



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Elaboración de Sensores de Temperatura
de Película Delgada de Cobre**

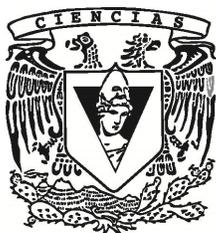
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

OMAR ULISES PERALTA SÁNCHEZ



Tutor: FÍS. RENÉ ORTEGA ALVARADO

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

La sabiduría es hija de la experiencia

Leonardo Da Vinci.

С любовью к моей белке, Яя и чеками

Agradecimientos

**A la pandilla por su apoyo
y su amor incondicional.**

**A mi madre por ser un pilar
de este trabajo.**

**A mi familia por su apoyo
incondicional.**

**A Rene por el apoyo y la amistad
desinteresada que me ha brindado.**

**Dr. Roberto Ysacc Sato Berrú por
la revisión del trabajo.**

**Dr. Juan Carlos Alonso Huitrón por
la revisión y sugerencias aportadas.**

**M. en C. Alicia Zarzosa Pérez por el tiempo
dedicado y las sugerencias aportadas.**

**Fís. Luis Flores Morales por el tiempo
dedicado y sus observaciones.**

**Al laboratorio de Física Moderna
por las facilidades para la
realización de este trabajo.**

**A Rodolfo, Ismael y Luci por su
apoyo.**

Índice	Página
Introducción	1
Capítulo 1: Sensores de temperatura	3
Capítulo 2: Sensores	6
2.1 Conceptos y Principios Físicos	7
2.2 Propiedades Físicas	8
2.3 Sensores de Temperatura Eléctricos	12
2.4 Sensores de Temperatura Resistivos	12
Capítulo 3: Elaboración y Caracterización del sensor	13
3.1 Elaboración	13
3.2 Evaporación	14
3.3 Tamaño del sensor	16
3.4. Dimensiones de la zona muerta y zona de contactos	18
3.5 Dimensiones de la zona activa	20
3.6 Relación espesor, resistencia y tiempo de cada sensor	21
Capítulo 4. Caracterización del sensor	24
4.1 Pruebas de resistencia contra temperatura	24
4.2 Caracterización matemática del sensor	29
4.3 Tiempo de Respuesta del sensor	32
Conclusiones	40
Bibliografía	43

Introducción

Conocer las propiedades de los materiales nos permite poder aplicarlos en diferentes situaciones físicas. Es el caso de la relación que existe entre la resistencia y la temperatura de un metal. En principio podemos pensar que los efectos de la temperatura sobre los metales afectan y restringen su desempeño y comportamiento, esto, debido a la naturaleza misma de la temperatura, la cual nos presenta una serie de dificultades como el sobrecalentamiento, la dilatación, transferencia de calor, etc., que debemos intentar resolver y controlar al mismo tiempo. Podemos ocupar el comportamiento resistivo de los metales para elaborar un sensor de temperatura. Un sensor juega un papel muy importante en los procesos científicos e industriales ya que este es el comienzo de todo sistema de medida; podríamos decir que un sensor actúa como nuestros “ojos” en el mundo físico. Estrictamente hablando, un sistema de medida incluye al sensor, transductor, acondicionador de señal y el procesamiento de la señal. El presente trabajo continua las investigaciones realizadas sobre películas delgadas de cobre en el laboratorio de Física Moderna, las cuales se llevaron a cabo por el método de evaporación térmica. Presentamos un sensor de temperatura, a partir de una película delgada de cobre, el cual depositamos sobre una película de resina. El sensor tiene una geometría característica, por lo que toda la caracterización es propia de dicha forma. Este puede ser empleado con fines de enseñanza, aplicaciones a la biología o industriales. Nuestro trabajo pretende mostrar la metodología para la elaboración y caracterización de los sensores. El trabajo se ha dividido de la siguiente manera:

El capítulo 1, presenta un panorama general de las investigaciones y desarrollos alcanzados, de los sensores de temperatura de película delgada. El capítulo 2, presenta las características que un sensor debe tener y su relación con la respuesta al estímulo físico. Los principios físicos que rigen el comportamiento del material a emplear y la relación matemática que describe su comportamiento. El capítulo 3, presenta la elaboración y caracterización dimensional. El capítulo 4, las pruebas experimentales realizadas y los resultados obtenidos.

Capítulo 1

Sensores de Temperatura

En este capítulo presentamos un panorama general de algunos sensores, y en particular los de temperatura. Presentamos algunas de las investigaciones llevadas a cabo hoy en día para obtener dichos sensores.

Los sensores se utilizan comúnmente en una amplia variedad de procesos; existen una gran variedad y registran todo tipo de medidas tanto físicas como químicas. Como es de esperarse, hay ocasiones en las que no pueden conectarse cables y mucho menos circuitos electrónicos para el registro de la temperatura. Se propone elaborar un sensor de temperatura basado en materiales magnéticos [11]. Estos sensores están compuestos de varias capas de material magnético, el cual tiene una frecuencia de resonancia o un espectro armónico que varía con la temperatura, que puede ser detectado a unos cuantos centímetros. Esto nos permite obtener sensores inalámbricos.

Miembros de IEEE, nos presentan un sensor de gas y temperatura [12]. Este es un innovador sensor que emplea las ondas acústicas. Los sensores acústicos emplean la relación entre la velocidad y la temperatura. Estos sensores tienen la propiedad de poder ser integrados fácilmente con otros sensores acústicos y así poder tener dos sensores. Aunque presentan ciertos problemas de interferencia, se emplea una forma de eliminar dicha eventualidad.

Hay ocasiones en las que es necesario tener un sensor de temperatura que sea flexible y se pueda manejar sin que se fracture o rompa. Se elaboró un sensor de película delgada flexible [13], por el método Micro-electro-mechanical-systems (MEMS); este permite reducir volumen, masa y los costos. Además, tiene la propiedad de ser flexible y puede ser aplicado en seres humanos o en sistemas biológicos.

Aunque el rubí se aplica en la elaboración de láser, hoy en día está siendo utilizado en la elaboración de sensores, en particular de temperatura [14]. Dicho sensor trabaja con líneas del espectro de fotoluminiscencia, en el rango de 694.2 nm a 692.7 nm. El rango de la temperatura de trabajo se ubica entre 138 y 368 K.

El desarrollo industrial ha impuesto una demanda de productos de alta precisión y de eficiencia económica, lo que ha dado origen a procesos de producción que requieren de altas velocidades de corte, desbaste, profundidad, etc. Estos procesos llevan consigo un deterioro en las herramientas de trabajo, fracturas, etc., lo cual origina pérdidas económicas en la industria. Para elegir mejor el material para las herramientas de trabajo es necesario conocer la temperatura a la cual trabajan. Se propone la elaboración de un sensor de película delgada para vigilar los procesos de torneado [15]. Se aplica un recubrimiento directamente a la herramienta de corte, con lo cual obtenemos un termopar.

Algunas fuentes de energía se deterioran con el tiempo y poder tener información de su desempeño nos daría la oportunidad de lograr una durabilidad de la energía y evitar procesos que afectan su funcionamiento. Los sensores de temperatura pueden ser aplicados en distintos procesos. Para poder medir la temperatura de un electrolito

se elabora un sensor para registrar la temperatura interna de una pila [16]. Este sensor tiene la finalidad de conocer y controlar los procesos internos dentro de una pila. El sensor de película delgada se coloca en el interior de la pila con recubrimientos especiales para evitar su degradación y poder resistir las condiciones extremas.

Hoy en día contamos con sistemas que requieren la mayor información posible en el menor tiempo posible. Podemos tener un sistema multifuncional que pueda trabajar midiendo el flujo de calor, esfuerzo y temperatura al mismo tiempo. Se construye un sensor de película delgada para medir la temperatura en superficies [17]. Estos tienen la propiedad de poder ser integrados con otros sensores, para tener más de un sensor y registrar temperatura, esfuerzo, etc., a la vez y ofrecer la información en tiempo real; fueron sometidos a pruebas en ambientes extremos para observar su funcionalidad.

El control de calidad, así como la producción de procesos son algunas de las razones por las cuales es importante medir el flujo. Para medir el flujo de gas o fluido en la industria automotriz o espacial, también se aplican los sensores de película delgada. Es el caso de los sensores de flujo [18].

Estos sensores nos permiten ubicar la versatilidad de las películas delgadas en referencia a los sensores de temperatura, como es que se ocupan actualmente.

Capítulo 2

Sensores

A menudo la definición de sensor puede tener sus dificultades en cuanto a su interpretación, por lo cual, nosotros entenderemos un sensor como un dispositivo que recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica. El estímulo es la cantidad, propiedad o condición que es sensada y convertida en señal eléctrica. El propósito de un sensor es responder a cualquier tipo de señal física, con una salida eléctrica, que pueda ser compatible con algún circuito eléctrico. [1]

La diferencia que existe entre un sensor y un transductor, es que el segundo convierte un tipo de energía en otra, mientras que el primero convierte cualquier tipo de energía en una eléctrica. Podemos distinguir dos tipos de sensores: aquellos que generan una señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo, llamados sensores activos y los conocidos como pasivos, porque requieren de una fuente de voltaje o corriente para producir una magnitud eléctrica. Una forma de clasificar a los sensores, es por sus propiedades, es decir, lo que miden, sus especificaciones, el fenómeno físico al cual es sensible, el mecanismo de conversión empleado, el material de fabricación, campo de aplicación, etc. Aunque como podemos observar, terminaríamos con áreas que se superponen, por lo cual cualquier clasificación debería tener en cuenta estos aspectos o emplear algún otro criterio.

2.1 Conceptos y Principios Físicos

Los sensores, de la misma forma que cualquier otro dispositivo, tienen su propia terminología, la cual necesitamos comprender antes de empezar a trabajar con ellos. A continuación presentamos algunas características importantes de estos:

1. ***Función de Transferencia.***- Para cada sensor existe una relación entre la señal de entrada y la de salida. Esta relación o función establece una dependencia entre la señal eléctrica producida por el sensor y la respuesta. La función puede ser lineal o no, lo cual depende del estímulo de entrada y salida.

2. ***Sensibilidad.***- La sensibilidad de un sensor se define como la pendiente de la función de transferencia, es decir, la relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.

3. ***Rango.***- El rango de un sensor es el valor máximo y mínimo del parámetro de entrada medido.

4. ***Precisión.***- El concepto de precisión se refiere al grado de reproducibilidad de una medida. Es decir, si un valor fuera medido cierto número de veces, un sensor ideal, debería tener exactamente el mismo valor de salida.

5. ***Resolución.***- Esta especificación es la mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida. La resolución

se expresa, ya sea, como una parte de la lectura o en términos absolutos.

6. **Exactitud.**- La exactitud de un sensor es la diferencia que pueda existir entre el valor real y el valor indicado en el sensor.

7. **Offset.**- El offset es el valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula.

8. **Histéresis.**- Un sensor debe ser capaz de seguir los cambios del parámetro de entrada, independientemente de la dirección en la cual se haga el cambio. La histéresis es una medida de esta propiedad.

2.2 Propiedades Físicas

Los materiales pueden clasificarse de acuerdo a la capacidad que presentan los electrones para fluir por ellos. Consideremos una corriente que fluye por un material; ésta depende de la diferencia de potencial suministrada. Para un material o dispositivo que obedece la ley de Ohm, la corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial, es decir

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow V = RI \quad (1)$$

Consideremos un segmento de alambre recto de área de sección transversal A y de una longitud l , como se muestra en la figura 2.2.1.

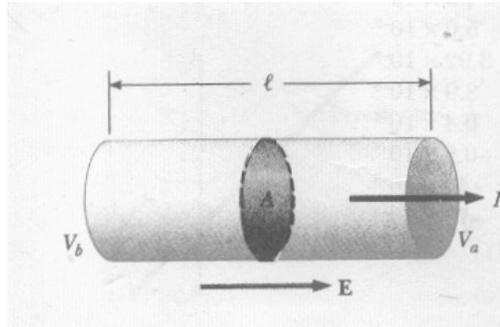


Figura 2.2.1. Muestra conductora.

Aplicamos una diferencia de potencial $\Delta V = V_b - V_a$ a través del alambre, con lo cual se crea un campo eléctrico y una corriente. Si el campo se supone uniforme, por la definición de diferencia de potencial, sabemos que:

$$\Delta V = \int_0^l E \cdot ds \Rightarrow \Delta V = El \quad (2)$$

Cuando se mantiene una diferencia de potencial a través de un conductor se establecen una densidad de corriente J y un campo eléctrico E . Para algunos materiales la densidad de corriente es proporcional al campo eléctrico;

$$J = \sigma E \quad (3)$$

donde la constante de proporcionalidad σ recibe el nombre de conductividad del material ¹, a dichos materiales se les llama *óhmicos*, por cumplir con la ley de Ohm. La densidad de corriente se define como la corriente I que circula por un conductor de sección transversal A , es decir;

$$J = \frac{I}{A} \quad (4)$$

sustituyendo **2** en **3** tenemos:

$$J = \sigma E = \sigma \frac{\Delta V}{l} \quad (5)$$

despejando la diferencia de potencial y sustituyendo **4** tenemos:

$$\Delta V = \frac{l}{\sigma} J = \left(\frac{l}{\sigma}\right)\left(\frac{I}{A}\right) \quad (6)$$

agrupando términos tenemos:

$$\Delta V = \left(\frac{l}{\sigma A}\right) I \quad (7)$$

la cantidad:

$$\frac{l}{\sigma A} \quad (8)$$

se denomina resistencia del conductor.

¹ La definición microscópica de la conductividad es: $\sigma = qn_q\mu_q$, donde q es la carga de los portadores, n_q concentración de los portadores, μ_q movilidad de los portadores.

El inverso de la conductividad se conoce como resistividad ρ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (9)$$

empleando esta definición, podemos expresar la resistencia de un bloque de material uniforme como:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (10)$$

Como podemos observar de la ecuación [10], la resistencia de un material depende de la conductividad y de su geometría. Experimentalmente se obtiene el comportamiento de la resistividad en función de la temperatura [9], el cual está dado por:

$$\rho = \rho_o (1 + \alpha (T - T_o)) \quad (11)$$

La cantidad α es el coeficiente de la resistividad con la temperatura media, en una región cuya temperatura se encuentra entre los puntos utilizados para determinar la pendiente. Podemos multiplicar ambos lados de la ecuación (11) por $\frac{l}{A}$, y de acuerdo a la ecuación (10) obtenemos la dependencia de la resistencia con la temperatura

$$R = R_o (1 + \alpha (T - T_o)) \quad (12)$$

Para el cobre a temperatura ambiente tenemos los valores de:

$$\alpha = 3.82 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}, \rho = 1.69 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$$

2.3 Sensores de Temperatura Eléctricos

Los sensores en esta categoría convierten un estímulo físico, como la temperatura, en una señal eléctrica que depende de ésta. Usualmente están basados en un cambio en su resistencia, capacitancia o inductancia, que resulta de la aplicación del estímulo. Su señal de respuesta en algunos casos puede ser obtenida directamente con la ayuda de un multímetro, como es el caso de la resistencia. Los termómetros de resistencia metálicos pueden ser usados en un rango de -270°C a más de 1000°C [8].

2.4 Sensores de Temperatura Resistivos

Un termómetro de resistencia consiste en un elemento resistivo que al exponerse a la temperatura la resistencia varía (**ec 12**), el cambio de resistencia es registrada en estados sucesivos. Como podemos observar (**ec 11**), la resistividad de los metales se incrementa con la temperatura.

Capítulo 3

Fabricación del sensor

En este capítulo presentamos el desarrollo experimental para la elaboración del sensor de temperatura de película delgada de cobre.

3.1 Elaboración

Se cortaron 11 placas de acero inoxidable cuadradas, con una dimensión de $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ y un grosor de 0.40 mm, como se muestra en la figura **3.1.a**. Las placas de acero se cubrieron de una fotoresina por medio de la técnica de sping coating cubriéndolas uniformemente. Este procedimiento es para evitar contacto eléctrico entre el sustrato (placas metálicas) y la película de cobre que se deposita en éstos. La velocidad angular a la cual se trabajó fue de 60 rps (ver figura **3.1b**). Posteriormente, dicha capa se dejó secar por seis minutos.



Figura 3.1.a. Placa de acero recortada.



Figura 3.1.b. Aplicación de fotoresist.

Una vez que se terminó de aplicar la resina se introducen las placas en el horno a una temperatura de 150 ° C, para secar y endurecer la película durante 15 minutos. Para comprobar si las placas están aisladas eléctricamente se verifico si había continuidad sobre su superficie con un multímetro Hp 34401A.

3.2 Evaporación

El sustrato ya preparado con su aislante eléctrico fue sujeto, por medio de unas pinzas pequeñas, a una mascarilla que sirve de antifaz. Además, junto colocamos un sustrato de vidrio, el cual sirve de testigo para medir posteriormente el grosor de la película metálica de cobre depositada en el sustrato (**figura 3.2.1a**). Todo el arreglo fue colocado a una distancia de 19 cm del filamento (**figura 3.2.1b**), dentro de un sistema de vacío por difusión. Los depósitos se hicieron por pares, dado que se contaba solo con dos mascarillas.

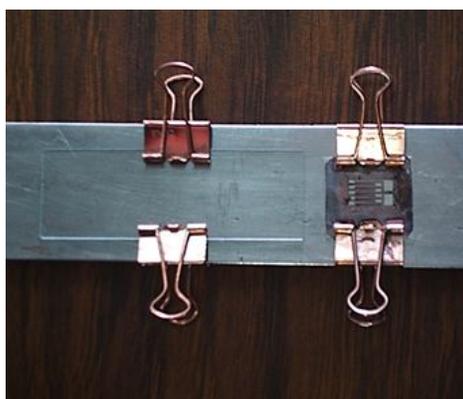


Figura 3.2.1a. Pinzas sosteniendo sustrato preparado y la placa antifaz.

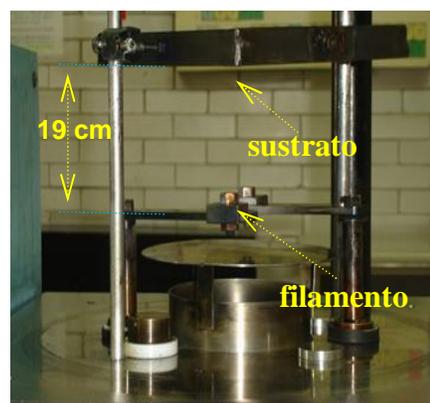


Figura 3.2.1b. Montaje.

Una vez cerrado el sistema de vacío se evacúa la cámara de evaporación, se hace pasar una corriente eléctrica a través del filamento, alimentada por medio de la fuente de corriente del sistema, se incrementa ésta poco a poco hasta llegar a 76 A, valor en el cual se funde el cobre que se colocó previamente en el filamento, el cobre empleado tiene una pureza de 99.99 %. Se continúa aumentando la corriente hasta 84 A para iniciar el proceso de evaporación, en dicho punto la presión dentro de la campana se estabiliza. El tiempo de depósito T_i se toma para cada muestra durante el proceso de evaporación. Los tiempos de depósito son fundamentales para la valoración del efecto del grosor. Después se disminuye la corriente del filamento a 0 A y se espera de 15 a 20 minutos para que se enfríen las muestras. Posteriormente se admite aire y se abre la cámara de evaporación para desmontar el arreglo, obteniendo con ello los sensores elaborados, figura 3.2.2.



Figura 3.2.2. Sensor elaborado.

Con los depósitos terminados realizamos una caracterización geométrica de cada sensor. Para ello, empleamos un microscopio viajero de la marca The Precision Tool & Instrument de Thornton Heath Surrey para medir sus dimensiones, este tiene una resolución de 0.01 mm.

3.3 Tamaño del sensor

Cada sensor tiene básicamente un tamaño global en donde existen tres zonas: zona activa, zona de contactos y la zona muerta, como se muestra en la figura 3.3.1

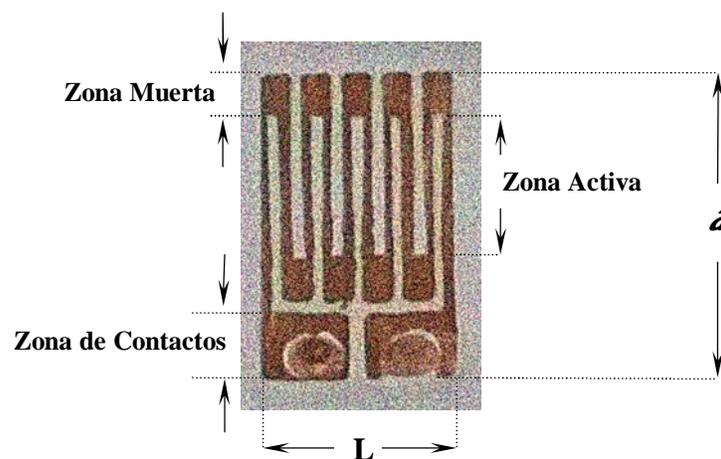


Figura 3.3.1 Zonas importantes de los sensores.

De los sensores que se fabricaron seleccionamos 11, los cuales se consideraron los más aceptables para su caracterización. Como un proceso de estandarización geométrica el siguiente paso fue saber si los sensores realizados tienen las mismas dimensiones.

En primera instancia para cada sensor medimos el ancho (d) y el largo (L), para así obtener el área global. Para obtener dichas dimensiones, empleamos el microscopio viajero. Los datos se muestran en la tabla 3.1.

Mascarilla	Sensor	T_i (s)	$d \pm 0.01$ (mm)	$L \pm 0.01$ (mm)	Área (mm ²)
1	1	60	7.38	12.43	91.73
2	2	60	7.34	12.41	91.09
2	3	60	7.30	12.48	91.10
1	4	60	7.24	12.39	89.70
2	5	60	7.24	12.39	89.70
1	6	75	7.24	12.35	89.41
1	7	75	7.25	12.31	89.25
1	8	75	7.29	12.40	90.40
2	9	75	7.25	12.36	89.61
2	10	75	7.25	12.46	90.34
1	11	90	7.28	12.35	91.14
	Promedio		7.28	12.39	90.28
	Desviación Estándar		0.05	0.05	0.79

Tabla 3.1. Dimensiones del sensor.

En la tabla 3.1, indicamos la mascarilla que empleamos para realizar cada uno de éstos. Como podemos apreciar en ésta, el área entre los sensores fabricados es muy parecida independientemente de la mascarilla empleada, es decir para fines prácticos pueden considerarse geoméricamente iguales.

3.4. Dimensiones de la zona muerta y zona de contactos

Las dimensiones de la zona muerta y la de contactos son las menos importantes para el registro de la temperatura, por lo cual nos interesa conocer solo sus dimensiones. Empleamos el mismo microscopio viajero para obtener las dimensiones de cada zona, los datos obtenidos se muestran en la tabla 3.4.1. El valor **X** corresponde al valor horizontal y el valor **Y** al vertical respectivamente de cada zona, como se indica en la figura 3.4.1.



Figura 3.4.1 Ubicación de los valores numéricos de cada zona.

Los datos que obtenemos son los siguientes:

Sensor	T _i (s)	Zona Muerta		Zona de Contactos	
		X± 0.01 (mm)	Y± 0.01 (mm)	X± 0.01 (mm)	Y± 0.01 (mm)
1	60	1.04	1.73	3.43	2.47
2	60	1.03	1.74	3.42	2.50
3	60	1.08	1.75	3.42	2.48
4	60	1.03	1.82	3.35	2.40
5	60	1.02	1.68	2.86	2.53
6	75	1.02	1.76	3.40	2.46
7	75	1.03	1.75	3.37	2.41
8	75	1.01	1.74	3.38	2.50
9	75	1.01	1.74	3.35	2.47
10	75	1.02	1.79	3.35	2.51
11	90	1.05	1.73	3.43	2.43
Promedio		1.03	1.75	3.34	2.47
Desv Estandar		0.02	0.03	0.16	0.04

Tabla 3.2. Dimensiones de la zona muerta y zona de contactos.

De acuerdo a los datos de la tabla 3.2, podemos observar que para la zona muerta, tanto en X como en Y sus tamaños son casi iguales para los 11 sensores. De la misma manera se tienen medidas en X como en Y en la zona de contactos.

3.5. Dimensiones de la zona activa

Para obtener las dimensiones de la zona activa, consideramos los 10 hilos que constituyen ésta zona. Para su caracterización geométrica, primero se enumeran de izquierda a derecha, de acuerdo a la figura 3.4.1. Los valores correspondientes al ancho(X) y largo (Y) de cada hilo se obtienen con el microscopio. Los datos que se obtuvieron se presentan en la tabla 3.3.

sensor		HILO									
N _o	mm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	X	0.28	0.31	0.24	0.28	0.21	0.27	0.20	0.29	0.19	0.28
	Y	8.23	5.79	5.79	5.62	5.70	5.82	5.80	5.85	5.76	8.17
2	X	0.30	0.24	0.19	0.25	0.34	0.23	0.20	0.27	0.24	0.22
	Y	8.14	5.80	5.86	5.88	5.87	5.85	5.84	5.81	5.70	8.12
3	X	0.30	0.34	0.30	0.36	0.26	0.25	0.35	0.30	0.27	0.38
	Y	8.09	5.69	5.89	5.91	5.91	5.95	5.88	5.93	5.88	8.14
4	X	0.31	0.24	0.35	0.16	0.26	0.25	0.33	0.14	0.31	0.18
	Y	8.20	5.88	5.90	5.92	5.87	5.90	5.81	5.83	5.80	8.22
5	X	0.22	0.28	0.25	0.25	0.20	0.32	0.23	0.20	0.23	0.28
	Y	8.23	5.93	5.93	5.91	5.90	5.91	5.81	5.82	5.89	8.14
6	X	0.32	0.24	0.33	0.22	0.25	0.33	0.19	0.27	0.12	0.19
	Y	8.18	5.78	5.87	5.87	5.81	5.83	5.89	5.83	5.85	8.22
7	X	0.35	0.21	0.26	0.29	0.22	0.28	0.24	0.30	0.19	0.32
	Y	8.29	5.86	5.89	5.87	5.86	5.83	5.88	5.80	5.89	8.26
8	X	0.28	0.22	0.26	0.17	0.26	0.26	0.20	0.18	0.24	0.25
	Y	8.21	5.84	5.89	5.87	5.87	5.85	5.87	5.90	5.91	8.26
9	X	0.21	0.28	0.22	0.26	0.18	0.30	0.20	0.19	0.21	0.22
	Y	8.26	5.96	5.75	5.92	5.92	5.95	5.93	5.92	5.88	8.14
10	X	0.25	0.23	0.28	0.23	0.25	0.24	0.21	0.29	0.25	0.26
	Y	8.12	5.76	5.90	5.91	5.93	6.01	5.98	5.93	5.92	8.14
11	X	0.24	0.33	0.25	0.28	0.19	0.33	0.23	0.25	0.21	0.31
	Y	8.29	5.94	5.88	5.90	5.87	5.93	5.92	5.89	5.90	8.26

Tabla 3.3 Dimensiones de los hilos de cada sensor.

Nuevamente, de la información que se presenta en la tabla 3.3, podemos afirmar que las dimensiones que presentan los hilos entre los sensores son muy parecidos. Con esto y la información obtenida de los resultados presentados en la tabla 3.1 y 3.2, podemos afirmar que los sensores para fines prácticos son dimensionalmente iguales.

3.6 Relación Espesor, Resistencia y Tiempo de cada sensor.

Otros parámetros fundamentales que se midieron fueron, el grosor de la película y la resistencia eléctrica. El primero se midió con un microscopio de sonda de barrido (figura 3.6.1a). La resistencia eléctrica se midió con un multímetro Hp 34401A (figura 3.6.1b), los datos se presentan en la tabla 3.4.

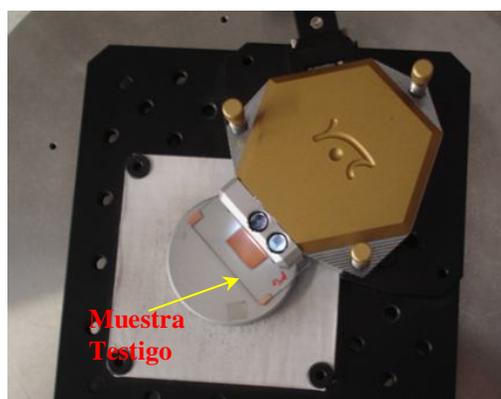


Figura 3.6.1.a. Microscopio de sonda de barrido.



Figura 3.6.1.b. Medición de la resistencia.

Los datos que obtenemos del espesor y la resistencia, se colocan en la tabla 3.4.

Sensor	T _i (s)	Resistencia (Ω)	Espesor (nm)
1	60	8.43	670.90
2	60	97.04	71.02
3	60	11.82	169.60
4	60	94.04	69.54
5	60	49.41	159.50
6	75	171.41	57.12
7	75	9.70	220.90
8	75	4.34	2225.00
9	75	4.66	1266.00
10	75	9.36	342.90
11	90	5.11	1266.00

Tabla 3.4 Datos obtenidos de resistencia y espesor

En la figura 3.6.2 se presenta la gráfica de la relación espesor contra tiempo (T_i) de acuerdo con los resultados que se presentan en la tabla 3.4.

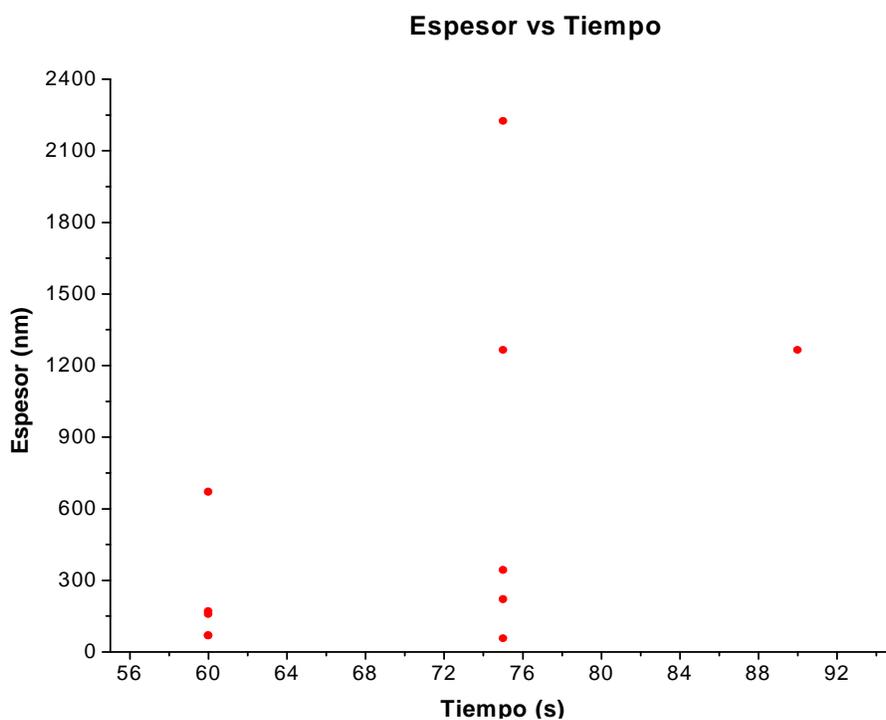


Figura 3.6.2 Comportamiento del espesor en función del tiempo.

Como podemos observar en ésta, para un mismo tiempo existen distintos espesores, lo cual experimentalmente nos dice que necesitamos un mejor control del tiempo de depósito, dado que no contábamos con un controlador de grosor. En la figura 3.6.3 se muestra la gráfica del comportamiento de la resistencia en función del espesor.

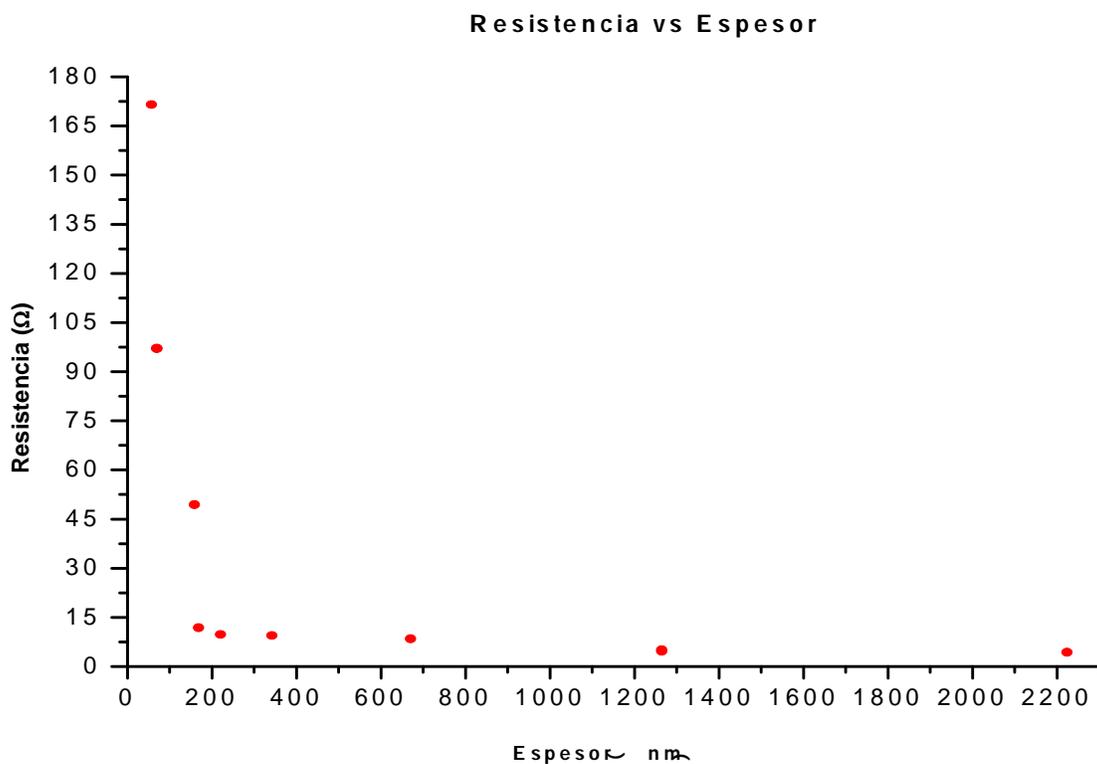


Figura 3.6.3 Gráfica de la resistencia en función del espesor.

En ésta se observa que el comportamiento de la resistencia depende inversamente del espesor, es decir, conforme el espesor aumenta, la resistencia disminuye tal y como se esperaba de la ecuación 10.

CAPÍTULO 4

Caracterización de los sensores en función de la temperatura

En este capítulo presentamos los resultados obtenidos de la respuesta a la temperatura de los sensores de película delgada de cobre.

4.1 Pruebas de resistencia contra temperatura

Para cada sensor elaborado se midió el cambio de su resistencia al ser sometido a un cambio en la temperatura. Para este proceso, primero le conectamos un par de cables de cobre (calibre 40) con pintura de plata a cada sensor, como se observa en la figura 4.1, es importante dejar secar por un determinado tiempo para garantizar un buen contacto eléctrico entre los alambres y el sensor.

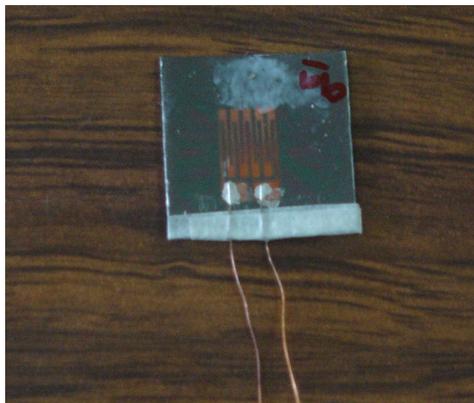


Figura 4.1 Sensor con terminales.

El siguiente paso es proporcionarle al sensor cambios en la temperatura, de tal forma que dicho cambio sea gradual y no cambie de manera abrupta. Para esto, se utiliza un resistor de potencia alimentado con una fuente de voltaje, para calentar el sustrato de acero inoxidable y calentar por ende la película de cobre (figura 4.2). El sensor se conecta a un multímetro Hp 34401A, para registrar sus cambios en la resistencia.

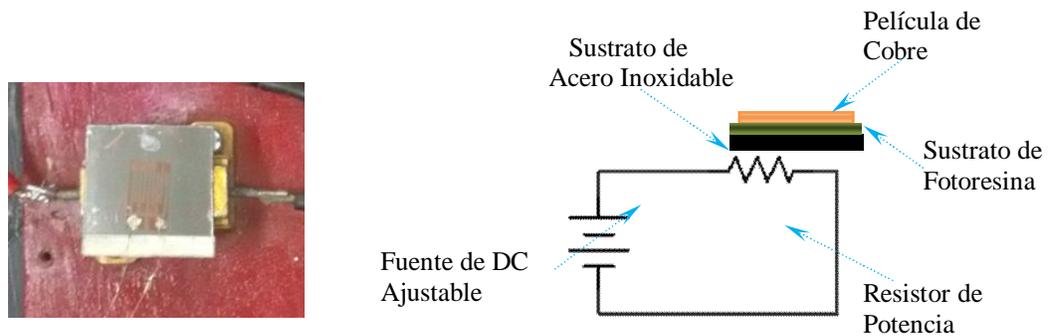


Figura 4.2 Montaje del sensor y diagrama del resistor de potencia.

Para medir la temperatura se usa un diodo marca Omega serie CY7-SD, en una configuración a cuatro puntas, que se alimenta con una fuente de corriente de $10 \mu\text{A}$ (figura 4.3).

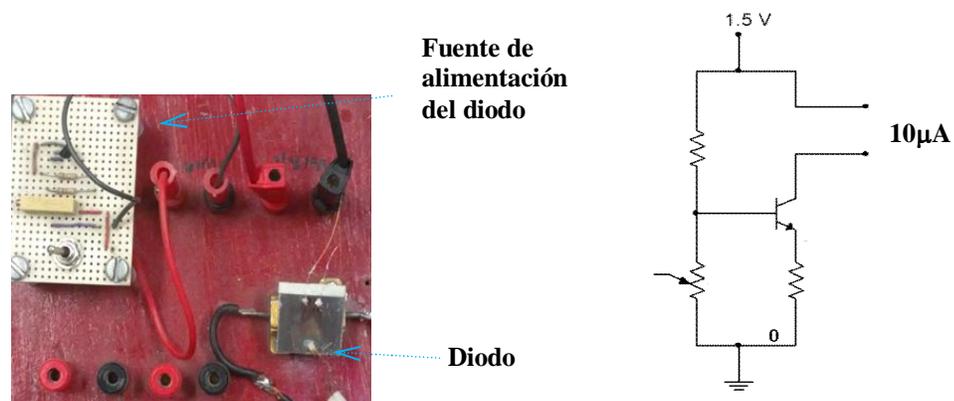


Figura 4.3 Fuente y diagrama de alimentación del diodo.

Este se coloca sobre el sustrato con grasa, para garantizar un buen contacto térmico y el diodo se conecta a otro multímetro Hp 34401A para registrar sus cambios de voltaje, el software es el encargado de transformar este voltaje en una temperatura, el dispositivo se muestra en la figura 4.4.

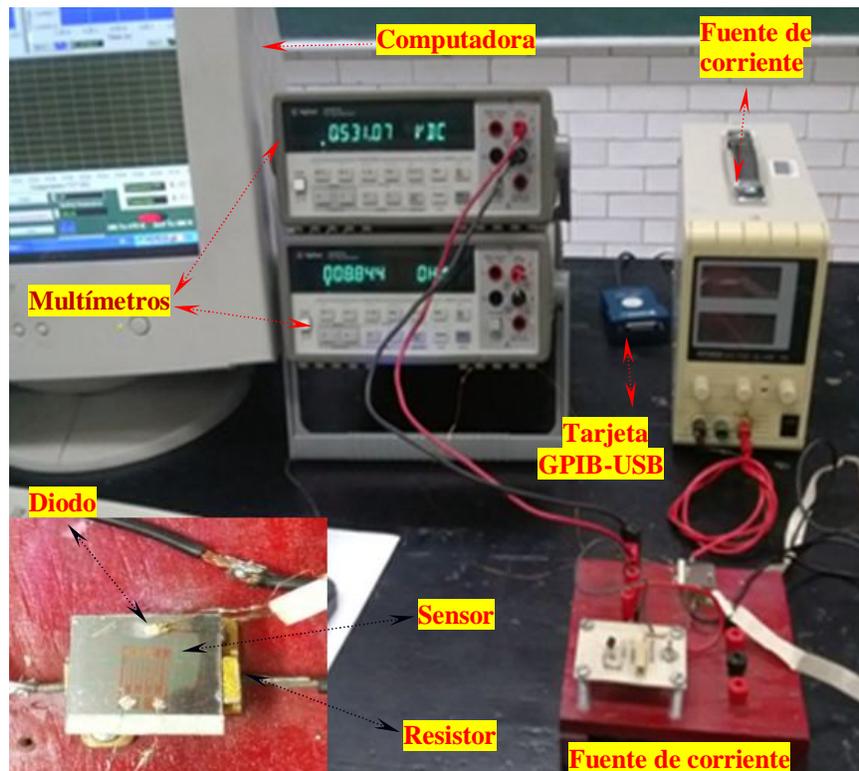


Figura 4.4 Montaje experimental.

Los dos multímetros se controlan por medio de una tarjeta de adquisición de datos GPIB-USB marca NATIONAL INSTRUMENT y se comunican a una computadora. Se emplea un programa elaborado en Labview 6.1 para visualizar la información de resistencia y

temperatura. El programa en la computadora tiene la carátula de la figura 4.5.

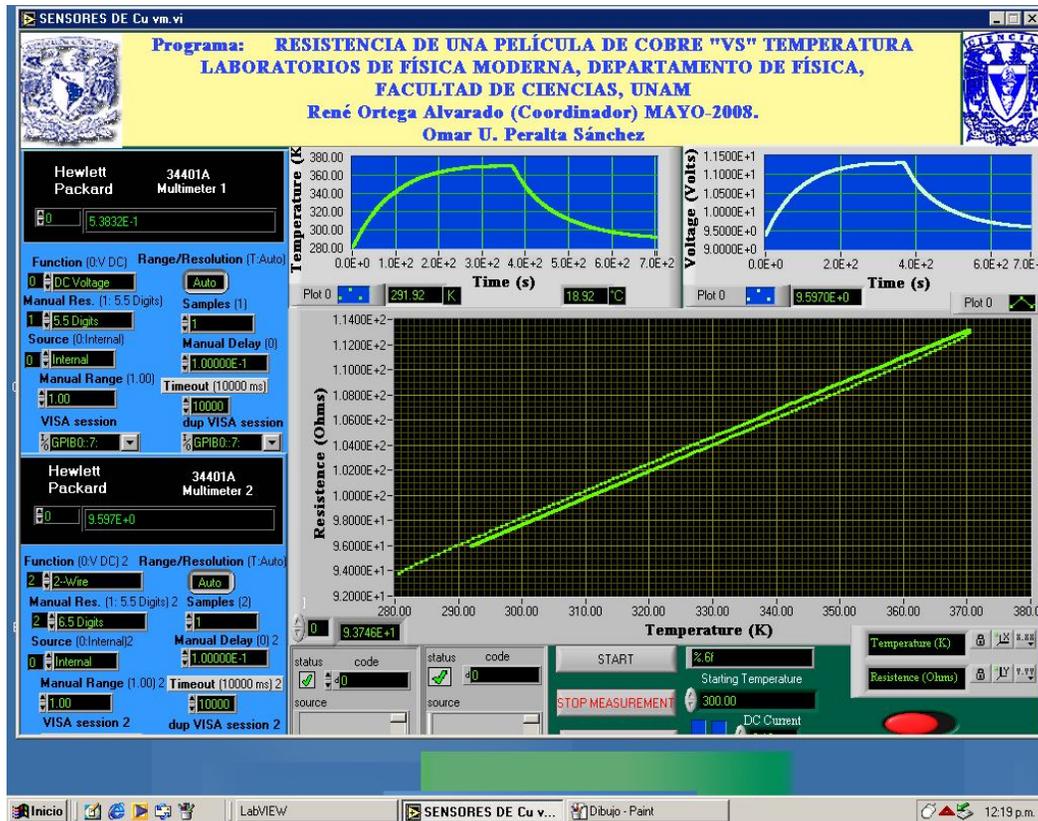


Figura 4.5 Imagen del programa empleado.

En la carátula del programa se observan tres gráficas en la parte superior aparece el comportamiento de la resistencia y la temperatura en función del tiempo. En la parte inferior, aparece el comportamiento de la resistencia en función de la temperatura. Una vez listo el dispositivo se hace la adquisición de datos variando la corriente que alimenta el resistor de potencia. Se realiza la toma de datos para cada sensor observando un comportamiento similar como el que se muestra en la figura 4.5. Los datos son grabados en un archivo en ASCII.

Con el programa OriginPro 8, se realiza el análisis de la gráfica que se presenta en figura 4.6.

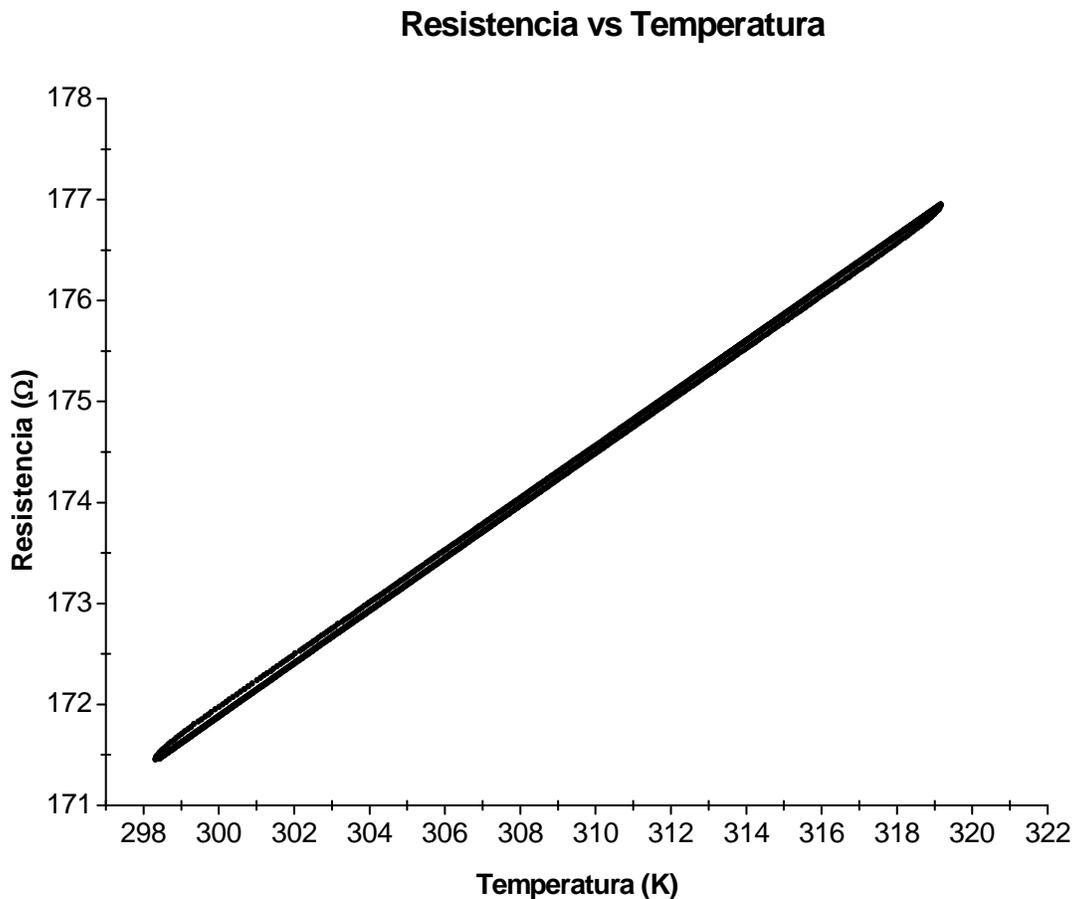


Figura 4.6 Comportamiento térmico de sensor de película delgada.

Como podemos observar, la gráfica de resistencia contra temperatura es una línea recta, es decir, tiene un comportamiento lineal. Comienza en 298 K con un valor de resistencia de 171.5 Ω, va ascendiendo suavemente hasta obtener un valor de 319 K con su respectivo valor de resistencia 177 Ω.

4.2 Caracterización Matemática de los Sensores

Realizando un ajuste a la curva de la figura 4.6, empleando el programa OriginPro 8, obtenemos un comportamiento lineal cuya ecuación es:

$$R = R_o + 0.264 (T - T_o) \quad (13)$$

donde:

$$R_o = 92.637 \, \Omega \quad m = 0.264 \, \Omega K^{-1} \quad r^2 = 0.99992$$

El valor r^2 corresponde al coeficiente de correlación. Los sensores los colocaremos de acuerdo al valor de la resistencia que aparece en la tabla 3.4. Colocaremos los sensores 1, 3, 7, 8, 9, 10 y 11, por tener el valor de la resistencia más parecido, como se muestra en la figura 4.7.

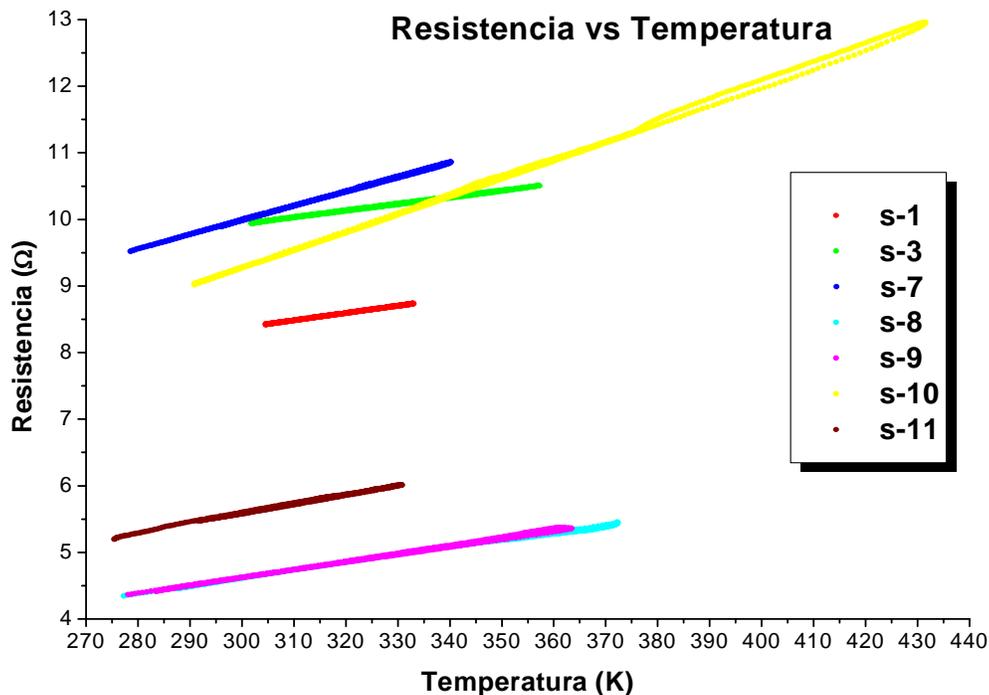


Figura 4.7 Curvas de los diferentes sensores fabricados.

Del análisis del programa OriginPro 8, tenemos que la ecuación tiene la forma general para los sensores fabricados y que es del tipo:

$$R = R_o + M (T - T_o) \quad (13)$$

Aplicando el mismo procedimiento que el realizado a la gráfica de la figura 4.6, a los sensores de la figura 4.7, presentamos los datos de los parámetros de la recta que representa el comportamiento de algunos sensores, así como los tiempos de depósito y coeficiente de correlación en la tabla 4.1. Adicionalmente calculamos el valor de α , para cada sensor.

Sensor	Tiempo (s)	Resistencia (Ω)	R_o (Ω)	M (ΩK^{-1})	$\alpha \times 10^{-3}$ (K^{-1})	r^2
1	60	8.43	5.108	0.011	1.30	0.99992
3	60	11.82	6.887	0.010	0.85	0.99914
7	75	9.70	3.412	0.022	2.27	0.99982
8	75	4.34	1.240	0.011	2.53	0.9986
9	75	4.66	1.021	0.012	2.58	0.99894
10	75	9.36	0.996	0.027	2.88	0.99898
11	90	5.11	1.392	0.014	2.74	0.99845

Tabla 4.1 Datos del análisis lineal para distintos sensores.

Los sensores restantes aparecen en la figura 4.8, de los cuales tenemos;

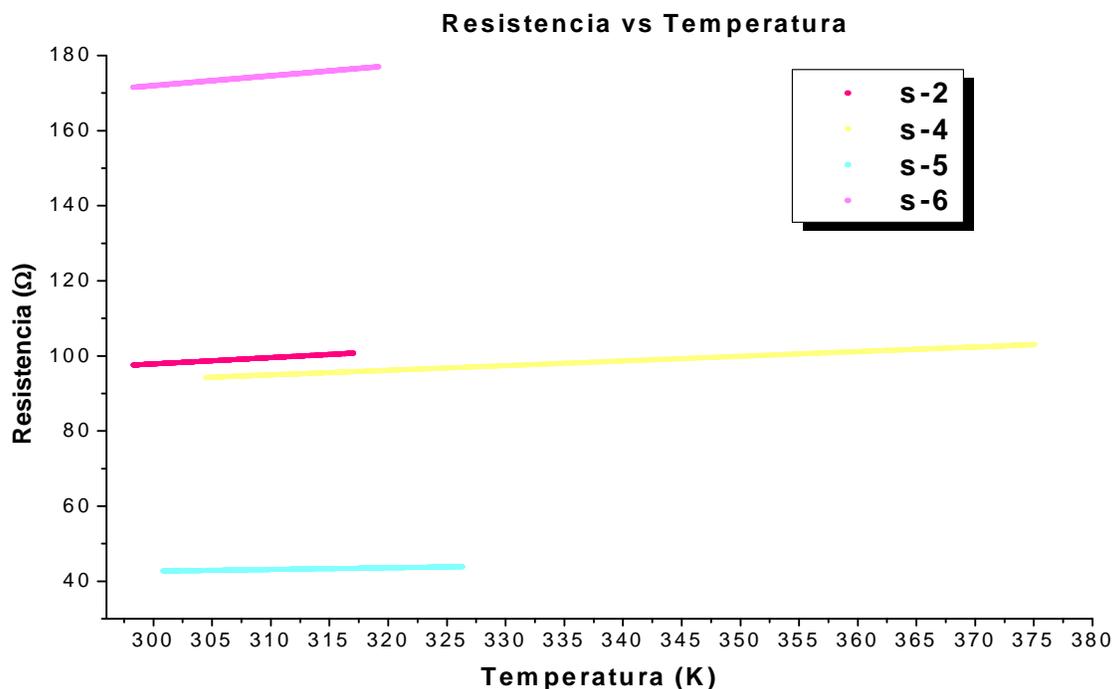


Figura 4.8 Curvas para diferentes sensores.

Las curvas tienen el mismo comportamiento lineal dado por la ecuación 13. Sin embargo realizamos el análisis de las curvas con el programa OriginPro 8, del cual obtenemos los datos de la tabla 4.2.

Sensor	Tiempo (s)	Resistencia (Ω)	R ₀ (Ω)	M (ΩK ⁻¹)	α x 10 ⁻³ (K ⁻¹)	r ²
2	60	97.04	47.427	0.168	1.73	0.99998
4	60	94.04	56.367	0.124	1.32	0.99988
5	60	49.41	29.085	0.045	0.91	0.99987
6	75	171.41	92.637	0.264	1.54	0.99992

Tabla 4.2 Análisis lineal para los sensores restantes.

4.3 Tiempo de Respuesta del Sensor

De acuerdo al programa de adquisición mencionada en la sección 4.1, la captura de datos es a razón de un dato por segundo, por lo tanto, podemos observar de qué forma se comportan la temperatura y la resistencia en función del tiempo. Emplearemos el sensor 1, para observar su comportamiento en función del tiempo. Para dicho sensor, la temperatura en función del tiempo aparece en la figura 4.9.

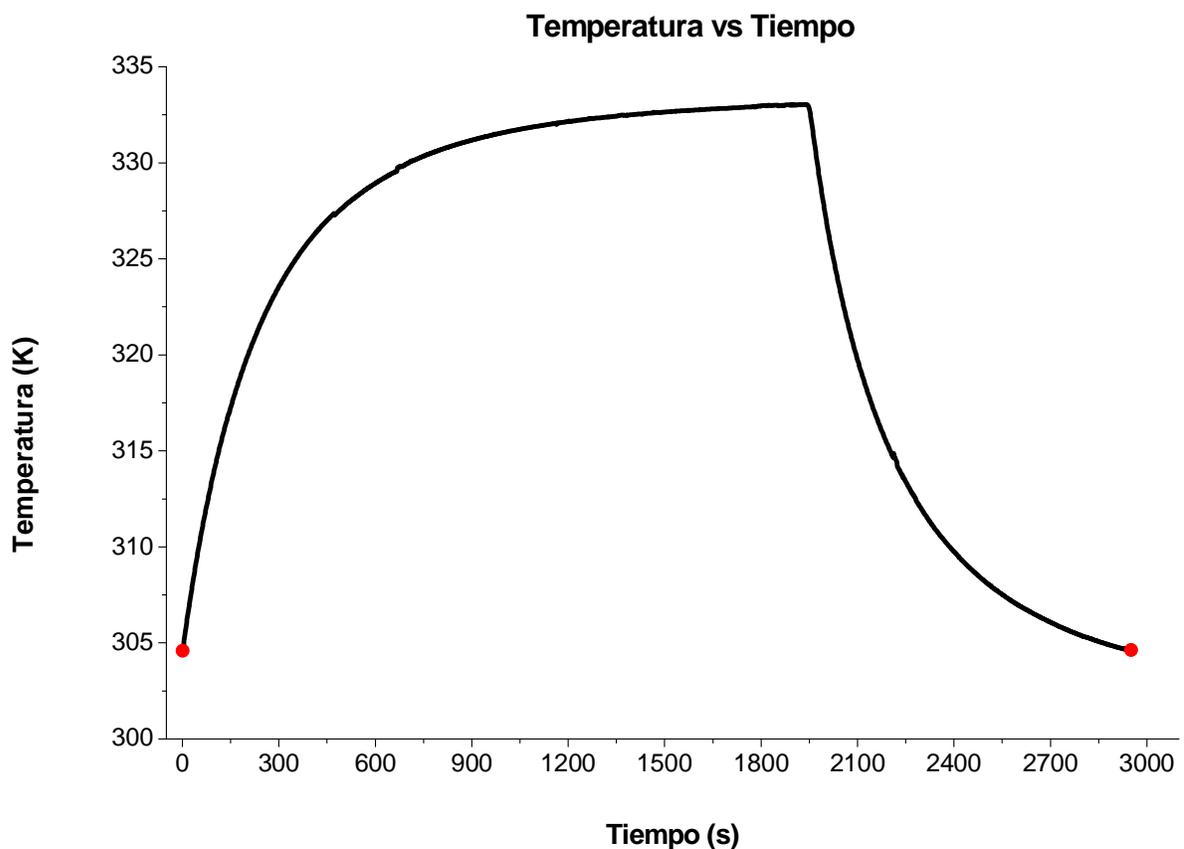


Figura 4.9 Temperatura en función del tiempo.

La figura 4.9 nos presenta el aumento en la temperatura, la cual se mantiene creciendo a un ritmo uniforme. Empezamos con una temperatura inicial de **304.581 K**, después podemos observar como el sensor alcanza su de temperatura máxima **333.0413 K**, para luego descender paulatinamente y alcanzar un valor mínimo. Cuando el sensor va aumentando su temperatura después de un tiempo de 470 segundos alcanza el 80% de dicha lectura **327.3403 K**. El comportamiento de los otros sensores es de la misma forma, colocamos juntos aquellos sensores que están en el mismo rango de tiempo, como se observa en la figura 4.10 y 4.11.

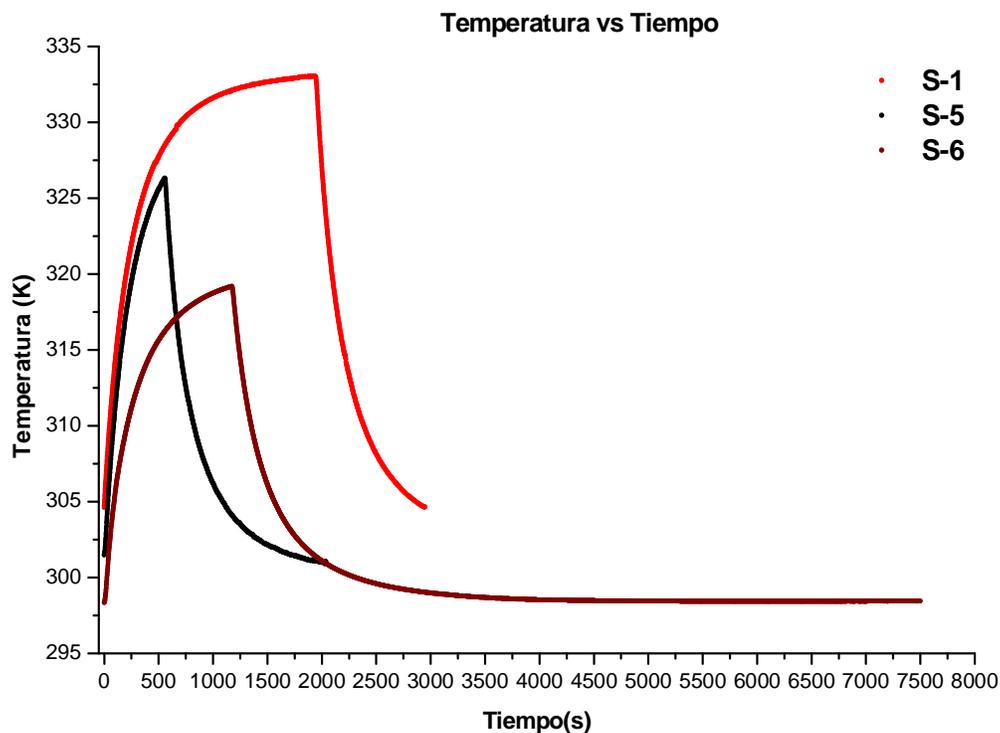


Figura 4.10 Temperatura contra tiempo para los sensores 1, 5, 6.

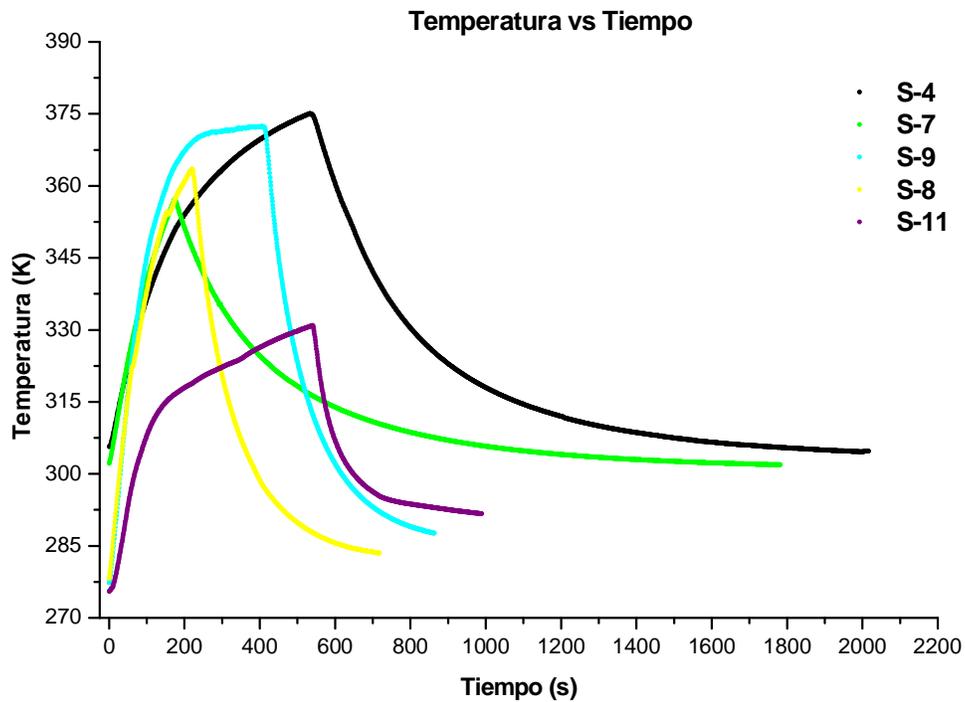


Figura 4.11 Temperatura contra tiempo para los sensores 4, 7, 8, 9, 11.

Como podemos observar en las figuras 4.10 y 4.11, hemos colocamos distintos sensores para poder observar su comportamiento temporal, él cual es muy parecido. En la tabla 4.3, registramos el tiempo ($t_{\%}$) que tarda cada uno de los sensores en alcanzar el 80% de su temperatura máxima ($T_{\%}$).

Sensor	T% (K)	t% (s)
1	327.340	470
2	313.295	471
3	346.079	123
4	360.946	271
5	321.244	303
6	315.006	452
7	327.890	3061
8	353.371	126
9	346.373	124
10	403.605	383
11	330.854	541

Tabla 4.3. Tiempo que tarda en alcanzar el 80 % de Temperatura.

El comportamiento de la resistencia en función del tiempo también lo podemos observar. Con la lectura de los datos obtenidos por el programa realizamos gráfica de la figura 4.12. El comportamiento resistivo del sensor se mantiene de la misma forma que el de la temperatura. Se aproxima suavemente a un valor máximo de resistencia **8.7389 Ω** , para luego ir descendiendo hasta su valor mínimo.

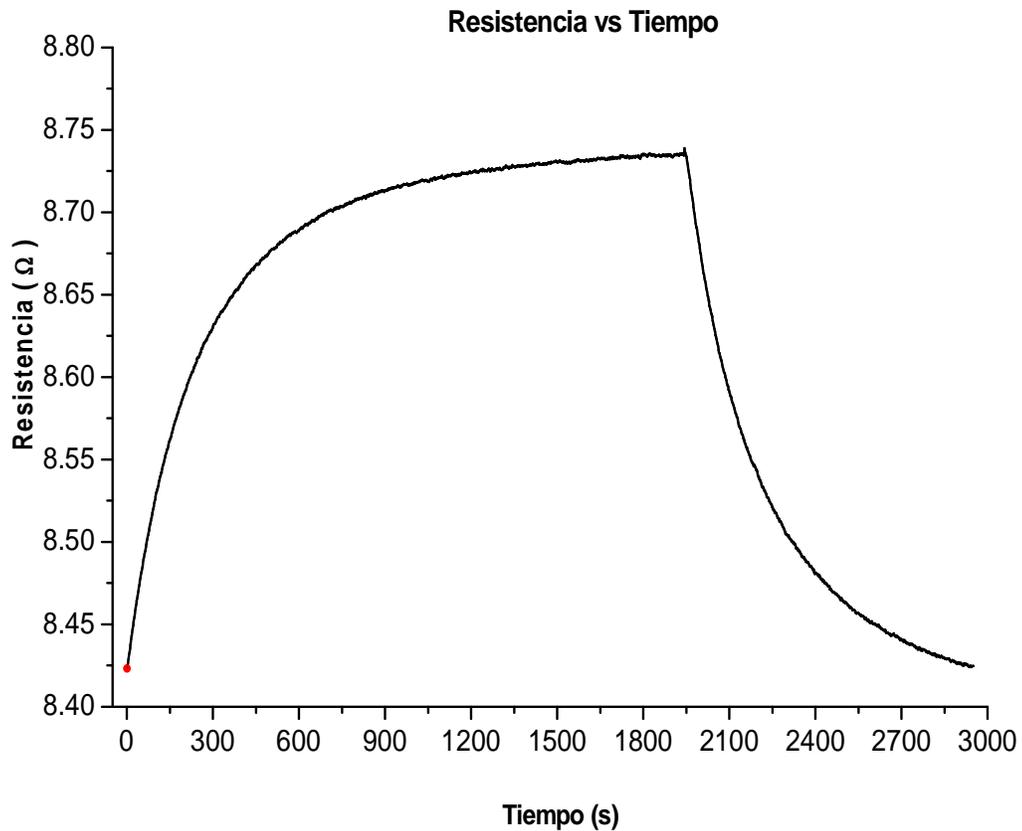


Figura 4.12 Resistencia en función del tiempo.

De la misma manera podemos colocar las gráficas de los demás sensores, de acuerdo al tiempo en el cual realizan su lectura, de los cuales obtenemos las figuras 4.13 y 4.14.

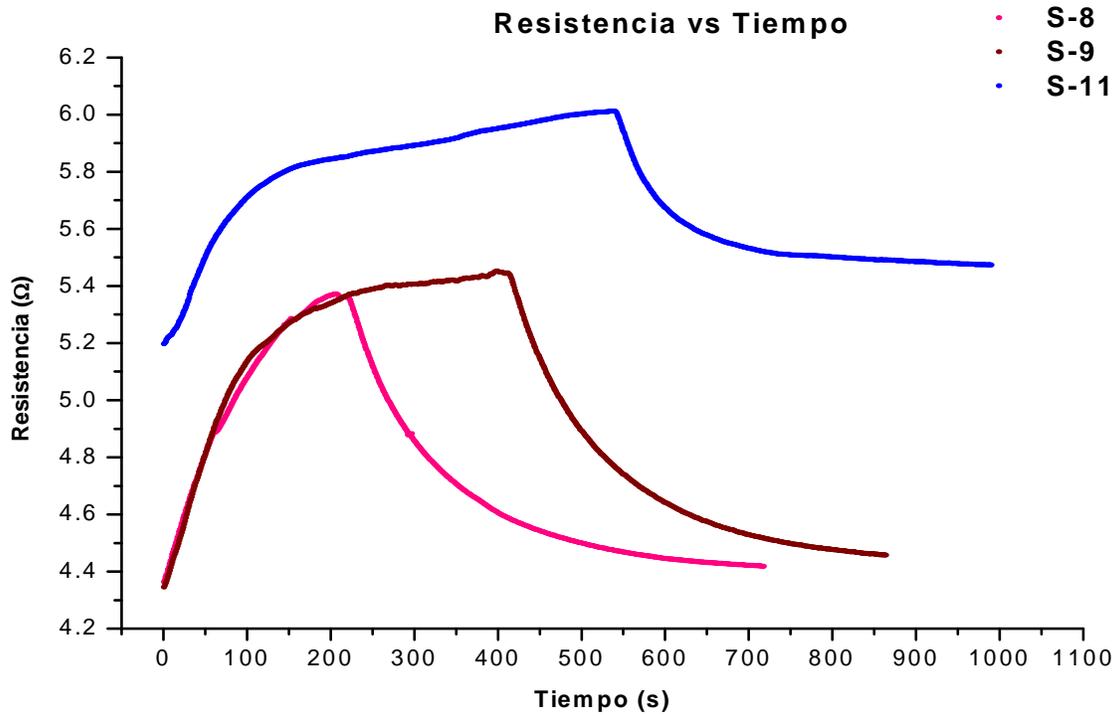


Figura 4.13 Resistencia en función del tiempo para los sensores 8, 9, 11.

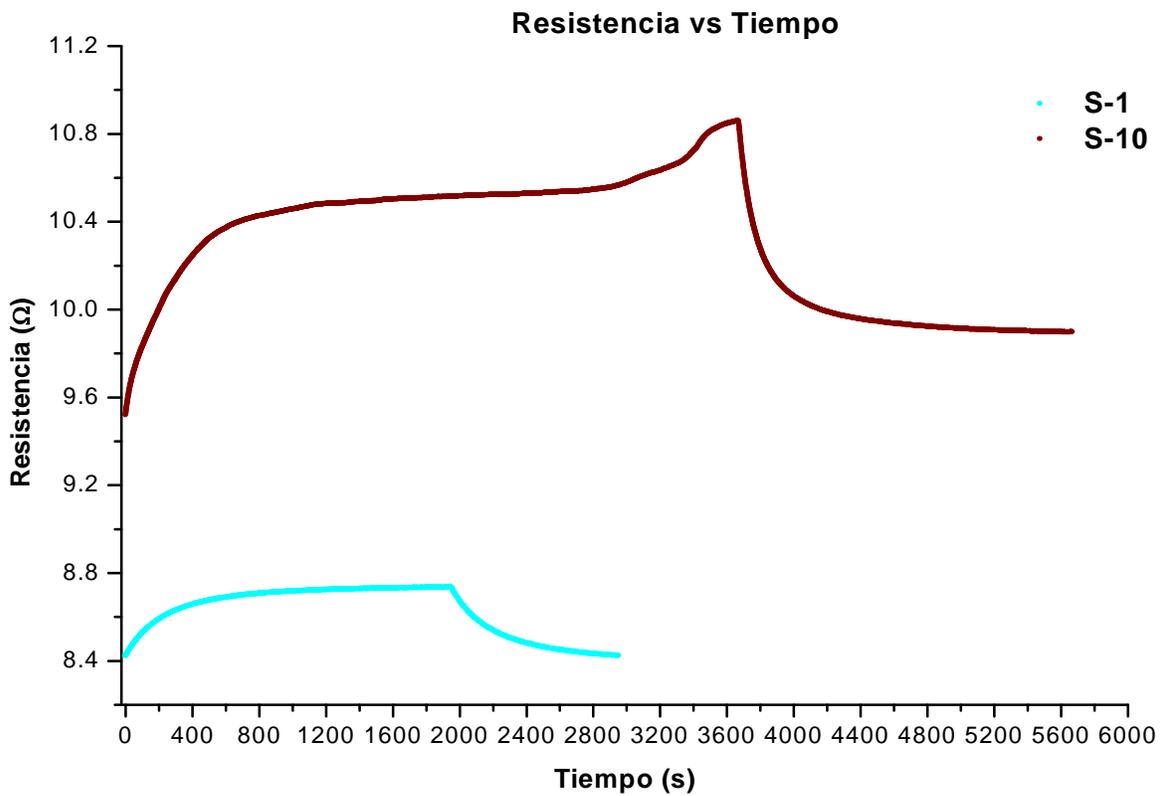


Figura 4.14 Resistencia en función del tiempo para los sensores 1, 10.

En la tabla 4.5 colocamos la resistencia máxima (R_{MAX}) y el tiempo (t) al cual se alcanza dicho valor, para cada uno de los sensores.

Sensor	R_{MAX} Ω	t s
1	8.739	1944
2	100.653	7151
3	10.505	176
4	102.974	535
5	43.785	557
6	176.951	1174
7	10.861	3668
8	5.452	399
9	5.371	205
10	12.968	433
11	6.012	537

Tabla 4.5 Resistencia máxima de los sensores.

Cada uno de los sensores alcanza su temperatura máxima en determinado tiempo y después comienza a descender. En la tabla 4.6, colocamos el tiempo total (t_T), empleado por cada sensor para completar un ciclo.

Sensor	t_T s
1	2951
2	13324
3	1783
4	2017
5	2040
6	7502
7	5666
8	864
9	718
10	897
11	990

Tabla 4.6. Tiempo total de cada sensor.

En cada uno de estos tiempos el sensor completa su ciclo de lectura, esto nos permite obtener el comportamiento para cada uno. Esto concluye las pruebas experimentales realizadas a cada sensor.

CONCLUSIONES

Nuestros sensores tienen una forma característica; el procedimiento seguido en su elaboración nos permitió lograr cierta regularidad en su geometría, ya que al medir cada una de las zonas que los conforman se observa que dentro de los límites de la incertidumbre son muy parecidos. Una característica que es importante mencionar, es el comportamiento asintótico que obtenemos de la resistencia y el espesor (figura 3.6.3), que en función de la temperatura, se comporta como lo predice la ecuación (10). Cuando separamos los sensores (tabla 4.1 y tabla 4.2), de acuerdo al valor de la resistencia, podemos constatar que los valores de las pendientes son muy parecidos, lo cual habla de la sensibilidad que posee, cada grupo de sensores. Qué decir de la regresión lineal, con ajustes de 0.99, lo cual representa un comportamiento lineal bueno. Las gráficas de temperatura contra tiempo y de resistencia contra tiempo, muestran que el comportamiento de la temperatura y la resistencia en función del tiempo es suave, es decir no hay cambios abruptos que perturben el ascenso y descenso de la curva. En parte, porque el sistema se encuentra aislado del exterior y por la resistencia que proporciona el aumento en la temperatura. El tiempo que emplea cada sensor para

llegar a su temperatura máxima no es el mismo ya que al llegar a un valor de corriente aplicado a la resistencia, por la inercia seguía su lectura hasta comenzar su descenso. El valor de α encontrado experimentalmente, no es muy confiable. Por lo anteriormente expuesto, podemos concluir que los sensores de película delgada de cobre pueden ser empleados para medir la temperatura adecuadamente. Podemos terminar con ciertas observaciones que pueden servir para trabajos posteriores. El material empleado como soporte del sustrato es acero inoxidable, y podríamos emplear diferentes soportes y ver el comportamiento de cada uno en la transmisión del calor. Para recubrir el sustrato de resina, empleamos el método de spin-coating, para lograr una capa uniforme. Dicho método podría ser mejorado e incluso se podría poder medir el tamaño del espesor del sustrato con el microscopio. Variando las revoluciones o modificar la forma del dispositivo para lograr optimizar la cantidad de foto-resina aplicada y así obtener mejores resultados. El depósito del sensor se realizó a una distancia de 19 cm del filamento, y se deja para investigaciones posteriores cambiar la distancia del filamento y obtener la distancia óptima. El tiempo de los depósitos es alrededor de 1 minuto, pero sería conveniente implementar un dispositivo que nos permita controlar de manera más eficiente el tiempo y la cantidad de

material depositado. Controlar el tiempo nos permitiría establecer una relación entre este y la distancia al filamento. Tal vez podríamos trabajar alrededor de otro tiempo para depositar, encontramos que alrededor de 2 minutos, hay buenos prospectos, lo cual se deja para investigaciones posteriores. Soldar los alambres con pintura de plata podría ser sustituido por colocar previamente los alambres de alguna forma y hacer el depósito para obtener una sola pieza entre el sensor y los alambres. Podríamos trabajar con el aumento o disminución de la temperatura y poder encontrar las condiciones de operación extrema. Es decir, cuál sería la temperatura máxima y la mínima a la cual nuestro sensor puede operar de manera normal sin sufrir alguna deformación, ruptura o desprendimiento de los alambres de lectura. Encontramos que al ser sometidos a cambios bruscos de temperatura los alambres se despegan, se fractura la película, se comienza a desprender del sustrato, etc. Al realizar la gráfica de espesor contra tiempo, se presentan una serie de puntos que están alineados, es decir para un tiempo en el depósito de la película, tenemos distintos valores de espesor, cuando lo que esperaríamos sería tener el mismo valor, esto afecta el comportamiento de la resistencia. No afecta el comportamiento de nuestros sensores con respecto a la relación lineal

que existe entre la temperatura y la resistencia. Afecta en el sentido de elaborar dos sensores de igual espesor.

Bibliografía

- [1] Fraden Jacob, "Handbook Of Modern Sensors, physics, designs, and applications", Springer-Verlag 1996; cap. 1, pag. 2.
- [2] Carr, Joseph, "Designer's handbook of instrumentation and control circuits", Prentice-Hall 1991; cap. 3, pag. 54-56.
- [3] Milton Ohring, "Materials Science of Thin Films", Academic Press 2001.
- [4] Zemansky W. Mark, "Temperaturas muy bajas y muy altas", Reverte Mexicana 1968, cap. 1.
- [5] Robert P. Benedict, "Fundamentals of Temperatura, Pressure, and Flow Measurements", John Wiley & Sons 1977; cap. 3, 4 y 6.
- [6] Raymond A Serway, "Physics for scientis and Engineers", Thomson Learning Academic Resource Center 2004; cap. 27.
- [7] Colliou McB. Antony, "Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales", Editorial Reverté S.A. 1977; cap. 1.
- [8] Kurt S. Lion, "Instrumentation Scientific Research", McGraw-Hill 1959; cap 2.
- [9] Rober Resnick, "Física Volumen 2", Editorial CECSA, 4ª edición 2002; cap. 29.
- [10] Cutnell & Johnson, "Physics", Editorial Wiley, 7ª edición 2007; cap. 20.
- [11] Richard R. Fletcher and Neil A. Gershenfeld, "Remotely Interrogated Temperature Sensors Based on Magnetic Materials", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 36, No. 5, SEPTEMBER 2000.

[12] Jason D. Sternhagen, Cyle E. Wold, Wade A. Kempf, Matt Karlgaard, Kraig D. Mitzner, Russell D. Mileham, and David W. Galipeau, *Member, IEEE*, "A Novel Integrated Acoustic Gas and Temperature Sensor", *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 2, No. 4, AUGUST 2002.

[13] Chi-Yuan Lee*, Shuo-Jen Lee, and Guan-Wei Wu, "Fabrication of Micro Temperature Sensor on the Flexible Substrate", *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology August 2 - 5, 2007, Hong Kong*.

[14] Satchi Kumari, Alike Khare, "Optical and structural characterization of pulsed laser deposited ruby thin films for temperature sensing application", *Applied Surface Science* 265, 180– 186, November 6, 2012.

[15] W. Tillmann, E. Voglia, J. Herpera, Dirk Biermann, Klaus Pantke, "Development of temperature sensor thin films to monitor turning process", *Journal of Materials Processing Technology* 210, 819–823, January 19, 2010.

[16] Suhao He, Matthew M. Mench, Srinivas Tadigadapa, "Thin film temperature sensor for real-time measurement of electrolyte temperature in a polymer electrolyte fuel cell", *Sensors and Actuators A* 125 (2006) 170–177.

[17] Lisa C. Martin, John D. Wrbanek, and Gustave C. Fralick, "Thin film sensors for surface measurements", *NASA Glenn Research Center, Cleveland 2001, OH 44135*.

[18] J.E. Sundeen y R.C. Buchanan, "Electrical properties of nickel-zirconia cermet films for temperature and flow-sensor applications", *Sensors and Actuators A* 63 (1997) 33-40.

[19] I.R. Sinclair, "Sensors and Transducers", editorial Newnes, 3a edición, 2001, cap4.

[20] Harry N. Norton, "Sensores y Analizadores", editorial Gustavo Gili 1984.

[21] Humpry Davyd, "Farther Researches on the Magnetic; Phaenomena Produced by Electricity; With Some New Experiments on the Properties of Electrified Bodies in Their Relations to Conducting Powers and Temperature", *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1821.

[22] <http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor>.

[23] <http://nl-cienciasfsicas.blogspot.com/2010/10/termometro.html>.

[24] <http://www.sabelotodo.org/termicos/medirtemperatura.html>.

[25] <http://fredd-garcia.lacoctelera.net/>.