

INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Examen Final (25 de enero de 2017)

APELLIDOS:

NOMBRE:	NIF/NIE:
---------	----------

El examen consta de **CUATRO MÁS UNA** preguntas que se encuentran repartidas entre ambas caras de las hojas. Lea cuidadosamente los enunciados del examen. Si tiene alguna duda, consúltela con el profesor. No se limite a dar la solución del ejercicio pues debe explicar claramente cuáles han sido los pasos que lo han conducido al resultado final. Respete las normas de comportamiento en el examen. Se invalidará cualquier respuesta que, aunque sea correcta, no venga acompañada de un detallado razonamiento lógico.

Se admite el uso de bolígrafo azul y/o negro, calculadora científica básica y reglas para subrayado.

BLOQUE 1: TEORÍA (30 %)

PREGUNTA 1 (30 %)

Escoja TRES de las siguientes cuatro preguntas y respóndalas en no más de media página.

1. Explique en qué tres situaciones es recomendable, o incluso obligatorio, usar amplificadores de aislamiento y optoacopladores.
2. Escriba lo que sepa sobre las LDRs.
3. ¿Cómo funciona un ADC tipo Flash? ¿En qué condiciones deben usarse?
4. Explique las características eléctricas que diferencian a los protocolos RS422/RS485 y al protocolo I²C del resto de protocolos de transmisión usados en instrumentación.

BLOQUE 2: EJERCICIOS (50 %)

PROBLEMA 2 (20 %)

Usted ha sido contratado recientemente por una compañía puntera cuyo objeto es la fabricación de sensores de temperatura. Su primera tarea va a ser diseñar un sensor resistivo de temperatura (RTD) muy lineal construido poniendo en serie dos resistencias: una de platino (R_{Pt}) y otra de níquel (R_{Ni}) (Fig. 1). Recordando que la resistencia de todo RTD se puede expresar como $R_X \simeq R_{X0} \cdot (1 + \alpha_{X1} \cdot T + \alpha_{X2} \cdot T^2 + \alpha_{X3} \cdot T^3)$ siendo T la temperatura en grados centígrados y que para el platino y el níquel los coeficientes valen:

	$\alpha_{X,1}(\text{ppm}/^\circ\text{C})$	$\alpha_{X,2}(\text{ppm}/^\circ\text{C}^2)$	$\alpha_{X,3}(\text{ppm}/^\circ\text{C}^3)$
Pt	3902	-0,5783	$-4,183 \cdot 10^{-4}$
Ni	5485	6,65	$2,805 \cdot 10^{-5}$

Determine:

1. La relación que existe entre R_{Pt0} y R_{Ni0} para que se anule el coeficiente cuadrático, $\alpha_{TOT,2}$, del equivalente de la resistencia R_{TOT} .
2. Con estos datos, determine el valor de los coeficientes $\alpha_{TOT,1}$ y $\alpha_{TOT,3}$ para el equivalente serie R_{TOT} , expresados en ppm/°C y ppm/°C³. En otras palabras, calcular los coeficientes de la expresión $R_{TOT}(T) \simeq R_{TOT,0} \cdot (1 + \alpha_{TOT,1} \cdot T + \alpha_{TOT,3} \cdot T^3)$, con $R_{TOT,0} = R_{Pt0} + R_{Ni0}$.
3. Si hacemos que $R_{TOT,0} = 100 \Omega$, determine los valores de resistencia a 0 y 100 °C y determine el valor de la sensibilidad medida de extremo a extremo del rango de salida.

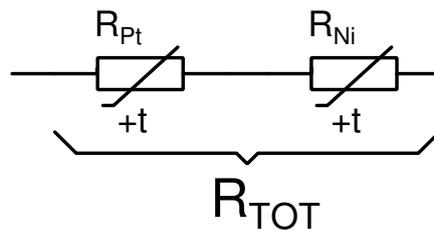


Figura 1: Dos RTDs en serie.

PROBLEMA 3 (30%)

Un sensor generador de tensión proporciona una salida V_S que puede variar entre 3 y 23 mV. Se va a medir con un amplificador de instrumentación de ganancia $G_D = 1 + \frac{49,5k\Omega}{R_G}$. Para corregir el nivel, se usa una referencia de tensión ajustable, V_A (Fig. 2).

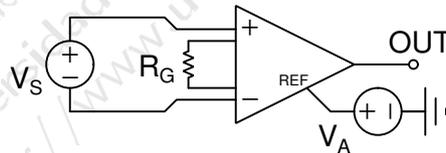


Figura 2: Sensor generador con un amplificador de instrumentación.

1. Con estos datos, determine los valores de V_A y R_G para que la salida del amplificador de instrumentación esté en el rango de tensiones 0 y 5 V.
2. Suponga ahora que el ruido en el sensor tiene un valor eficaz $v_{n,S} = 160 \text{ nV}$. Existen fuentes de ruido intrínsecas al amplificador de instrumentación, independientes de la ganancia, que aportan otra componente de ruido a la salida de valor eficaz $v_{n,ai} = 30 \mu\text{V}$. Finalmente, en la referencia de tensión V_A , el valor eficaz del ruido es, $v_{n,A} = 37,5 \mu\text{V}$. Determine el valor eficaz del ruido total en la salida del amplificador de instrumentación.
3. La salida del amplificador de instrumentación se dirige a un ADC de resolución desconocida. A partir del nivel de ruido calculado en el apartado anterior y de los niveles de tensión de la salida, estime la resolución máxima que tiene sentido en este sistema teniendo en cuenta que no se va a utilizar sobremuestreo.
4. Si necesitamos conocer el valor de la tensión del sensor con una precisión de $5 \mu\text{V}$ en el rango 3-23 mV, ¿Qué resolución mínima recomienda usar en el ADC?

5. Ahora, imagine que se tiene que enfrentar al problema de corregir la tensión de *offset* del amplificador. Dispone de un microcontrolador, switches analógicos, comparadores, etc. Proponga alguna solución al problema.

BLOQUE 3: DESARROLLO (20 %)

PROBLEMA 4 (20 %)

Se ha descubierto que, en aras de facilitar la autocalibración del sensor, sería interesante implementar alguna estrategia que permitiera elegir a voluntad el valor de V_A desde un microcontrolador.

Haga un diseño de algo que nos pudiera resolver el problema. Recuerde que no hay solución cerrada a este problema y que toda solución propuesta siempre puede mejorarse.

BLOQUE 4: PRESENTACIONES EN CLASE (+10 %)

PREGUNTA 5 (+10 %)

Responda a DOS de las siguiente cuatro preguntas explicadas por los alumnos en las presentaciones en clase. No rellene más de una página en total.

1. Dé algún ejemplo del uso práctico de piezoeléctricos para la recolección de energía.
2. ¿Cuáles son los protocolos típicos de transmisión utilizados en comunicaciones inalámbricas de los *smart sensors*? ¿Podría comentar algo al respecto?
3. A la hora de medir temperatura, ¿cuáles son las ventajas de los sensores de fibras ópticas frente al resto de sensores? ¿y los inconvenientes?
4. ¿Por qué interesa el uso de redes neuronales en combinación con matrices de sensores.

IMPORTANTE: Aquellos alumnos cuyo tema se haya usado para plantear alguna de las cuatro preguntas anteriores, deben descartarla y elegir ésta en su lugar:

- ¿Cuántos CCDs se encuentran en cada píxel de una cámara? ¿Cuál es la función de cada uno?

Respuesta a la PREGUNTA 1 (30%)

Escoja TRES de las siguientes cuatro preguntas y respóndalas en no más de media página.

1. Explique en qué tres situaciones es recomendable, o incluso obligatorio, usar amplificadores de aislamiento y optoacopladores.
2. Escriba lo que sepa sobre las LDRs.
3. ¿Cómo funciona un ADC tipo Flash? ¿En qué condiciones deben usarse?
4. Explique las características eléctricas que diferencian a los protocolos RS422/RS485 y al protocolo I²C del resto de protocolos de transmisión usados en instrumentación.

Debe reseñarse que la puntuación se reparte equitativamente entre las tres opciones elegidas. En otras palabras, cada una de ellas vale 1 punto sobre 10.

Pregunta 1

El estudiante tiene que mencionar los tres casos mencionados en clase:

- Pueden utilizarse para evitar la formación de bucles de tierra.
- Deben utilizarse en el caso de que estén previstas tensiones muy elevadas entre distintas partes del circuito y que sean potencialmente dañinas para el sistema o para el usuario.
- Son obligatorios en instrumentación biomédica para evitar descargas eléctricas accidentales en el paciente supervisado.

Por supuesto, se valorará también que el estudiante mencione algo que sea razonable y que haya encontrado al aprender por su cuenta.

Pregunta 2

Es necesario describir brevemente las propiedades características de las LDR: Composición, forma geométrica, color, cuales son sus características semiconductoras, tiempo de respuesta, ecuación característica, posibles usos, etc. No es necesario decir las todas para conseguir la máxima nota.

Pregunta 3

En este caso, se remite a la Diapositiva 16 del tema 8.

Pregunta 4

Desde el punto de vista eléctrico, las principales propiedades que diferencian estos protocolos del resto de protocolo son:

- El protocolo I²C posee **dos líneas**, de reloj y de datos, conectadas **con resistencias de pull-up a las tensiones de alimentación** y conectados a una salida en **colector/drenador abierto** de los distintos componentes.
- En el caso del protocolo RS422/485 **cada línea es doble** y lo que importa es, más que el valor, **el signo de la diferencia de tensión** entre los cables.

Solución al PROBLEMA 2 (20 %)

Usted ha sido contratado recientemente por una compañía puntera cuyo objeto es la fabricación de sensores de temperatura. Su primera tarea va a ser diseñar un sensor resistivo de temperatura (RTD) muy lineal construido poniendo en serie dos resistencias: una de platino (R_{Pt}) y otra de níquel (R_{Ni}) (Fig. 1). Recordando que la resistencia de todo RTD se puede expresar como $R_X \simeq R_{X0} \cdot (1 + \alpha_{X1} \cdot T + \alpha_{X2} \cdot T^2 + \alpha_{X3} \cdot T^3)$ siendo T la temperatura en grados centígrados y que para el platino y el níquel los coeficientes valen:

	$\alpha_{X,1}(\text{ppm}/^\circ\text{C})$	$\alpha_{X,2}(\text{ppm}/^\circ\text{C}^2)$	$\alpha_{X,3}(\text{ppm}/^\circ\text{C}^3)$
Pt	3902	-0,5783	$-4,183 \cdot 10^{-4}$
Ni	5485	6,65	$2,805 \cdot 10^{-5}$

Determine:

1. La relación que existe entre R_{Pt0} y R_{Ni0} para que se anule el coeficiente cuadrático, $\alpha_{TOT,2}$, del equivalente de la resistencia R_{TOT} .
2. Con estos datos, determine el valor de los coeficientes $\alpha_{TOT,1}$ y $\alpha_{TOT,3}$ para el equivalente serie R_{TOT} , expresados en $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ y $\text{ppm}/^\circ\text{C}^3$. En otras palabras, calcular los coeficientes de la expresión $R_{TOT}(T) \simeq R_{TOT,0} \cdot (1 + \alpha_{TOT,1} \cdot T + \alpha_{TOT,3} \cdot T^3)$, con $R_{TOT,0} = R_{Pt0} + R_{Ni0}$.
3. Si hacemos que $R_{TOT,0} = 100 \Omega$, determine los valores de resistencia a 0 y 100°C y determine el valor de la sensibilidad medida de extremo a extremo del rango de salida.

Apartado 1

Vamos a determinar cuales son las características de la resistencia total, R_{TOT} :

$$\begin{aligned} R_{Pt}(T) &= R_{Pt,0} \cdot (1 + \alpha_{Pt,1} \cdot T + \alpha_{Pt,2} \cdot T^2 + \alpha_{Pt,3} \cdot T^3) \\ + R_{Ni}(T) &= R_{Ni,0} \cdot (1 + \alpha_{Ni,1} \cdot T + \alpha_{Ni,2} \cdot T^2 + \alpha_{Ni,3} \cdot T^3) \\ \hline R_{TOT}(T) &= R_{TOT,0} \cdot (1 + \alpha_{TOT,1} \cdot T + \alpha_{TOT,2} \cdot T^2 + \alpha_{TOT,3} \cdot T^3) \end{aligned}$$

siendo:

$$\begin{aligned} R_{TOT,0} &= R_{Pt,0} + R_{Ni,0} \\ \alpha_{TOT,1} &= \frac{\alpha_{Pt,1} \cdot R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,1} \cdot R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} \\ \alpha_{TOT,2} &= \frac{\alpha_{Pt,2} \cdot R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,2} \cdot R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} \\ \alpha_{TOT,3} &= \frac{\alpha_{Pt,3} \cdot R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,3} \cdot R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} \end{aligned}$$

A partir de estas expresiones, es posible determinar los resultados buscados. En primer lugar, la relación que debe existir entre los valores de $R_{Pt,0}$ y $R_{Ni,0}$ para que el coeficiente cuadrático, $\alpha_{TOT,2}$, se anule:

$$\alpha_{TOT,2} = \frac{\alpha_{Pt,2} \cdot R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,2} \cdot R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} = 0 \Rightarrow \alpha_{Pt,2} \cdot R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,2} \cdot R_{Ni,0} = 0 \Rightarrow \frac{R_{Pt,0}}{R_{Ni,0}} = -\frac{\alpha_{Ni,2}}{\alpha_{Pt,2}}$$

y usando los valores del enunciado, se deduce que:

$$\frac{R_{Pt,0}}{R_{Ni,0}} = -\frac{\alpha_{Ni,2}}{\alpha_{Pt,2}} = -\frac{6,65}{-0,5783} = 11,5.$$

En realidad, el coeficiente del platino es ligeramente distinto pero se ha retocado el valor para obtener un número redondo.

Apartado 2

Sabiendo que $R_{Pt,0} = 11,5 \cdot R_{Ni,0}$, los otros términos se convierten en:

$$\begin{aligned} R_{TOT,0} &= R_{Pt,0} + R_{Ni,0} = 12,5 \cdot R_{Ni,0} \\ \alpha_{TOT,1} &= \frac{\alpha_{Pt,1}R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,1}R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} = \frac{3902 \cdot 11,5 \cdot R_{Ni,0} + 5485 \cdot R_{Ni,0}}{12,5 \cdot R_{Ni,0}} = 4028,6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C} \\ \alpha_{TOT,2} &= \frac{\alpha_{Pt,2}R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,2}R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} = 0 \\ \alpha_{TOT,3} &= \frac{\alpha_{Pt,3}R_{Pt,0} + \alpha_{Ni,3}R_{Ni,0}}{R_{Pt,0} + R_{Ni,0}} = \frac{-4,183 \cdot 10^{-4} \cdot 11,5 \cdot R_{Ni,0} + 0,2805 \cdot 10^{-4} \cdot R_{Ni,0}}{12,5 \cdot R_{Ni,0}} = -3,826 \cdot 10^{-4} \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}^3 \end{aligned}$$

Apartado 3

Si hacemos $R_{TOT,0} = 100 \Omega$, los valores a 0°C y a 100°C son:

$$\begin{aligned} R(T) &= 100 \cdot \left(1 + 4028,6 \cdot 10^{-6} \cdot T - 3,826 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-6} \cdot T^3 \right) = \\ &= 100 + 0,40286 \cdot T - 3,826 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 \end{aligned}$$

con lo que:

$$R(0) = 100 \Omega$$

$$R(100) = 100 + 0,40286 \cdot 100 - 3,826 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6 = 140,25 \Omega$$

y la sensibilidad media será:

$$\bar{S} = \frac{140,25 - 100}{100 - 0} = 0,4025 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}},$$

que es ligeramente inferior a la deducida directamente desde $\alpha_{TOT,1}$.

Solución al PROBLEMA 3 (30 %)

Un sensor generador de tensión proporciona una salida V_S que puede variar entre 3 y 23 mV. Se va a medir con un amplificador de instrumentación de ganancia $G_D = 1 + \frac{49,5k\Omega}{R_G}$. Para corregir el nivel, se usa una referencia de tensión ajustable, V_A (Fig. 2).

1. Con estos datos, determine los valores de V_A y R_G para que la salida del amplificador de instrumentación esté en el rango de tensiones 0 y 5 V.
2. Suponga ahora que el ruido en el sensor tiene un valor eficaz $v_{n,S} = 160$ nV. Existen fuentes de ruido intrínsecas al amplificador de instrumentación, independientes de la ganancia, que aportan otra componente de ruido a la salida de valor eficaz $v_{n,ai} = 30$ μ V. Finalmente, en la referencia de tensión V_A , el valor eficaz del ruido es, $v_{n,A} = 37,5$ μ V. Determine el valor eficaz del ruido total en la salida del amplificador de instrumentación.
3. La salida del amplificador de instrumentación se dirige a un ADC de resolución desconocida. A partir del nivel de ruido calculado en el apartado anterior y de los niveles de tensión de la salida, estime la resolución máxima que tiene sentido en este sistema teniendo en cuenta que no se va a utilizar sobremuestreo.
4. Si necesitamos conocer el valor de la tensión del sensor con una precisión de 5 μ V en el rango 3-23 mV, ¿Qué resolución mínima recomienda usar en el ADC?
5. Ahora, imagine que se tiene que enfrentar al problema de corregir la tensión de offset del amplificador. Dispone de un microcontrolador, switches analógicos, comparadores, etc. Proponga alguna solución al problema.

Apartado 1

En un amplificador de instrumentación, $V_{OUT} = REF + G_D \cdot (V_+ - V_-) = V_A + G_D \cdot V_S$. Como deseamos que, para $V_S = 3 \cdot 10^{-3}$ V $\rightarrow V_{OUT} = 0$ V y para $V_S = 23 \cdot 10^{-3}$ V $\rightarrow V_{OUT} = 5$ V, se debe cumplir que:

$$\begin{cases} V_A + G_D \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0 \\ V_A + G_D \cdot 23 \cdot 10^{-3} = 5 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} G_D = 250 \\ V_A = -0,75 \text{ V} \end{cases}$$

y esa ganancia diferencial se alcanza si:

$$250 = 1 + \frac{49,5 \text{ k}\Omega}{R_G} \rightarrow R_G = \frac{49500\Omega}{250 - 1} = 198,8 \Omega$$

Apartado 2

En referencia al ruido del sistema, hay tres fuentes de ruido, de las cuales una debe ser amplificadas, y que se deben sumar siguiendo las reglas usuales que vinculan variaciones aleatorias. Tomando como unidad de tensión el μ V:

$$v_{n,TOT}^2 = (G_D \cdot v_{n,S})^2 + v_{n,ai}^2 + v_{n,A}^2 = (250 \cdot 0,16)^2 + 30^2 + 37,5^2 = 3906,25 (\mu V)^2$$

$$v_{n,TOT} = \sqrt{3906,25 (\mu V)^2} = 62,5 \mu V$$

Apartado 3

Hay que tener en cuenta que no tiene sentido usar un ADC cuyo V_{LSB} sea menor que el nivel total de ruido. Por tanto:

$$V_{LSB} = \frac{V_{REF}}{2^{N_{MAX}}} > v_{n,TOT} \rightarrow \frac{5}{2^{N_{MAX}}} > 62,5 \cdot 10^{-6}; \quad 2^{N_{MAX}} < \frac{5}{62,5 \cdot 10^{-6}} = 80,000 \rightarrow N_{MAX} < 16,29.$$

En otras palabras, no tiene sentido usar conversores de más de 16 bits.

Apartado 4

La precisión de $5 \mu V$ se convierte en $250 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 1,25 \text{ mV}$ en el rango de 0 a 5 V. Por tanto, el valor del V_{LSB} debe ser menor que esta cantidad:

$$V_{LSB} = \frac{5}{2^{N_{MIN}}} < 1,25 \cdot 10^{-3} \rightarrow 2^{N_{MIN}} > \frac{5}{1,25 \cdot 10^{-3}} = 4,000 \rightarrow N_{MIN} > 11,97.$$

Así que, teóricamente, nos bastaría usar un ADC de 12 bits. Sin embargo, recordemos que siempre es preferible usar 2 bits más de resolución que el requerimiento estricto por lo que es recomendable usar, al menos, 14 bits.

Apartado 5

¿Cómo solucionar el *offset*? Ya se han visto en clase varias técnicas. Algunas serían:

- Con un *switch*, conectar la entrada no inversora bien a V_S , bien a V_- . En el segundo caso, se podría medir el *offset* total del sistema y corregir a posteriori.
- Con un *switch*, intercambiar la posición de los terminales no inversor e inversor. Como en el segundo caso tendremos tensiones de salida negativa, es necesario rectificar esta señal. Midiendo ambos valores con el ADC y haciendo media en el microcontrolador, se resolvería el problema.

Solución al PROBLEMA 4 (20 %)

Se ha descubierto que, en aras de facilitar la autocalibración del sensor, sería interesante implementar alguna estrategia que permitiera elegir a voluntad el valor de V_A desde un microcontrolador.

Haga un diseño de algo que nos pudiera resolver el problema. Recuerde que no hay solución cerrada a este problema y que toda solución propuesta siempre puede mejorarse.

Dado que la tensión de referencia V_A es negativa, bastaría con usar un DAC con R/2R y con menor V_{LSB} que el ADC. Esto se consigue usando una resolución muy alta y/o usando una V_{REF} menor como, por ejemplo, 1,25 V. Una gran ventaja es que, en estos conversores, la salida es negativa como se requiere en el diseño.

Respuestas a la PREGUNTA 5 (+10 %)

Responda a DOS de las siguiente cuatro preguntas explicadas por los alumnos en las presentaciones en clase. No rellene más de una página en total.

1. *Dé algún ejemplo del uso práctico de piezoeléctricos para la recolección de energía.*
2. *¿Cuáles son los protocolos típicos de transmisión utilizados en comunicaciones inalámbricas de los smart sensors? ¿Podría comentar algo al respecto?*

3. *A la hora de medir temperatura, ¿cuáles son las ventajas de los sensores de fibras ópticas frente al resto de sensores? ¿y los inconvenientes?*
4. *¿Por qué interesa el uso de redes neuronales en combinación con matrices de sensores.*

IMPORTANTE: *Aquellos alumnos cuyo tema se haya usado para plantear alguna de las cuatro preguntas anteriores, deben descartarla y elegir ésta en su lugar:*

- *¿Cuántos CCDs se encuentran en cada píxel de una cámara? ¿Cuál es la función de cada uno?*

-
1. Un bonito ejemplo es el uso de piezoeléctricos en el suelo de una discoteca y que almacena energía a partir de los saltos de la gente. Con ello, es posible iluminar el lugar.
 2. Los tres protocolos clásicos son WiFi, Bluetooth y ZigBee. Una característica que los diferencia es, por ejemplo, la facilidad de programación, mucho menor en el ZigBee; alcance, potencia consumida, etc.
 3. Los sensores de fibras ópticas puede usarse a larga distancia, el sensor y el transmisor son el mismo dispositivo, son robustos frente a interferencias eléctricas, etc. Su mayor problema es el coste alto de la instrumentación asociada, alineamiento, etc.
 4. Porque a partir de unos pocos sensores se pueden distinguir muchos tipos de compuestos químicos y a que permiten deducir concentraciones relativas en mezclas de elementos.
 5. En cada píxel de una cámara hay 4 CCDs dispuestos en cuadro. Dos se reservan para luz verde y los otros dos para el rojo y el azul.