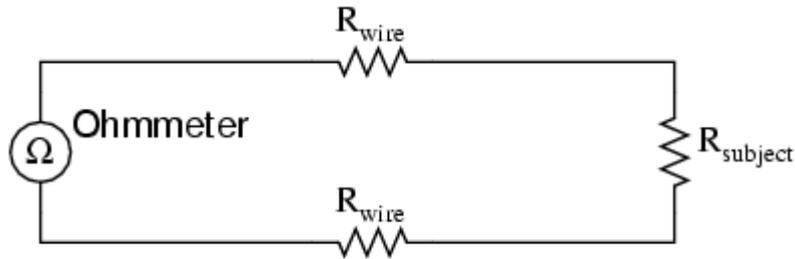
Tabla 3.4. Características de película delgada para distintos metales

3.2.3 Medidas de resistencia

La resistencia eléctrica es toda oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico cerrado, atenuando o frenando el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones. Es un parámetro muy importante en la electrónica ya que está íntimamente relacionado con valores de salida de sensores (como los sensores de temperatura RTD) y por ello una correcta medición es necesaria para garantizar los datos que proporciona el sensor.

La medida de resistencia se puede realizar mediante distintos métodos e instrumentos, dependiendo del valor de la resistencia a medir y de la exactitud que se desee. Para las medidas de resistencias con variaciones pequeñas como ocurre con las RTD hay dos métodos distintos, cada uno con unas características y precisiones que dependen de las exigencias que se le pidan a la medida. Estos dos métodos son la medida de dos hilos y de cuatro hilos.

El *método de dos hilos* es una medida clásica que utiliza un óhmetro. El problema de este método es que si la distancia de la resistencia hasta el óhmetro es significativa se incluyen en la resistencia medida el valor resistivo de los cables que conectan la resistencia al óhmetro, por lo que marcaría la resistencia total de los dos cables de conexión y la resistencia. [22]

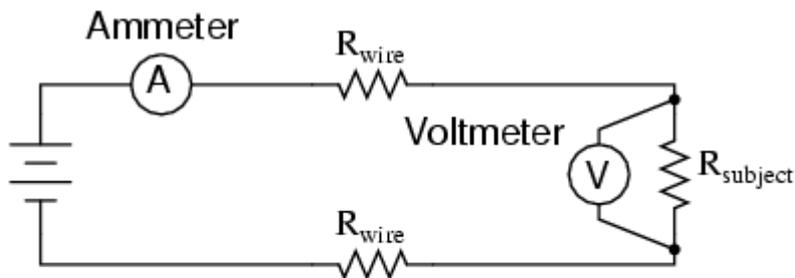


Ohmmeter indicates $R_{wire} + R_{subject} + R_{wire}$

Figura 3.13. Medida de resistencia de dos hilos

Usualmente, la resistencia de los cables suele ser muy pequeña, pero si los cables de conexión son largos y la resistencia a medir es muy pequeña, los errores de medida que se introducen podrían llegar a ser importantes.

Un método ingenioso para mejorar la medida de dos hilos es utilizar conjuntamente un voltímetro y un amperímetro. Como se cumple la ley de Ohm, la resistencia será igual a la tensión dividida por la corriente ($R = \frac{V}{I}$) y por ello se podría determinar la resistencia si se conociese la corriente que circula por la resistencia y la caída de tensión que ocurre en la misma.



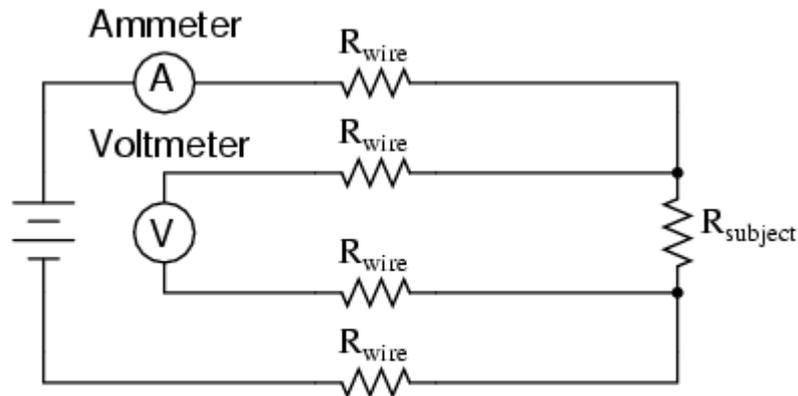
$$R_{subject} = \frac{\text{Voltmeter indication}}{\text{Ammeter indication}}$$

Figura 3.14. Variación de medida de resistencia de dos hilos

En este caso, la corriente es la misma en todos los puntos ya que el circuito tiene un solo lazo cerrado y al medir la caída de tensión en los extremos de la resistencia evitamos que se incluya la caída de tensión en los cables y mediante la Ley de Ohm se puede obtener el valor de la resistencia.

Sin embargo, en muchas aplicaciones no se puede medir directamente sobre los terminales de las resistencias ya que muchas forman parte de un circuito complejo y no se puede acceder a ellas, por lo que inevitablemente se introducen los valores de los cables. Por ello se añaden un

par de cables más y así se permite conectar el voltímetro cerca del amperímetro, conociéndose esta técnica como *método de cuatro hilos*.



$$R_{\text{subject}} = \frac{\text{Voltmeter indication}}{\text{Ammeter indication}}$$

Figura 3.15. Medida de resistencia de cuatro hilos

A simple vista parece que al medir la resistencia de este modo incluimos más valores resistivos de cables y la media puede ser menos precisa. Sin embargo, analizándola en detalle se observa que no es así. El voltímetro inyecta una pequeña corriente debido a su alta impedancia de entrada por lo que en los cables prácticamente no se produce una caída de tensión y se puede aproximar a que la medida del voltímetro está muy cerca del caso de colocarlo sobre los terminales de la resistencia.

Cualquier caída de tensión en los cables principales de corriente no es medida por el voltímetro y así no se tiene en cuenta en el cálculo de la resistencia. Este método se puede mejorar si se consigue que la corriente del voltímetro sea mínima, disminuyendo de este modo la caída de tensión en los cables.

También existe un método de tres hilos, pero los más utilizados son los de dos y cuatro hilos. El más implementado en sensores de temperatura resistivos (RTD) es el método de cuatro hilos ya que ofrece una mayor precisión y además elimina el ruido que pueda provocar la variación de resistencia con la temperatura de los cables.

Sin embargo, esta metodología tiene un gran inconveniente que es la necesidad de disponer de una fuente de corriente muy estable. Esto puede llegar a convertirse en un problema ya que variaciones en la corriente de alimentación provocarán variaciones en la resistencia de medida.

Para evitar el uso de una fuente de corriente estable se utiliza el método clásico de medida de resistencia mediante el *punto de Wheatstone*.

Ésta es una técnica utilizada para medidas de precisión de resistencia desde aproximadamente 1Ω hasta $1 M\Omega$. Está constituido por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. La precisión está determinada, principalmente, por la precisión de las resistencias conocidas que se utilizan en el puente y por la sensibilidad del detector de cero.

En la Figura 3.16 vemos que R_x es la resistencia cuyo valor queremos determinar, R_1 , R_2 y R_3 son resistencias de valores conocidos, siendo la resistencia R_2 es ajustable. Si la relación de las dos resistencias del brazo conocido (R_1/R_2) es igual a la relación de las dos del brazo desconocido (R_x/R_3), el voltaje entre los dos puntos medios será nulo y por tanto no circulará corriente alguna entre esos dos puntos C y B.

Para efectuar la medida lo que se hace es variar la resistencia R_2 hasta alcanzar el punto de equilibrio. La detección de corriente nula se puede hacer con gran precisión mediante el galvanómetro V.

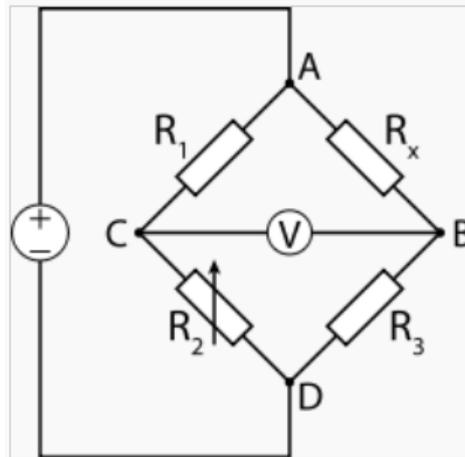
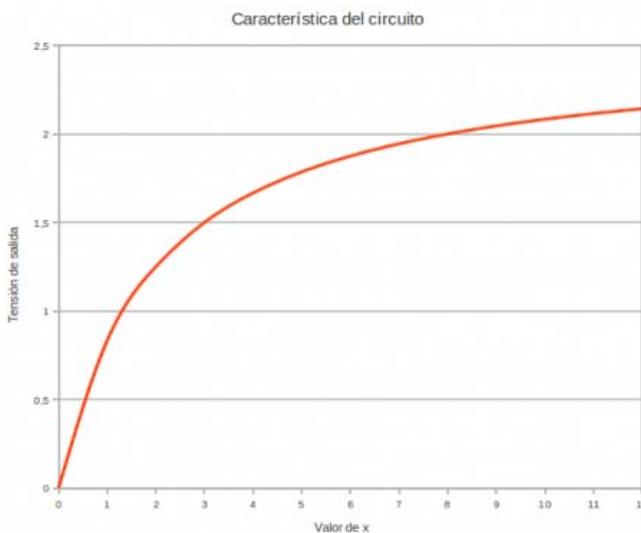


Figura 3.16. Puente de Wheastone

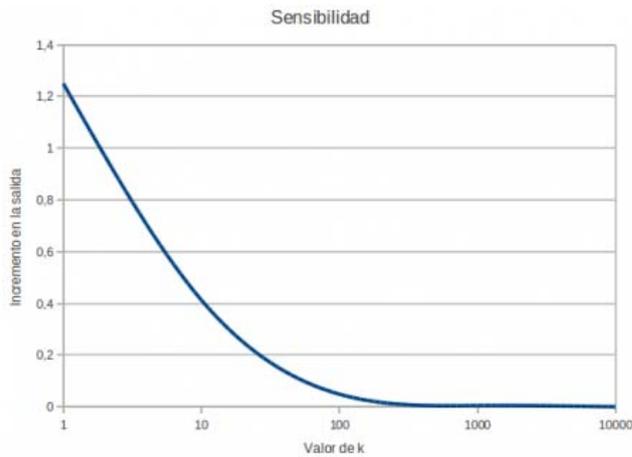
Sin embargo, para su utilización como etapa de adaptación de señal para un sensor de temperatura RTD interesa conocer la diferencia de tensión que se producirá entre los puntos C y B como consecuencia de una variación en la resistencia R_x . Esta relación es la mostrada a continuación:

$$V_{CB} = V_s \left(\frac{R_x}{R_1 + R_x} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right)$$



Esta relación de la tensión de salida en función del valor de R_x es no lineal. Si se define x como la variación de resistencia de R_x con respecto a su valor nominal a T_0 , es decir, $X = \frac{\Delta R_x}{R_x}$, la forma de la tensión de salida es la mostrada en la Figura 3.17. [23]

Figura 3.17. Tensión de salida del puente de Wheastone



Otro aspecto interesante del puente de Wheatstone es que su sensibilidad se ve maximizada para valores que equilibran el puente. Definiendo el valor k como $k = \frac{R1}{Rx} = \frac{R2}{R3}$, la sensibilidad del puente es la mostrada en la Figura 3.18.

Figura 3.18. Tensión de salida del puente de Wheatstone

Este tipo de medida basada en el puente de Wheatstone es muy utilizada y está muy extendida entre los métodos para medir variaciones de resistencia. Además, hay muchas topologías que utilizan amplificadores operacionales para mejorar las características de salida del puente, linealizando y amplificando la variación de tensión de salida que produce una variación de resistencia del sensor.

3.3 Sensores de flujo

Una gran variedad de campos industriales y de investigación trabajan con dispositivos microfluidicos para el desarrollo de sus aplicaciones en biomedicina, farmacéutica y áreas similares. Gracias al elevado conocimiento que se tiene en la tecnología MEMS se han generado dispositivos Lab-on-chip que implementan un completo sistema en un microchip, formado por los sensores, actuadores y electrónica de tratamiento de señal. Estos microsistemas trabajan con microfluidos y por ello es necesario disponer de sensores para medir tanto la temperatura de dichos fluidos como el caudal con el que se desplazan por el sistema.

El denominador común de estas aplicaciones para medir caudales es obtener un dispositivo que sea lineal, rápido y robusto, esto último es importante ya que el sensor trabajará en contacto con fluidos que pueden degradarlo. Hay aplicaciones donde además se necesita generar un foco de calor controlado, preciso y localizado debido a los requerimientos del proceso.

Los sensores térmicos de flujo están constituidos, básicamente, por sensores de temperatura y calentadores. Utilizan los principios de transferencia de calor para determinar la velocidad de flujo de un fluido. Con el paso del líquido a través del dispositivo, el calor se transfiere desde el calentador hasta el fluido y esta relación depende de la velocidad de flujo. A medida que aumenta esta velocidad, aumenta la cantidad de calor que se transfiere y conociendo la temperatura del medio, la tasa de flujo puede determinarse a partir de la variación de la señal de salida de los sensores de temperatura.

Son sensores que suelen fabricarse mediante película delgada y, aunque están muy investigada, esta tecnología de fabricación está muy acotada al modo de depositar y a las herramientas que se utilizan.

3.3.1 Tipos

El sensor de flujo es un dispositivo que, instalado en línea con el canal, permite determinar el caudal que está circulando por dicho canal. Se caracteriza por medir caudales gracias al desplazamiento del perfil de temperatura causado alrededor del elemento calentador, de este modo puede ser usado para medir caudales muy pequeños.

Los sensores de flujo térmico pueden clasificarse en: [25]

- Anemómetros (Anemometers)
- Sensores en tiempo de vuelo (Time of flight sensors)
- Sensores de flujo calorimétricos (Calorimetric flow sensors)

Los sensores *anemómetros* consisten principalmente en un único elemento el cual es calentado mediante una corriente eléctrica y en función de la cantidad de flujo que circule por el sensor se producirá una variación de resistividad característica para ese microcaudal.

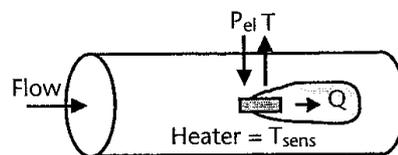


Figura 3.19. Sensor de flujo anemométrico

Estos tipos de sensores se caracterizan por disponer de un gran fondo de escala, lo que le permite medir caudales relativamente elevados. Sin embargo, responden mal ante caudales pequeños, son muy sensibles a la contaminación y necesitan ser calibrados cada cierto tiempo para evitar tomar medidas falseadas debido a la oxidación o por ensuciamiento del heater.

En la Figura 20 puede observarse como en este modo de funcionamiento se puede obtener un gran fondo de escala (500 $\mu\text{L}/\text{min}$). Sin embargo, para caudales menores de 100 $\mu\text{L}/\text{min}$ el sensor no es capaz de medir correctamente el caudal del fluido. [26]

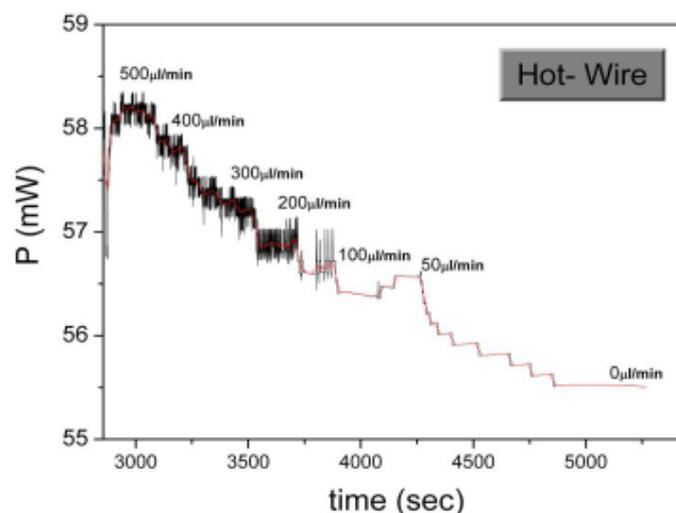


Figura 3.20. El sensor opera con el principio anemómetro (Modo de temperatura constante CT). La potencia generada en el heater para distintos valores de caudal es mostrado en la imagen.

En los sensores en *tiempo de vuelo*, el heater está continuamente alimentado con una cierta cantidad de energía eléctrica. Este pulso de calor se realiza lejos del heater y éste es usado para medir el retardo de tiempo entre la fuente de calor y el detector de calor. Se necesitan dos elementos para utilizar esta configuración y un tercero si se desea conocer el sentido del flujo.

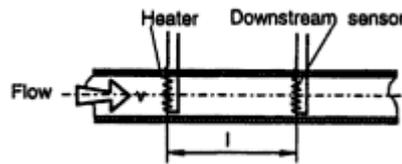


Figura 3.21. Sensor de flujo tiempo de vuelo

Este modo es menos sensible a los cambios en la temperatura ambiente que el modo anemómetro y el rango de medida del sensor puede ser seleccionado en función de la distancia entre la fuente de calor y el detector. A mayores distancias, se obtendrá un mayor fondo de escala. Aunque por motivos constructivos habrá una distancia límite donde el sensor se sature y no sea capaz de medir mayores caudales.

Aunque existen varios estudios sobre este tipo de sensores de caudal, no están tan desarrollados y no son tan utilizados en la actualidad como el anemómetro o el principio calorimétrico. Esto se debe a las buenas prestaciones que debe de tener el sensor de temperatura para que sea capaz de detectar los pequeños pulsos de calor que se generan y también de la gran complejidad de tratamiento de señal que necesita comparado con otros tipos.

Sin embargo, el método que se utiliza mucho en la actualidad es el *principio calorimétrico*. Se basa en transferir calor al fluido, lo cual se logra mediante convección, de modo que esta cantidad de calor es proporcional al caudal del fluido y medida por los sensores de temperatura.

La configuración estándar consta de tres elementos: un calentador (heater) y dos sensores de temperatura, uno situado aguas-arriba y otro aguas-abajo del heater. Los sensores de temperatura suelen ser termorresistencias (RTD), que son metales con la característica de que su resistencia es función de la temperatura a la que esté expuesto.

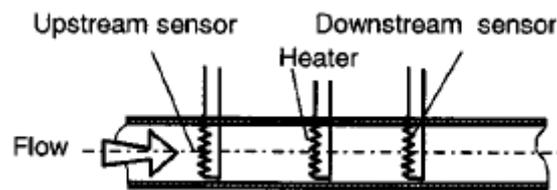


Figura 3.22. Sensor de flujo basado en principio calorimétrico

El principio de funcionamiento de este tipo de sensores de flujo es el siguiente. El fluido entra en el sensor y atraviesa un canal aislado térmicamente del exterior donde en primer lugar se encuentra a su paso con la resistencia aguas-arriba (R_{UP}), posteriormente el heater y por último la resistencia aguas-abajo (R_{DOWN}). Mediante transmisión de calor por convección se enfriará la resistencia aguas-arriba, disminuyendo su valor resistivo debido a que su temperatura decrecerá. Tras ello, el fluido se calentará debido a su exposición al heater y calentará la resistencia aguas-abajo, incrementando su valor resistivo debido al incremento de temperatura. La medida del caudal del fluido se realizará mediante la diferencia de resistencia que habrá entre R_{down} y R_{up} , siendo esta diferencia mayor al aumentar el caudal del fluido.

De este modo, el perfil de temperatura en el canal del sensor será función del caudal que circule. El valor mínimo es el caso en el que hay caudal nulo por el canal, en este caso (si los sensores están situados simétricamente respecto del heater) los dos sensores medirán la misma temperatura y su diferencia resistiva será nula. A medida que vaya aumentando este caudal la transmisión de calor por convección será mayor y el perfil de temperatura variará, desplazándose en el sentido del movimiento del fluido. Cuanto mayor sea el caudal, más se desplazará el campo de temperatura y mayor será la diferencia resistiva entre las resistencias aguas-abajo y aguas-arriba. Esta diferencia resistiva será el parámetro con el que caracterizaremos el caudal volumétrico que circule por nuestro sensor.

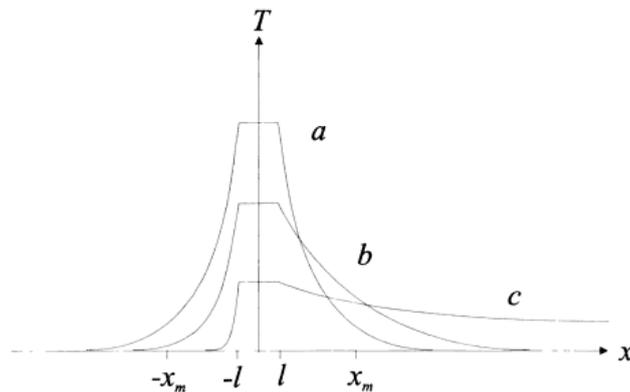


Figura 3.23. Distribución de temperatura en el centro del canal como función de la posición x . El heater se extiende desde $x=-l$ hasta $x=l$. x_m denota la posición de los sensores de temperatura. La curva caracteriza las tres típicos flujo de velocidad: a) Velocidad nula. b) Velocidad baja que permite difundir el calor hasta el sensor aguas-arriba. c) Velocidad elevada que permite difundir el calor hasta el sensor aguas-abajo.

En el principio calorimétrico, donde la diferencia de temperatura de los dos sensores situados a cada lado del calentador son monitorizados como una función del flujo, se entregan datos con una alta precisión y reproducibilidad. Otra mayor ventaja de este principio es que el efecto del calor por conducción desde o hacia el ambiente es básicamente cancelado al restar las señales de los dos elementos sensores, eliminando así posibles errores en la medida debido a las condiciones ambientales donde se utilice el sensor. Además, las fluctuaciones en la temperatura del calentador tienen un mínimo efecto en la medida final. Obviamente, para que todo esto sea cierto, los sensores de temperatura tienen que ser monitorizados ambos al mismo tiempo.

Mediante la electrónica asociada al microsensado se podrá conocer el caudal que circule por el canal a través de la señal de salida del mismo. Esta señal será la diferencia resistiva entre las resistencias aguas-arriba y aguas-abajo, que serán alimentados a través de una intensidad continua constante e igual para las dos resistencias, transformando de este modo la señal de salida en valores de tensión mediante la Ley de Ohm $V = R \cdot I$.

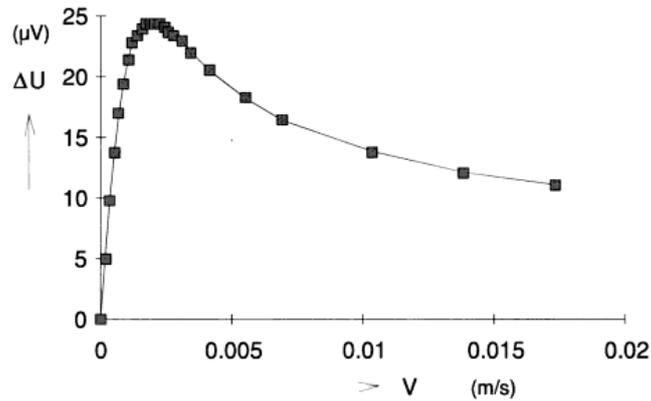


Figura 3.24. Señal de salida del sensor de flujo con agua como líquido. Con una canal de $1000\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ y una distancia de los sensores de temperatura al heater de $1000 \mu\text{m}$ (Lammerink 1993).

La respuesta que caracterizará el comportamiento de nuestro sensor será semejante a la Figura 3.24 anterior. En ella se observan dos regiones bien diferenciadas. Una primera zona lineal que va desde caudales bajos hasta un caudal límite de saturación que representará el fondo de escala de nuestro sensor y otra zona que es para caudales mayores a este valor límite en el cual el sensor se satura y da una respuesta no lineal. Nos centraremos en el análisis de la primera zona donde la variación de tensión es función del caudal que circule por el canal.

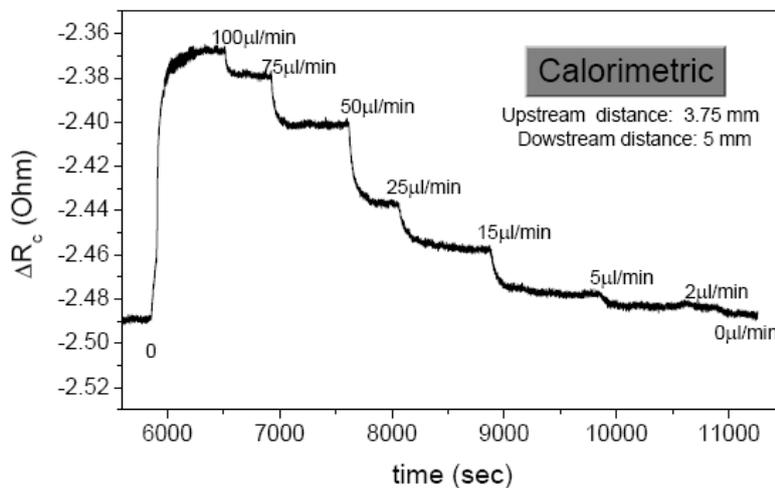


Figura 3.25. Operación del sensor bajo el principio calorimétrico, para $D_{\text{down}} = 5 \text{ mm}$ y $D_{\text{up}} = 3.75 \text{ mm}$. La señal en tiempo real es el cambio de resistencia de los elementos sensores a los valores de flujo señalados.

En la Figura 25 se observa una clara correlación entre la respuesta del sensor, medido en variación de resistividad, y el caudal del fluido. A diferencia del sensor anemómetro, Figura 20, se observa que en este caso se pueden medir caudales que sean bastante pequeños (aprox. $5 \mu\text{L}/\text{min}$), con una respuesta muy constante, pero con menor fondo de escala (aprox. $100 \mu\text{L}/\text{min}$ frente a los $500 \mu\text{L}/\text{min}$ que se pueden obtener en el modo anemómetro).

Por estas características se tomará el principio calorimétrico para construir el sensor. Aunque no se disponga de un rango de medida elevado, la respuesta lineal y fiable que proporciona el principio calorimétrico hace que se decida seleccionar este modo en detrimento del anemómetro.

3.3.2 Estudios y avances

Son varios los autores que han realizado diversos estudios acerca de sensores térmicos de flujo. Muchos se han centrado en comparar las características entre los sensores anemómetros y calorimétricos, mientras que otros han enfocado su estudio en mejorar la caracterización de una de estas dos técnicas. [26][27][28]

Entre estos estudios se halla el realizado por los griegos Anastasios Petropoulos y Grigoris Kaltsas [29]. En su estudio se centraron en fabricar un sensor de flujo mediante tecnología PCB-MEMS y optimizar las distancias de los sensores de temperatura con respecto al heater en el principio calorimétrico. Para ello, crearon una matriz de resistencias de Platino alrededor del heater y para un mismo caudal fueron midiendo las variaciones de resistividad que se producían en cada sensor de temperatura.

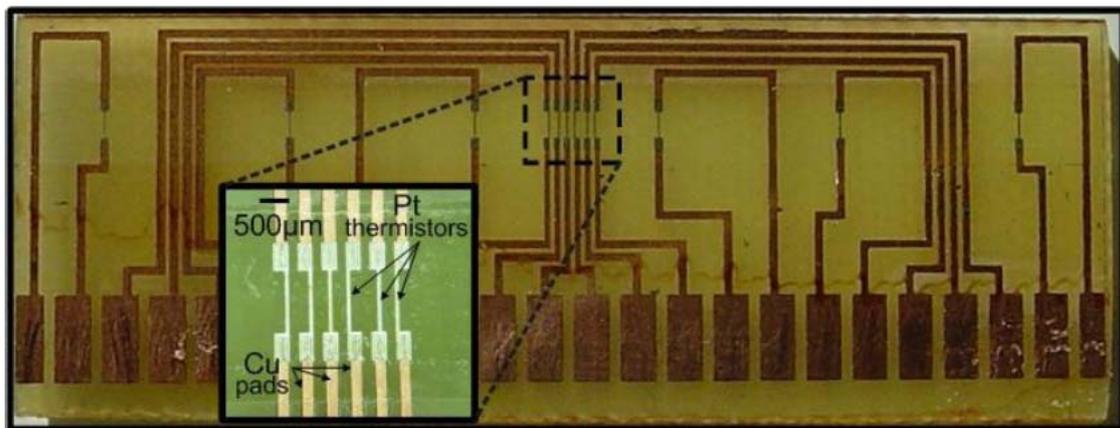


Figura 3.26. Matriz de resistencias para optimizar la distancia de los sensores de temperatura al calentador

Realizaron varios ensayos para caracterizar este dispositivo, como variar el área transversal del microcanal, y utilizaron como fluidos agua y aceite de motor. Finalmente concluyeron que los valores óptimos de la distancia del sensor aguas-abajo del sensor debía de estar muy próxima al heater ($D=0,425$ mm) y que cuanto mayor fuese la distancia entre el heater y el sensor aguas-arriba, mayor sería el fondo de escala del sensor.

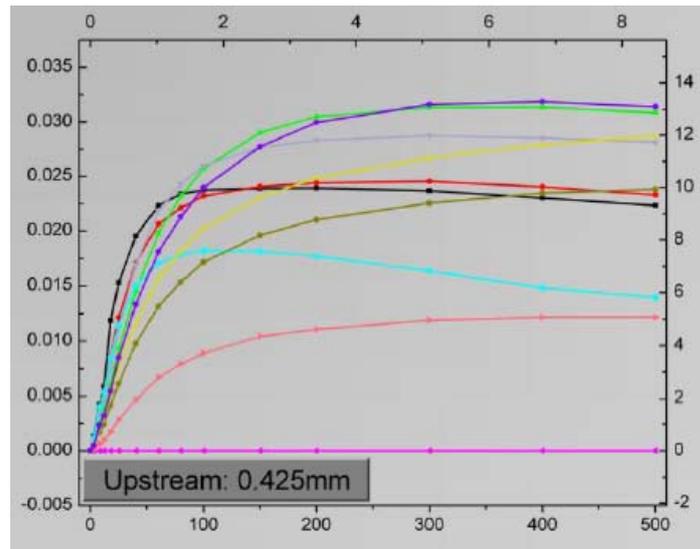


Figura 3.27. Distintas curvas de funcionamiento del sensor de flujo en función de distintas posiciones de los sensores de temperatura

Sobre esta optimización de distancias hay distintos trabajos publicados ya que éste factor es dominante en el rendimiento del sensor. Volklein y Baltes [30] presentaron un modelo analítico detallado para el que cuantificar, entre otras cualidades, el efecto de la distancia de los sensores de temperatura con respecto a la sensibilidad del dispositivo. Observaron que la mayor sensibilidad se obtenía para la mayor distancia entre el calentador y el elemento sensor. Nguzen y Dötzel [31] usaron distancias no simétricas en los sensores de temperatura (desde 200 μm hasta 660 μm) y comprobaron que el rango de medida de su dispositivo se incrementó hasta 150 mL/min, comparado con los 10 mL/min que obtuvieron cuando utilizaba distancias simétricas.

Otro aporte interesante fue el de E. AbbaspourSani y D. Javan [30]. En su estudio realizaron un sensor de flujo basado en el principio calorimétrico tanto teóricamente como en la práctica. Modelaron el dispositivo mediante las ecuaciones de energía y con un software de elementos finitos simulaban su comportamiento.

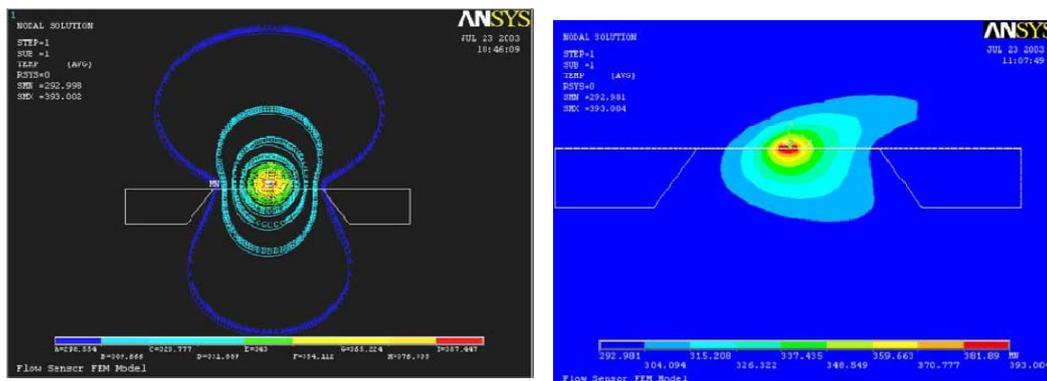


Figura 3.28. Perfil de temperatura simétrico a flujo nulo (izq) y con gas en movimiento a una velocidad de $v=1\text{m/s}$ (dcha)

Tras simular el comportamiento del sensor, modelaron el dispositivo mediante ordenador y comprobaron los resultados analíticos con los obtenidos en la simulación, siendo los resultados

bastante cercanos. Los sensores se instalaron simétricos al calentador y en este caso también se optimizó la distancia de los sensores de temperatura al calentador, siendo esta distancia de 200 μm .

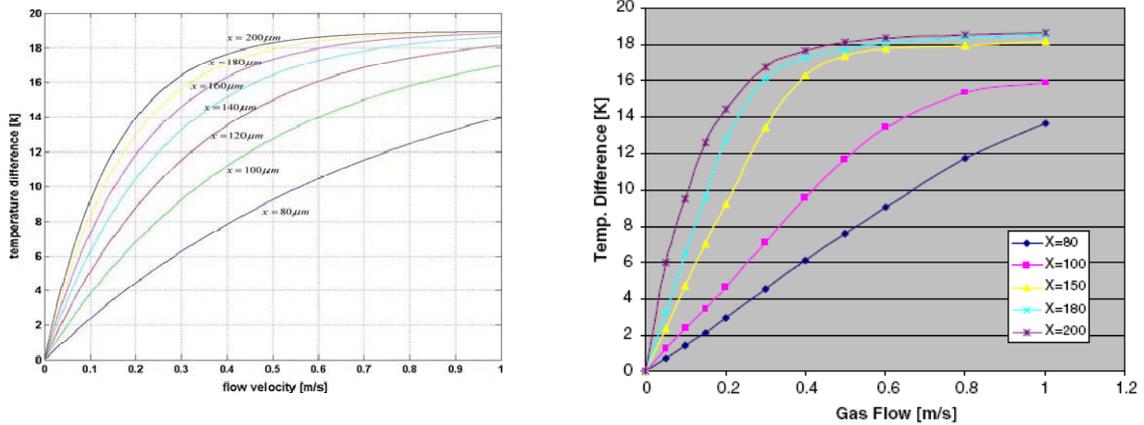


Figura 3.29. Resultados analíticos (izq) y simulados (dcha) de la diferencia de temperatura frente a la velocidad de flujo para varias distancias entre sensores y calentador

Además de optimizar las distancias entre los sensores de temperatura y el calentador, hay otros estudios referidos a los sensores de temperatura que son muy interesantes y que son básicos en el diseño de sensores de flujo. Muchos hacen referencia a las variaciones de las características de las resistencias de película con las condiciones de deposición

Ya en 1988, Wilson A. Clayton estudió y caracterizó la dependencia de las propiedades de los metales de película delgada con el espesor. Concretamente, caracterizó el coeficiente de temperatura del Platino con respecto al espesor. [21]

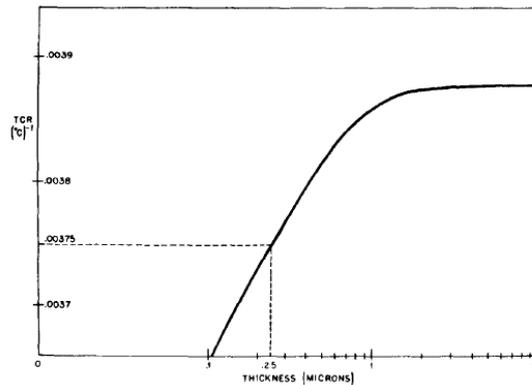


Figura 3.30. Variación del coeficiente de temperatura α con el espesor depositado

También sobre las propiedades de película delgada del Platino, Fred Lacy [33] estudió el comportamiento de este metal como sensor de temperatura. Fabricó un serpentín de Platino de una longitud de 0,107 m, depositó diversos espesores (46,3 nm, 74 nm y 92,6 nm) y caracterizó el coeficiente de temperatura de cada uno. También analizó la saturación del sensor de temperatura cuando alcanzaba una temperatura crítica, a partir de la cual ya no podía medir más variación de temperatura.

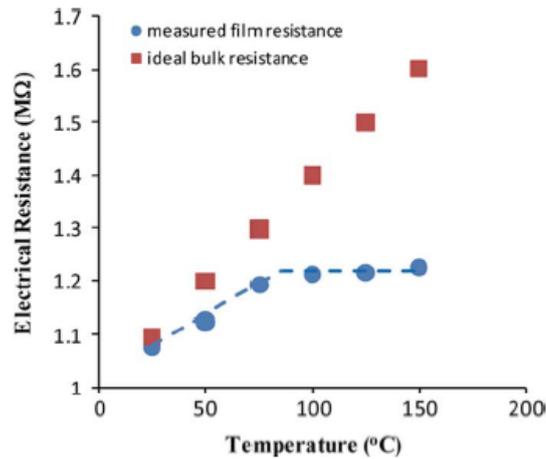


Figura 3.31. Medida de la resistencia eléctrica de Platino de 46,3 nm de espesor. Las dos regiones de medida de la resistencia (lineal y saturación) son claramente visibles

Además del Platino se han utilizado otros materiales para fabricar sensores de temperatura, tales como Níquel u Oro. Con respecto al primero, los chinos Sangsoo Noh, Eunghan Lee y Sungil Lee fabricaron sensores de temperatura realizados en Níquel. Para ello depositaron varios espesores de Níquel (152,3 nm, 307,5 nm, 514,2 nm y 982,7 nm) en un vacío de $6,66 \cdot 10^{-7}$ mbar y caracterizaron su resistividad con respecto al espesor de película delgada. También ofrecieron una solución al problema que presenta el Níquel de oxidación. Para ello realizaron un tratamiento térmico de recocido a 450 °C para facilitar la oxidación de la superficie del sensor y una vez que se creaba una capa superficial de óxido de Níquel, caracterizaban el sensor de temperatura ya que su resistencia no variaría al no poder ya oxidarse más. [20]

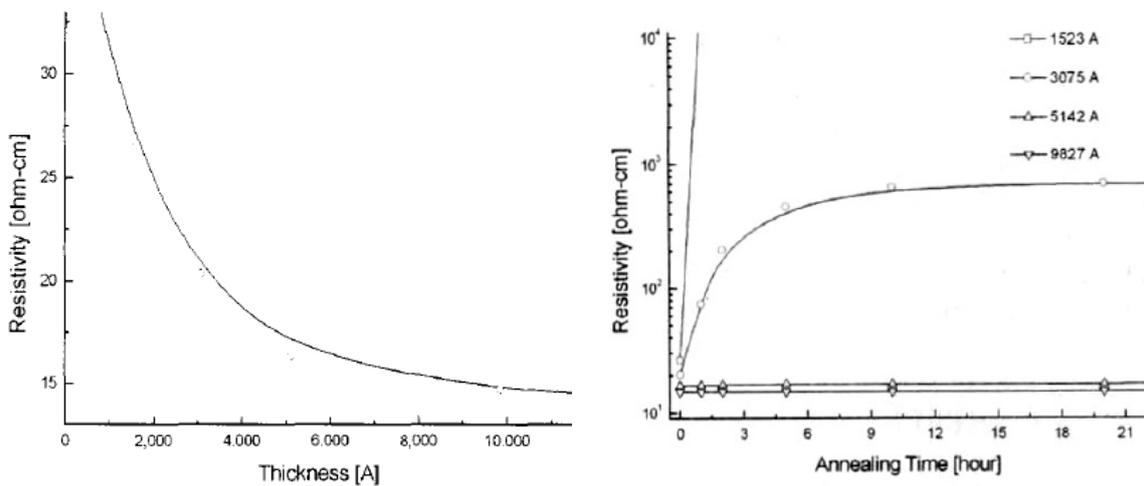


Figura 3.32. Resistividad frente a espesor depositado de níquel (izq) y tratamiento térmico de recocido para forzar la oxidación superficial del Níquel (dcha)