



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

“ESTUDIO Y DESARROLLO DIDÁCTICO DE UN TERMÓMETRO DIGITAL”

AUTORÍA ANTONIO JOSÉ HEREDIA SOTO
TEMÁTICA TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA
ETAPA ESO Y BACHILLERATO

Resumen

En el presente artículo se realiza un estudio del funcionamiento, diseño de cálculo y desarrollo de un termómetro digital, con objeto de facilitar a los estudiantes de electrónica, en la medida de lo posible, la comprensión de los contenidos relacionados con los sistemas electrónicos de adquisición de datos.

Para ello nos hemos basado principalmente en un convertidor analógico digital de doble rampa y en el sensor de temperatura LM 335 para la detección del parámetro físico (temperatura ambiente), que nos permitirá medir un rango de temperatura comprendido entre 0°C y 99° C.

Palabras clave

- Sensor
- Amplificador Operacional
- Analógico, digital
- Multiplexor
- Monoestable, estable
- Decodificador
- Display
- Fuente de alimentación
- Resistencia
- Condensador
- Frecuencia (f)
- Periodo (T)
- Transformador
- Contador
- Circuito integrador

1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL TERMÓMETRO DIGITAL

C/ Recogidas Nº 45 - 6ºA 18005 Granada csifrevistad@gmail.com



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 21 AGOSTO DE 2009

El termómetro estará compuesto de una serie de bloques funcionales bien diferenciados:

- Sensor de temperatura.
- Amplificador de ganancia unidad.
- Amplificador sumador de ganancia 10.
- Circuito generador de señal de referencia.
- Circuito multiplexor.
- Amplificador aritmético.
- Circuito Integrador.
- Circuito comparador.
- Monoestable
- Astable
- Contador
- Registro
- Decodificador
- Unidad de visualización (displays).

1.1. Funcionamiento general del termómetro digital en conjunto

El sensor de temperatura lo constituye el circuito integrado **LM 335**. Este dispositivo opera de manera similar a un diodo zéner, cuya tensión de salida es variable y proporcional a la temperatura ambiente, concretamente en 10mV/K, es decir aumenta 10mV por cada grado Kelvin incrementado.

La tensión de salida captada por el sensor es aplicada a la entrada de un **amplificador de ganancia -1**, y la señal de salida de éste a su vez es introducida en un **amplificador sumador de ganancia -10**. (La razón de utilizar dos etapas amplificadoras en vez de una, se debe a la necesidad de obtener una señal positiva a la entrada del multiplexor, el cual no acepta señales negativas).

No debemos olvidar que el LM335 nos proporciona 10mV/K. Esto implica que si por ejemplo el sensor mide una temperatura de 20°C, su conversión en °K será: $20 + 273 = 293$ °K y por lo tanto el sensor suministrará en su salida un voltaje de 2,93V. Así pues, para un rango de temperaturas entre 0°C y 99°C, los voltajes tienen que estar comprendidos entre **2,73V y 3,72V**, valores algo engorrosos para trabajar, por ello se realizará un ajuste que nos permita pasar de la escala de °K a °C. Dicho ajuste se realizará mediante un potenciómetro, el cual conectaremos a la entrada del amplificador sumador de ganancia -10, de forma que a la salida de éste, se hayan absorbido los 2,73V (tensión mínima suministrada por el LM335) y el valor de 0V se corresponda con 0° C.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

Seguidamente en el **multiplexor analógico** (4016), se introducen dos señales bien diferenciadas, una señal **V_{in}** (correspondiente a la señal del sensor amplificada por los dos amplificadores de ganancia) y otra **V_{ref}** (voltaje de referencia) de 9,9 V, las cuales darán lugar a una **doble rampa**. Para controlar estas dos señales, existen otras dos señales de control que nunca estarán activas al mismo tiempo, siendo siempre una complementaria de la otra (para ello se utilizará una puerta **NAND de un C.I. 4011**).

Las dos salidas del multiplexor son introducidas en un **amplificador aritmético**, donde se obtendrá la señal amplificada del sensor o bien la señal - V_{ref}. Estas señales a su vez se introducirán en el **circuito integrador**, que como su propio nombre indica, lo que hace es integrar las dos señales de entrada, dando lugar a una onda triangular negativa, que se aplicará a la siguiente etapa (**circuito comparador**), cuya función será la de comparar las dos señales de entrada basculando a $\pm V_{cc}$.

El **circuito monoestable** está formado por el circuito monolítico NE555 que actúa como base de tiempos, generando un pulso de duración T1 de 1 segundo cada vez que la tensión de entrada en la patilla número 2 encuentra un flanco de bajada.

La activación del monoestable se realizará con la señal de salida del comparador, a través de un diodo en serie intercalado con la misma, cuya misión será la de dejar pasar al monoestable sólo señales positivas (señales negativas sería perjudicial para el monoestable).

Seguidamente, la salida del monoestable (negada) alimentará la patilla número 4 (reset) de la base de tiempos 555 en modo **astable**. La frecuencia de este astable se ha de calcular para que sea de 100 Hz. Así pues, mientras el monoestable se mantenga a nivel alto, la salida del astable será 0, y en caso contrario (nivel bajo), el astable generará un tren de pulsos durante un tiempo T2, que será el tiempo que se utilice para que el contador cuente.

La unión de los circuitos basados en NE555 a la unidad contadora y al registro se realiza mediante divisores de tensión, puesto que esta parte es la única que se alimenta a 5V y por lo tanto hay que bajar la tensión de 12 a 5V para el correcto funcionamiento del circuito.

El bloque **contador digital**, formado por dos contadores (uno para las decenas y otro para las unidades), sólo podrá contar de 00 a 99 y después volver a 00, siendo su salida en BCD. Asimismo, como con un contador sólo se podrá contar hasta 9, se utilizará otro contador, de tal manera que la patilla 14 del primer contador (arrastre) es introducida en la entrada de "Up" del siguiente contador. Dichos contadores poseen sus respectivas patillas "14" unidas (reset o clear) de tal manera que cuando le llegue un nivel alto, éste borra el dígito y lo pone a 0, mientras que si le llega un nivel bajo, el contador cuenta.

Todos los datos de salida del contador son introducidos en el **registro**. Este registro se activa por flancos de disparos de la siguiente manera:

- Cada vez que recibe un flanco de subida del monoestable, vuelca los datos que se encontraban en la entrada a la salida, y sólo cuando recibe el siguiente flanco de subida volverá a volcar los datos de entrada.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

La salida del registro es introducida al **bloque decodificador** el cual está compuesto por **dos decodificadores**, uno para las decenas y otro para las unidades, y cuya función es la de recibir señales de datos digitales y decodificarlas en dos grupos de 7 señales digitales (los circuitos integrados encargados de realizar esta acción serán dos 74LS48).

Estos dos grupos de 7 señales cada uno, ya decodificadas correspondientes a las decenas y unidades, serán representadas en dos **displays** de 7 segmentos de cátodo común, respectivamente.

2. CÁLCULOS DE COMPONENTES

A continuación se realiza el cálculo de los diferentes circuitos citados anteriormente. Para mayor entendimiento de los mismos, se recomienda ver los bloques correspondientes a los que se hace referencia en cada apartado, del esquema general (*ilustrado en el epígrafe 4*).

2.1. Cálculo del amplificador inversor (*ver bloque 1 del esquema general*)

Para el montaje de este circuito se utiliza un A.O. 741 en configuración inversora de ganancia unidad. La ganancia de este amplificador viene dada por la expresión:

$$G = -\frac{R_2}{R_1}$$

La ganancia que se pretende obtener es la unidad, por consiguiente $R_2 = R_1$.

Pero además, se debe tener en cuenta para que no haya distorsión de la señal de salida, que la impedancia de entrada del amplificador debe ser elevada, por lo que se adopta dos resistencias de 100KΩ, las cuales satisfacen nuestras necesidades.

2.2. Cálculo del amplificador sumador de ganancia 10 (*ver bloque 2 del esquema general*)

Para el montaje de este circuito se utiliza otro A.O. 741 configurado como amplificador sumador de ganancia 10. La ganancia de este amplificador viene dada por la expresión:

$$G = -R_f \cdot \left(\frac{V_i}{R_1} + \frac{V_0}{R_2} \right) \quad V_i = 2,73 + V'$$

Donde:

V_i = señal de salida de la etapa anterior (bloque 1).

V_0 = señal de ajuste (traslado de cero). Se pone cero voltios cuando $V_i = 2,73$ voltios. Para entendernos, lo que se está haciendo es cambiar de escala Kelvin a escala Celsius, es decir en °C.

V' = señal que se incrementa en 10mV por cada grado de temperatura detectada por el sensor.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

Para no sobrecargar la etapa anterior se tendrá una alta impedancia a la entrada, $R_1 = 10K\Omega$.

Por otro lado, se desea una salida del amplificador de $10 \cdot V'$, para que esto ocurra se tiene que cumplir la siguiente condición:

$$\frac{2,73}{R_1} = \frac{V_0}{R_2}$$

Sabiendo que $V_0 = 12V$ y $R_1 = 10K\Omega$, se obtendrá una $R_2 = 43,95K\Omega$, aunque no obstante, para garantizar que se cumpla dicha condición y facilitar el ajuste del sensor de temperatura, pondremos un potenciómetro de $100K\Omega$.

2.3. Circuito generador de señal de referencia (ver bloque 3 del esquema general)

Este circuito pretende aportar una tensión fija de $9,9V$, valor que se conseguirá mediante un divisor de tensión. Además se conectará en serie otro seguidor de tensión constituido por un A.O. 741, para evitar una caída de tensión no deseada, que sería producida por una impedancia en la siguiente etapa.

Se utiliza un potenciómetro de $2,2 K\Omega$, ajustando éste hasta obtener la tensión deseada, que en nuestro caso la $R \approx 2,0625K\Omega$.

2.4. Circuito multiplexor analógico (ver bloque 4 del esquema general)

Este circuito se basa en el C.I. (circuito integrado) 4016, de tecnología CMOS. Este C.I. sólo admite señales de tensión positivas, por lo que a la salida del multiplexor habrá de ponerse un amplificador aritmético para poder convertir algunas de estas señales de positivas a negativas.

Las señales que entrarán al multiplexor son la señal de referencia (V_{ref}) y la señal amplificada del sensor ($10 \cdot V'$).

El amplificador aritmético tendrá la ecuación $V_a = V_1 - V_2$. Para hallar los valores de las resistencias que componen el circuito amplificador se utiliza la siguiente tabla:

	Z	R_y	R_y	R_i	R_j
Caso 1	< 0	∞	∞	R_f/X_i	R_f/X_j
Caso 2	> 0	R_f/Z	R_f/Z		
Caso 3	$= 0$	∞	∞		

Siendo $Z = X - Y - 1$; ($X=1, Y=1$) \rightarrow por lo que $Z = -1 < 0$, por tanto nos encontramos en el caso 1.

Fijando el valor de $R_f = 100K\Omega$, se obtiene $R_x = R_i = R_j = 100K\Omega$



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 21 AGOSTO DE 2009

2.5. Circuito integrador (ver bloque 5 del esquema general)

Se utilizará el A.O. 741, configurado como integrador, en la que se obtendrá a la salida del mismo:

$$V_o = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int V_a \cdot dt \quad \text{Como } V_a = \text{cte} \rightarrow \frac{V_o}{V_a} = \frac{t}{R \cdot C} = 1$$

Para calcular la resistencia y el condensador que junto con el A.O. compone el circuito integrador, se tomarán las siguientes consideraciones:

Se fija $t = 1$ segundo, por lo que $R \cdot C = 1$.

También fijamos el condensador a un valor normalizado de $100\mu\text{F}$ por ejemplo, con lo que despejando, se obtendrá una resistencia de $100\text{K}\Omega$.

(Nota: La salida del circuito integrador, que arriba la hemos llamado V_o (para no confundir), en el esquema está nominada como V_i , la cual se corresponderá con la tensión de entrada de la siguiente etapa \rightarrow así que $V_o = V_i$).

2.6. Circuito comparador (ver bloque 6 del esquema general)

El circuito comparador está compuesto de un A.O. 741 y un diodo 1N4001. De este modo, la salida del circuito, la cual se le ha denominado V_d , fluctuará entre 0 y 9,9V.

2.7. Monoestable (ver bloque 7 del esquema general)

Se utilizará un C.I. NE555, un condensador de $100\mu\text{F}$, un segundo condensador de 10nF y un potenciómetro de $10\text{K}\Omega$.

La salida del monoestable, denominada como V_m , será una onda cuadrada con un tiempo de 1segundo a nivel alto y un tiempo variable (no superior a 1 segundo), a nivel bajo. El tiempo a nivel alto viene dado por la siguiente expresión:

$T = 1,1 \cdot R \cdot C$, siendo $T = 1$ segundo y $C = 100\mu\text{F}$, por lo que despejando R , se obtiene $\rightarrow R = 9.090,9\Omega$ (es por ello por lo que se adopta el potenciómetro de $10\text{K}\Omega$, mencionado arriba, el cual es un valor normalizado y comercial).

(Nota: El condensador de 10nF que se sitúa entre la patilla 5 del C.I. y masa, es un valor característico que determina el fabricante para todos los montajes).

2.8. Astable (ver bloque 8 del esquema general)

Se utiliza otro C.I. NE555, un condensador de 10nF , otro segundo condensador de 220nF , una resistencia de $1,8\text{K}\Omega$ y un potenciómetro de $47\text{K}\Omega$.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

La salida del astable, a la cual le hemos llamado V_{as} , generará un tren de pulsos cuya frecuencia viene dada por la expresión:

$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2 \cdot R_2) \cdot C}$$

Fijamos la frecuencia $f=100\text{Hz}$ (frecuencia deseada), $R_1 = 1,8\text{K}\Omega$ y $C= 220\text{nF}$, con lo cual, despejando se obtendrá una $R_2= 31,8\text{K}\Omega$ (de la misma manera que en el epígrafe anterior, es por lo que se adopta el potenciómetro de $47\text{K}\Omega$, mencionado arriba, el cual es un valor normalizado y comercial).

2.9. Circuito de control del multiplexor (ver bloque 9 del esquema general)

Se utilizará una puerta NAND (C.I. 4011).

La función de este circuito es que las dos señales que llegan al control del multiplexor sean complementarias. Una señal procede del circuito monoestable V_m y controla la señal V_{in} y la otra es la complementaria de V_m y controla V_{ref} .

2.10. Circuito de corrección de señal para los TTL (ver bloque 10 del esquema general)

Para los divisores de tensión se utilizarán 3 potenciómetros de $4,7\text{K}\Omega$, los cuales alimentarán respectivamente la entrada UP de contador, entrada Reset de contador y la entrada CLK del registro. Dichos potenciómetros, se ajustarán hasta obtener $1,95\Omega$ entre el cursor del potenciómetro y masa.

2.11. Contadores (ver bloque 11 del esquema general)

Se utilizarán dos C.I. 74LS192.

El conexionado del contador se realiza uniendo las patillas 14 (reset) entre sí. Asimismo la patilla 12 (arrastre) del contador de unidades, se unirá a la patilla 5 del contador de las decenas. De este modo, cada vez que el contador de unidades hace el conteo hasta nueve, genera un pulso en el arrastre haciendo que el contador de decenas aumente su conteo en una unidad.

Los flancos de reloj que entran en la patilla 5 del contador de unidades proceden del circuito astable, pasando previamente por el divisor de tensión, citado en el apartado anterior.

2.12. Registro (ver bloque 12 del esquema general)

Se utilizará un C.I. 74LS374.

La misión de dicho C.I., es la de actuar como registro. Se activa con flancos de disparo de la siguiente manera:

- Cada vez que recibe un flanco de subida procedente del monoestable, vuelca los datos que se encontraban en la entrada a la salida, y sólo cuando recibe el siguiente flanco de subida, volverá a volcar los datos de entrada.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 N° 21 AGOSTO DE 2009

2.13. Decodificador BCD de 7 segmentos (ver bloque 13 del esquema general)

Se utilizarán dos C.I. 74LS48.

La función del decodificador es la de recibir cuatro señales de datos digitales y codificarlas en siete señales de salidas digitales. Estas siete señales serán representadas en dos displays de siete segmentos de cátodo común.

Para encender cada uno de los diodos LED integrados en los displays de 7 segmentos, se dispondrá de una resistencia limitadora de 330Ω en serie, colocada entre la salida del decodificador y el visualizador. El cálculo de estas resistencias es bien sencillo; sabiendo que la caída de tensión del LED tiene que ser de 1,7V y la intensidad que debe circular por él, es de 10mA, se aplica la ley de Ohm y se obtiene dicho valor de 330Ω .

3. ALIMENTACIÓN DE LOS DIFERENTES BLOQUES DE CIRCUITOS

Las tensiones necesarias para alimentar los diferentes circuitos son:

- $\pm 12V$ para los A.O. 741.
- +12V para el monoestable y astable.
- +12V para el multiplexor C4016.
- +12V para la puerta NAND (C.I. C4011).
- + 5V para los contadores, registro y decodificadores.

Por lo que necesitaremos una fuente **simétrica de $\pm 12V$** y otra **fente de 5V** para satisfacer las necesidades del montaje, y para las que se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Ambas fuentes de alimentación estarán estabilizadas mediante reguladores monolíticos de la familia 78xx.
- La suma de todas las potencias disipadas por los diferentes componentes que constituyen el conjunto del circuito es despreciable en comparación a la corriente máxima de 1A que es capaz de proporcionar y soportar el regulador monolítico, según el fabricante.

3.1. Cálculo de la fuente de alimentación simétrica de $\pm 12V$

La tensión de salida que debe entregar esta fuente será de +12V y -12V (valores simétricos). Para su regulación se utilizarán los reguladores **7812** y **7912**, para la tensión positiva y negativa respectivamente.

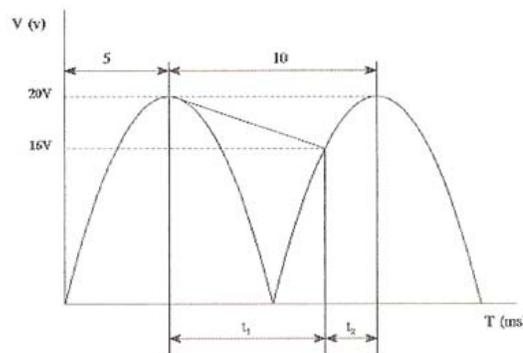
A continuación procederemos a realizar los cálculos del diseño de la fuente para cualquiera de los dos valores de tensión (+12V o -12V), ya que ambos cálculos a efectos prácticos son idénticos. En este

caso, elegiré por ejemplo la de +12V y una vez realizados dichos cálculos se aplicarán los mismos valores de los componentes, para su tensión simétrica de -12V:

Según el fabricante del regulador monolítico 7812, recomiendan que la tensión mínima a la entrada de éste sea de 14,5V. Este valor lo aumentaremos a **16 Voltios** por ejemplo para garantizar el correcto funcionamiento de dicho regulador.

3.1.1. Cálculo del condensador electrolítico

Para el cálculo del condensador electrolítico, supondremos un voltaje de rizado de 4V, por lo que el voltaje de pico deberá ser de 20V, y por lo tanto la constante de tiempo del equivalente, deberá ser igual al tiempo desde la cresta de la senoide (20V) hasta el valor de 16V del periodo justamente siguiente. Para ayudar a comprender mejor esto se adjunta el siguiente gráfico:



El valor de t1 se calcula por la siguiente expresión:

$$T = \frac{1}{f}$$

Siendo T el periodo de la onda (en segundos), y f la frecuencia (en Hz) de dicha onda, que en nuestro caso es de 100Hz (50Hz rectificadas); por tanto sustituyendo se obtiene que:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100\text{Hz}} = 0,01\text{segundos} = 10\text{ms}$$

ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

Esto quiere decir, como podemos observar en la gráfica de la página anterior, que de cresta a cresta de la onda pasa un tiempo de 10ms, y que por lo tanto $t_1 + t_2 = 10\text{ms}$

Así pues, para el cálculo de dicho condensador electrolítico haremos uso de su ecuación de carga y descarga de éste:

- Ecuación de descarga: $V_{16V} = V_p \cdot e^{-\frac{t_1}{R \cdot C}}$

- Ecuación de carga: $V_{16V} = V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t_2)$

De donde conocemos: $V_{16V} = 16V$, $V_p = 20V$ y $\omega = 2\pi f = 100\pi$ ($f=50\text{Hz}$)

Y para calcular C (valor del condensador) es necesario conocer el valor de R y t_1 .

Respecto el cálculo de R, sabemos que la tensión de salida del regulador tiene que ser de 12V y que la potencia total disipada por los diferentes componentes del conjunto del circuito, como se explicó anteriormente, era despreciable, no obstante vamos a suponer por exceso que éste consume una intensidad de 0,5 A (la mitad de la corriente máxima de 1A que es capaz de proporcionar el regulador). Por lo que aplicando la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12}{0,5} = 24\Omega$$

Asimismo, para calcular t_1 es necesario conocer antes t_2 , ya que como se determinó anteriormente $t_1 + t_2 = 10\text{ms}$. Por lo tanto sustituyendo en la ecuación de carga del condensador y realizando las operaciones necesarias obtendremos $t_1 = 7,05 \text{ ms}$, en este caso.

De este modo, conocidos ya la $R=24\Omega$ y $t_1= 7,05 \text{ ms}$, sólo tendremos que sustituir en la ecuación de descarga y averiguar el valor de $C = 1316\mu\text{F}$. Pero al no ser un valor comercial adoptaremos un condensador de **2200 μF de 25V**.

Respecto los diodos que constituirán el puente rectificador, podemos elegir cualquier diodo que exista en el mercado, puesto que la corriente de pico que éstos pueden soportar es superior a 5A, y la corriente máxima que puede llegar a entregar el regulador es de 1A, por tanto no será necesaria su justificación mediante cálculos. Se adopta **4 diodos** tipo **1N4001**.

3.1.2. Elección del transformador de alimentación

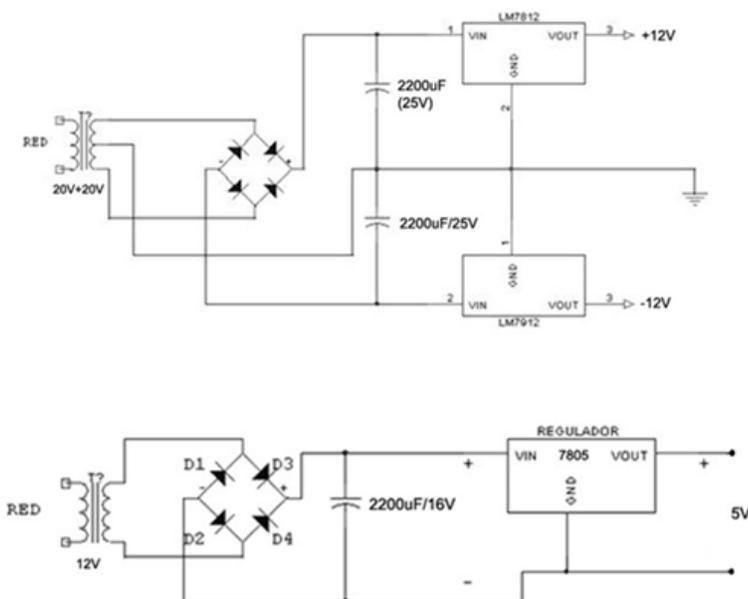
El transformador ha de suministrar en su devanado secundario un voltaje que sea como mínimo el voltaje de pico calculado. Así pues para la elección de nuestra fuente de tensión simétrica de $\pm 12V$, la tensión de pico es de 20V por lo que se utiliza un transformador de 20V con toma intermedia.

3.2. Cálculo de la fuente de alimentación de 5V

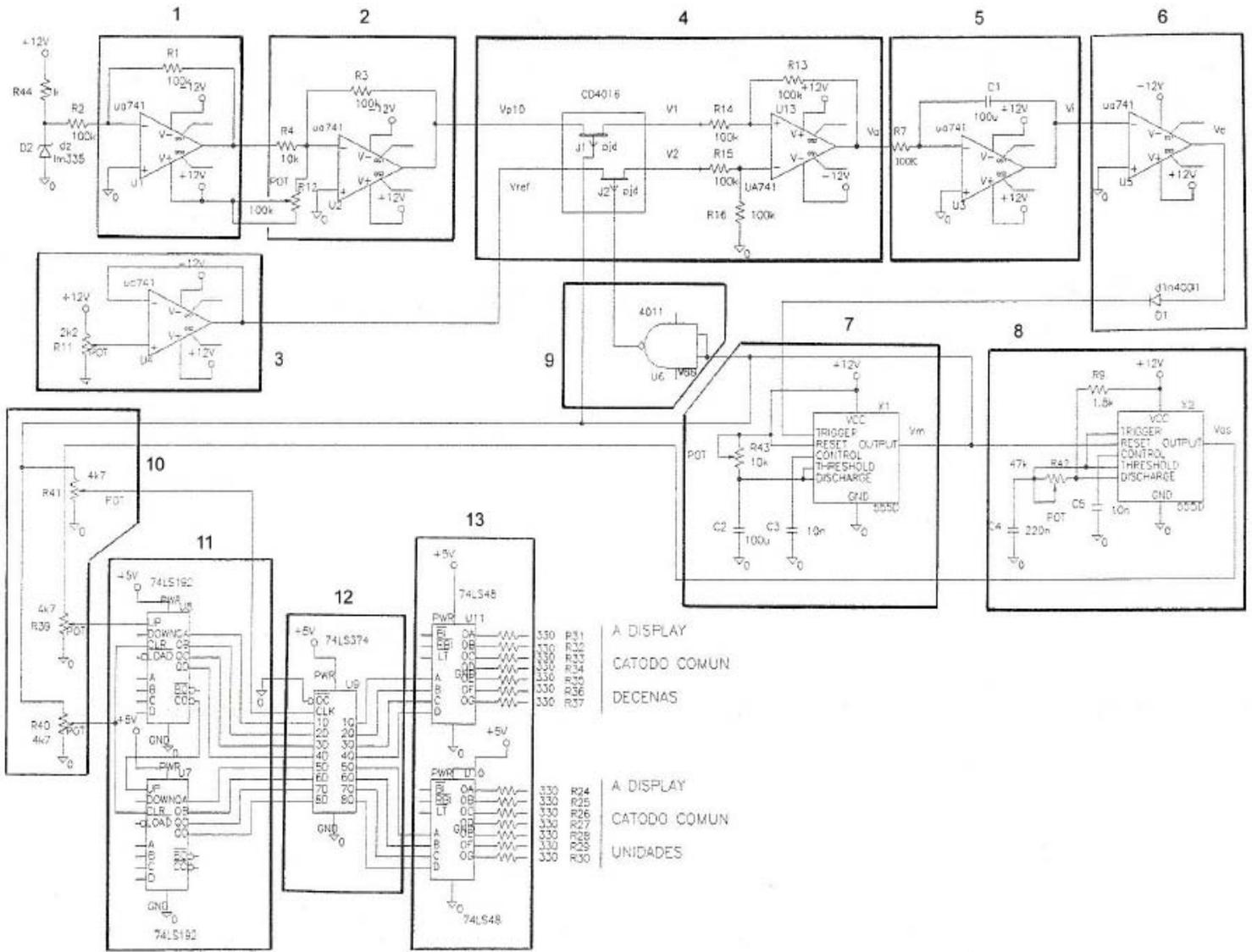
De manera análoga a la anterior, realizamos los cálculos para esta fuente de alimentación de 5V, obteniendo los siguientes resultados:

- Valor del voltaje a la entrada del regulador **8V**
- Tensión de rizado = **4V**, Valor de pico (V_p) = **12V**
- R (con una intensidad por exceso de 0,5A)= **10 Ω** y $t_1 = 7,67$ ms
- Condensador electrolítico= **1891 μF** \rightarrow Se adopta un **C=2200 μF** de **16V**.
- Se adopta un transformador de **12V**.

3.3. Esquemas resultantes de las dos fuentes de alimentación de $\pm 12V$ y +5V respectivamente



4. ESQUEMA GENERAL DEL CONJUNTO



Observaciones:

La tensión de alimentación del C.I. 4016 (multiplexor) y el C.I. 4011 (de la puerta NAND), aunque no quede reflejado en el esquema será de 12V.



ISSN 1988-6047 DEP. LEGAL: GR 2922/2007 Nº 21 AGOSTO DE 2009

5. BIBLIOGRAFÍA

- 📖 Masot Peris, Rafael. (2003). *Tecnología electrónica*. Valencia: Universidad Politécnica Valencia.
- 📖 Hermosa Donate, Antonio. (1997). *Técnicas electrónica digitales: Tecnología y circuitería en TTL y CMOS*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- 📖 Cembranos Nistal, Florencio Jesús (2000). *Electrónica general*. Madrid: Thomson Paraninfo, S.A.

Autoría

- Antonio José Heredia Soto
- IES Reyes Católicos de Vélez-Málaga (Málaga)
- antheso@gmail.com