

# 1 Sensor de Temperatura

## 1.1 Introducción

Se implementará un sensor de temperatura utilizando el circuito integrado LM35, un circuito integrado cuya tensión de salida varía linealmente con la temperatura.

Según la datasheet del integrado mencionado anteriormente del fabricante Texas Instruments "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors", con última revisión en diciembre de 2017, el integrado ofrece un rango de medición asegurada de entre  $-55^{\circ}\text{C}$  y  $150^{\circ}\text{C}$ , con una variación de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , siendo el  $0^{\circ}\text{C}$  correspondiente a  $0\text{V}$ .

Se busca implementar a partir de estos valores, un sensor de temperatura capaz de medir con máxima excursión entre  $35^{\circ}\text{C}$  y  $45^{\circ}\text{C}$ , con  $0\text{V}$  correspondiendo a  $35^{\circ}\text{C}$  y  $5\text{V}$  a  $45^{\circ}\text{C}$ .

A partir del circuito se podrá utilizar un conversor analógico-digital para lograr manipular la información de temperatura como se requiera.

Se tuvo como prioridad minimizar la cantidad de componentes utilizados, garantizar la confiabilidad y precisión de los valores que el circuito devuelva. Se tuvo en cuenta la protección del circuito receptor de la señal, haciendo que la señal de salida no sobrepase el intervalo  $[-1;6]$  volts.

## 1.2 Análisis del LM35 y condiciones a tener en cuenta

Según la datasheet mencionada anteriormente, deben mencionarse ciertas consideraciones a tener en cuenta:

- El error máximo del LM35 para medir temperatura es de  $0.5^{\circ}\text{C}$ , por lo que el circuito derivado a partir de él no podrá asegurar un error menor a este mismo.
- La tensión de alimentación para el LM35 será de entre  $-0.2\text{ V}$  y  $35\text{ V}$  como valores máximos,  $4\text{V}$  y  $30\text{ V}$  como valores típicos.
- La máxima temperatura de juntura es  $150^{\circ}\text{C}$ , la cual no se contradice con el rango de valores elegidos para el circuito implementado. La máxima temperatura de juntura es la máxima temperatura que la juntura del semiconductor interno puede tolerar manteniendo al LM35 en estado operativo.
- La corriente de entrada del LM35 será baja, de  $60\mu\text{A}$  máximo.
- La corriente de salida del LM35 tomará un valor máximo de  $10\text{mA}$ .
- El LM35 tiene una impedancia de salida baja, de  $0.1\Omega$ .

Es importante hacer notar que una baja impedancia de salida se corresponde con un circuito emisor de señal como es el caso de un sensor de temperatura. Esto es así porque si la señal emitida en tensión deberá ser recibida por otro circuito que interpretará o modificará la señal recibida, y si la impedancia de entrada del circuito receptor fuera más baja que la de salida del emisor, entonces siendo  $z_1$  la impedancia de salida del emisor y  $z_2$  la impedancia de entrada del receptor, basándonos en el teorema de Thevenin, se realiza un divisor de tensión:  $V_o = \frac{z_2}{z_1 + z_2} V_i$

Donde  $V_i$  es la tensión de entrada y  $V_o$  la de salida. Si se asume que la potencia se mantiene constante en el traspaso entre los dos circuitos, se aprecia de aquí que si  $|z1| \ll |z2|$  y  $1 \ll |z2|$ , entonces  $\frac{z_2}{z_1 + z_2} \approx 1$ , con lo cual la tensión de salida del circuito emisor original sería equivalente a la tensión de entrada del circuito receptor, por lo que la señal sería recibida correctamente en valor.

Es por esto que se intentará obtener una impedancia de entrada de nuestro circuito adaptador mucho mayor a la impedancia de salida de  $0.1\Omega$  del LM35.

### 1.3 Cambio de rango operacional

El comportamiento del LM35 puede ser representado matemáticamente con una transformación lineal de grados celsius a tensión en volts

$TL_{35}$ :  $c \in [-55; 150] \rightarrow v \in [-0.55; 1.5] / TL_{35}(c) = 0.01 \cdot c$ . El circuito a implementar pretende utilizar una transformación lineal

$TL_{cambio}$ :  $v_1 \in [0.35; 0.45] \rightarrow v_2 \in [0; 5]$  de forma tal que  $TL_{cambio}(TL_{35}(c)) = TL_{sensor}(c)$  donde  $TL_{sensor} : c \in [0.35; 0.45] \rightarrow v_2 \in [0; 5]$  será la transformación total del circuito.

Así, se deberá resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} 0 = m \cdot 0.35 + b \\ 5 = m \cdot 0.45 + b \end{cases} \quad (1)$$

Que tiene como solución  $m=50 \cap b = -17.5$ .

Para realizar la transformación lineal sobre la salida del LM35, se decidió utilizar un opamp con realimentación negativa, dispuesto de la siguiente manera:

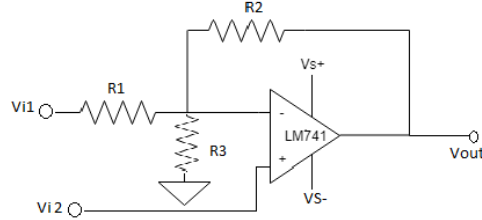


Figura 1: Cambio de rango operacional en circuito

El cual se resolverá por superposición (suponemos que el opamp está operando en su zona lineal) para mostrar que efectivamente realiza la transformación requerida:

- Pasivamos la fuente  $V_{i1}$ , dejando un no inversor:

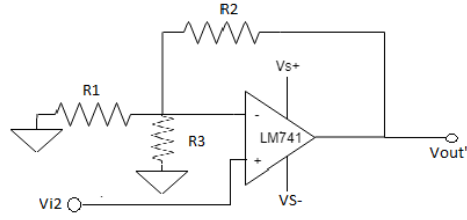


Figura 2: Vi1 pasivada

Entonces  $V_{out}' = (1 + \frac{R2(R1+R3)}{R1R3}) \cdot Vi2$

- Pasivamos la fuente Vi2, dejando un inversor:

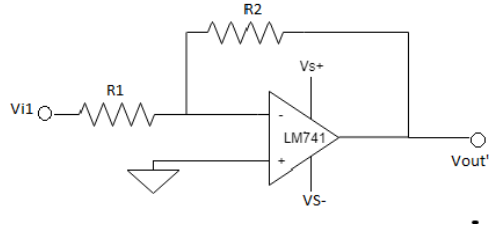


Figura 3: Vi2 pasivada

Entonces  $V_{out}'' = -\frac{R2}{R1} \cdot Vi1$

- Obtenemos la salida como la superposición de los dos estados calculados anteriormente:

$$V_{out} = V_{out}' + V_{out}'' = (1 + \frac{R2(R1+R3)}{R1R3}) \cdot Vi2 - \frac{R2}{R1} \cdot Vi1$$

Si Vi1 es una entrada continua positiva de valor Vs+ y Vi2 es la salida del LM35, entonces, para cumplir tanto con  $y = mx + b$  como con la solución al sistema de ecuaciones mencionada anteriormente:

$$\begin{cases} 50 = 1 + \frac{R2(R1+R3)}{R1R3} \\ -17,5 = -\frac{R2}{R1} \cdot Vs+ \end{cases} \quad (2)$$

Por lo que si Vs+ es la alimentación del LM35 y, dado que el mismo se podrá alimentar con cualquier valor de tensión que caiga en el rango recomendado de entre 4V y 30V, si se elige  $Vs+ = 7V$ ,

El sistema queda definido como:

$$\begin{cases} R2 = \frac{35R1}{2Vs+} = \frac{5 \cdot R1}{2} \\ R3 = \frac{5R1}{14Vs+-5} = \frac{5 \cdot R1}{93} \end{cases} \quad (3)$$

## 1.4 Protección del circuito a conectar

Dado que el nuevo sensor a implementar será utilizado para alguna aplicación en concreto, deberá ser conectado a un segundo circuito "receptor" que utilice la información de la temperatura actual, por ejemplo un conversor analógico-digital. Es por esta razón que se prohibirán tensiones de salida que puedan resultar peligrosas para el receptor. Se garantiza que la salida, por ende, no será superior a 6V ni inferior a -1V.

Para lograr lo anterior, se utilizará un diodo Zener, que hará clipping asimétrico a la señal de salida (ver pedal de distorsión o ej5 para mayor información sobre clipping).

Los diodos Zener suelen usarse para protección de circuitos y pueden ser representados por su curva característica:

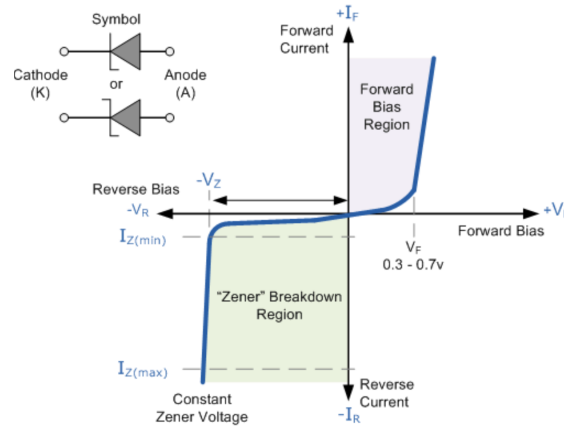


Figura 4: Curva característica del diodo Zener

De esta curva se hace notar que al superar el valor de tensión  $V_f$  o al llegar a un nivel de tensión menor a  $V_z$ , la demanda de corriente por parte del diodo aumentará exponencialmente. Es aquí cuando recordamos una de las condiciones de la subsección **Análisis del LM35 y condiciones a tener en cuenta**: La corriente de salida del LM35 tomará un valor máximo de 10mA. Esto deberá ser tenido en cuenta cuando se presente la implementación final del circuito, junto con la salida de corriente máxima del opamp a utilizar para la transformación lineal.

De esta manera, se buscará que los valores de  $V_f$  y  $V_z$  sean tales que la demanda de corriente sea tan alta luego de los mismos que la tensión de salida no pueda estos valores para que se logre suplir. De esta manera, se muestra gráficamente la tensión de salida en función de la tensión de entrada:

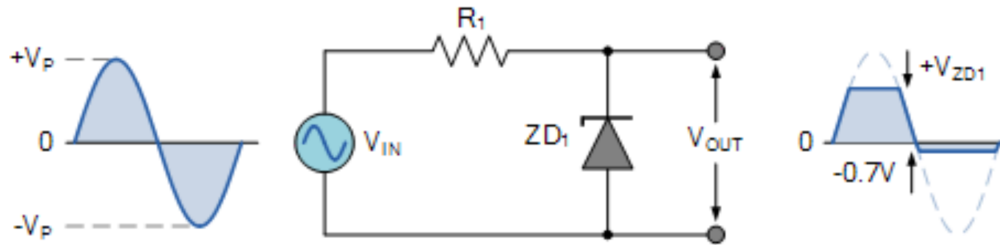


Figura 5: Efecto del diodo Zener sobre la entrada

Así es como se observa que  $V_f = -0.7V$  y  $V_z \approx 6V$ . Cabe destacar que el valor de  $V_z$  es aproximado a  $6V$  porque el valor no podrá ser excedido en absoluto como restricción de protección, por lo que  $V_z < 6V$ . Se elige un valor  $V_z = 5.6V$ .

## 1.5 Calibración del sensor

Debido al uso de fuentes no ideales y a los requerimientos de corriente de los opamps que generan ripple para la fuente, la tensión  $V_{s+}$  de alimentación para el LM35 no necesariamente administrará el valor fijo de tensión antes designado de  $7V$ , sino que será un valor cercano al anterior, y por lo tanto la relación entre resistencias mencionadas en la subsección **Cambio de rango operacional** que se elija previamente a la implementación no será exacta.

Además, se sabe que los valores de resistencia nominales no necesariamente coinciden con los valores de resistencias reales de los componentes a la hora de realizar el circuito, y caerán dentro de un cierto rango centrado en su valor nominal definido por su tolerancia.

Es por esto que los valores de resistencias que se elijan de antemano no convergerán precisamente al offset y a la escala requeridas previamente (valores de  $m$  y  $b$ ). De aquí que es necesario un proceso de calibración del sensor para su correcto funcionamiento.

El proceso de calibración, por ende, requerirá de ajustar los valores de resistencia de la subsección **Cambio de rango operacional**.

Se observa que no se podrá ajustar los valores de offset y de escalamiento independientemente uno del otro, ya que si bien  $R3$  solo participa del escalamiento, tanto  $R2$  como  $R1$  afectan al offset como así también al escalamiento, por lo que no se podrá alterar a  $R2$  sin alterar al offset.

Es por esta razón que el método de calibración será necesariamente iterativo. Se obtiene así un método iterativo que converja al resultado esperado con el grado de error de calibración que requiera la persona que realice el ajuste.

Para lograr el calibrado y hacer  $R2$  y  $R3$  variables dentro de cierto rango,  $R2$  y  $R3$  ahora quedarán expresadas como la combinación de un potenciómetro y un valor fijo de resistencia en serie, de la siguiente manera:

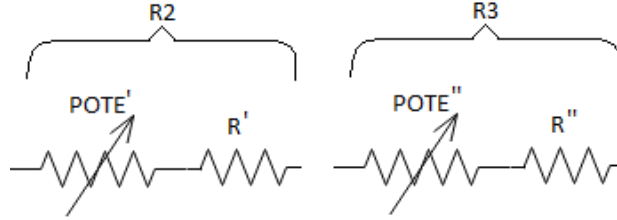


Figura 6: Expresión de R2 y R3 como combinación de potenciómetros en serie con resistencias fijas.

Una fuente externa se utilizará para calibrar el circuito, que simulará el input por parte del LM35. Se elige una fuente externa y no el LM35 para tener un rango de tensiones con el operar en vez de un único valor acorde a la temperatura actual determinada por el sensor. La señal a utilizar puede ser cualquiera que permita ajustar tanto la escala como la tensión de offset, pero se elige una rampa para la calibrar por su sencillez a la hora de determinar valor medio, amplitud y desplazamiento vertical.

#### **Método de calibración:**

Se conecta la salida del circuito a un osciloscopio. Se posiciona al switch de calibración en aquella posición que permite imponer una señal distinta a la del LM35 para calibrar. La fuente deberá generar una rampa (sawtooth signal) con duty cycle del 100%, con LoLevel de 350mV y HiLevel de 450 mV. La frecuencia de esta señal deberá ser baja, eligiéndose a comodidad en un valor del orden de los 100 Hz. Se mide con el osciloscopio la señal de entrada, ajustando el trigger a comodidad.

El método de calibración propuesto buscará lograr una suerte de cuasi-independencia entre R2 y R3. Se tratará a R2 como la resistencia que maneja al offset y R3 como la que manejará al escalamiento. Para el caso en el cual no se pueda seguir recurriendo a R2 para modificar al offset (es decir, el preset de R2 ha llegado a su límite), se podrá utilizar a R3 para acomodar a la señal.

Se seguirán los siguientes pasos:

1. En el osciloscopio, se ajustará la escala vertical para lograr que se logren visualizar correctamente las dos señales. Tener en cuenta que la señal de salida estará finalmente situada entre los 0V y los 5V, por lo que si se tiene que ajustar la escala en cualquier momento de la calibración, se deberá hacerlo.
2. Se utilizará la base temporal del osciloscopio: La rampa de entrada y de salida se posicionarán de forma tal que las señales se corten en el extremo derecho de la pantalla y tengan su continuación en el extremo izquierdo de la pantalla sin saltos. Puesto de otra forma, se busca que el intervalo temporal del display de la señal sea un múltiplo natural del período de la señal.
3. Se pondrá en display el average de la señal usando las opciones de Quick Measure del osciloscopio.
4. Se modificará R2 (ajustando el preset) de manera tal que el valor medio o average de la señal de salida sea de 2.5V. En el caso en que esto sea imposible porque se ha llegado al límite del preset, se podrá utilizar R3 para lograr que el valor medio o average de la señal de salida sea de 2.5V.
5. Se modificará R3 (ajustando el preset) de manera tal que o el extremo inferior de la señal de salida termine en 0V o el extremo superior termine en 5V. Si no se puede seguir modificando a R3 porque se ha llegado al límite del preset, se da por terminado el paso.

- ## 1.6 Implementación del circuito



## 1.7 Mediciones y conclusión

7

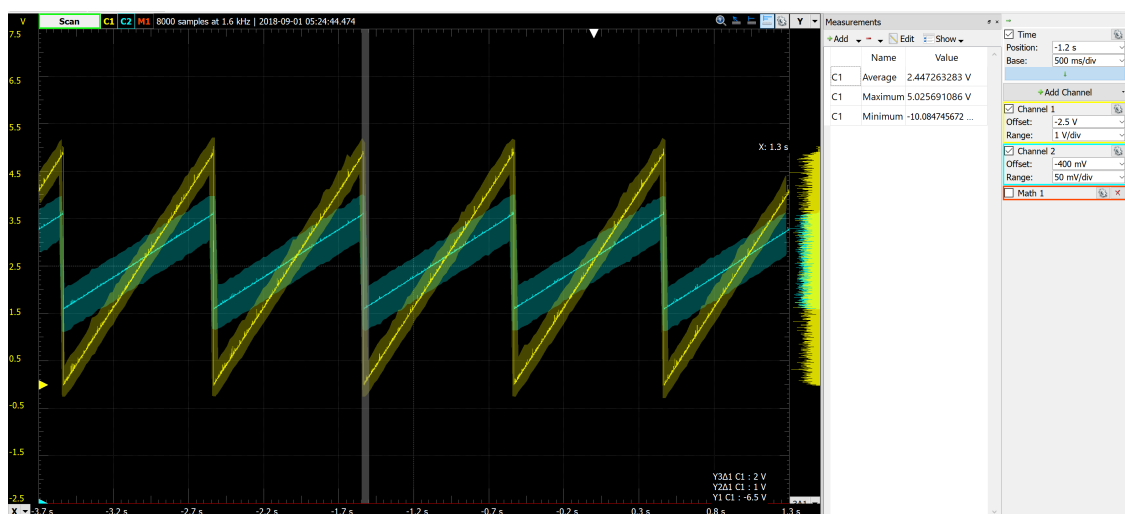


Figura 8: Circuito calibrado. CH2:Entrada del circuito con la rampa de calibracion. CH1: Salida del circuito calibrado.

De esta manera, se demuestra que el escalamiento  $y = 50 * x - 17.5$  se cumple con el circuito obtenido y el método de calibración es adecuado.

Se procedió a medir la temperatura con un tester del paníol y el LM35 con el osciloscopio y se verificó que las salidas coincidían.

Las ventajas del circuito implementado son predominantes en su bajo coste, ya que se utilizan pocas resistencias y un sólo integrado, en detrimento de la falta de independencia entre los presets y el factor que ajustan a la hora de calibrar.

## 1.8 Datasheet

Se proporciona una datasheet del nuevo sensor con los datos más importantes. Esta datasheet fue basada en la datasheet del LM35 de Texas Instruments mencionada anteriormente:



### 3 Description

### **4.3 Electrical Characteristics**

<b><u>PARAMETER</u></b>	<b><u>TEST CONDITIONS</u></b>	<b><u>MIN</u></b>	<b><u>MAX</u></b>	<b><u>Average</u></b>	<b><u>UNIT</u></b>
Accuracy	T in [35;45]		<u>0.7</u>		°C
Sensor gain (average slope)	T in [35;45]			0.5	V/°C