



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Trabajo Final de Instrumentación Electrónica

Tomás Ricardo Basile Álvarez
316617194

ASIGNATURA

Laboratorio de Electrónica. Grupo 8285

25 de enero de 2022

Introducción

En este trabajo se aplicaron varios de los conocimientos en electrónica adquiridos a lo largo del curso para realizar dos actividades, un termómetro electrónico y un decodificador.

El objetivo general del trabajo es implementar estos dos instrumentos en circuitos en TINA-TI, entender su funcionamiento y de esta forma aplicar muchos de los conocimientos adquiridos en el curso.

El termómetro electrónico que realizamos tiene el objetivo de registrar temperaturas entre 0°C y 100°C y convertirlas a un voltaje entre 0V y 5V . Para el diseño del circuito de esta actividad es necesario utilizar diodos, amplificadores operacionales y otros elementos electrónicos, por lo que es necesario el conocimiento sobre estos dispositivos para entender correctamente el circuito completo.

Por otro lado, el decodificador tiene el objetivo de convertir la salida del convertidor Flash que habíamos hecho en un trabajo anterior (que es un código termómetro) en una salida binaria. El decodificador es una parte fundamental del funcionamiento de un convertidor analógico-digital y para su diseño requiere el uso de compuertas lógicas, por lo que será importante tener conocimiento de ellas.

Ambos circuitos fueron simulados en TINA-TI y sus resultados fueron analizados para comprobar que actuaban como era esperado y entender completamente su funcionamiento.

Antecedentes

En esta sección repasamos algunos de los conocimientos básicos necesarios para entender completamente los circuitos que analizamos en esta práctica. Empezamos revisando el funcionamiento de todos los dispositivos electrónicos que serán utilizados en este trabajo.

Diodo

Un diodo es un componente electrónico con dos terminales y que tiene la característica importante de que (en el caso ideal) permite el flujo de corriente en una dirección pero no en la dirección contraria. Un diodo se puede construir uniendo un material tipo P con uno tipo N como se muestra en la figura 1

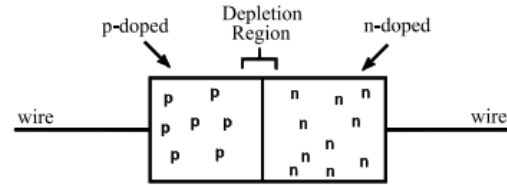


Figura 1: Diodo semiconductor. Obtenida en [1]

A este arreglo se le conoce como unión PN y es una forma de construir diodos utilizando semiconductores. Cuando la unión PN se encuentra en equilibrio, los electrones libres del material N que se encuentran en la frontera pasan al material P y llenan a los hoyos libres de éste. Por ello, en la superficie entre ambos materiales se crea una región conocida como región de agotamiento en la que no hay cargas libres [2].

El comportamiento de la corriente i como función del voltaje v entre las terminales del diodo (medido como potencial del material P menos potencial del material N) se muestra en la figura 2.

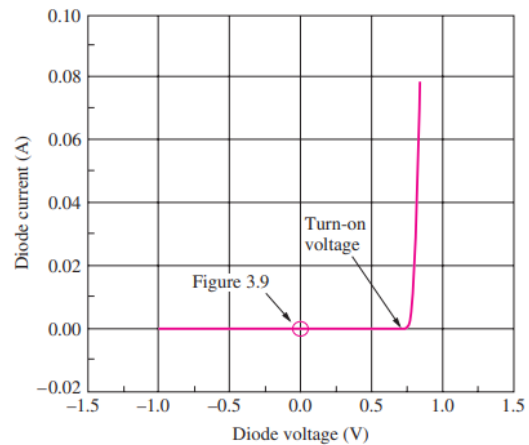


Figura 2: Gráfica de iv para un diodo. Obtenida de [2].

Como se puede ver en la figura 2, cuando el material N se encuentra a mayor potencial que el material P, la corriente por el diodo es 0 (o muy cercana a 0). Es decir, el diodo se comporta prácticamente como un circuito abierto. En realidad, la corriente no es exactamente 0 en este caso, sino que para voltajes v suficientemente negativos (menores a aproximadamente $-0,1\text{V}$), hay una corriente $-I_s$ en el diodo, que es conocida como la **corriente de saturación inversa** [2].

Por otro lado, cuando el potencial del material tipo P menos el del tipo N es mayor que cierta cantidad mínima llamada **voltaje de encendido** (típicamente de alrededor de $0,6\text{V}$), la corriente puede atravesar el diodo. Además, bajo estas condiciones, el voltaje se vuelve prácticamente independiente de la corriente y

permanece en un valor cercano al voltaje de encendido para toda corriente, es decir, el diodo se comporta como un circuito cerrado [2].

Ecuación del diodo

Para realizar el análisis completo de los circuitos con diodos, será necesario tener un modelo matemático de estos. Estudiando físicamente los materiales semiconductores que conforman al diodo, se puede llegar a la ecuación 1 que relaciona el voltaje v aplicado al diodo con su corriente i [2].

$$i_D = I_s \left[\exp \left(\frac{qv_D}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

Donde:

- I_s : Corriente de saturación inversa.
- v : Voltaje aplicado al diodo.
- q : Carga del electrón.
- k : Constante de Boltzmann.
- T : Temperatura absoluta del diodo.
- n : Factor de no linealidad del diodo. Es una cantidad característica de cada diodo y que suele tener un valor entre 1 y 1,1.

Cuando el diodo se encuentra en polarización directa (la diferencia de potencial v_D es positiva), la exponencial $\exp \left(\frac{qv_D}{nkT} \right)$ tiene un valor muy grande comparado con el -1 , por lo que la ecuación se puede ver aproximadamente como:

$$i_D = I_s \exp \left(\frac{qv_D}{nkT} \right) \quad (2)$$

Amplificadores

Los amplificadores son circuitos electrónicos que se utilizan en general para amplificar, acondicionar, filtrar o comparar señales [3]. Revisaremos algunos conceptos importantes de los amplificadores, empezando por los amplificadores operacionales, que son la base de la mayoría de los circuitos de amplificación.

Amplificadores operacionales

Los amplificadores operacionales son dispositivos que en general cuentan con 5 terminales como se ve en la figura 3.

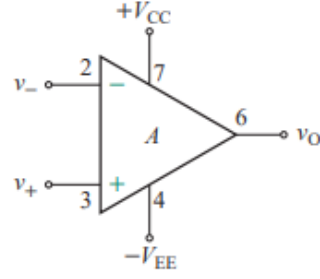


Figura 3: Símbolo de un amplificador operacional. Obtenido de [4].

El dispositivo posee dos entradas: la entrada no inversora (denotada con un $+$) y la entrada inversora (denotada con un $-$). Lo que hace un amplificador operacional es tomar las dos señales de entrada v_+ y v_- y amplificar su diferencia $v_+ - v_-$. Es decir, en la terminal de salida se crea un voltaje $v_o = A(v_+ - v_-)$. Donde A es una constante que representa la ganancia del amplificador y suele ser un número muy grande (del orden de 10^5) [3].

Además, cuenta con dos terminales por donde se proporciona la fuente de energía. En una de estas terminales se suministra un voltaje positivo $+V_{CC}$ y en la otra un voltaje negativo $-V_{EE}$. La terminal de salida v_o del amplificador no puede generar cualquier voltaje, sino que su valor seguirá la relación $v_o = A(v_+ - v_-)$ siempre y cuando $-V_{EE} \leq v_o \leq V_{CC}$. Si se tiene que $A(v_+ - v_-) > V_{CC}$ entonces se dice que está saturado y la salida ya no cumplirá la relación $v_o = A(v_+ - v_-)$, sino que será $v_o = V_{CC}$. Similarmente, si $A(v_+ - v_-) < -V_{EE}$, la salida será $v_o = -V_{EE}$ [3].

Sin embargo, los amplificadores operacionales usualmente no se usan de esta manera. Generalmente se les añade retroalimentación negativa, que se consigue conectando la salida del dispositivo de regreso a una de las entradas. Al realizar esto, se puede estudiar de forma más sencilla el funcionamiento de los amplificadores. Al tener la retroalimentación, los amplificadores cumplen las siguientes propiedades [5]:

1. La diferencia de tensión entre las dos entradas es insignificante $v_+ \simeq v_-$. El valor del voltaje de salida v_o toma el valor necesario para que se cumpla esto.
2. No entra ni sale corriente sobre ninguna de las entradas del dispositivo.

Tomando en cuenta estas dos propiedades, se pueden usar amplificadores operacionales para varias aplicaciones distintas. A continuación mencionamos las aplicaciones de amplificadores operacionales que utilizaremos en este trabajo.

Amplificador no inversor

En particular, en este trabajo usaremos un amplificador no inversor, que tiene el objetivo de dado un voltaje de entrada v_i , producir un voltaje de salida $v_o = kv_i$ con $k > 0$. En la figura 4 se muestra un circuito que realiza esto.

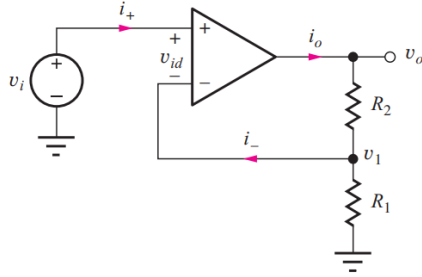


Figura 4: Circuito de un amplificador no inversor. Obtenida de [2].

Estudiamos cómo funciona este circuito. Como se dijo antes, en un amplificador operacional con retroalimentación negativa, el voltaje de ambas entradas v_+ y v_- son iguales. En el circuito de la figura 4 vemos que la entrada $+$ se encuentra con un voltaje v_i (que es el voltaje de entrada), lo que implica que la otra entrada también debe de estar a ese voltaje. Esto significa que el nodo marcado como v_1 se encuentra a dicho voltaje.

Además, las entradas no toman ni expulsan corriente, por lo que la corriente I que fluye por R_1 es igual a la de R_2 . Pero por lo mencionado en el párrafo anterior, el salto de voltaje de la resistencia R_1 es $v_1 = v_i$, por lo que la corriente que pasa por ella es $I = v_i/R_1$. Dicha corriente también pasa por R_2 , por lo que el salto de voltaje en la resistencia R_2 es de $IR_2 = \frac{R_2}{R_1}v_i$.

Entonces podemos calcular el voltaje de salida v_o tomando el voltaje v_1 y sumando el salto de voltaje de R_2 , que es $\frac{R_2}{R_1}v_i$. Entonces, el voltaje de salida es de:

$$v_o = v_i + \frac{R_2}{R_1}v_i = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_i \quad (3)$$

Por lo que el factor de amplificación es $k = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

Amplificador Instrumental

El amplificador instrumental es un circuito que toma dos entradas v_1 y v_2 y produce una salida igual a su diferencia multiplicada por una constante, es decir $v_o = k(v_2 - v_1)$ con k alguna constante. En la figura 5 se muestra un circuito de un amplificador instrumental.

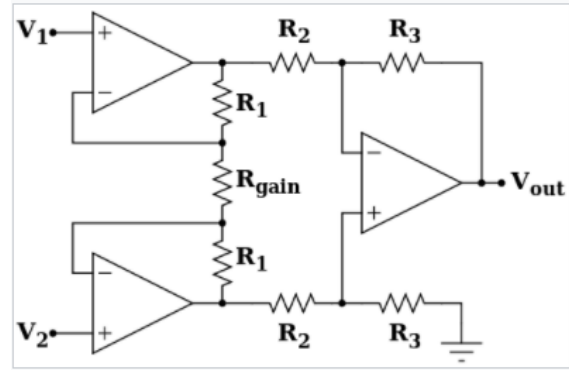


Figura 5: Amplificador Instrumental. Obtenida de [5].

En este circuito se usan 4 valores de resistencias distintos R_1, R_2, R_3, R_{gain} . Usando las mismas reglas que hemos utilizado antes para analizar amplificadores operacionales con retroalimentación, se puede llegar a que el voltaje de salida es igual a [5]:

$$v_o = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) \frac{R_3}{R_2}(v_2 - v_1) \quad (4)$$

Es decir, como dijimos antes, la diferencia $v_2 - v_1$ es amplificada, con un factor de amplificación de $k = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) \frac{R_3}{R_2}$.

Señales Digitales y Analógicas

Otro concepto importante para este trabajo será el de señales digitales y analógicas y en particular la conversión de una señal analógica en digital. Primero tenemos que definir lo que es una señal analógica y una señal digital.

- **Analógica:** : Una señal analógica es aquella que tiene un rango continuo de valores de voltaje que puede tomar. [3]
- **Digital:** Para cada tiempo, esta señal puede tomar uno de entre una cantidad finita de posibles valores de voltaje [3]. Este tipo de señales se pueden representar como una cadena de bits.

Las señales digitales son las que usualmente se utilizan en las computadoras y se usan para la transmisión de información, pero muchas cantidades físicas como el sonido o la luz son señales analógicas. Para este trabajo será importante convertir señales analógicas en digitales, proceso que se explica a continuación.

Convertidor Analógico Digital (ADC)

Un convertidor analógico digital tiene el objetivo de convertir señales analógicas en cadenas de bits (señales digitales). Es decir, el objetivo de este tipo de convertidores es tomar una señal analógica v_I y producir

una palabra de n bits $b_0 b_1 \dots b_{n-1}$ con valor fraccionario D_0 (el valor fraccionario de una palabra de n bits se define como $D_0 := b_0 2^{-1} + b_1 2^{-2} + \dots + b_{n-1} 2^{-n}$) tal que se cumpla que:

$$D_0 = b_0 2^{-1} + b_1 2^{-2} + \dots + b_{n-1} 2^{-n} = \frac{v_I}{V_{ref}} \quad (5)$$

Donde V_{ref} es un voltaje de referencia que se utiliza en el circuito y que es mayor al valor máximo que alcanza v_I . De esta forma, se codifica un voltaje analógico en una palabra de n bits.

Hay muchas formas de construir un ADC, pero nos concentraremos solamente en una, conocida como un convertidor Flash que se construye con un circuito como el de la figura 6.

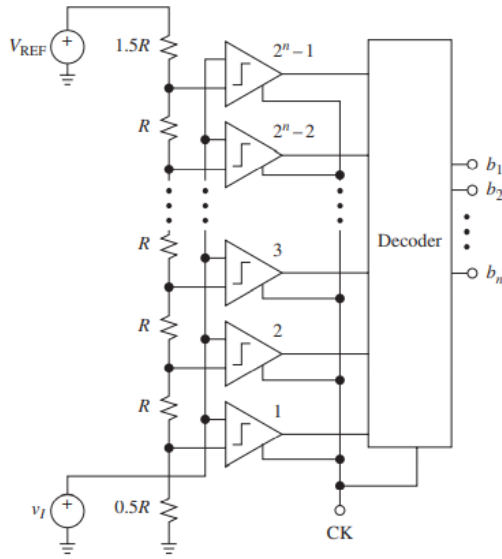


Figura 6: Convertidor flash de n bits. Obtenida de [6].

Como vemos, el circuito tiene un voltaje de entrada v_I que es la señal analógica que queremos convertir a digital y en la parte superior tiene un voltaje llamado voltaje de referencia V_{ref} . Además, el circuito tiene un total de $2n - 1$ comparadores y finalmente un decodificador.

El voltaje de entrada v_I está conectado a una de las terminales de todos los comparadores y el voltaje de referencia está conectado a una cadena de resistencias y luego a las otras terminales de los comparadores. La cadena de resistencias funciona como un divisor del voltaje de referencia V_{ref} .

El divisor de voltaje tiene el efecto de dividir el voltaje V_{ref} en varios niveles distintos en cada uno de los nodos que hay entre las resistencias. Luego, cada uno de estos niveles de voltaje es conectado a un comparador distinto, con el voltaje máximo entrando al comparador $2n - 1$ y el mínimo al comparador 1. Cada uno de estos voltajes es comparado con el voltaje

de entrada v_I usando un comparador y por tanto sólo darán un voltaje de salida positivo aquellos comparadores en los que v_I es mayor que el voltaje del divisor.

Así, darán un voltaje de salida positivo los primeros comparadores hasta llegar al comparador en el cual el voltaje del divisor supere al voltaje de entrada v_I . Esto nos da información sobre en qué nivel se encuentra el voltaje de entrada v_I . La salida de estos comparadores es llamada **código termómetro**, pues todos los comparadores debajo de cierto nivel dan una salida de voltaje positiva, mientras que los que están por arriba no.

Finalmente, se usa el decodificador para convertir esta salida de los $2n - 1$ comparadores en la palabra de n bits $b_0 b_1 \dots b_{n-1}$ deseada. El diseño de este codificador será una parte importante de este trabajo y lo veremos más adelante, para poder diseñarlo, será importante antes estudiar las compuertas lógicas.

Compuertas Lógicas

Una compuerta lógica es un dispositivo electrónico que realiza una función booleana sobre cierto número de bits. Es decir, toma como entrada valores binarios 0 o 1 (falso o verdadero) y da como resultado algún valor binario según cierta regla. Existen varios tipos de compuertas lógicas, sin embargo, para este trabajo solamente necesitaremos utilizar las que se presentan a continuación. Para cada una de las compuertas, presentamos el símbolo con el que se representa en un circuito y su tabla de verdad (en la cual se escriben todos los posibles valores de los bits de entrada y el valor correspondiente que tendrá el bit de salida en cada caso) [7].

■ NOT:

NOT es una puerta lógica que toma como entrada un bit y da como salida un bit con el valor de verdad opuesto a la entrada. La forma de representarlo se muestra en la figura 7.

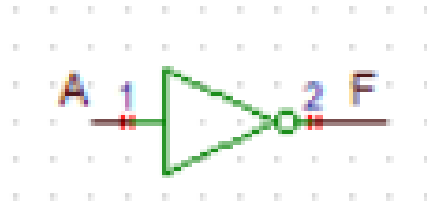


Figura 7: Puerta NOT en TINA.

Siguiendo la definición, la tabla de verdad de esta compuerta se muestra en el cuadro 1.

Input		Output
A		F
0		1
1		0

Cuadro 1: Tabla de verdad NOT

■ AND:

AND es una puerta lógica que toma como entrada dos bits y da una salida verdadera solamente si ambos bits de entrada son verdaderos. El símbolo con el que se representa se muestra en la figura 8.

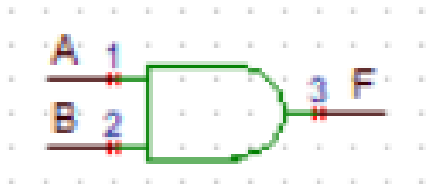


Figura 8: Puerta AND en TINA.

La tabla de verdad de esta compuerta se muestra en el cuadro 2.

Input		Output
A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Cuadro 2: Tabla de verdad AND

■ OR:

OR es una puerta lógica que toma como entrada dos bits y da una salida verdadera si cualquiera de los bits de entrada es verdadero. El símbolo con el que se representa se muestra en la figura 9.

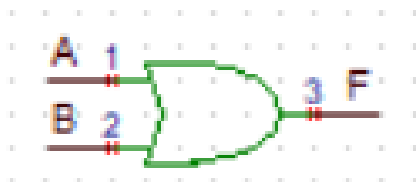


Figura 9: Puerta OR

La tabla de verdad de esta compuerta se muestra en el cuadro 3.

Input		Output
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Cuadro 3: Tabla de verdad OR

■ XOR:

XOR es una puerta lógica que toma como entrada dos bits y da una salida verdadera si cualquiera de los bits de entrada es verdadero pero no los dos a la vez. Otra forma de pensarlo, es que da una salida verdadera sólo si los bits de entrada son distintos. El símbolo con el que se representa se muestra en la figura 10.

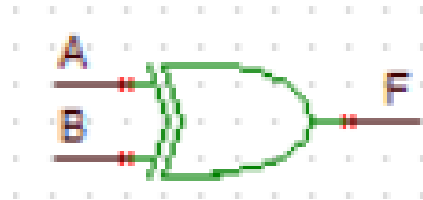


Figura 10: Puerta XOR

La tabla de verdad de esta compuerta se muestra en el cuadro 4.

Input		Output
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Cuadro 4: Tabla de verdad XOR

Hay muchas otras compuertas lógicas, pero éstas son las únicas necesarias para este trabajo.

Cuando usamos compuertas en circuitos, se entenderá que un voltaje positivo (o más específicamente, mayor que cierto umbral) será considerado como un bit en el estado verdadero, mientras que un voltaje cercano a cero o negativo se considera como un bit en el estado falso.

Usaremos estas compuertas lógicas más adelante para construir el decodificador en el circuito del convertidor flash de n bits, que realizaremos en la actividad 2.

Actividad 1: Sensor de Temperatura

Desarrollo y Resultados

Como se menciona en la introducción, en esta actividad se tiene el objetivo de construir un sensor de temperatura que a distintas temperaturas dé como salida valores de voltaje distintos. En particular, que para $T = 0^\circ C$ dé como salida un voltaje de $0V$ y cuando $T = 100^\circ C$ dé como salida un voltaje de $5V$. Para temperaturas intermedias, el voltaje de salida será un valor intermedio entre $0V$ y $5V$ y que crece gradualmente conforme aumenta la temperatura. Además, al final del circuito, convertiremos la salida analógica de voltaje en una palabra de 8 bits que la representa.

El circuito para construir el sensor de temperatura consta de 5 etapas que enumeramos a continuación:

1. **Sensor de Temperatura:** Ésta etapa es la que produce un voltaje de salida V_{PTAT} que depende de la temperatura del ambiente, para hacerlo, se utilizan diodos, cuyo comportamiento depende de la temperatura a la que se encuentran, como se ve en la ecuación 1.
2. **Amplificador de Instrumentación:** En esta etapa se amplifica el voltaje de salida de la etapa anterior y se produce así un voltaje de salida V_{F1} . Para realizar la amplificación, como su nombre lo dice, se utiliza un amplificador de instrumentación.
3. **Restador de DC:** En esta etapa se le resta a V_{F1} un voltaje DC de tal manera que logremos que cuando $T = 0^\circ C$, el voltaje de salida V_{F2} sea $0V$. Para realizar este paso, se utiliza nuevamente un amplificador de instrumentación.
4. **Amplificador:** En esta etapa se utiliza un amplificador no inversor para multiplicar el voltaje de salida V_{F2} de tal forma que el voltaje de salida de este paso, V_{F3} tenga un valor de $5V$ cuando $T = 100^\circ C$.
5. **Convertidor Analógico Digital:** Finalmente utilizamos un convertidor para convertir el voltaje analógico V_{F3} en una palabra de 8 bits que codifica al valor de voltaje.

A continuación implementaremos cada una de estas etapas e iremos revisando los resultados paso a paso para asegurarnos que cada etapa cumpla el objetivo correspondiente. Para ello, seguimos los siguientes pasos:

1. Construir el sensor de temperatura

Para construir el sensor de temperatura, se utiliza el diseño propuesto en la p. 88 de [2], el cual tiene la forma de la figura 11.

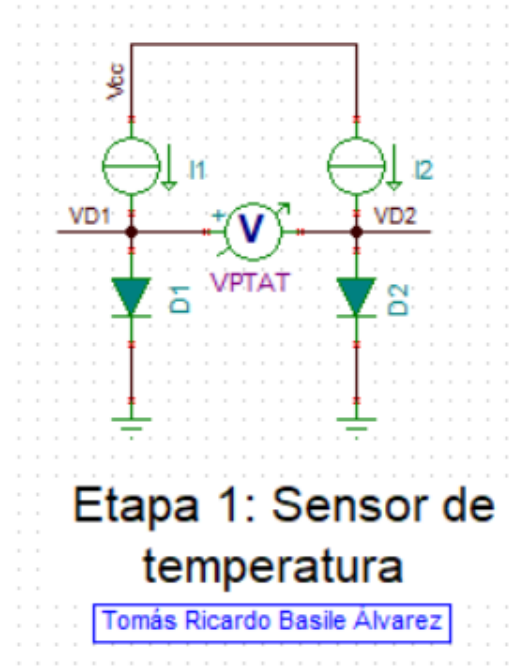


Figura 11: Sensor de temperatura.

Como vemos, el sensor de temperatura está conformado por dos diodos y dos fuentes de corriente I_1, I_2 . El objetivo es producir un voltaje de salida V_{PTAT} que dependa de la temperatura, el cual se define como la diferencia de dos voltajes en el circuito, $V_{D1} - V_{D2}$, que son los voltajes a través de los diodos 1 y 2 respectivamente.

Para comprobar que el voltaje de salida V_{PTAT} depende de la temperatura T a la que se encuentran los diodos, primero notamos que la corriente por el diodo 1 es I_1 (pues es la corriente suministrada por la primera fuente) y la que pasa por el diodo 2 es I_2 (pues es suministrada por la segunda fuente).

Luego, podemos usar la ecuación 2 para relacionar el voltaje por el diodo 1 (V_{D1}) con la corriente que pasa por él (I_1). Dicha ecuación nos dice que $I_{D1} = I_s \exp\left(\frac{qV_{D1}}{kT}\right)$ (donde hemos usado que $n \simeq 1$ para la mayoría de los diodos), por lo que el voltaje es $V_{D1} = \frac{kT}{q} \log\left(\frac{I_{D1}}{I_s}\right)$. Lo mismo se tiene para el diodo 2, $V_{D2} = \frac{kT}{q} \log\left(\frac{I_{D2}}{I_s}\right)$. Entonces, la diferencia entre los voltajes es de:

$$\begin{aligned} V_{PTAT} &= V_{D1} - V_{D2} \\ &= \frac{kT}{q} \log\left(\frac{I_{D1}}{I_s}\right) - \frac{kT}{q} \log\left(\frac{I_{D2}}{I_s}\right) \end{aligned}$$

Y por lo tanto

$$V_{PTAT} = \frac{kT}{q} \log\left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}}\right) \quad (6)$$

Por lo tanto, debido a la dependencia en la temperatura que tiene el comportamiento de los diodos, el voltaje de salida de este circuito depende directamente de la temperatura, tal como se ve en la ecuación 6. Además, podemos calcular la derivada de este voltaje con respecto a la temperatura, para ver cómo aumenta el voltaje con respecto a T .

$$\frac{dV_{PTAT}}{dT} = \frac{k}{q} \log \left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right) \quad (7)$$

Al implementar el sensor de temperatura en TINA, escogí utilizar fuentes de corriente con valores de:

$$\begin{aligned} I_{D1} &= 1mA \\ I_{D2} &= 0,5mA \end{aligned}$$

Con ello, reemplazando en la ecuación 6, esperaríamos tener un voltaje V_{PTAT} que depende de T como sigue:

$$V_{PTAT} = 5,973 \times 10^{-5} \cdot T \quad (8)$$

Donde T debe de estar medido en Kelvin.

Ahora vamos a simular este circuito en TINA. Para realizarlo, haremos un procedimiento conocido como **temperature analysis**, en el cual podemos pedirle a TINA que mida el valor V_{PTAT} para distintas temperaturas desde $0^\circ C$ ($273K$) hasta $100^\circ C$ ($373K$). El resultado que arroja TINA se muestra en la gráfica de la figura 12.

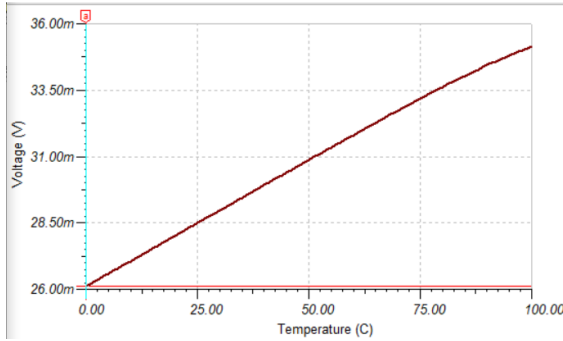


Figura 12: Gráfica de V_{PTAT} vs temperatura (en Celsius) simulada en TINA

Como se ve en la figura 12, el voltaje crece linealmente con la temperatura, tal como esperaríamos por la ecuación 8. El resultado simulado nos arroja los siguientes valores para V_{PTAT} a $0^\circ C$ y $100^\circ C$:

$$\begin{aligned} V_{PTAT}(0^\circ C) &= 26,1mV \\ V_{PTAT}(100^\circ C) &= 35,1mV \end{aligned}$$

Vemos que estos resultados no coinciden con el valor que predice la ecuación 8, pues según dicha ecuación, deberíamos de tener que $V_{PTAT}(0^\circ C) = 5,973 \times 10^{-5} \cdot (273K) = 16,3mV$ y que $V_{PTAT}(100^\circ C) = 5,973 \times 10^{-5} \cdot (373K) = 22,28mV$.

Por ello, vemos que los valores encontrados en la simulación no coinciden con lo esperado teóricamente. Sin embargo, el comportamiento predicho por la ecuación 8 sí persiste, pues vemos que el resultado es un voltaje que crece de forma prácticamente lineal en todo el intervalo.

La inconsistencia con la ecuación 8 se puede deber a que los diodos simulados en TINA no funcionan exactamente como diodos ideales. Sin embargo, lo importante es el comportamiento lineal que tiene la gráfica, el cual en las siguientes etapas reacondicionaremos para que vaya de $0V$ a $5V$.

2. Utilizar el Amplificador de Instrumentación

En este paso utilizaremos el amplificador de instrumentación para amplificar la señal V_{PTAT} . El circuito que realiza esto se presenta en la figura 13.

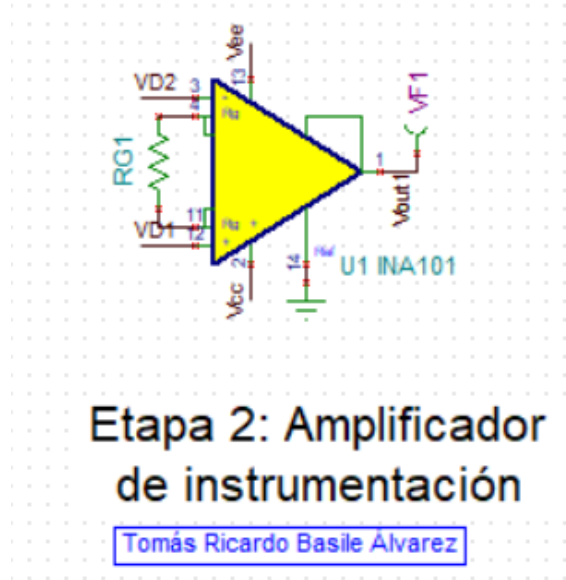


Figura 13: Circuito del amplificador de instrumentación

Como vemos, el circuito no tiene la forma mostrada en la figura 5. Esto se debe a que el dispositivo utilizado es ya un amplificador de instrumentación integrado, en particular, el modelo INA101.

El dispositivo INA101 representa a todo un amplificador de instrumentación como el de la figura 5, pero con la resistencia R_{Gain} no incluida para poder modificarla por fuera y así cambiar el factor de amplificación. Según la hoja de especificaciones del dispositivo [8], el valor de amplificación que produce es de $k = 1 + \frac{40k\Omega}{R_{G1}}$.

Tal como vimos en la sección de antecedentes, el amplificador instrumental toma dos voltajes V_{D1} y

V_{D2} , y amplifica su resta, produciendo un voltaje de salida de $V_{F1} = k(V_{D1} - V_{D2}) = kV_{PTAT}$.

Ya que queremos que el voltaje de salida esté en el rango de $5V$ para temperaturas cercanas a $100^\circ C$, pero el V_{PTAT} tiene un valor de aproximadamente $35,1mV$ en dicha temperatura (aproximadamente 100 veces más pequeño a $5V$), escogeremos un coeficiente de amplificación de $k = 100$.

Esta etapa sólo tiene el objetivo de restar los voltajes V_{D1} y V_{D2} y acercarnos a la forma final que queremos que tenga la señal, por eso no importa el valor exacto de k , ya que luego seguiremos modificando la señal.

Para implementar este valor de $k = 100$, la resistencia R_{G1} tiene que ser escogida de tal manera que $k = 1 + \frac{40k\Omega}{R_{G1}} \Rightarrow 100 = 1 + \frac{40k\Omega}{R_{G1}} \Rightarrow 99 = \frac{40k\Omega}{R_{G1}} \Rightarrow R_{G1} = \frac{40k\Omega}{99} \simeq 404\Omega$. Por lo tanto, se escogió el valor de la resistencia $R_{G1} = 404\Omega$.

Ahora realizamos un temperature analysis en TINA al igual que antes y el resultado del voltaje V_{F1} se muestra en la figura 14.

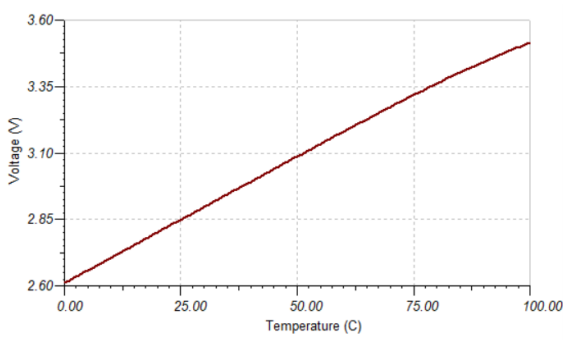


Figura 14: Gráfica de V_{F1} vs temperatura (en Celsius) simulada en TINA.

Como vemos, la gráfica es muy similar a la de V_{PTAT} en la figura 12, sólo que con mayores valores de voltaje, tal como se buscaba al hacer la amplificación. Para ser precisos, los valores de los voltajes a $0C$ y $100C$ son:

$$V_{F1}(0^\circ C) = 2,61V$$

$$V_{F1}(100^\circ C) = 3,51V$$

Lo cual comparado con los valores de V_{PTAT} a estas temperaturas, nos permite concluir que efectivamente el voltaje $V_{PTAT} = V_{D1} - V_{D2}$ fue amplificado por 100, tal como se buscaba al escoger la resistencia R_{G1} .

3. Restador de DC

En este paso utilizaremos nuevamente un amplificador de instrumentación funcionando como un restador DC. El circuito que realiza esto se presenta en la figura 15.

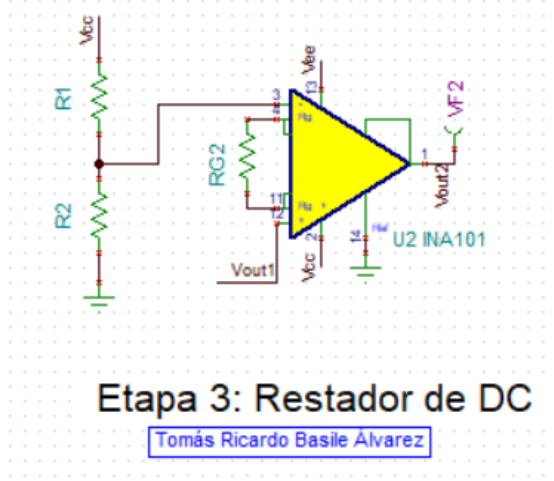


Figura 15: Restador de DC

El objetivo de esta parte del circuito es tomar el voltaje de salida del paso anterior (denotada por V_{out1}) y restarle un voltaje DC de tal forma que el voltaje de salida tenga un valor de $0V$ en la temperatura $0^\circ C$. Para lograr esto, utilizamos nuevamente un amplificador de instrumentación INA101, el cual tiene en la entrada '+' al voltaje V_{out1} y en la entrada '-' un voltaje que llamaremos V_{DC} .

Como se menciona en los antecedentes, el voltaje de salida del amplificador de instrumentación será $V_{F2} = k(V_+ - V_-) = k(V_{out1} - V_{DC})$. No nos interesa amplificar el resultado, por lo que buscamos que $k = 1$. Para conseguirlo, usamos nuevamente la expresión del factor de amplificación del INA101, que es $k = 1 + \frac{40k\Omega}{R_{G2}}$. Claramente, para que $k = 1$, debemos de tener un valor de R_{G2} muy alto, en este caso escogemos $R_{G2} = 100G\Omega$, por lo que $k \simeq 1$.

Además, como se mencionó, el objetivo de este paso es que el voltaje de salida en $0^\circ C$ sea $0V$. Sin embargo, el voltaje que tenemos es $V_{F1}(0^\circ C) = 2,61V$, por lo que para obtener el valor final que buscamos, tenemos que restarle $V_{DC} = 2,61V$.

El voltaje V_{DC} que entra en la entrada '-' del amplificador se consigue a partir de un divisor de voltaje aplicado al voltaje de la fuente $V_{cc} = 15V$. Es necesario seleccionar los valores de las resistencias R_1 y R_2 para que el divisor de voltaje produzca el voltaje V_{DC} .

Para ello, utilizamos que en un divisor de voltaje de dos resistencias, el salto de voltaje en la resistencia R_2 es de $V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$. Dicho voltaje en la resistencia R_2 tiene que ser igual a V_{DC} , pues es el voltaje de la entrada '-'. Por lo tanto tenemos que:

$$\begin{aligned} V_{DC} &= V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ \Rightarrow (R_1 + R_2)V_{DC} &= V_{cc}R_2 \\ \Rightarrow R_1 &= \frac{V_{cc} - V_{DC}}{V_{DC}} R_2 \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores $V_{cc} = 15V$ $V_{DC} = 2,61V$, tenemos que:

$$R_1 = \frac{15V - 2,61V}{2,61V} R_2 = 4,747 R_2$$

Una forma de conseguir aproximadamente esta relación es proponer los siguientes valores de las resistencias:

$$\begin{aligned} R_1 &= 1000\Omega \\ R_2 &= 210\Omega \end{aligned}$$

Ahora realizamos un temperature analysis en TINA de esta parte del circuito con dichos valores de las resistencias. El resultado del voltaje V_{F2} se muestra en la figura 16.

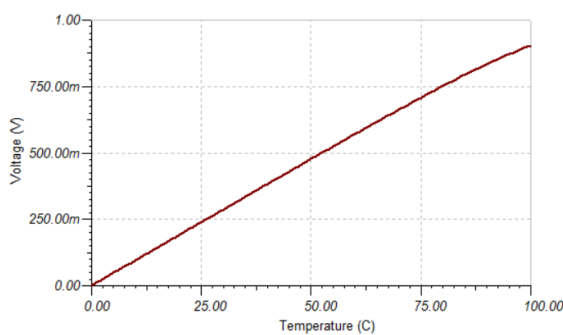


Figura 16: Gráfica de V_{F2} vs temperatura (en Celsius) simulada en TINA.

Podemos ver que efectivamente se logró el objetivo de este paso, pues el voltaje V_{F2} en la temperatura $0^\circ C$ obtuvo un resultado muy cercano a $0V$. En particular, se obtuvieron los siguientes resultados:

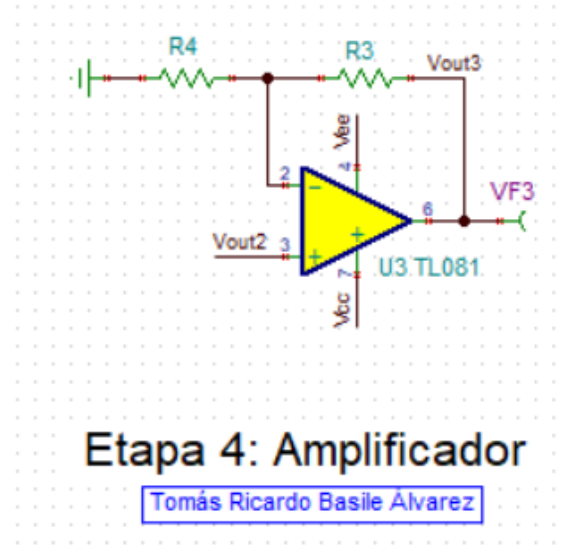
$$\begin{aligned} V_{F2}(0^\circ C) &= 0,00085V \\ V_{F2}(100^\circ C) &= 0,904V \end{aligned}$$

Con ello se consigue el objetivo de esta parte del circuito de hacer que el voltaje a $0^\circ C$ sea aproximadamente $0V$.

4. Amplificador:

El objetivo de este paso es amplificar el voltaje obtenido en el paso anterior V_{F2} de tal forma que el voltaje resultante tenga el valor deseado de $5V$ cuando $T = 100^\circ C$. Notar que como el voltaje V_{F2} en $0^\circ C$ es aproximadamente $0V$, al realizar esta amplificación eso no va a cambiar significativamente y obtendremos así al final un voltaje de salida V_{F3} que vale $0V$ cuando $T = 0^\circ C$ y vale $5V$ cuando $T = 100^\circ C$.

El circuito que realiza esta amplificación se presenta en la figura 17.



Etapa 4: Amplificador

Tomás Ricardo Basile Álvarez

Figura 17: Amplificador no inversor.

Como vimos en la sección de antecedentes en la ecuación 3, un amplificador no inversor toma un voltaje de entrada (en este caso V_{F2}) y la multiplica por una constante k (siguiendo la ecuación 3 pero para los nombres de las resistencias de este circuito, sería $k = 1 + \frac{R_3}{R_4}$) y produce así un voltaje de salida (en este caso llamado V_{F3}). Por lo que tenemos que:

$$V_{F3} = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_{F2}$$

Como se mencionó antes, el objetivo de este paso es que el voltaje V_{F3} de salida sea $5V$ cuando $T = 100^\circ C$. El valor de V_{F2} a esta temperatura fue encontrado en el paso pasado y tiene un valor de $0,904V$, por lo que para que valga $5V$ hay que multiplicarlo por $\frac{5V}{0,904V} = 5,53$. Por lo tanto, las resistencias R_3, R_4 deben de ser escogidas de tal forma que:

$$\begin{aligned} 1 + \frac{R_3}{R_4} &= 5,53 \\ \Rightarrow \frac{R_3}{R_4} &= 4,53 \end{aligned}$$

Una forma de conseguir esta relación es escogiendo los valores de las resistencias como:

$$R_3 = 453\Omega$$

$$R_4 = 100\Omega$$

Con estos valores de las resistencias, realizamos ahora nuevamente un temperature analysis en TINA para ver el voltaje V_{F3} como función de la temperatura, que se muestra en la figura 18.

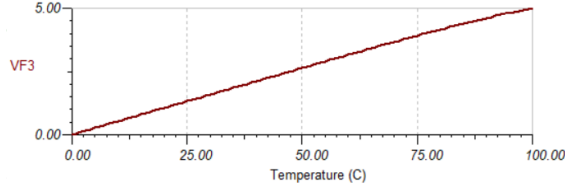


Figura 18: Gráfica de V_{F3} vs temperatura (en Celsius) simulada en TINA.

Notamos en la figura 18 que se logra el objetivo de tener un voltaje de $0V$ cuando $T = 0^\circ C$ y un voltaje de $100V$ cuando $T = 100^\circ C$. En particular, los valores exactos obtenidos en la simulación son de:

$$V_{F3}(0^\circ C) = 0,00476V$$

$$V_{F3}(100^\circ C) = 4,99V$$

Antes de pasar al último paso del circuito, vemos en la figura 19 la recopilación de todas las gráficas V_{PTAT} , V_{F1} , V_{F2} , V_{F3} .

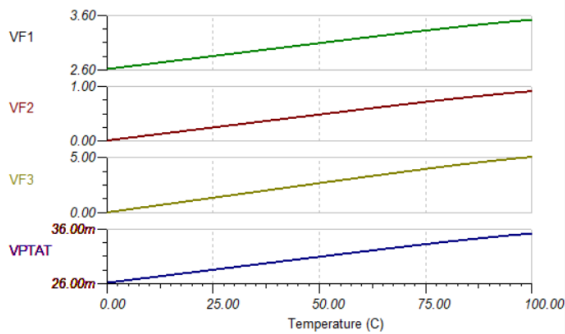


Figura 19: Gráficas V_{PTAT} , V_{F1} , V_{F2} , V_{F3} .

Con estas gráficas podemos ver como funciona cada paso del circuito. El primer paso produce un voltaje V_{PTAT} que depende linealmente de la temperatura. Posteriormente el voltaje es amplificado para acercarlo al rango de voltajes esperados y se produce así V_{F1} . Luego se traslada la gráfica al restarle un voltaje DC y se produce así el voltaje V_{F2} , que tiene un valor de $0V$ a temperatura $0^\circ C$. Finalmente, se amplifica este voltaje y se produce así la salida V_{F3} que tiene un valor de $5V$ a temperatura $100^\circ C$.

5. Convertidor Analógico Digital

Finalmente, el resultado V_{F3} de la sección pasada es convertido a una palabra de 8 bits $b_0b_1 \dots b_7$, de tal manera que se cumpla (como en la ecuación 5 pero con $V_{ref} = 5V$) que:

$$V_{F3} \simeq 5V (b_02^{-1} + b_12^{-2} + \dots + b_72^{-8})$$

De esta forma, la palabra de 8 bits codifica hasta una precisión de $5 \cdot 2^{-8}V$ el valor del voltaje V_{F3} y de esta forma nos da información sobre la temperatura medida. En particular, la palabra $00 \dots 0$ corresponde al voltaje $0V$ y por tanto a la temperatura $0^\circ C$ y la palabra $11 \dots 1$ corresponde a $4,98V$ y por tanto a una temperatura de casi $100^\circ C$.

En la figura 20 se muestra la parte del circuito que realiza la conversión analógica a digital. Para realizarla, se utiliza un convertidor que viene incluido en TINA.

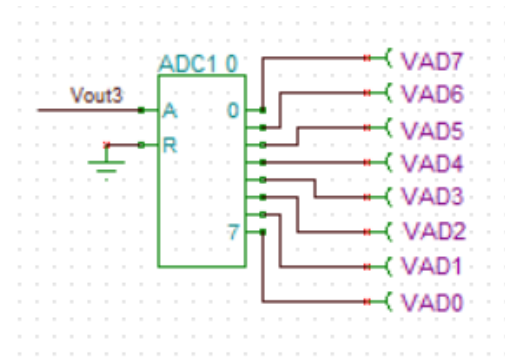


Figura 20: Convertidor Analógico Digital en TINA.

Los bits resultantes se miden con los voltímetros $VAD0, VAD1, \dots, VAD7$ desde el más significativo hasta el menos significativo. El resultado de las curvas de estos bits como función de la temperatura se muestra en la figura 21.

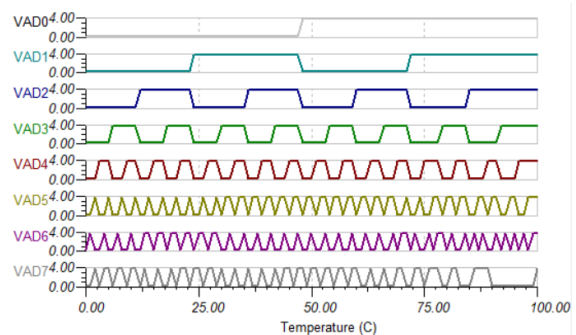


Figura 21: Curvas de $VAD0, \dots, VAD7$ como función de la temperatura.

Estas curvas forman la palabra de 8 bits $b_0 \dots b_7$. Cuando el voltaje $VADi$ es positivo, indica que el bit b_i tiene un valor de 1, mientras que si $VADi$

es 0, el bit b_i tiene un valor de 0 también. Como ya se mencionó, los estados de estos bits codifican el valor del voltaje V_{F3} , de tal forma que $V_{F3} \simeq 5V (b_0 2^{-1} + b_1 2^{-2} + \dots + b_7 2^{-8})$.

Por lo que a cualquier temperatura T que queramos, podríamos trazar una línea vertical y ver cuáles de los bits se encuentran encendidos. Luego, esos bits encendidos nos indican el nivel que tiene el voltaje V_{F3} a esta temperatura.

Por ejemplo, el bit b_0 , medido por VAD_0 contribuye una cantidad de voltaje $5V(2^{-1})$ a la suma $V_{F3} \simeq 5V (b_0 2^{-1} + b_1 2^{-2} + \dots + b_7 2^{-8})$. Por lo que dicho bit sólo se activa cuando V_{F3} vale más de $2,5V$, es decir, cuando se encuentra después de la mitad de camino entre $0^\circ C$ y $100^\circ C$, como se ve en la figura 21. Similarmente, el bit b_1 contribuye una cantidad $5V(2^{-2}) = 1,25V$, y así sucesivamente.

El voltaje incremental del convertidor, es la diferencia de voltaje que se consigue al cambiar el bit menos significativo, el cual contribuye una cantidad $5V(2^{-8}) = 0,019V$.

La temperatura mínima que puede medir el circuito es $T = 0^\circ C$, pues para temperaturas menores, el voltaje V_{F3} sería negativo, lo cual no se puede escribir en la forma $5V(b_0 2^{-1} + \dots + b_7 2^{-8})$ por lo que no hay forma de traducirlo a una palabra de bits con este convertidor de esta forma.

Por otro lado, el voltaje máximo que puede codificar la palabra de 8 bits es cuando todos se encuentran en el estado 1, la cual corresponde con un valor de $V_{F3} = 5V(2^{-1} + \dots + 2^{-8}) \simeq 4,98V$. Entonces, la temperatura máxima que puede codificar el convertidor es la correspondientes a $V_{F3} = 4,98V$. Como $V_{F3} = 5V$ corresponde a $100^\circ C$ y la relación entre V_{F3} y T es aproximadamente lineal, un voltaje de $4,98V$ corresponde a una temperatura de $\frac{4,98V}{5V} 100^\circ C = 99,6^\circ C$.

Además, al convertir el voltaje a una palabra de 8 bits, el valor más pequeño de voltaje que se puede distinguir es el correspondiente al bit menos significativo b_7 , el cual contribuye un voltaje de $5V(2^{-8}) \simeq 0,02V$ a la suma $V_{F3} = 5V(b_0 2^{-1} + \dots + b_7 2^{-8})$. Por lo tanto, la incertidumbre en el valor del voltaje V_{F3} representado por la palabra de 8 bits es de al menos $0,02V$. Considerando que $5V$ se traduce a $100^\circ C$ y la relación es lineal, esta incertidumbre es de $\frac{0,02V}{5V} 100^\circ C = 0,4^\circ C$ en la medición de la temperatura.

Finalmente vale la pena mencionar que el convertidor tiene una fuente de error conocida como error

de cuantización. Dicho error sucede porque valores de voltaje analógico que estén muy cercanos entre sí serán convertidos a la misma palabra de 8 bits. Esto porque la conversión sólo puede dar como resultado una de 256 opciones, por lo que rangos con un ancho de $5V/256 = 0,019V$ son convertidos en la misma palabra de 8 bits. Entonces, la palabra de 8 bits resultante no corresponde a un único voltaje de entrada, sino que corresponde a todo un rango y no nos permite determinar exactamente el voltaje de entrada, esto es lo que se conoce como error de cuantización.

Vemos así que el circuito completo es capaz de medir una temperatura en el rango $[0^\circ C, 100^\circ C]$ en una palabra de 8 bits que la representa.

Actividad 2: Convertidor Analógico Digital

Desarrollo y Resultados

En esta actividad construiremos un convertidor analógico digital completo, enfocándonos principalmente en la parte de decodificación, que como se menciona en los antecedentes, es la parte que convierte el código de termómetro de los comparadores en una palabra de n bits.

El objetivo de esta actividad será tomar un voltaje analógico v_I que tenga la forma $v_I = (5V)t$ (es decir, que crezca linealmente con el tiempo desde $0V$ hasta $5V$) y convertirlo a una palabra de 2 bits b_0b_1 que represente este voltaje. En particular, buscamos que la palabra de dos bits sea tal que el valor $5V(b_02^{-1} + b_12^{-2})$ se acerque lo más posible a v_I .

La primera parte del circuito, que convierte una señal analógica en el código de termómetro ya se implementó en la práctica pasada usando 3 comparadores y se explica su funcionamiento en la parte de antecedentes. Dicha parte del circuito se muestra en la figura 22.

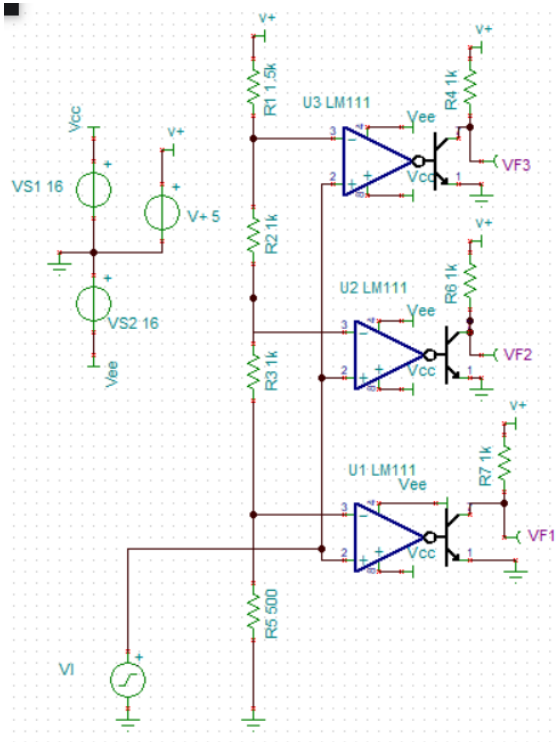


Figura 22: Circuito que convierte una señal analógica en un código de termómetro.

Primero se crea una fuente de voltaje v_I , la cual es una señal triangular de amplitud $5V$ y frecuencia $0,25Hz$. Se hace de esta forma para que en un segundo se tome solamente el primer cuarto de la señal y así el voltaje crezca desde $0V$ hasta $5V$ en un se-

gundo. Así, la señal analógica que se toma de entrada es $v_I = (5V)t$ como se mencionó antes.

Como se menciona en los antecedentes, los comparadores convierten esta señal en un código de termómetro. En la figura 23 se muestra tanto la señal de entrada como la de salida de cada uno de los comparadores en un análisis de TINA-TI de duración $1s$.

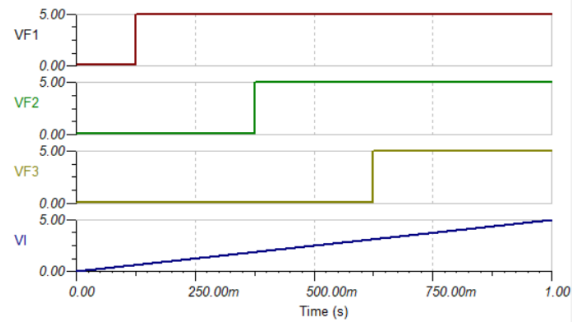


Figura 23: Resultados convertir v_I a código de termómetro.

Como se ve en la figura 23, el voltaje analógico de entrada es efectivamente lineal que crece de $0V$ a $5V$ según la regla $v_I(t) = (5V)t$. Conforme crece el voltaje de entrada, los comparadores van produciendo salidas positivas de voltaje. Los resultados de este circuito se pueden resumir en una tabla como la del cuadro 5, en la que se indica con una V si el voltaje de salida del comparador es positivo y con una F si es cero para los distintos rangos de v_I .

Voltaje v_I	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3
$0V \leq v_I \leq 0,625V$	F	F	F
$0,625V \leq v_I \leq 1,875V$	V	F	F
$1,875V \leq v_I \leq 3,125V$	V	V	F
$3,125V \leq v_I \leq 5V$	V	V	V

Cuadro 5: Tabla de verdad convertidor de señal analógica a termómetro.

En esta parte es necesario agregar el decodificador para convertir esta salida de termómetro en una palabra de dos bits b_0b_1 tal que $5V(b_02^{-1} + b_12^{-2})$ se acerque lo más posible a v_I . Enlistamos ahora los valores $5V(b_02^{-1} + b_12^{-2})$ para las distintas combinaciones de los bits:

- $b_0b_1 = 00 : 5V(b_02^{-1} + b_12^{-2}) = 0V$
- $b_0b_1 = 01 : 5V(b_02^{-1} + b_12^{-2}) = 1,25V$
- $b_0b_1 = 10 : 5V(b_02^{-1} + b_12^{-2}) = 2,5V$
- $b_0b_1 = 11 : 5V(b_02^{-1} + b_12^{-2}) = 3,75V$

Por lo tanto, para que el voltaje de entrada v_I se acerque lo más posible a $5V(b_02^{-1} + b_12^{-2})$, los valores de los bits para distintos rangos de v_I deben de ser los siguientes:

Voltaje v_I	Palabra b_0b_1 esperada
$0V \leq v_I \leq 0,625V$	00
$0,625V \leq v_I \leq 1,875V$	01
$1,875V \leq v_I \leq 3,125V$	10
$3,125V \leq v_I \leq 5V$	11

Cuadro 6: Tabla de verdad convertidor de señal analógica a palabra de 2 bits.

Como se ve en el cuadro 5, estos 4 rangos de v_I dan distintos resultados en los comparadores. El objetivo es convertir dichos resultados del cuadro 5 en los bits indicados por el cuadro 6. Es decir, queremos convertir las salidas de los convertidores en las siguientes palabras de dos bits:

- Comparadores 1,2 y 3: FFF \Rightarrow Bits $b_0b_1 = 00$
- Comparadores 1,2 y 3: VFF \Rightarrow Bits $b_0b_1 = 01$
- Comparadores 1,2 y 3: VVF \Rightarrow Bits $b_0b_1 = 10$
- Comparadores 1,2 y 3: VVV \Rightarrow Bits $b_0b_1 = 11$

Usualmente esta conversión se realiza usando un circuito conocido como 'priority encoder' [7]. Sin embargo para este caso en particular, y con el objetivo de experimentar un poco con las puertas lógicas, idearemos otra forma de hacerlo, lo cual también nos permite explicar paso a paso el diseño.

Primero notamos que el bit b_0 tiene un valor 1 si y sólo si los comparadores 1 y 2 están activos. Por lo tanto, podemos conectar una puerta AND a los comparadores 1 y 2 y conectar la salida de dicha puerta al punto que representará al bit b_0 . De esta forma, el bit b_0 valdrá 1 solamente si los comparadores 1 y 2 están activos. Dicho circuito se implementa en la figura 24.

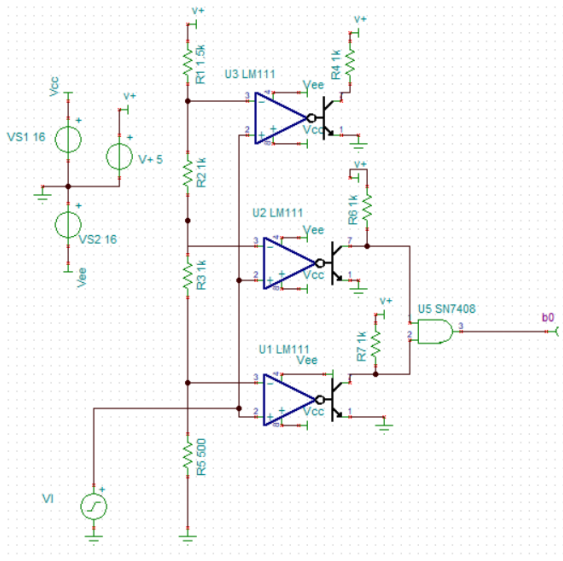


Figura 24: Convertidor con decodificador (parte 1).

Ahora nos fijamos en el bit b_1 . Notamos que dicho bit vale 1 cuando los comparadores 1, 2 y 3 se encuentran en VFF o VVV. Es decir, es necesario que el primer comparador tenga un voltaje positivo y que los otros dos comparadores tengan el mismo valor de verdad (o ambos en V o ambos en F).

Por lo tanto, podemos primero implementar una puerta XOR entre los comparadores 2 y 3. Esta puerta dará un resultado positivo sólo si estos comparadores tienen distintos valores de verdad. Si luego de la puerta XOR agregamos una puerta NOT, el resultado de estas puertas será verdadero si y sólo si los comparadores 2 y 3 tienen el mismo valor de verdad.

Luego, para que el bit b_1 esté activo, hay que agregar la condición de que el comparador 1 tenga un voltaje positivo. Para pedir ambas condiciones a la vez, unimos el comparador 1 con la salida del NOT de antes y los juntamos en una puerta AND, la salida de esta AND será el bit b_1 .

Agregando estas puertas, el circuito completo con el decodificador se presenta en la figura 25.

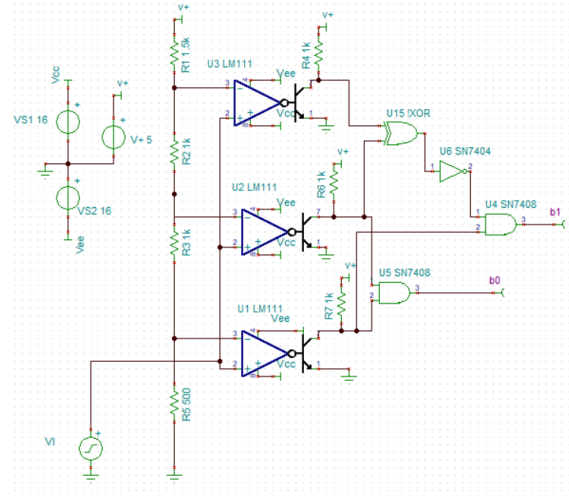


Figura 25: Convertidor con decodificador.

Para ver que el circuito hace lo esperado, realizamos una simulación con duración de 1s, el resultado se muestra en la figura 26.

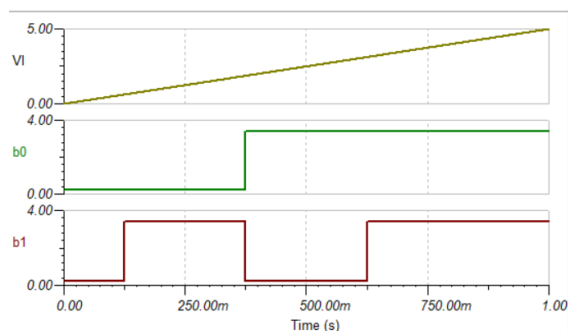


Figura 26: Resultado del convertidor con decodificador.

La primera gráfica es el voltaje de entrada $v_I = (5V)t$ y se presentan también los voltajes de los dos bits b_0 y b_1 .

Se puede ver en la figura 26 que si v_I se encuentra entre $0V$ y $0,625V$, entonces los bits de salida son $b_0b_1 = 00$. Si el voltaje se encuentra entre $0,625V$ y $1,875V$, los bits de salida son $b_0b_1 = 01$. Si v_I se encuentra entre $1,875V$ y $3,125V$, los bits de salida son $b_0b_1 = 10$ y finalmente si v_I es mayor a $3,125V$, los bits de salida son $b_0b_1 = 11$.

Por lo tanto, vemos que el circuito tiene la tabla de verdad 6 que dijimos que debería de tener para que los bits tuvieran el valor necesario para que $5V(b_02^{-1} + b_12^{-2})$ se acerque lo más posible a v_I y de esta forma se codifique v_I de la mejor forma posible usando sólo dos bits.

Conclusiones

Se implementaron exitosamente los circuitos de las actividades de este trabajo. Y para cada uno de ellos se hicieron simulaciones en TINA-TI para revisar su correcto funcionamiento.

Primero se implementó el circuito sensor de temperatura. Este circuito se implementó por secciones para entender paso por paso la función de cada etapa del diseño y la forma en que se tratan las señales con ayuda de los amplificadores para llegar al resultado esperado. Al final de la actividad, se revisa que el circuito efectivamente da como salida un voltaje que depende linealmente de la temperatura.

El resultado final deseado era que el voltaje de salida a $100^\circ C$ fuera de $5V$ pero se obtuvo $4,99V$, lo que corresponde con un error de únicamente $\frac{5V - 4,99V}{5V} \times 100\% = 0,2\%$. Además, se deseaba que a temperatura de 0° el voltaje fuera de $0V$, pero se obtuvo un valor de $0,00476V$, aunque no tiene sentido calcular un error porcentual en este caso porque el valor deseado es 0 , podemos ver que el margen de error es pequeño.

De esta forma se pudo apreciar como los amplificadores operacionales son extremadamente útiles para operar sobre señales y convertirlas según sea necesario. Además, posteriormente se utilizó un convertidor para transformar el voltaje de salida en una palabra de 8 bits, lo cual también se pudo realizar exitosamente. En un termómetro verdadero, esta palabra de 8 bits podría utilizarse por ejemplo para activar un display que presente numéricamente la temperatura medida por el termómetro.

Por otro lado, en la segunda actividad se implementó un convertidor analógico-digital y se prestó especial atención en la parte de decodificación, ya que la parte anterior había sido revisada ya en una práctica pasada. Se pudo construir correctamente el convertidor y hasta fue posible ponerlo a prueba usando una señal analógica como entrada, con lo que se comprobó que ésta era convertida a una palabra de 2 bits que codifican su valor.

Este circuito muestra la forma en que se suele trabajar con valores lógicos en la electrónica digital, en la que se usan compuertas lógicas para modificar estos valores según sea necesario.

Ambas actividades muestran la gran utilidad de los dispositivos electrónicos vistos a lo largo de la materia y permiten mostrar aplicaciones directas de estos.

Bibliografía

1. Suits, Bryan H. Electronics for Physicists: An Introduction. Springer Nature, 2020.
2. Jaeger, Richard C., and Travis N. Blalock. Micro-electronic circuit design. New York: McGrawHill, 2010.
3. Rashid, Muhammad H. Microelectronic Circuits Analysis and Design Second edition. Cengage Learning, 2011
4. Kay, Art. Comparator with Hysteresis Reference Design. Texas Instruments. <https://www.ti.com/lit/ug/tidu020a/tidu020a.pdf?ts=1638069557507>
5. Horowitz, Paul and Hill Winfield. The art of electronics - 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
6. Franco, Sergio. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. McGraw Hill Education, 2002.
7. Mano, M. Morris. Digital Logic and Computer Design. Pearson, 2009.
8. "INA101." INA101 Data Sheet, Product Information and Support — TI.com, TINA, <https://www.ti.com/product/INA101>.