

# INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

## Examen Final (4 de septiembre 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 por qué no tiene sentido modelar un amplificador de instrumentación con el modelo del polo dominante como ocurre con los amplificadores operacionales.
2. Explique qué es linealizar un sensor resistivo con un puente resistivo con resistencia patrón y tensión de referencia y enumere al menos dos técnicas para hacerlo.
3. Explique brevemente por qué, desde el punto de vista eléctrico, un cristal de cuarzo permite crear osciladores.
4. Explique qué significa el concepto de “*códigos perdidos*” en la conversión analógico-digital.

---

### BLOQUE 2: EJERCICIOS (50 %)

#### PROBLEMA 2 (20 %)

Un determinado sistema de instrumentación debe medir la corriente de fuga a través de un fotodiodo polarizado en inversa. El rango de corrientes esperables en el diodo es de 5–600 nA y trabajará a una temperatura de  $-88\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es necesario que el error asociado al ruido no sea superior al 0,5% para ningún valor dentro del rango de medida. A partir de estos datos, y teniendo en cuenta de que no son necesarios ninguno más, determine la frecuencia mínima de corte del filtro LP que se debe colocar en el sistema de instrumentación para garantizar los requerimientos de diseño.

## PROBLEMA 3 (30 %)

Se ha preparado el circuito de la figura 1 utilizando dos op amps, un *switch* y un condensador de 10 nF para formar un circuito S/H simple.

1. Suponiendo que la entrada, *IN*, puede fluctuar en el rango de  $\pm 5$  V y que el op amp 1 tiene un slew rate de  $0,8$  V/ $\mu$ s y que la máxima corriente de salida que puede proporcionar el op amp es 6 mA, determine el tiempo mínimo que el *switch* debe estar abierto para que el condensador almacene correctamente el valor de la entrada.
2. El op amp 2 tiene una corriente de polarización de la entrada, con sentido saliente, de 300 pA. Determine el error que se comete en la salida si la medida de la salida requiere 1,5 ms.

### BLOQUE 3: DESARROLLO (20 %)

## PROBLEMA 4 (20 %)

Se le requiere diseñar un circuito capaz de transformar el ciclo de trabajo (o *duty cycle*) de una señal cuadrada en una tensión. La señal cuadrada tiene como niveles de salida 0 y 5,00 V y la señal DC de salida debe ir entre 0 y 3,3 V. El ciclo de trabajo puede ir de 30 %, que correspondería a una salida de 0 V, o 70 %, que correspondería a 5,00 V.

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.

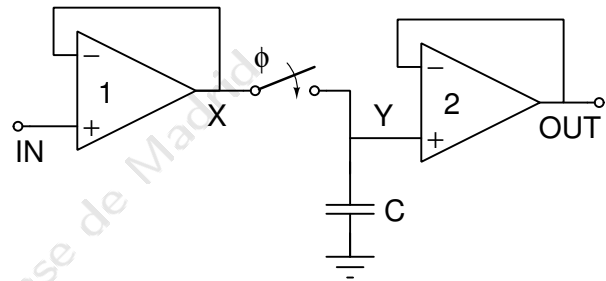


Figura 1: Circuito asociado al problema 3.

### 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. Indique qué sensores basados en MEMS pueden encontrarse en el interior de un teléfono móvil.
2. Explique cuáles son los sistemas de localización presentes en el interior de las cajas negras de los aviones y que permiten hallarla en caso de accidente.
3. Explique el mecanismo de funcionamiento del sensor de lluvia presente en el parabrisas de un coche.
4. Explique la función del bloque analógico programable en los sistemas PSOC.

## Respuesta a la PREGUNTA 1 (30%)

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

1. Explique por qué no tiene sentido modelar un amplificador de instrumentación con el modelo del polo dominante como ocurre con los amplificadores operacionales.
2. Explique qué es linealizar un sensor resistivo con un puente resistivo con resistencia patrón y tensión de referencia y enumere al menos dos técnicas para hacerlo.
3. Explique brevemente por qué, desde el punto de vista eléctrico, un cristal de cuarzo permite crear osciladores.
4. Explique qué significa el concepto de "códigos perdidos" en la conversión analógico-digital.

---

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

Debe dejarse claro que la presencia de tres amplificadores operacionales similares obliga a la introducción de tres posibles polos en el sistema. Esto impide que el amplificador se pueda modelar con un único polo y que, por ello, se prefiere usar el concepto de frecuencia de caída de 3 dB para determinadas ganancias.

### Pregunta 2

Linealizar un sensor resistivo consiste en cancelar el término cuadrático del desarrollo de Taylor de la función que relaciona la tensión en el punto medio del puente resistivo con la temperatura aunque eso implique pérdidas en la ganancia. Esto se puede conseguir eligiendo adecuadamente el valor de la referencia patrón si el  $dR_{SENSOR}/dT < 0$ , como ocurre en los NTC. En caso contrario, debe hacerse por software al procesar la señal.

### Pregunta 3

Porque su modelo circuital contiene una inducción que, junto con otros dos condensadores, permite definir una frecuencia de resonancia en el diagrama de Bode asociado. Realimentando con la ganancia adecuada, puede cumplirse el criterio de Barkhausen y aparecer una oscilación.

### Pregunta 4

Un ADC presenta códigos perdidos, o *missing codes*, cuando existen salidas que nunca aparecen por limitaciones de diseño. Se descubren a realizar histogramas contando el número de veces que aparecen todos los códigos al introducir una señal periódica de tipo sinusoidal o rampa que abarca todo el rango de valores de entrada posibles. Se consideran códigos perdidos aquellos que no aparecen nunca y que este hecho no puede atribuirse a fluctuaciones estadísticas.

## Solución al PROBLEMA 2 (20 %)

Un determinado sistema de instrumentación debe medir la corriente de fuga a través de un fotodiodo polarizado en inversa. El rango de corrientes esperables en el diodo es de 5–600 nA y trabajará a una temperatura de  $-88^{\circ}\text{C}$ . Es necesario que el error asociado al ruido no sea superior al 0,5% para ningún valor dentro del rango de medida. A partir de estos datos, y teniendo en cuenta de que no son necesarios ninguno más, determine la frecuencia mínima de corte del filtro LP que se debe colocar en el sistema de instrumentación para garantizar los requerimientos de diseño.

De acuerdo con el enunciado del problema, es necesario que se cumpla la condición  $\frac{i_n}{I_D} < \frac{0,5}{100} = 5 \cdot 10^{-3}$  para cualquier valor de  $I_D$  situado entre 5 y 600 nA. Al encontrarnos en un diodo, el ruido puede ser de disparo o flicker. Sin embargo, no existen parámetros que permitan calcular el ruido flicker, como el exponente de la frecuencia o la constante de proporcionalidad. En consecuencia, sólo nos interesa el ruido de disparo.

Sabemos que el ruido de disparo responde a la expresión  $i_n^2 = 2 \cdot q \cdot I_D \cdot \Delta f$ , siendo  $q$  el valor absoluto de la carga del electrón,  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C, y  $\Delta f$  el ancho de banda del sistema de medida. En consecuencia, se debe cumplir la condición:

$$\frac{i_n}{I_D} = \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot I_D \cdot \Delta f}}{I_D} = \frac{\sqrt{2 \cdot q \cdot \Delta f}}{\sqrt{I_D}} < 5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow \Delta f < \frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot I_D}{2 \cdot q}$$

De esta expresión se deduce que la condición más restrictiva aparece para los valores menores de  $I_D$ . Dentro del rango de interés, este valor es 5 nA. Sustituyendo:

$$\Delta f < \frac{25 \cdot 10^{-8} \cdot I_D}{2 \cdot q} < \frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = 390,1 \text{ kHz}$$

y éste es el máximo valor que puede tener el ancho de banda del filtro LP buscado.

## Solución al PROBLEMA 3 (30%)

Se ha preparado el circuito de la figura 1 utilizando dos op amps, un *switch* y un condensador de 10 nF para formar un circuito S/H simple.

- Suponiendo que la entrada, *IN*, puede fluctuar en el rango de  $\pm 5$  V y que el op amp 1 tiene un slew rate de  $0,8$  V/ $\mu$ s y que la máxima corriente de salida que puede proporcionar el op amp es 6 mA, determine el tiempo mínimo que el *switch* debe estar abierto para que el condensador almacene correctamente el valor de la entrada.
- El op amp 2 tiene una corriente de polarización de la entrada, con sentido saliente, de 300 pA. Determine el error que se comete en la salida si la medida de la salida requiere 1.5 ms.

### Apartado 1

El conmutador debe estar cerrado el tiempo suficiente para que se cargue el condensador *C*. El peor caso ocurre si la entrada debe saltar súbitamente entre los extremos del rango de valores de entrada permitidos. El máximo salto sería entonces de 10 V, correspondiente a una transición entre  $-5$  y  $+5$  V, o viceversa.

Este salto puede estar limitado bien por el slew rate del amplificador 1, bien por la incapacidad de cargar el condensador por la limitación en la corriente de salida. Estimemos ambos casos:

$$\text{Slew rate : } T_{SR} > \frac{\Delta V_{OUT}}{S.R.} = \frac{10 \text{ V}}{0,8 \text{ V}/\mu\text{s}} = 12,5 \mu\text{s}$$

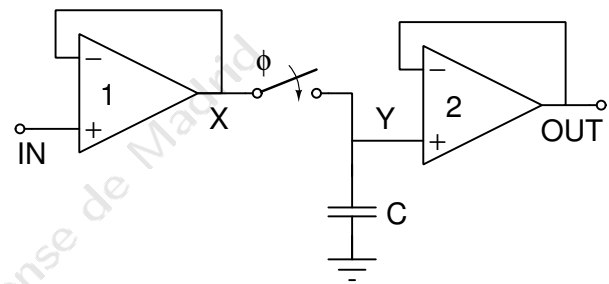
$$\text{Carga del Condensador : } T_{CC} > \frac{C \cdot \Delta V_{OUT}}{I_{OUT}} = \frac{10^{-8} \text{ F} \cdot 10 \text{ V}}{6 \cdot 10^{-3} \text{ A}} \simeq 16,7 \mu\text{s}$$

Puede verse que la condición más restrictiva es la segunda y que, por tanto, el conmutador debe estar abierto más de  $16.7 \mu\text{s}$ .

### Apartado 2

La corriente de polarización de la entrada altera la carga del condensador y, por tanto la tensión de salida. Este incremento de tensión sería:

$$\Delta V_{OUT} = \Delta V_C = \frac{\Delta Q_C}{C} = \frac{I_B \cdot T}{C} = \frac{300 \cdot 10^{-12} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{10^{-8}} = 45 \mu\text{V}$$



## Solución al PROBLEMA 4 (20 %)

Se le requiere diseñar un circuito capaz de transformar el ciclo de trabajo (o duty cycle) de una señal cuadrada en una tensión. La señal cuadrada tiene como niveles de salida 0 y 5,00 V y la señal DC de salida debe ir entre 0 y 3,3 V. El ciclo de trabajo puede ir de 30 %, que correspondería a una salida de 0 V, o 70 %, que correspondería a 3,3 V.

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.

---

Dada la forma de la señal, una opción sería utilizar la componente DC de la señal, que es proporcional al ciclo de trabajo. Así, deberíamos conectar la señal a un filtro LP con una frecuencia de corte suficientemente baja. La salida del filtro estaría comprendida entre  $0,3 \cdot 5 = 1,5 \text{ V}$  y  $0,7 \cdot 5 = 3,5 \text{ V}$ . Convertir estos valores en señales comprendidas entre 0 y 3.3 es sencillo ya que bastaría un amplificador operacional, resistencias para controlar la ganancia y una tensión de referencia para desplazar el nivel de salida.

## Respuestas a la PREGUNTA 5 (+10%)

Responda a DOS de las siguientes 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.

Para uso de alumnos de la  
Universidad Complutense de Madrid  
<http://www.ucm.es>