

Capítulo 4. Sensor de Temperatura.

4.1 Introducción a la termometría.

De acuerdo con Carr la temperatura es uno de los parámetros físicos medidos más frecuentemente y es importante para casi todas las aplicaciones (médicas, científicas o de ingeniería) de tecnología de sensores [12]

Entre las diferentes escalas usadas en termometría (es decir, usadas en la medición de temperatura) están las escalas Fahrenheit y Celsius (también llamada escala Centígrada) así como las escalas Kelvin y Rankine. Las primeras dos son más conocidas familiarmente y sus intervalos se definieron originalmente por el punto de congelación y el punto de evaporación del agua bajo condiciones de temperatura y presión estándares.

Existen diferentes formas de sensores de temperatura: Resistores térmicos (RTDs y termistores), termopares y dispositivos semiconductores de unión PN. Aunque existen diversas aplicaciones para las diferentes formas de sensores, éstas dependen de parámetros clave y otros factores de diseño que normalmente favorecen una forma de sensor sobre otra.

Los resistores térmicos son elementos conductores diseñados para variar su resistencia eléctrica de manera predecible al aplicar cambios en temperatura. Los termopares funcionan en base a la termo-electricidad (aquella electricidad generada por calor), que fue descubierta por Thomas Seebeck en 1821 y que posteriormente Becquerel

utilizó para medir temperatura. Por último si un diodo rectificador de estado-sólido se conecta a un óhmetro, la resistencia debido a la polarización en forma directa del diodo a temperatura ambiente puede ser medida. Si el diodo se calienta temporalmente el óhmetro desplegará un decremento en la resistencia conforme la temperatura aumenta.

Dado lo anterior, la selección de un sensor de temperatura sobre otro implica hacer una serie de compromisos entre las características disponibles que de acuerdo con Trietley las más importantes son: rango de temperatura, sensibilidad, exactitud, linealidad y costo.[13]

Un compromiso básico se hace entre el rango y la sensibilidad, normalmente los dispositivos con rangos más amplios ofrecen menor sensibilidad. Por otro lado la exactitud y el costo se relacionan ya que el esfuerzo necesario para mantener un alto nivel de exactitud requiere atención adicional a materiales, detalles de manufactura y pruebas.

4.2 Termómetro de diodo.

La mayoría de los semiconductores sensores de temperatura se basan en la variación de dos cantidades sensibles a la temperatura como son: el voltaje de polarización directa de una unión $p-n$ y la resistencia propia del silicio sometido a algún proceso de dopaje. Thrietley afirma que la variación de ambos es aproximadamente lineal.

Una unión $p-n$ (ya sea un diodo o la unión base-emisor de un transistor) requiere 0.7V a una temperatura de 25°C cuando está polarizado directamente. Conforme la temperatura aumenta, este voltaje decrece en aproximadamente $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$. De forma que los diodos y transistores se utilizan algunas veces como sensores de temperatura,

especialmente en aplicaciones de compensación donde la exactitud absoluta no es importante.

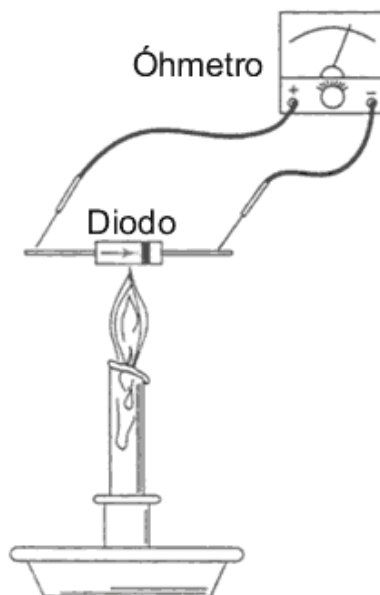


Figura 4.1. Medición de la resistencia de un diodo al ser calentado.

La sensibilidad exacta depende del dopaje, la geometría de la unión y la densidad de corriente, de forma que es posible ajustar sensibilidades individuales cambiando la corriente en cada caso.

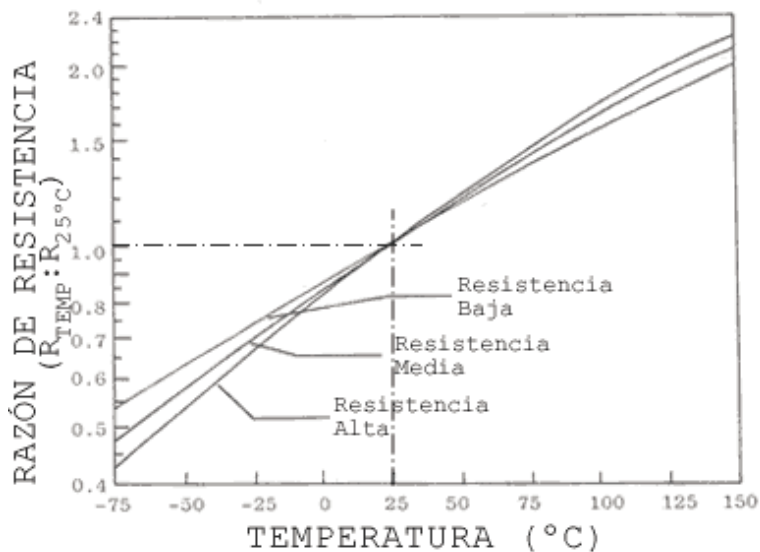


Figura 4.2. Curvas de resistencia vs. Temperatura de un típico termistor PTC de Silicio.

Existen varias familias diferentes de sensores de temperatura en circuitos integrados, cuyo rango de operación generalmente varía entre -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$ o menos, son dispositivos bastante lineales, sin embargo sus exactitudes y estabilidades, así como la variedad de empaques y ensambles disponibles, no son ni siquiera cercanamente iguales a otros tipos de sensores de temperatura. Otra desventaja es que los circuitos de silicio son afectados adversamente por la humedad y ambientes contaminantes, al tiempo que es sensible a influencias ambientales como interferencia electromagnética y a la luz visible, sin embargo el costo de este tipo de dispositivos es en muchos casos menor a los demás dispositivos existentes.

4.3 Construyendo un Sensor de Temperatura.

Al igual que con el multiplexor, muchos entusiastas de LEGO han ideado alternativas para crear sus propios sensores de temperatura.

De hecho, Grupo LEGO® ofrece un sensor de temperatura con Número de Parte #2980_c01 como el que se muestra en la Figura 4.3 pero la disponibilidad es poca y su costo es elevado aproximadamente USD \$32.50 en Little Plastic Bricks.[14]



Figura 4.3. Sensor de Temperatura.

En particular Gasperi intentó construir su propio sensor de temperatura conectando un termistor de coeficiente negativo de temperatura (NTC) con valor de 10k a temperatura ambiente (25°C) aunque sugiere que en realidad el RCX espera un valor de 12k a 25°C .

Phillipe Hurbain explica dos pruebas realizadas con dos termistores comerciales: el 2322-640-63103 de BC-Components y el NTSA0XV103FE1B0 de Murata conectados cada uno en serie con una resistencia de 2.2k y descubre que la variación entre la lectura del RCX y la de un termopar varían en menos de 1°C. [15]

Kekoa Proudfoot ha documentado el código que el RCX utiliza para convertir el valor RAW en un valor de temperatura y que está publicado en su artículo *RCX Internals*, (este listado se ha reproducido en el Apéndice F) y se aprecian los ajustes que se llevan a cabo, dependiendo el rango de temperatura que esta sensando el dispositivo, debido a la no linealidad de los termistores. La última parte del programa decide si el resultado a mostrar en el *Display* será en escala centígrada o en grados Fahrenheit.



Figura 4.4 Sensor realizado por Hurbain.

Vale la pena mencionar que el sensor construido por Hurbain es muy parecido al original de LEGO como se muestra en la Figura 4.4 y de acuerdo con el autor el error es siempre menor a 1°C.

De lo discutido hasta el momento podemos observar que en realidad ya no hay mucho misterio detrás del sensor de temperatura por lo que recordando el objetivo de este proyecto se decidió reproducir un experimento que tuviera un menor costo, por lo que se decidió realizar un termómetro de diodo.

La elección de este dispositivo se debió a que presenta linealidad bastante aceptable en el rango de 0°C a 100°C de acuerdo con las gráficas obtenidas de la siguiente manera.

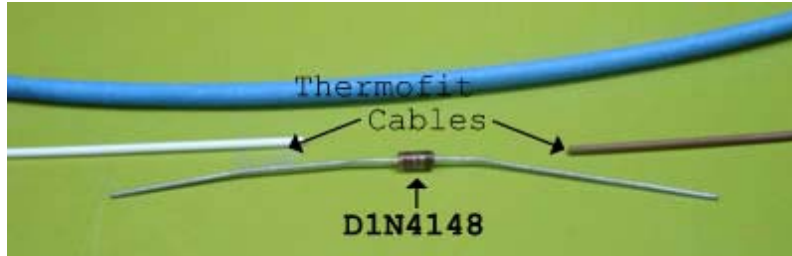


Figura 4.5. Elementos para transductor de temperatura.

Primero se realizó una especie de termo pozo al soldar un par de cables de cobre a los extremos de un diodo 1N4148 y cubrirlo con *thermofit*, de esta forma el dispositivo podía ser sumergido sin ningún problema en agua.



Figura 4.6. Transductor de Temperatura.

Después se consiguieron hielos que se colocaron en un vaso de precipitados, en él se sumergía el diodo enredado a un termómetro de mercurio, como se muestra en la Figura 4.7, con la idea de medir temperaturas cercanas a 0°C.

El vaso se colocaba sobre una parrilla eléctrica de forma que la temperatura empezara a aumentar hasta un valor cercano a 100°C. Conforme la temperatura aumentaba, gracias al calor generado por la parrilla, se comparaba la escala de temperatura del termómetro con la lectura del voltímetro a diferentes intervalos.

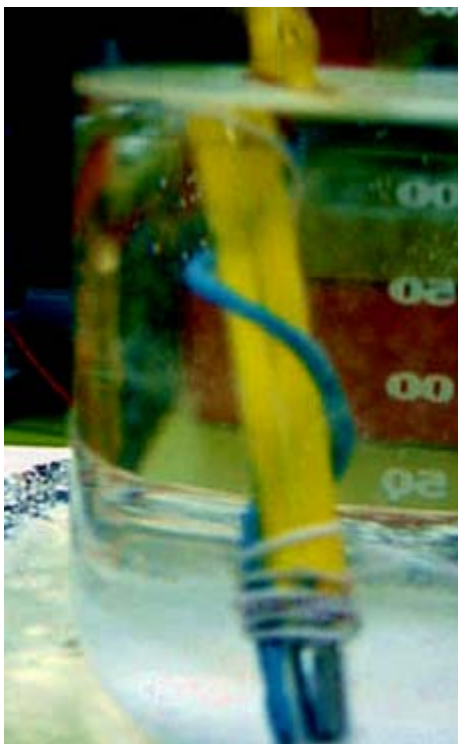


Figura 4.7 Diodo y Termómetro.

Cabe aclarar que en la primera medición realizada, el diodo se conectó directo al RCX pero debido al largo tiempo requerido para una estabilización de la temperatura (y por ende una lectura correcta tanto del termómetro como del voltímetro) el voltaje en las baterías empezaba a disminuir, lo que hacía que al terminar de capturar la tabla, ésta estuviera incorrecta dado que el voltaje aplicado no era constante durante todo el experimento.

El hecho de que el voltaje varíe, afecta el experimento, ya que modifica la corriente que pasa a través del diodo, con lo que el voltaje de polarización del diodo se vuelve una función que depende de dos variables: corriente y temperatura.

Debido a esto, se repitió la medición, pero ahora utilizando un regulador de voltaje de la empresa Microchip el modelo usado fue el MCP1700 5002 que a una temperatura de 25°C entrega un voltaje de $5V \pm 0.4\%$ a partir de tan sólo 5.6V, a

diferencia del L7805 que regula a partir de 7V, de acuerdo con las hojas de especificación incluidas en el Apéndice E.

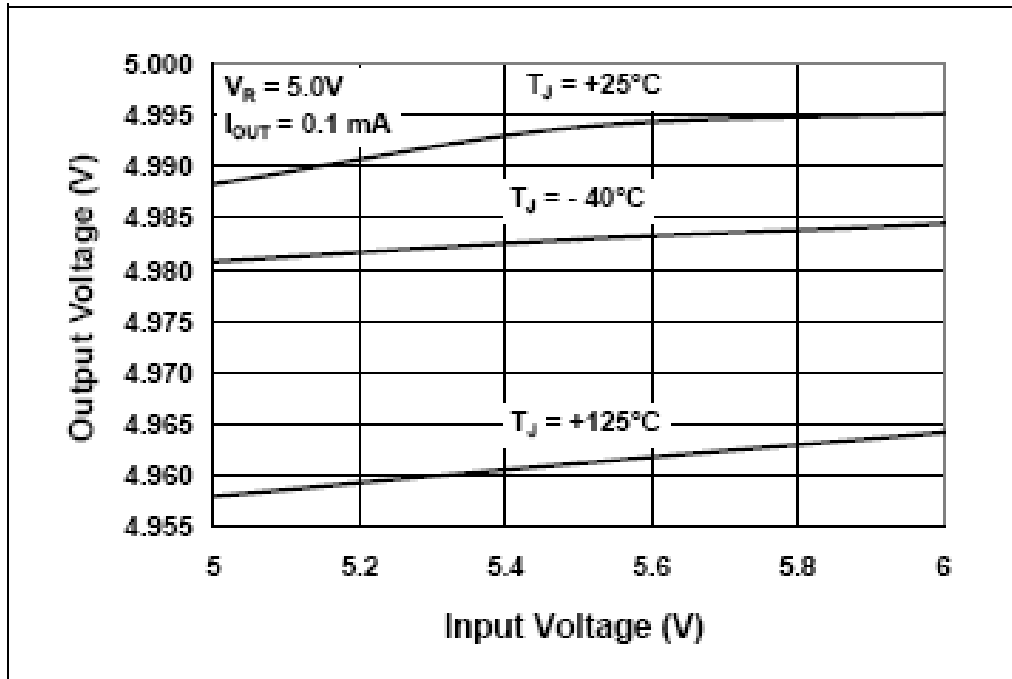


Figura 4.8. Voltaje de Salida vs. Voltaje de Entrada del MCP1700 5002.

Previendo el circuito que se iba a realizar para acondicionar la señal posteriormente se conectó el diodo entre un potenciómetro de 20k ajustado a un valor de 17.56k y una resistencia de 1k, de forma que todas las resistencias conectadas al opamp respeten el límite inferior de operación sugerido para un buen funcionamiento ($R \geq 1k$).

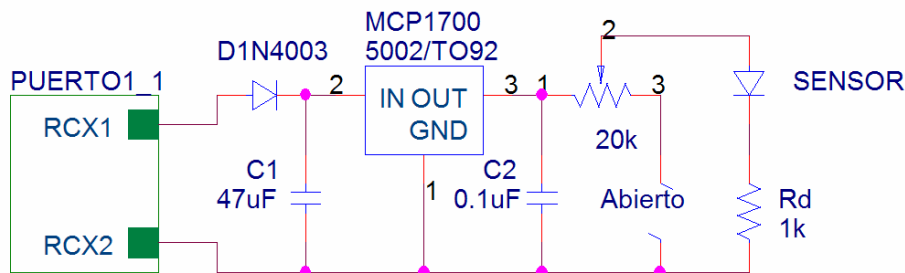


Figura 4.9. Alimentación del Sensor a través del regulador.

De este modo se encontró que el voltaje de polarización del diodo se reduce conforme aumenta la temperatura (Ver Tabla 4.A). Gracias al regulador la corriente

suministrada al diodo era constante y las variaciones en el voltaje eran debidas sólo al cambio de temperatura.

Tabla 4.A. Lecturas del Termómetro y Voltímetro.

Temperatura (Termómetro de Mercurio)	Voltaje Diodo (Voltímetro)	Temperatura (Termómetro de Mercurio)	Voltaje Diodo (Voltímetro)	Temperatura (Termómetro de Mercurio)	Voltaje Diodo (Voltímetro)	Temperatura (Termómetro de Mercurio)	Voltaje Diodo (Voltímetro)
0 °C	0.607	20 °C	0.562	50 °C	0.497	81 °C	0.426
1 °C	0.605	24 °C	0.554	53 °C	0.489	84 °C	0.418
2 °C	0.603	25 °C	0.551	58 °C	0.479	88 °C	0.411
4 °C	0.598	30 °C	0.541	64 °C	0.465	90 °C	0.407
6 °C	0.593	32 °C	0.535	67 °C	0.458	91 °C	0.404
9 °C	0.586	37 °C	0.524	68 °C	0.455	92 °C	0.401
10 °C	0.584	41 °C	0.516	71 °C	0.449	93 °C	0.398
13 °C	0.578	43 °C	0.511	75 °C	0.44		
16 °C	0.572	46 °C	0.506	78 °C	0.434		

Como se mencionó previamente el nivel de voltaje de las baterías del RCX afectaría directamente la corriente aplicada al diodo si no fuera por el regulador de voltaje, y por ende afectaría también al voltaje de polarización del diodo. Si repetimos el experimento manteniendo fija la temperatura en 0.8°C pero desconectamos el regulador y variamos el voltaje aplicado (voltaje de la fuente) mediante una fuente de poder marca LEADER modelo LPS152, obtendríamos los valores de la Tabla 4.B.

Este problema de alimentación debe afectar también al termómetro fabricado por el Grupo LEGO® ya que aparentemente no hay ningún control para contrarrestar el efecto de la variación de voltaje de las pilas. De hecho, no es culpa del diseño, sino de la variación en la fuente de voltaje debido al tipo de alimentación que en este caso es alimentación por baterías.

Tabla 4.B. Voltaje de polarización del diodo cuando varía el voltaje de alimentación.

Temperatura = 0.8 °C			
Voltaje Puerto (Voltímetro)	Voltaje Diodo (Voltímetro)	Voltaje Puerto (Voltímetro)	Voltaje Diodo (Voltímetro)
8.30	0.754	6.70	0.740
7.98	0.751	6.40	0.736
7.80	0.749	6.09	0.733
7.45	0.746	5.81	0.730
7.00	0.743	5.39	0.724

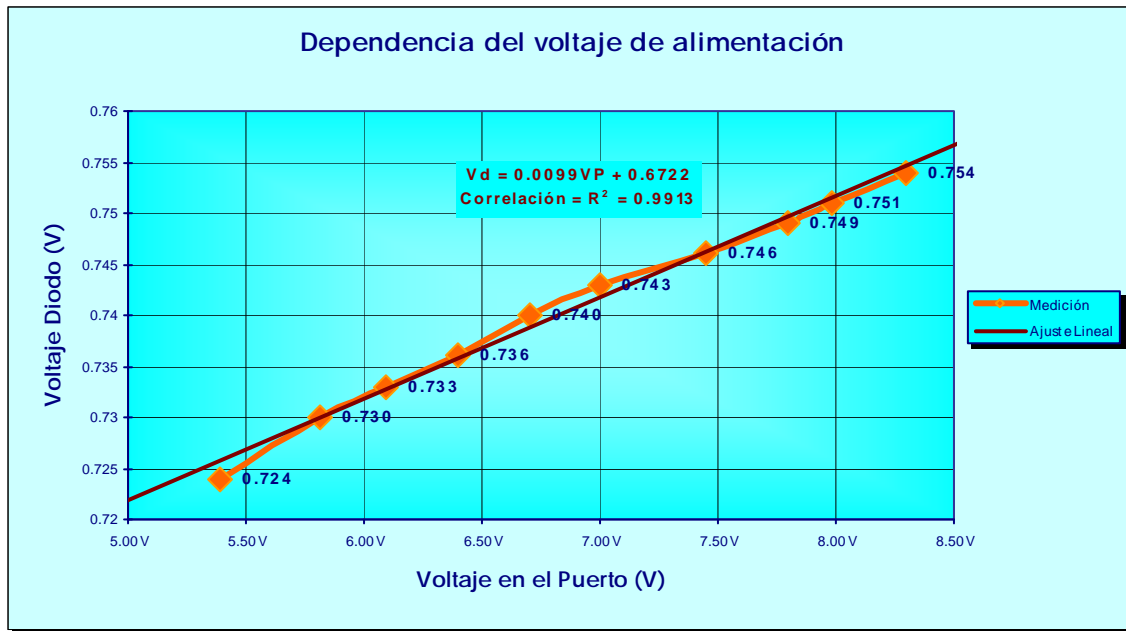


Figura 4.10. Dependencia del voltaje de la fuente. (Medición y aproximación lineal).

De acuerdo con la Figura 4.10, que muestra los puntos de la medición así como su recta de mejor ajuste, se puede suponer que el hecho de que el voltaje en las pilas disminuya, simplemente provoca un desplazamiento hacia abajo de la línea con respecto al punto óptimo, es decir, cuando las pilas están completamente cargadas.

Sin embargo, la única forma de comprobar que sólo había un desplazamiento (u *offset*) del punto de partida era volver a realizar el mismo experimento variando la temperatura para diferentes valores de voltaje de la fuente. Las tablas de estos otros dos

experimentos se incluyen en el Apéndice G. Por otro lado la Figura 4.11 muestra que nuestra suposición fue correcta dado que para diferentes voltajes de alimentación se crea una familia de rectas prácticamente paralelas, cuyo cruce con el eje vertical es dependiente del valor de voltaje provisto por la fuente.

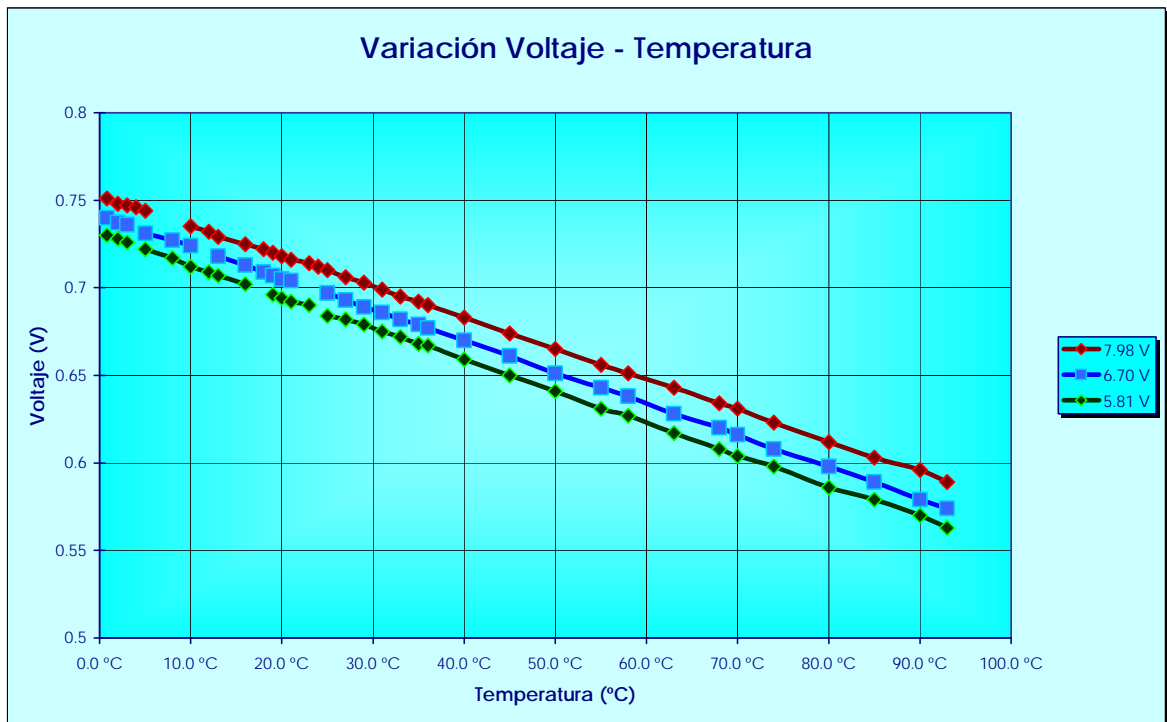


Figura 4.11. Variación del voltaje de polarización a diferentes voltajes de alimentación.

Nuevamente podemos observar la ventaja de utilizar el regulador de voltaje, ya que sin él tendríamos esta familia de rectas correspondientes a los diferentes voltajes de las baterías, y deberíamos realizar un ajuste diferente para cada una de ellas, de forma que a una temperatura dada siempre tuviéramos el mismo voltaje después de haber acondicionado la señal producida por el diodo, sin importar si las baterías están completamente cargadas o no. Mediante el uso del regulador MCP1700 5002 no importa el voltaje presente en las baterías, el diodo siempre va a dar la misma recta mostrada en la Figura 4.12.

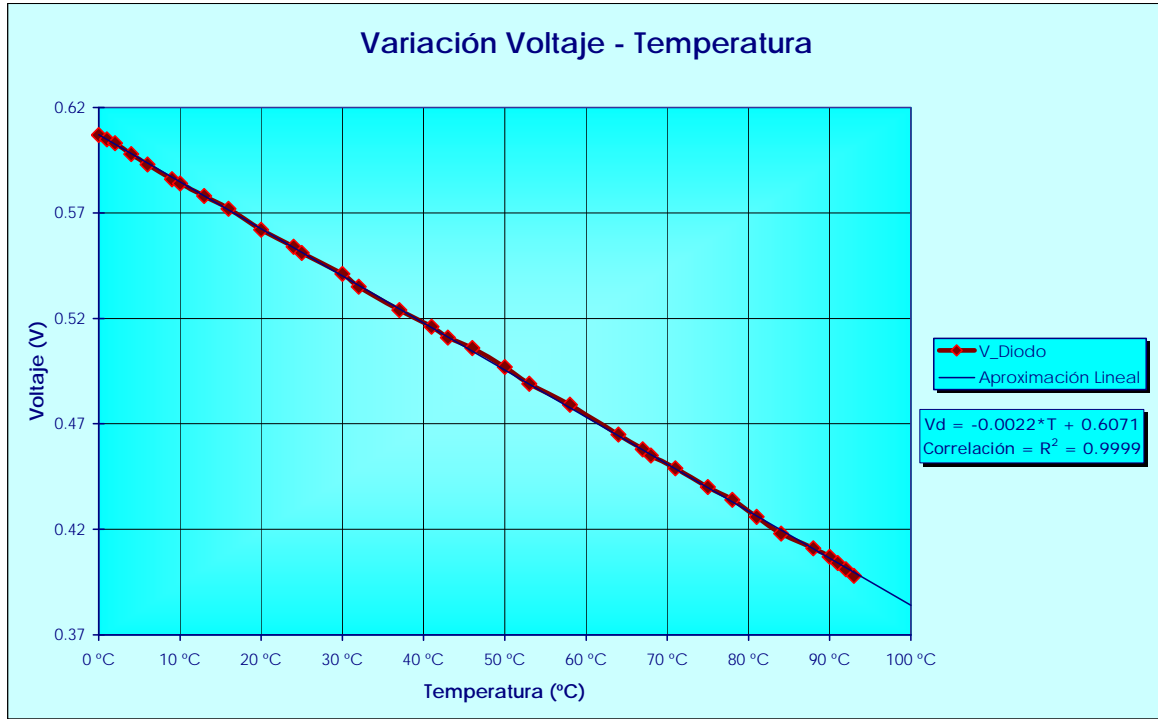


Figura 4.12. Voltaje de polarización del diodo usando el regulador de voltaje.

Aplicando las técnicas de regresión lineal para los datos de la Tabla 4.A observamos que el coeficiente de correlación es muy alto ($R^2=0.9999$) y del mismo modo obtenemos la Ecuación 4.1.

$$V_d = -.0022 \cdot T + .6071$$

Donde T = temperatura(°C)

Ecuación 4.1

De esta forma, podemos ver que cada vez que la temperatura aumenta en 1°C, el voltaje de polarización del diodo se reduce en 2.2mV.

La variación máxima del voltaje debido a la temperatura es bastante pequeña (176mV para un cambio de 0°C a 80°C), en otras palabras, si conectáramos el diodo de forma directa al puerto del RCX, sabiendo que el voltaje varía únicamente 2.2mV por cada grado, necesitaríamos que el RCX tuviera una resolución muy grande para poder determinar la temperatura correcta.

Aunque un convertidor de 10 bits provee un buen nivel de resolución, no es tan útil para medir señales que varían tan sólo 176mV sobretodo si sabemos que su escala de lectura completa está ajustada desde 0V hasta 5V, por eso sería deseable que la señal se amplificara para aprovechar al máximo el rango dinámico del convertidor análogo-digital.

Dado lo anterior, se buscó un diseño que amplificara la señal y al mismo tiempo invirtiera el signo, de forma que si la temperatura aumentaba también lo hiciera el voltaje. Fue así que se diseñó el circuito mostrado en la Figura 4.13.

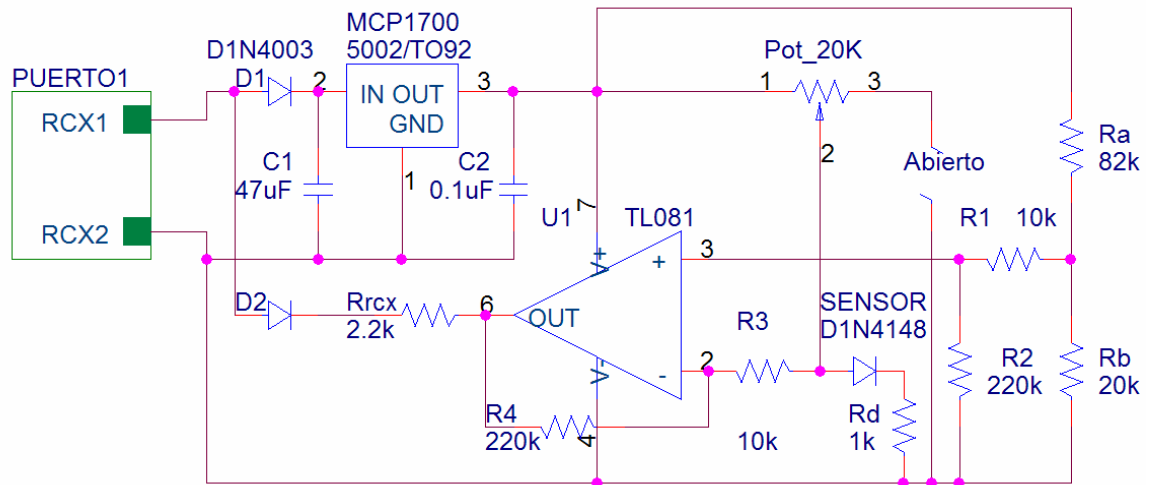


Figura 4.13. Circuito de acondicionamiento.

En este circuito se ha eliminado el puente rectificador de onda completa, ya que a pesar de que éste permitía un correcto funcionamiento del sensor sin importar la polaridad del voltaje de alimentación, también consumía aproximadamente 1.3V del voltaje disponible (650mV por cada diodo que conduce). No obstante, se han preservado 2 diodos que impiden que al conectar el voltaje con polaridad incorrecta, se produzca de hecho, un daño al circuito. Y aunque en caso de conectarlo incorrectamente el sensor no

funcionará, se ha reducido el consumo del voltaje disponible y al mismo tiempo se ha reducido la dimensión del circuito.

El capacitor C_1 se carga a través de D_1 y tiene la función de mantener el voltaje V_C constante en el momento de lectura (cuando el RCX alterna el voltaje a 5V). La resistencia R_{RCX} aísla V_{Out} del voltaje de alimentación y permite al RCX la lectura correcta a través del diodo D_2 .

El regulador MCP1700-5002 tiene la función de mantener el voltaje fijo a 5V con ayuda de C_1 y C_2 sin importar el voltaje presente en las baterías.

El núcleo de este circuito lo forma el amplificador operacional TL081 en su configuración de Amplificador Diferencial. En este modo de operación el voltaje de salida cuando $R_1=R_3$ y $R_2=R_4$ es:

$$V_{Out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{Pos} - V_{Neg})$$

Ecuación 4.2

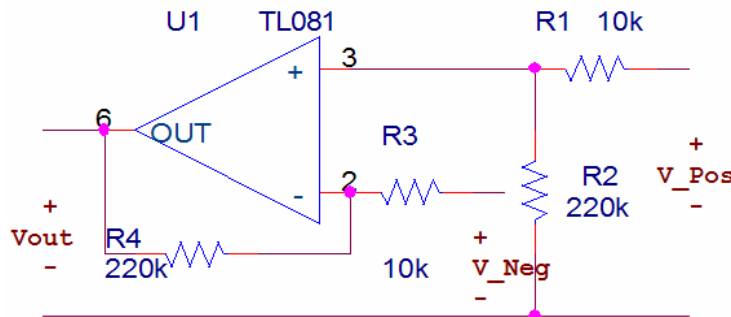


Figura 4.14. Amplificador Diferencial.

Donde V_{Neg} es el voltaje que provoca la resistencia de 1k y el voltaje en el diodo D1N4148 polarizado a través del potenciómetro y R_d , y V_{Pos} es aproximadamente el voltaje que se obtiene del divisor formado por R_a y R_b .

Matemáticamente:

Que es lo mismo al circuito de la Figura 4.16, donde se han eliminado algunos componentes que no son de interés con el fin de simplificar el análisis.

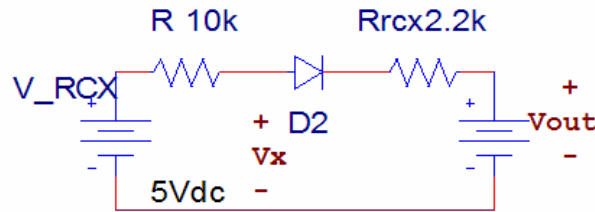


Figura 4.16. Circuito equivalente simplificado.

La corriente en este circuito será:

$$i = \frac{5 - V_{D2} - V_{Out}}{12.2} \quad [\text{mA}]$$

Ecuación 4.5

De forma que el voltaje de interés (V_x) considerando que cada diodo se polariza con 600mV en realidad se va a leer como:

$$V_x = 0.8197V_{Out} + 1.3934 \quad [\text{V}]$$

Ecuación 4.6

De acuerdo con la fórmula anterior, si V_{Out} fuera cero, el mínimo voltaje leído sería de 1.4V, sin embargo, debemos recordar que es a partir de las fuentes de voltaje conectadas en las terminales positiva y negativa ($V+$ y $V-$) del amplificador operacional que se polarizan los transistores internos, de tal forma que tanto el límite de voltaje inferior y el superior en conjunto ofrecerán un rango menor al del voltaje conectado entre las terminales de alimentación (en este caso: 5V).

Lo anterior provoca que aunque $V_{Pos}=V_{Neg}$, V_{Out} no puede ser igual a cero (con referencia al voltaje presente en su terminal $V-$) sino que será igual al valor del límite inferior. Del mismo modo si se satura el opamp hacia arriba, el voltaje a la salida no será 5V, sino el valor del límite superior.

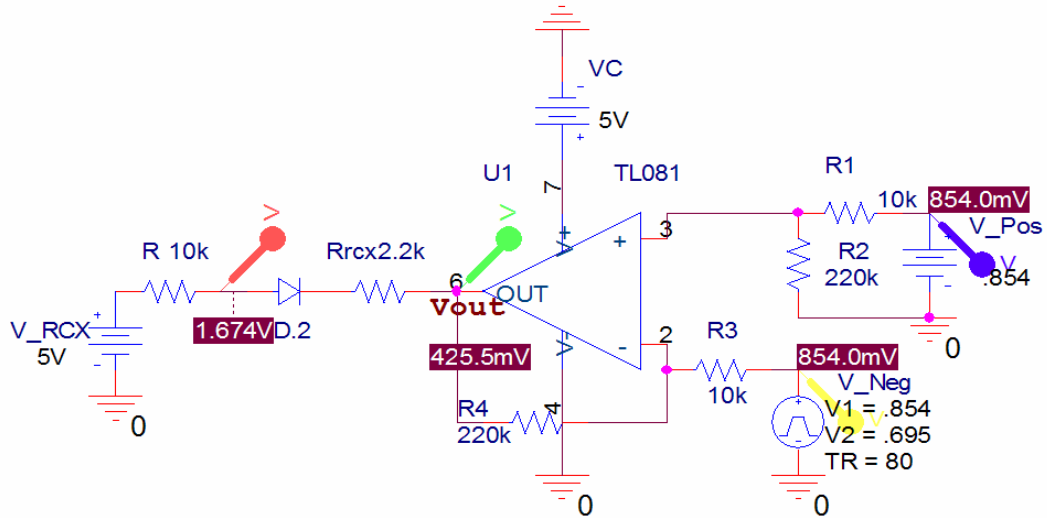


Figura 4.17. Simulación $V_{Pos}=V_{Neg}$, $V_{Out}\neq 0$.

La Figura 4.17 muestra una simulación, en ella se comprueba que a pesar de que V_{Neg} y V_{Pos} son iguales, V_{Out} no es igual a 0V, sino que se aproxima a 0.5V.

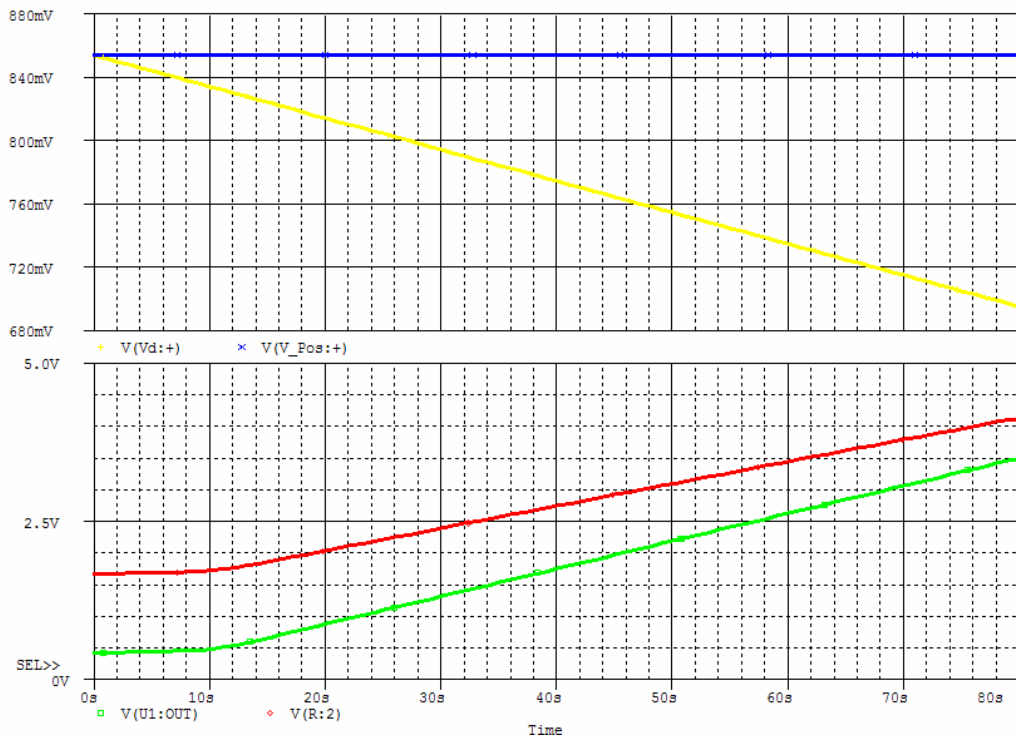


Figura 4.18. Simulación: V_{Out} es recortada y no puede llegar a 0V.

La línea horizontal del primer gráfico de la Figura 4.18 corresponde a V_{Pos} y es constante en todo el intervalo. La línea con pendiente negativa del primer gráfico

corresponde a V_{Neg} y se ha simulado utilizando una fuente de pulso donde cada segundo representa un incremento de $1^{\circ}C$.

La línea inferior del segundo gráfico de la simulación anterior corresponde al voltaje a la salida del dispositivo TL081, y en base a ésta hemos determinado que el límite inferior es de aproximadamente $0.5V$. Mientras que la línea superior del mismo gráfico corresponde al voltaje que mediría el RCX una vez que se han considerado las pérdidas por el diodo y la resistencia de $2.2k$. De acuerdo con la Ecuación 4.6 a $0^{\circ}C$ el valor que lee el RCX debería ser igual a $1.7418V$, la razón de que en la simulación difiera el resultado es que el voltaje de polarización del diodo en la simulación no corresponde a $650mV$.

Utilizando el factor de 22 ($R_2/R_1=22$) y sabiendo que el cambio total es de $159mV$ ($854mV-695mV$) tenemos que para un voltaje constante de las baterías utilizaremos $3.5V$ ($22 \times 159mV$) para cubrir todo el rango de temperaturas entre $0^{\circ}C$ y $80^{\circ}C$.

Considerando que las resistencias tuvieran exactamente el valor nominal marcado, mediante la Ecuación 4.4 tendríamos que $V_{Pos} = 0.916V$. Del mismo modo considerando al dispositivo TL081 como ideal sabríamos que el voltaje mínimo posible a la salida sería $V_{Out_{min}} = 0.5V$ por lo que utilizando la Ecuación 4.2 resuelta para V_{Neg}

tendríamos que $V_{Neg(0^{\circ}C)} = V_{Pos} - \frac{R_1}{R_2} V_{Out} = 0.893V$. Como a esta temperatura el diodo

estaría polarizado con $607mV$ de acuerdo con la Tabla 4.A deberíamos ajustar el valor del potenciómetro a un valor de aproximadamente $14.36k$ para que el circuito arroje el valor mínimo que deseamos a la salida del amplificador operacional, de acuerdo con:

$$i_{Pot} = \frac{V_{Neg} - V_d}{R_{1k}} = 286\mu A$$

$$Pot = \frac{5V - V_{Neg}}{i_{Pot}} = 14.36k\Omega$$

Sin embargo las resistencias no tienen exactamente el valor nominal ya que tienen cierta tolerancia (ver Apéndice H), tampoco el dispositivo TL081 concuerda exactamente con la simulación (los límites inferior y superior son bastante diferentes a los simulados) por lo que se probaron diferentes valores del potenciómetro y se encontró que para un valor de 17.56k los valores RAW (valores leídos del puerto sin ser procesados mediante programación) corresponden con la curva mostrada en la Figura 4.19.

En ella se puede observar que lo que debería ser una línea recta se curva en sus extremos, esto es una evidencia de que el amplificador operacional se está saturando, no obstante conserva una muy buena linealidad en el rango entre 10°C y 70°C.

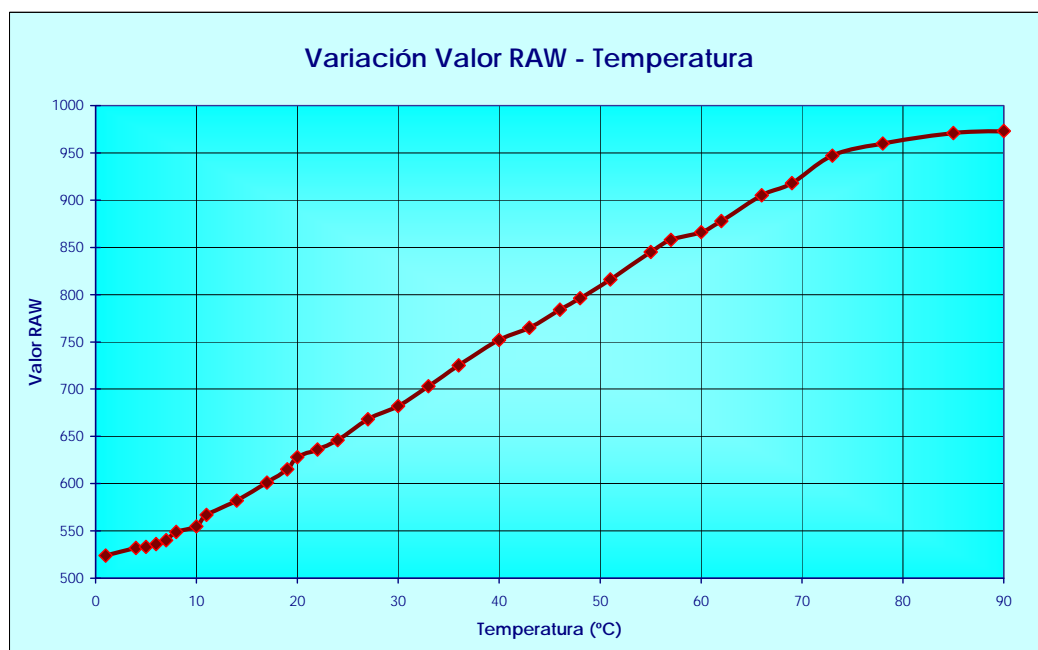


Figura 4.19. Variación de los valores RAW usando el circuito de acondicionamiento. Potenciómetro = 17.56k.

Si hacemos la regresión lineal, considerando el valor RAW como la variable independiente y la temperatura como la variable dependiente, para el rango que es más lineal obtenemos la Ecuación 4.7:

$$T = 0.1619RAW - 80.785$$

Ecuación 4.7

En base a la Ecuación 4.7 podemos proceder a programar el RCX mediante el siguiente listado mostrado en Figura 4.20. Debemos recordar que el RCX de LEGO maneja números signados de 16 bits, es decir que de las 65,536 combinaciones o números enteros, las variables pueden tomar valores en un rango que va de -32,768 hasta 32,767. El hecho de que sean números enteros limita la precisión al realizar operaciones ya que los decimales al hacer divisiones no son almacenados. Por otro lado el hecho de que el mayor número positivo sea 32767 limita el valor máximo a la hora de realizar productos. (Recordemos que el valor RAW varía desde 0 hasta 1023). Por eso en el listado de la Figura 4.20, algunas operaciones se realizan en dos pasos y no siempre se puede lograr la exactitud deseada, en este caso se requería que se multiplicara por 0.1619, pero se tuvo que aproximar mediante 0.16 únicamente.

```
#define RAW_SENSOR_1 //Se conecta al PUERTO 1
task main ()
{
    int temp;           //Almacena los resultados parciales
    SetSensorType (RAW, SENSOR_TYPE_LIGHT); //Se define el tipo y modo
    SetSensorMode (RAW, SENSOR_MODE_RAW); //para una lectura correcta

    while(true)        //La lectura se realiza de forma continua
    {
        temp=RAW*32;
        temp=temp/20; // 1.6*RAW
        temp=temp-808; // 1.6*RAW-808
        SetUserDisplay(temp,1); // T=0.16*RAW-80.8
    }
}
```

Figura 4.20. Programando el sensor de Temperatura.

Por otro lado se puede especificar al *Display* donde debe colocar el punto decimal, de esta forma al multiplicar todo por 10 y ajustar el punto decimal a la posición 1 se da la idea de una mayor exactitud, aun cuando en realidad no se manejan números decimales. Esto se demuestra en la operación $temp=temp-808$ porque realmente el resultado es 10 veces el resultado de la Ecuación 4.7 pero como el punto del *Display* se coloca un lugar a la izquierda cuando el usuario lo vea, leerá el valor como si el resultado hubiera sido dividido entre 10 y hubiera conservado un decimal.

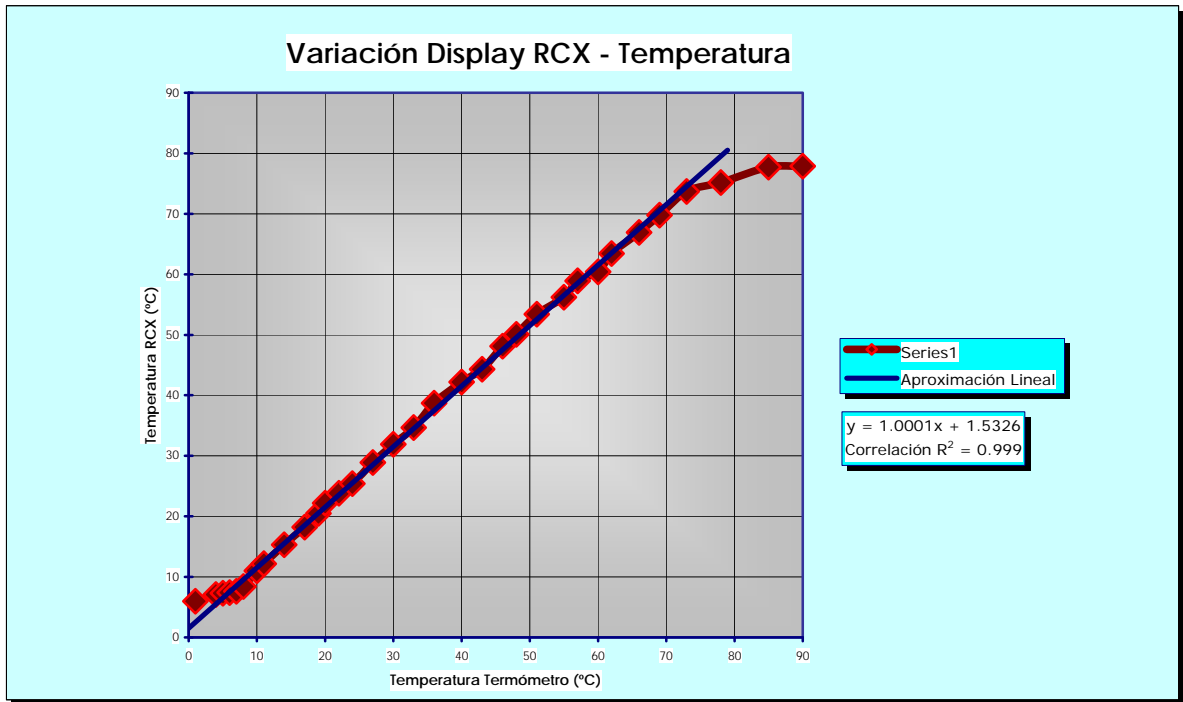


Figura 4.21. Lecturas de temperatura obtenidas usando el RCX y el Sensor construido.

Como siguiente paso se obtuvieron las lecturas mostradas en la Figura 4.21 utilizando el programa anterior, en ella se observa que los valores menores a 10°C y mayores de 70°C presentan un poco de distorsión respecto al valor real, pero en el rango intermedio la lectura es prácticamente la misma que la medida por el termómetro de mercurio (la pendiente es casi 1), aunque aparentemente hay un error constante de 1.5°C

que se puede corregir cambiando el factor 808 por 823 en el listado anterior ($[80.8 + 1.5] \times 10$).

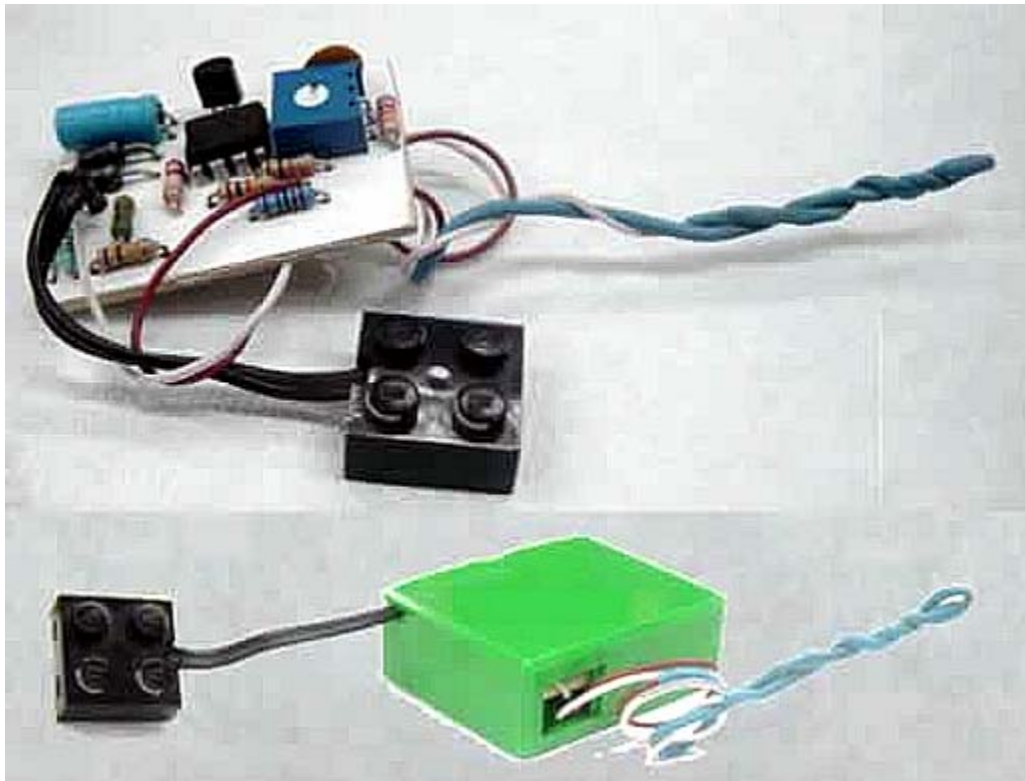


Figura 4.22. Sensor de Temperatura construido.

Finalmente la Figura 4.22 muestra tanto el circuito construido así como el encapsulado realizado al sensor de temperatura.