



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**Conversión DA y AD**

**Tomás Ricardo Basile Álvarez**  
**316617194**

ASIGNATURA

**Laboratorio de Electrónica. Grupo 8285**

12 de enero de 2022

---

## Introducción

En esta actividad se revisarán dos circuitos electrónicos: un convertidor analógico-digital (ADC) y otro digital-analógico (DAC). Estos convertidores se construyen utilizando algunos de los dispositivos electrónicos que hemos estudiado antes.

El objetivo es simular el comportamiento de estos convertidores utilizando TINA-TI para así comprender los conceptos fundamentales de las conversiones y las utilidades de estos procesos. Primero presentaremos la teoría general de estos convertidores en la sección de antecedentes y luego los implementaremos en el simulador.

## Antecedentes

Para empezar la investigación teórica de los convertidores AD y DA, primero tendremos 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. [1]
- **Digital:** Para cada tiempo, esta señal puede tomar uno de entre una cantidad finita de posibles valores de voltaje [1]. 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.

## Convertidor Digital Analógico (DAC)

Un convertidor digital analógico es un sistema que convierte señales digitales en analógicas [1]. Este tipo de convertidores se utilizan por ejemplo para convertir cadenas de bits guardadas en una computadora en señales analógicas de audio o de video.

Para entender cómo funciona un DAC, primero tenemos que definir el siguiente concepto:

**Palabra de  $n$  bits:** Es una serie de  $n$  bits de la forma  $b_1b_2b_3 \cdots b_n$  donde  $b_i \in \{0, 1\}$ .  $b_1$  se conoce como el bit más significativo (MSB) y  $b_n$  el menos significativo (LSB). Esta palabra de  $n$  bits se puede usar para codificar un valor numérico que se encuentre entre 0 y  $1 - 2^{-n}$  llamado **valor fraccionario binario** y que se define como [2]:

$$D = b_12^{-1} + b_22^{-2} + b_32^{-3} + \cdots + b_n2^{-n}$$

Dependiendo del patrón de  $n$  bits,  $D$  puede tomar cualquiera de entre  $2^n$  valores igualmente espaciados entre 0 y  $1 - 2^{-n}$ . El valor de 0 es tomado cuando todos los bits son 0 y el valor de  $1 - 2^{-n}$  cuando todos los bits son 1.

Un convertidor DA toma como entrada una palabra de  $n$  bits  $b_1b_2 \cdots b_n$  y tiene como objetivo producir un voltaje analógico proporcional al valor fraccionario binario  $D$  codificado por estos bits dado por [2]:

$$v_o = KV_{ref}D = V_{FSR}(b_12^{-1} + b_22^{-2} + \cdots + b_n2^{-n})$$

Donde  $K$  es un factor de escala,  $V_{REF}$  se conoce como el voltaje de referencia y  $V_{FSR}$  el rango completo de escala. [2]

Dependiendo del patrón de bits, el voltaje  $v_o$  producido puede tomar  $2^n$  diferentes valores desde 0 hasta  $(1 - 2^{-n})V_{FSR}$ . Cada bit contribuye en distinta proporción al valor del voltaje final, el LSB contribuye un voltaje de  $V_{FSR}b_n/2^n$  mientras que el MSB contribuye un voltaje de  $V_{FSR}b_1/2$  y en general el  $i$ -ésimo bit contribuye un voltaje de  $V_{FSR}b_i2^{-i}$ .

Hay muchas formas de construir un DAC, sin embargo, nos concentraremos en una en particular, que es el tipo escalera  $R-2R$ . Este tipo de DAC se construye como en el circuito de la figura 1.

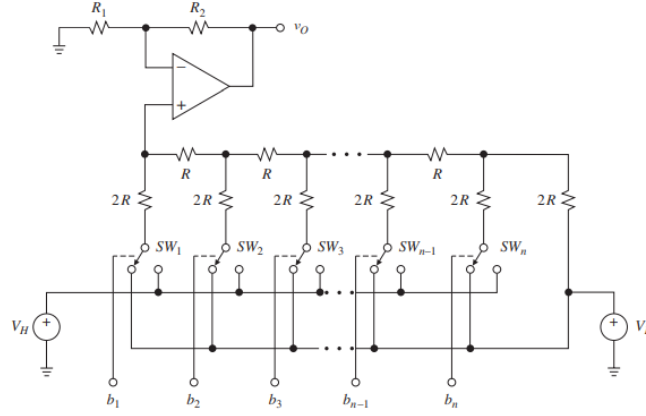


Figura 1: DAC tipo escalera  $R-2R$ . Obtenido de [2]

Para representar a cada uno de los bits  $b_1, b_2, \dots, b_n$ , se utilizan  $n$  interruptores  $SW_1, \dots, SW_n$ . Los interruptores tienen una entrada a un voltaje alto  $V_H$  y la otra a un voltaje bajo  $V_L$ . Si el interruptor se encuentra conectado a  $V_L$ , representa un bit en el estado 0, mientras que si está conectado al voltaje  $V_H$ , representa un bit en el estado 1.

Las terminales de salida de los interruptores se encuentran conectadas a resistencias en forma de escalera como se indica en la figura 1. Al resolver la escalera de resistencias de la figura 1, se puede concluir que si el bit  $b_i$  se pasa del estado 0 al estado 1 entonces el voltaje del nodo más a la izquierda de la escalera aumentará en una cantidad  $(V_H - V_L)/2^i$  (algo que veremos a más detalle en una de las preguntas del desarrollo). Por lo tanto, conforme el estado de los bits varía desde  $0 \dots 0$  hasta  $1 \dots 1$ , el voltaje del nodo más a la izquierda cambia en pasos de  $2^{-n}(V_H - V_L)$  desde  $V_L$  hasta  $V_H - 2^{-n}(V_H - V_L)$ . Finalmente, el amplificador operacional del circuito escala este voltaje por un factor de  $K = 1 + R_2/R_1$ .

De esta forma, el circuito de la figura 1 convierte palabras de  $n$  bits en un voltaje analógico proporcional al valor fraccionario binario  $D$ , con [2]:

$$v_o = K(V_H - V_L)D = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)(V_H - V_L)(b_12^{-1} + b_22^{-2} + \dots + b_n2^{-n}) \quad (1)$$

## Convertidor analógico digital (ADC)

Un convertidor analógico digital tiene el objetivo inverso que el DAC, ya que convierte señales analógicas en digitales. El objetivo de este tipo de convertidores es tomar una señal

analógica  $v_I$  y producir una palabra de bits  $b_1 b_2 \dots b_n$  con valor fraccionario binario  $D_o$  tal que se cumpla que:

$$D_o = b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \dots + b_n 2^{-n} = \frac{v_I}{V_{ref}}$$

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 2.

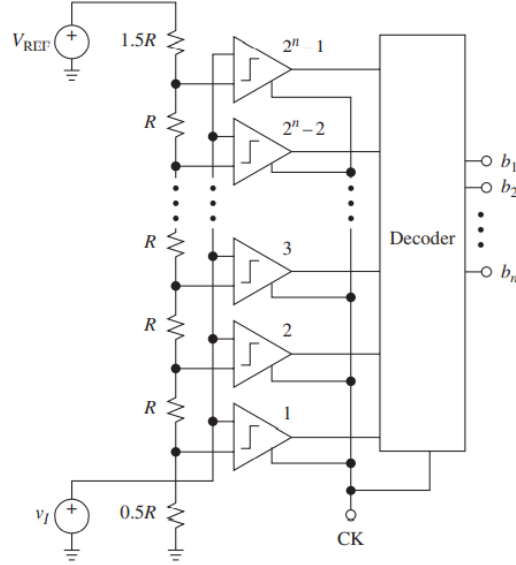


Figura 2: Convertidor flash de  $n$  bits. Obtenida de [2]

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  $2^n - 1$  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  $2^n - 1$  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 cuál 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  $v_I$ . Finalmente, se usa el decodificador para convertir esta salida de los  $2^n - 1$  comparadores en la palabra de  $n$  bits  $b_1 b_2 \dots b_n$  deseada.

## Desarrollo

Realizamos ahora las actividades de simulación de los distintos convertidores y respondemos a las preguntas de la actividad.

### Convertidor Digital-Analógico (DA)

Efectúe la simulación del circuito del convertidor digital-analógico del tipo escalera R-2R siguiendo los pasos que se indican a continuación. Posteriormente, responda las preguntas que se hacen.

1. Implemente el circuito del convertidor digital-analógico del tipo escalera R-2R en TINA cuidando los valores de cada una de las resistencias y fuentes. Ponga atención en la polarización de los circuitos.

El circuito implementado en TINA se muestra en la figura 3 a continuación.

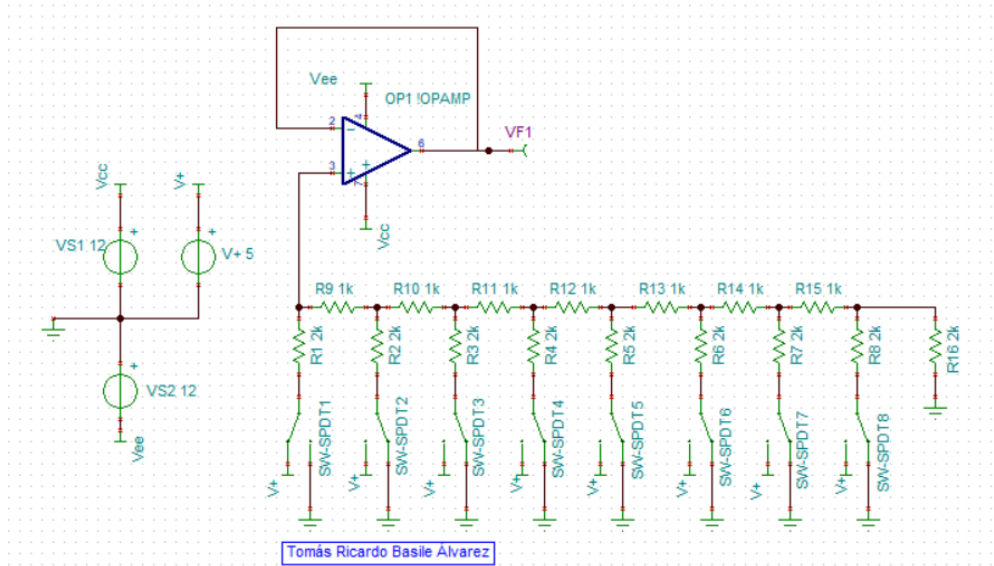


Figura 3: Convertidor digital-analógico del tipo escalera R-2R

Como se puede ver en la figura 3, el circuito es similar al del marco teórico en la figura 1. Con la característica que ahora el voltaje bajo es  $V_L = 0V$  y el voltaje alto es  $V_H := V_+ = 5V$ . Además, en vez de usar un amplificador de voltaje, usamos un seguidor de voltaje. Por lo tanto, al poner una palabra de  $n$  bits  $b_1b_2 \dots b_n$  en los interruptores, el voltaje de salida debería ser (según la ecuación (1) y usando que en este caso no hay amplificación):

$$v_o = (5V)(b_12^{-1} + b_22^{-2} + \dots + b_n2^{-n}) \quad (2)$$

2. Considerando que el orden de los bits más significativos a los menos significativos son SDPT1, SDPT2, ..., SPDT8, entonces, obtenga las simulaciones del voltaje de salida cuando se hacen las posibles combinaciones de los 3 bits más significativos tal como se muestra en la siguiente tabla. Ponga el resto de los interruptores en 0 lógico.

Se simuló el circuito de la figura 3 para cada una de las combinaciones mencionadas, con  $SDTP4 = SDTP5 = \dots = SDTP8 = 0$ . Para cada una de estas combinaciones de los tres bits más significativos  $b_1, b_2, b_3$ , calculamos primero el valor del voltaje de salida teórico que nos dice la ecuación (2) y también el voltaje de salida de la simulación usando un análisis DC en TINA.

SDPT1	SDPT2	SDPT3	Vo teórico [V]	Vo simulado [V]
0	0	0	0	0
0	0	1	0.625	0.625
0	1	0	1.25	1.25
0	1	1	1.875	1.875
1	0	0	2.5	2.5
1	0	1	3.125	3.125
1	1	0	3.75	3.75
1	1	1	4.375	4.375

Tabla 1. Resultados de las simulaciones del convertidor DA con  $V_+ = 5V$

Vemos que en todos los casos el circuito simulado dio como resultado lo esperado por la teoría y que efectivamente se pudo convertir una palabra de bits en un voltaje proporcional al valor codificado por los bits.

### 3. Cambie el voltaje $V_+$ por otro diferente de 5 y repita el paso 2.

Para este paso cambié el voltaje  $V_+$  del circuito por 10V. Por lo tanto, similarmente a la ecuación (2), el voltaje de salida teórico al poner una palabra de n bits  $b_1b_2 \dots b_n$  será:

$$v_o = (10V)(b_12^{-1} + b_22^{-2} + \dots + b_n2^{-n}) \quad (3)$$

Se simuló el circuito con este nuevo voltaje y se hizo el mismo procedimiento que en el paso 2. Luego, ponemos en una tabla el valor de voltaje teórico según la ecuación (3) y el simulado para las distintas combinaciones de los primeros tres bits.

SDPT1	SDPT2	SDPT3	Vo teórico [V]	Vo simulado [V]
0	0	0	0	0
0	0	1	1.25	1.25
0	1	0	2.5	2.5
0	1	1	3.75	3.75
1	0	0	5	5
1	0	1	6.25	6.25
1	1	0	7.5	7.5
1	1	1	8.75	8.75

Tabla 2. Resultados de las simulaciones del convertidor DA con  $V_+ = 10V$

Vemos nuevamente que los resultados teóricos y simulados coinciden perfectamente para todas las combinaciones de los primeros tres bits.

---

## Preguntas

Responda las siguientes preguntas:

1. **Explique con sus propias palabras, por qué es importante convertir señales digitales a señales analógicas.**

La importancia radica en que la mayoría de las señales son naturalmente analógicas ya que los fenómenos físicos como el sonido pueden tomar valores de entre un continuo de opciones. Sin embargo, las computadoras guardan la información en forma de bits que forman señales digitales. Por lo tanto, si queremos por ejemplo reproducir una canción almacenada en una computadora, ésta se almacena como una serie de bits pero para reproducirla es necesario convertirla antes a una señal analógica. Para hacer dicha conversión, se pueden utilizar convertidores como el de esta actividad.

2. **Encuentre una expresión general con la cual pueda calcular el voltaje de salida para una palabra digital de  $n$  bits**

Veremos ahora a más detalle la ecuación (1) para calcular el voltaje de salida para una palabra de  $n$  bits.

Para encontrar la expresión general del voltaje producido por una palabra de  $n$  bits en un circuito como el de la figura 3 (pero con  $n$  bits en vez de 8), encontraremos primero el voltaje de salida para el caso especial de palabras de  $n$  bits en las que el  $i$ -ésimo bit se encuentra en 1 y todos los demás en 0. Veremos que para palabras de ese tipo, el voltaje de salida será:

$$V_o = \frac{V_+}{2^i} \quad (4)$$

Luego, para palabras más generales se podrá usar el principio de superposición y este resultado para calcular el voltaje de salida.

Probaremos primero la ecuación (4) para el caso en que  $i = 1$  (es decir, cuando la palabra de entrada es  $100 \cdots 0$ , veremos que el voltaje es  $V_o = \frac{V_+}{2}$ ) y luego para el caso  $i = 2$  (es decir, cuando la palabra de entrada es  $010 \cdots 0$  probaremos que el voltaje es  $V_o = \frac{V_+}{4}$ ). El método que usaremos se puede generalizar para probar la ecuación (4) para cualquier valor de  $i$ .

- $100 \cdots 0$  :

Primero consideramos una palabra de  $n$  bits en la que el primer bit se encuentra en 1 (el bit más significativo) y los demás en 0. Entonces, el circuito se verá como en la figura 4. El objetivo es calcular el voltaje  $V_o$ , que es el que luego se lleva al seguidor de voltaje.

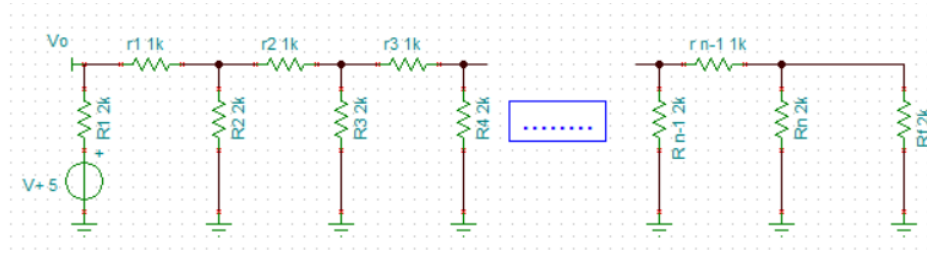


Figura 4: Circuito con entrada  $100 \dots 0$

Notamos que la resistencia  $R_f$  está en paralelo con  $R_n$ , por lo que se pueden reducir a una resistencia de valor  $R_n || R_f = 2k\Omega || 2k\Omega = 1k\Omega$  y queda un circuito como el de la figura 5

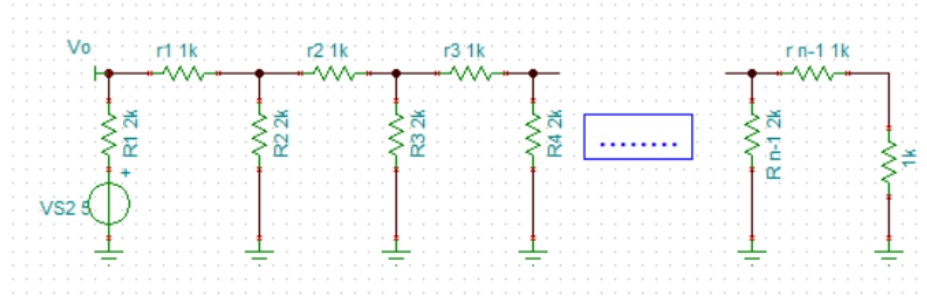


Figura 5: Circuito con entrada  $100 \dots 0$

Luego, la resistencia resultante de  $1k\Omega$  y la resistencia  $r_{n-1}$  están en serie, por lo que la resistencia equivalente es de  $2k\Omega$ , dando como resultado el circuito de la figura 6.

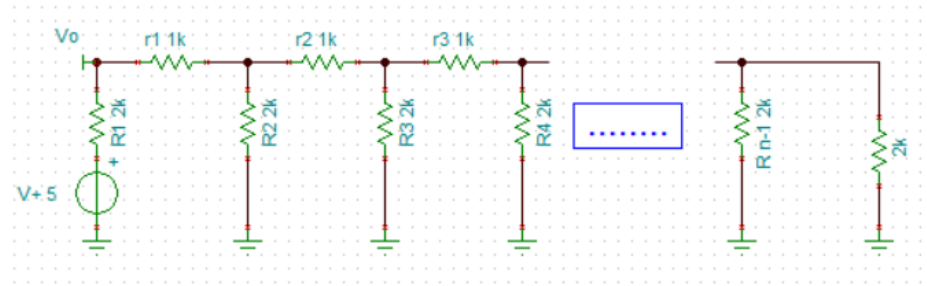


Figura 6: Circuito con entrada  $100 \dots 0$

Se puede ver que este circuito tiene la misma forma que el de la figura 4 pero con la última parte de la escalera de resistencias ya reducida. Podemos entonces volver a simplificar las últimas resistencias del circuito un escalón a la vez hasta llegar al circuito de la figura 7.



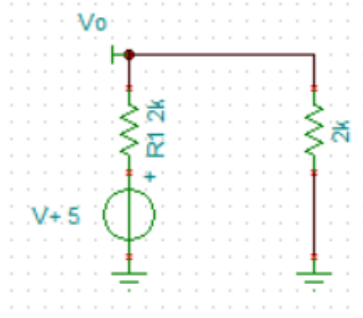


Figura 7: Circuito con entrada  $100 \dots 0$  reducido

El circuito de la figura 7 es un simple divisor de voltaje, con dos resistencias iguales, por lo que es fácil ver que el voltaje de salida  $V_o$  será  $V_o = \frac{V_+}{2}$ . Por lo tanto, concluimos que cuando la entrada de bits es  $100 \dots 0$ , el voltaje de salida es  $\frac{V_+}{2}$ :

$$\text{Bits de entrada: } 100 \dots 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Voltaje de salida: } \frac{V_+}{2}$$

Por lo que coincide con la ecuación (4).

- $0100 \dots 0$  :

Ahora consideramos una palabra de  $n$  bits en la que el segundo bit se encuentra en 1 y todos los demás en 0. Un circuito como éste se ve en la figura 8.

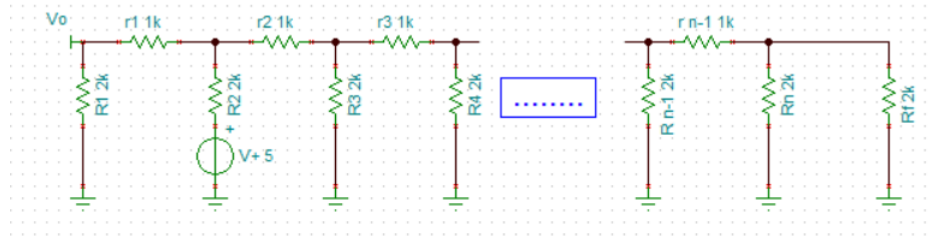


Figura 8: Circuito con entrada  $010 \dots 0$

Las resistencias a partir de  $r_2$  y hacia la derecha forman una escalera igual a la del caso anterior, por lo que se pueden reducir de la misma forma en una resistencia de  $2k\Omega$  y obtenemos el circuito de la figura 9.

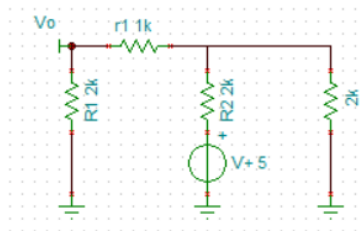


Figura 9: Circuito con entrada  $010 \dots 0$  reducido

Para resolver el voltaje de salida  $V_o$  de este circuito, usamos el método de mallas con corrientes definidas como en la figura 10.

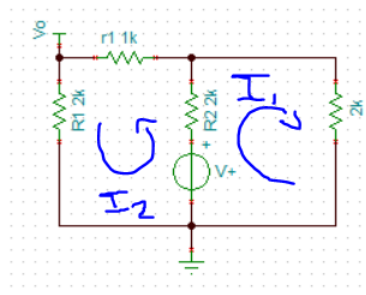


Figura 10: Circuito con entrada 010...0 reducido

Aplicamos la ley de voltajes de Kirchhoff a cada malla. Para la malla de la derecha tenemos que la suma de los voltajes es

$$-V_+ + R_2(I_1 + I_2) + (2k\Omega)I_1 = 0$$

Mientras que en la malla de la izquierda obtenemos

$$-V_+ + R_2(I_1 + I_2) + r_1 I_2 + (2k\Omega)I_2 = 0$$

Juntando estas dos ecuaciones llegamos a  $I_1 = \frac{r_1 + 2k\Omega}{2k\Omega} I_2 = \frac{1k\Omega + 2k\Omega}{2k\Omega} I_2 = \frac{3}{2} I_2$ . Luego, sustituyendo esto en la primer ecuación, llegamos a que  $I_1 = \frac{V_+}{\frac{5}{3}R_2 + 2k\Omega} =$

$$\frac{3}{16000\Omega} V_+ \text{ y por tanto } I_2 = \frac{2}{3} I_1 = \frac{1}{8000\Omega} V_+$$

Luego, si recorremos el circuito desde la tierra hasta el punto  $V_o$ , concluimos que el voltaje  $V_o$  es igual a  $I_2 \cdot R_1 = \frac{V_+}{8000\Omega} \cdot 2000 = \frac{V_+}{4}$ .

Por lo tanto, concluimos que el voltaje de salida es  $\frac{V_+}{4}$ , es decir:

$$\text{Bits de entrada: } 0100 \dots 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Voltaje de salida: } \frac{V_+}{4}$$

Por lo que coincide con la ecuación (4).

Vemos entonces que estos dos casos particulares cumplen con la ecuación (4). Para probar la ecuación (4) para un  $i$  arbitrario, se puede seguir un procedimiento similar.

Ahora bien, si en vez de tener un solo bit encendido tenemos varios, podemos aplicar el principio de superposición para unir los resultados que tenemos. Digamos que la palabra de  $n$  bits es  $b_1 b_2 b_3 \dots b_n$ , luego el  $i$ -ésimo bit da un voltaje de salida de  $\frac{b_i}{2^i} V_+$  (pues de esa forma cuando el  $i$ -ésimo bit está encendido, el voltaje correspondiente según la ecuación (4) es  $\frac{1}{2^i} V_+$  y si el bit está en 0, el voltaje correspondiente es  $0V$ ).

Entonces, el voltaje de salida total debido a la palabra  $b_1b_2 \cdots b_n$  es:

$$V_o = \left( \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2^2} + \frac{b_3}{2^3} + \cdots + \frac{b_{n-1}}{2^{n-1}} + \frac{b_n}{2^n} \right) V_+$$

### 3. De acuerdo con Franco, ¿Cuáles son algunas de las principales causas de error durante la conversión digital a analógica?

Según el libro de Franco [2], los errores de la conversión digital a analógica se pueden deber a discordancias, envejecimiento del equipo o ruido. Para medir el error de la conversión, se define la **exactitud absoluta** como la diferencia entre la salida ideal esperada y la obtenida por el circuito, medida en fracciones de 1 LSB (el voltaje producido por el bit menos significativo).

Se puede graficar la diferencia entre el voltaje ideal y el obtenido por el circuito para distintas palabras de entrada. En la figura 11 se muestran dos gráficas de este tipo, en las que se ven dos tipos de errores distintos.

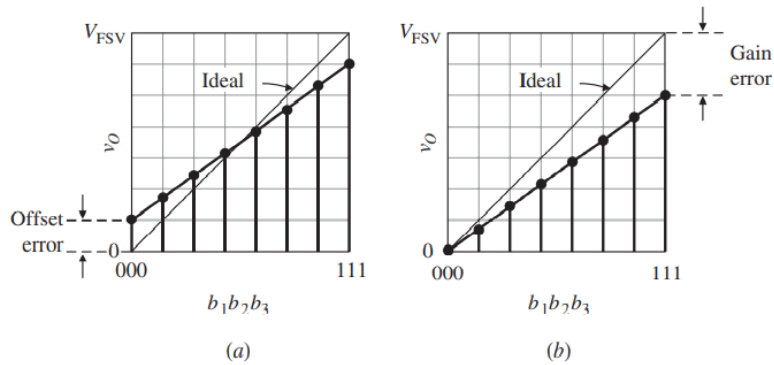


Figura 11: Tipos de errores de DAC. Obtenida de [2]

En la imagen a) se muestra el **error offset**, el cual sucede cuando el resultado del convertidor no es cero aunque los bits estén todos en cero. En la imagen b) se muestra el **error de ganancia**, en el cual los voltajes no aumentan con la pendiente con la que deberían conforme cambiamos las entradas de los bits.

El error offset se corrige desplazando la curva de voltajes de salida, mientras que el error de ganancia se corrige al ajustar por un factor de escala. Sin embargo, incluso al corregir estos dos errores, pueden aparecer errores no lineales que hacen que el voltaje de salida del DAC sea distinto al esperado. Debido a este tipo de errores, el resultado de un DAC comparado con el valor ideal generalmente se verá como en la figure 12.

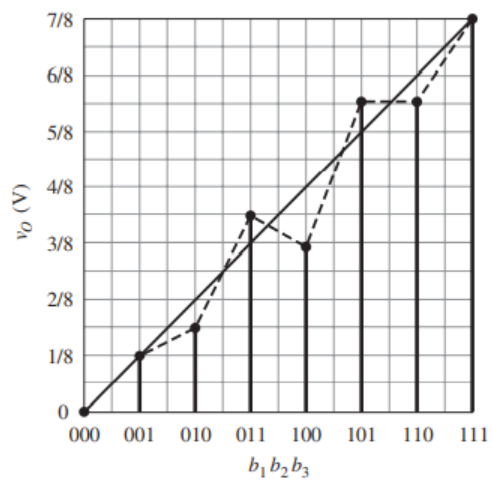


Figura 12: Error no lineal en un DAC. Obtenida de [2]

## Convertidor analógico-digital (AD)

Realice las siguientes actividades:

### 1. Ubicar el circuito de la figura 12.31 de (Franco,2002)

Dicho circuito se presenta a continuación en la figura 13.

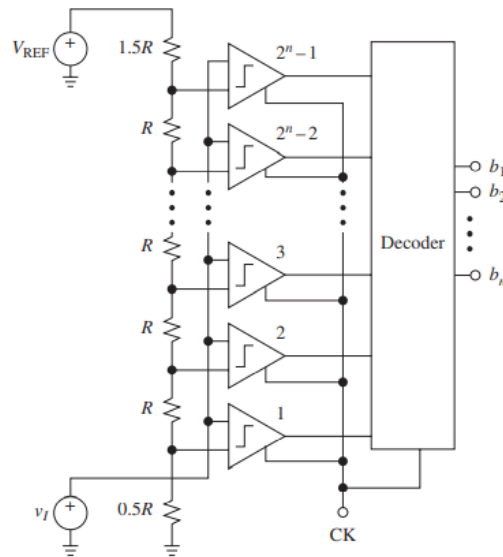


Figura 13: ADC tipo flash de n bits. Obtenida de [2]

### 2. Implementar en TINA-TI un circuito con 4 comparadores

Se construyó dicho circuito como el de la figura 13 pero con 4 comparadores (aunque lo correcto sería hacerlo con 3 comparadores si se quiere tener una salida de 2 bits, pues  $3 = 2^2 - 1$ ). El circuito se presenta a continuación en la figura 14.

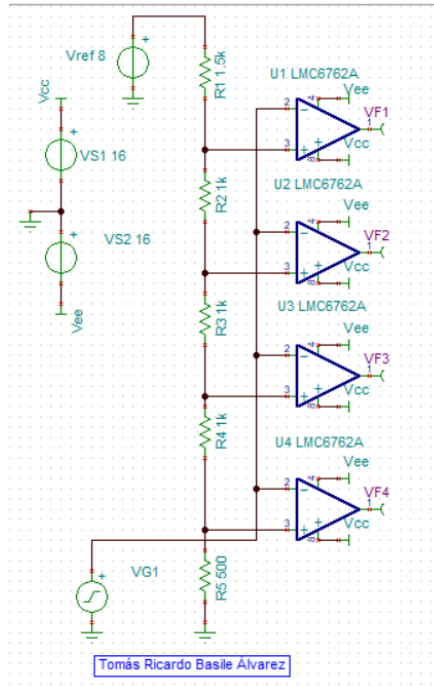


Figura 14: ADC tipo flash en TINA

**3. Pruebe el circuito usando una señal  $v_i(t) = kt$ , donde  $k$  es una constante cualquiera. Presente las formas de onda de salida de cada uno de los comparadores.**

Para realizar esto, se puso una señal triangular en la fuente de voltaje  $VG1$ . Dicha señal tiene una frecuencia de  $0,25Hz$  y una amplitud de  $8V$ . Por lo tanto, si la simulamos durante un tiempo de  $1s$  (que corresponde a un cuarto de periodo), se verá como un voltaje que inicia en  $0V$  y crece linealmente hasta  $8V$  en un tiempo de  $1s$ , es decir, se tiene que  $v_i(t) = (8V)t$ .

Además, se colocaron voltímetros en la salida de cada comparador, denotados como  $VF1$ ,  $VF2$ ,  $VF3$ ,  $VF4$ . Los resultados de una simulación de  $1s$  se muestran en la figura 15.

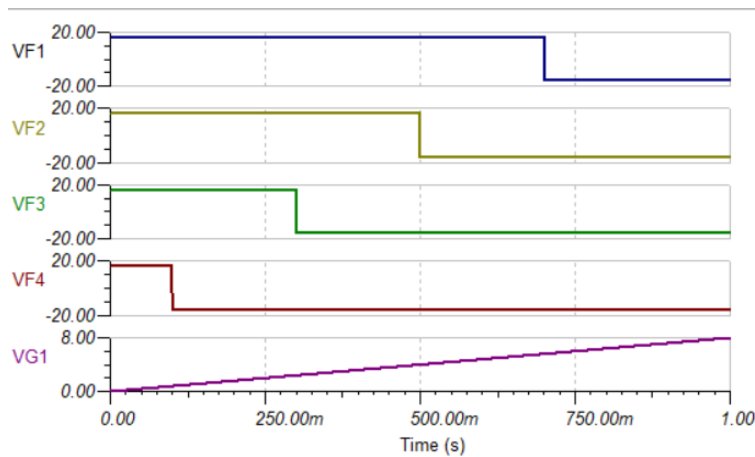


Figura 15: Resultados del ADC implementado en TINA

---

La curva  $VG1$  representa el voltaje de entrada, que como se dijo antes, aumenta linealmente según la ecuación  $v_i(t) = (8V)t$ . Las curvas  $VF1, VF2, VF3, VF4$  indican el voltaje de salida de cada comparador.

Para entender la gráfica que se obtuvo, hay que recordar que este circuito consiste en un divisor de voltaje de la fuente  $V_{ref} = 8V$  en varios niveles distintos (en este caso 4 niveles) para lo cual se usan las resistencias. Cada uno de estos niveles se usa como una de las entradas a uno de los comparadores. Usando la fórmula para divisor de voltaje, se puede ver que el nivel que se usa en el primer comparador es  $V_1 = \frac{R_2 + R_3 + R_4 + R_5}{\sum_i R_i} V_{ref} = \frac{3,5k}{5k}(8V) = 5,6V$ . Y similarmente, para los demás comparadores es  $V_2 = \frac{2,5k}{5k}(8V) = 4V$ ,  $V_3 = \frac{1,5k}{5k}(8V) = 2,4V$ ,  $V_4 = \frac{0,5k}{5k}(8V) = 0,8V$

Luego, en la otra entrada de los comparadores se conecta el voltaje de entrada  $v_i$ . El comparador da como salida un voltaje positivo si el voltaje en su entrada '+' es mayor al de la entrada '-'. Por lo tanto, concluimos que el primer comparador dará como salida un voltaje positivo si  $5,6V > v_i$ , el segundo comparador si  $4V > v_i$ , el tercero si  $2,4V > v_i$  y el cuarto si  $0,8V > v_i$ . En la figura 15 vemos que esto es precisamente lo que sucede, pues conforme pasa el tiempo, los capacitadores dejan de dar una salida positiva cuando el  $v_i$  supera su nivel de voltaje del divisor de voltaje.

## Preguntas

Responda las siguientes preguntas:

### 1. Explique la importancia de la conversión de señales analógicas a digitales.

Como se mencionó antes, los fenómenos físicos suelen producir señales analógicas pero las computadoras guardan la información y la transmiten en forma de bits, que son señales digitales. Convertir una señal analógica a una digital es la forma de convertir una señal física como puede ser el sonido en información que puede almacenar y manejar una computadora. Por ello, esta conversión se usa por ejemplo en la grabación de música para almacenar la información de una onda de sonido en una computadora.

### 2. En la figura 13 hay un bloque que dice decodificador. Explique qué hace este bloque.

Como se explica también en la sección de antecedentes, este bloque se utiliza para convertir los voltajes de salida de los comparadores en palabras de  $n$  bits. En general, en un convertidor como el de la figura 13, se utilizan  $2^n - 1$  comparadores para transformar voltajes analógicos en palabras de  $n$  bits.

Como vimos en la simulación, el voltaje de salida de los comparadores no dice exactamente la palabra de  $n$  bits, sino que solamente nos permite saber la posición del

voltaje  $v_i$  entre los  $2^n - 1$  niveles que produce el divisor de voltaje. Es ahí donde es útil el decodificador, ya que convierte la información de estos  $2^n - 1$  comparadores en la palabra de  $n$  bits  $b_1b_2b_3 \dots b_n$  correspondiente, de tal forma que:

$$D_o := b_12^{-1} + b_22^{-2} + \dots + b_n2^{-n} = \frac{v_i}{V_{ref}}$$

Donde esta igualdad se cumple con un error de hasta  $V_{ref}/2^n$ .

### 3. Deduzca la tabla de verdad de dicho decodificador para el circuito de su simulación.

Para cada rango de voltajes en la entrada  $v_i$ , marcamos en la siguiente tabla el voltaje de salida de los comparadores (con un 1 indicando un voltaje de salida positivo y  $-1$  uno negativo).

Voltaje de entrada $v_i$	$VF_1$	$VF_2$	$VF_3$	$VF_4$
0 a 0,8V	1	1	1	1
0,8 a 2,4V	1	1	1	-1
2,4 a 4	1	1	-1	-1
4 a 5,6V	1	-1	-1	-1
5,6 a 8V	-1	-1	-1	-1

Tabla 3. Tabla de verdad del convertidor analógico digital

### 4. Explique el funcionamiento completo de este convertidor.

Esto ya se explica en los antecedentes y la simulación, pero lo resumimos aquí. El circuito toma una señal de voltaje analógica  $v_i$  y la convierte en una palabra de  $n$  bits  $b_1b_2 \dots b_n$  que cumple con lo siguiente:

$$b_12^{-1} + b_22^{-2} + \dots + b_n2^{-n} = \frac{v_i}{V_{ref}}$$

Donde esta igualdad se cumple con un error de hasta  $V_{ref}/2^n$ .

Para lograrlo, el circuito primero divide el voltaje  $V_{ref}$  en  $2^n - 1$  niveles distintos usando un divisor de voltaje (para lo cual se usan las resistencias). Luego, se compara el voltaje de entrada  $v_i$  con cada uno de estos niveles usando comparadores, los cuales darán como salida un voltaje positivo si su nivel es mayor a  $v_i$ .

Usando los voltajes de salida de estos comparadores, podemos determinar el rango en el que se encuentra el voltaje de entrada  $v_i$ . Finalmente, se utiliza el decodificador para usar la información de estos comparadores para construir la palabra de  $n$  bits  $b_1b_2 \dots b_n$ .



---

## Conclusiones

Se lograron construir los circuitos que realizan la conversión de señales analógicas a digitales y viceversa. Además, se pudo entender cómo funcionan estos circuitos para convertir señales y las utilidades que tienen. Ambos circuitos fueron simulados utilizando TINA-TI.

Para el circuito que convierte señales digitales en analógicas, se usaron como entrada varias palabras de  $n$  bits distintas y se verificó que el voltaje de salida simulado en TINA sea igual al esperado idealmente. Resulta que para todas las palabras de  $n$  bits utilizadas como entrada, el voltaje de salida simulado fue exactamente igual al esperado. Por otro lado, para el convertidor analógico digital se usó una señal lineal para entender cómo funciona en general.

## Bibliografía

1. Rashid, Muhammad H. Microelectronic Circuits Analysis and Design Second edition. Cengage Learning, 2011.
2. Franco, Sergio. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. McGraw Hill Education, 2002.