



UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SIMULACION DE CONVERTIDORES D/A Y A/D EN EL SOFTWARE 20-SIM

TESIS PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA

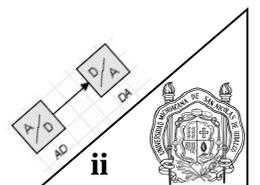
Presenta  
Edmundo Núñez Rubio

Asesor de Tesis  
Dr. Gilberto González Avalos

Morelia, Michoacán. Abril, 2016

*"Dream as if you'll live forever, live as if you'll die today."*

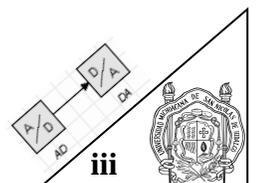
James Dean.



# Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica, por ser una parte fundamental en mi formación personal y académica, durante el tiempo que fui alumno de la misma, a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, a mi asesor de tesis, el Dr. Gilberto, por guiarme en la realización de esta tesis, a mis padres, familiares y amigos.

A todos muchas gracias, por estar conmigo durante todo este proceso, en los buenos y malos momentos.



# Resumen

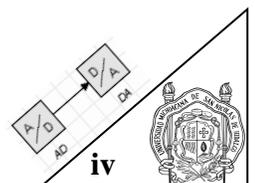
Esta tesis propone el diseño de convertidores D/A y A/D, mediante el uso del simulador 20-sim.

Se analizan los diferentes tipos de convertidores, y se estudia su funcionamiento y circuitos característicos.

Después de observar a detalle el comportamiento de los convertidores, se escogen dos convertidores, para analizarlos mediante el programa 20-sim.

Lo anterior se aplica a casos de estudio para comprobar su funcionamiento y consiguiendo resultados satisfactorios.

**Palabras clave:** 20-sim, convertidores, analógico-digital, digital-analógico, simulación.



# Abstract

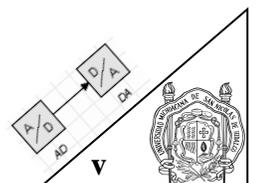
This thesis proposes the design of A/D and D/A converters using the software 20-sim.

The different types of converters are analyzed, and their operation and characteristic circuits are studied.

After the studying the behavior of the converters, two models are chosen, to be analyzed through the 20-sim program.

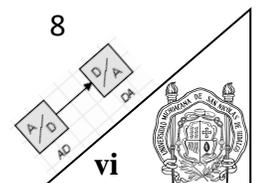
This applies to case studies to prove their work and operation, and achieving satisfactory results.

**Key words:** 20-sim, converters, analog-digital, digital-analog, simulation.

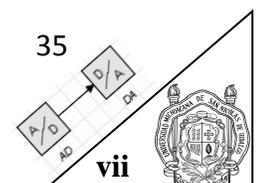


# Contenido

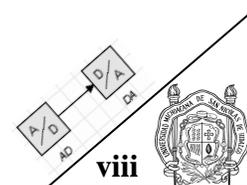
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Contenido	vi
Lista de Figuras	ix
<b>Capítulo 1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 La importancia de los convertidores A/D y D/A	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Justificación	3
1.4 Metodología	3
1.5 Contenido de la Tesis	4
<b>Capítulo 2 Circuitos convertidores D/A y A/D</b>	<b>6</b>
2.1 Introducción	6
2.2 Conceptos de los convertidores D/A	6
2.2.1 Resolución	6
2.2.2 Tiempo de Conversión	7
2.2.3 Linealidad	7
2.2.4 Monotonicidad	7
2.2.5 Tiempo de establecimiento	7
2.2.6 Señal analógica	7
2.2.7 Señal digital	7
2.2.8 Muestreo	7
2.2.9 Teorema de muestreo de Nyquist	8



2.2.10 Descripción del proceso de conversión Digital/Analógico	8
2.3 Tipos de convertidores Digital/Analógico	9
2.3.1 Convertidor Digital/Analógico Tipo Sumador Con Entradas Ponderadas	9
2.3.2 Convertidor Digital/Analógico Tipo Escalera R-2R	11
2.4 Conversión Analógico/Digital	13
2.4.1 Descripción de los convertidores Analógico/Digital	14
2.4.2 Ejemplo de conversión analógica digital	15
2.5 Tipos de convertidores Analógico/Digital	17
2.5.1 Convertidor Analógico/Digital de rampa o escalera	17
2.5.2 Convertidor Analógico/Digital de aproximaciones sucesivas	19
2.5.3 Convertidor Analógico/Digital tipo ráfaga o flash	20
2.5.4 Convertidor Analógico/Digital integrador de doble rampa	21
2.5.5 Convertidor Analógico/Digital de voltaje frecuencia	22
<b>Capítulo 3 Diseño de convertidores</b>	<b>24</b>
3.1 Introducción	24
3.2 Empezando a usar 20-sim	24
3.2.1 Modelado y simulación	26
3.2.2 Editor de ecuaciones	26
3.2.3 Editor gráfico	26
3.2.4 Librerías personalizadas	26
3.2.5 Arrastrar y Soltar	28
3.2.6 Simulación	28
3.3 Convertidor Digital Analógico	29
3.4 Convertidor Analógico Digital	32
3.4.1 Rampa creciente y decreciente	35



3.5 Simulación en 20-sim de un Convertidor Digital Analógico de rampa digital	37
3.5.1 Contador	37
3.5.2 DAC	41
3.5.3 Comparador	43
3.6 Simulación en 20-sim de un Convertidor Analógico Digital de doble rampa.	46
3.6.1 Switch	47
3.6.2 Integración de doble rampa	49
3.6.3 Simulación en 20-sim del convertidor A/D de doble rampa	50
<b>Capítulo 4 Casos de Estudio</b>	<b>53</b>
4.1 Introducción	53
4.2 Primer caso de estudio, convertidor A/D de doble rampa	53
4.2.1 Puente de Wheatstone	53
4.2.2 Amplificador de Instrumentación	55
4.2.3 Simulación en 20-sim del primer caso de estudio	57
4.3 Segundo caso de estudio	60
4.3.1 Bits de entrada	60
4.3.2 Switch de entrada	61
4.3.3 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio	64
<b>Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>71</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>74</b>



# Lista de Figuras

Figura 1.1- Diagrama de bloques de un convertidor A/D.	1
Figura 1.2- Diagrama de bloques de un convertidor D/A.	2
Figura 2.1- Proceso de conversión Digital/Analógico.	8
Figura 2.2- Convertidor tipo sumador de resistencias ponderadas.	10
Figura 2.3- Convertidor tipo Escalera R-2R.	12
Figura 2.4- Señal Analógica.	15
Figura 2.5- Muestreo de la Señal.	15
Figura 2.6- Señal Muestreada.	16
Figura 2.7- Señal Muestreada con mayor resolución.	16
Figura 2.8- Diagrama de bloques de un convertidor A/D tipo Rampa o Escalera.	18
Figura 2.9- Diagrama de bloques de un convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.	19
Figura 2.10- Convertidor A/D integrador de doble rampa.	21
Figura 2.11- Convertidor A/D integrador de voltaje frecuencia.	23
Figura 3.1- Ventana del editor de 20-sim.	25
Figura 3.2- Ejemplo de un circuito rectificador en 20-sim.	27
Figura 3.3 Modificando las propiedades de los bloques en 20-sim	27
Figura 3.4 Simulación de un modelo en 20-sim.	28
Figura 3.5 Valores mostrados en la simulación.	29
Figura 3.6 Convertidor Digital-Analógico R2R.	30
Figura 3.7 Modelo del convertidor R2R en20.sim.	31
Figura 3.8 Simulación del convertidor R2R en 20-sim.	31
Figura 3.9 Diagrama de bloques de un convertidor analógico-digital.	33

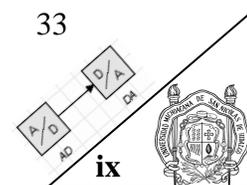


Figura 3.10 Convertidor analógico-digital de rampa digital o tipo contador.	34
Figura 3.11 Modelo de un ADC de rampa digital o tipo contador en 20-sim.	37
Figura 3.12 Código de un Flip Flop SR modificado para que funcione como JK en 20-sim.	38
Figura 3.13 Agregando entradas y salidas.	39
Figura 3.14 Diagrama de bloques de un contador síncrono con Flip Flops JK.	40
Figura 3.15 Simulación en 20-sim de un contador síncrono con Flip Flops JK.	40
Figura 3.16 Diagrama de bloques de un contador síncrono con Flip Flops JK.	41
Figura 3.17 Bloque MultiplyDivide para hacer la multiplicación.	42
Figura 3.18 Bloque PlusMinus para hacer la suma.	42
Figura 3.19 Simulación en 20-sim de las salidas de los flip flops sumadas.	43
Figura 3.20 Diagrama de un amplificador operacional comparador.	43
Figura 3.21 Bloque de And utilizado como comparador en 20-sim.	44
Figura 3.22 Simulación del comparador.	45
Figura 3.23 Simulación de un convertidor analógico digital en 20-sim.	45
Figura 3.24 Diagrama de bloques de un convertidor A/D de doble rampa en 20-sim.	46
Figura 3.25 Switch utilizado para realizar la doble integración en 20-sim.	47
Figura 3.26 Simulación de Switch para realizar la doble integración.	49
Figura 3.27 Simulación del convertidor A/D de doble rampa en 20-sim.	50
Figura 4.1 Puente de Wheatstone.	54
Figura 4.2 Amplificador de Instrumentación.	56
Figura 4.3 Diagrama del primer caso de estudio en 20-sim.	57
Figura 4.4 Simulación del sistema balanceado en 20-sim.	58
Figura 4.5 Simulación del sistema desbalanceado en 20-sim.	59
Figura 4.6 Diagrama de bloques del segundo caso de estudio en 20-sim.	60
Figura 4.7 Propiedades de los bloques que representan los bits.	

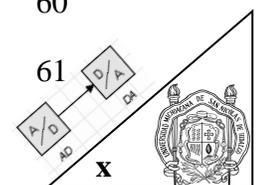
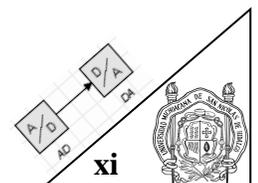


Figura 4.8 Diagrama de bloques del switch y su interface.	62
Figura 4.9 Diagrama de bloques interno del switch.	62
Figura 4.10 Código del switch.	63
Figura 4.11 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 0001.	65
Figura 4.12 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 1000.	66
Figura 4.13 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 1111.	67
Figura 4.14 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio a escala completa.	68
Figura 4.15 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 0001, 1000 y 1111. .	70

## Lista de Tablas

Tabla 3.1 Voltajes obtenidos con el convertidor	32
Tabla 3.2 Conversión de binario 12 bits a decimal	52
Tabla 4.1 Voltajes obtenidos al simular 0001, 1000 y 1111.	68



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 La importancia de los convertidores A/D y D/A

En la actualidad una gran variedad de procesos físicos son controlados por sistemas electrónicos, como es sabido la mayoría dichos procesos físicos pueden ser representados por medio de señales analógicas, por ejemplo valores obtenidos por un sensor al aplicar cambios de temperatura, presión, etc.

Para poder controlar estos procesos es necesario realizar una conversión analógico-digital para poder obtener valores que sean más fáciles de manipular con sistemas electrónicos.

El principal objetivo de un convertidor A/D es el de transformar una señal eléctrica<sup>1</sup> en un número digital equivalente, de la misma manera, un convertidor D/A transforma un número digital en una señal eléctrica analógica.

Este proceso exige que los pasos intermedios se realicen con la mejor calidad posible para no tener una información, dependiendo del tipo de componente y su aplicación podemos encontrar diferentes parámetros que lo caracterizan, estos son: la velocidad de conversión, la resolución, los rangos de entrada, etc.

Un transductor genera señales eléctricas a partir de fenómenos físicos, como se mencionó en anterioridad para poder manipular las señales con sistemas digitales.

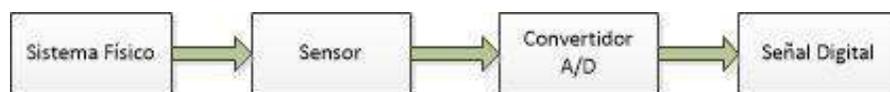
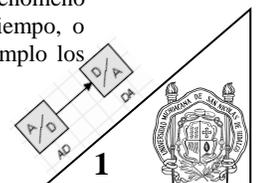


Figura 1.1- Diagrama de bloques de un convertidor A/D.

<sup>1</sup> La Real Academia de la lengua, nos da la definición sobre señal eléctrica: Tipo de señal generada por algún fenómeno electromagnético. Estas señales pueden ser de dos tipos: analógicas, si varían de forma continua en el tiempo, o digitales si varían de forma discreta (con parámetros que presentan saltos de un valor al siguiente; por ejemplo los valores binarios 0 y 1).



La figura 1.1 muestra la secuencia desde que la variable física entra al sistema hasta que es transformada en una señal digital, para que esta señal sea ingresada al convertidor analógica digital, esta debe ser muestreada, es decir se toman valores discretos en instantes de tiempo de la señal analógica, esto tiene el nombre de muestreo (sampling), matemáticamente es el equivalente a multiplicar la señal análoga por una secuencia de pulsos de periodo constante.

Como resultado se obtiene un tren de pulsos con amplitudes limitadas por la envolvente de la señal analógica.

Para garantizar la toma de muestra y la conversión de forma correcta se debe considerar la velocidad de muestreo, para lo cual el de Teorema de Nyquist<sup>2</sup>, establece que la frecuencia de muestreo  $f_s$ , debe ser como mínimo el doble que el ancho de banda de la señal muestreada como se indica. En (1.1). Si no ocurre esta situación, se tiene lugar el fenómeno denominado aliasing<sup>3</sup>.

$$f_s > 2 \cdot f_m \quad (1.1)$$

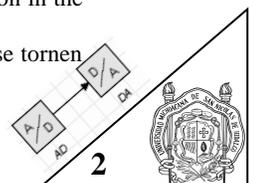
En el proceso de conversión D/A indicado en la figura 1.2, se observa que la señal digital es convertida en una señal eléctrica, la señal digital debe de pasar por un convertidor del tipo digital-analógico. Esta señal modulada es recuperada a través de un filtro pasa bajas e interpolada, obteniéndose la señal analógica equivalente.



**Figura 1.2- Diagrama de bloques de un convertidor D/A.**

<sup>2</sup> La Este teorema fue formulado en forma de conjetura por primera vez por Harry Nyquist en 1928 (Certain topics in telegraph transmission theory), y fue demostrado formalmente por Claude E. Shannon en 1949 (Communication in the presence of noise).

<sup>3</sup> En procesamiento de señales al se le denomina aliasing, al efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean digitalmente).



## 1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es el de realizar la simulación de convertidores A/D y D/A en 20-sim<sup>4</sup>, observar el comportamiento que presentan y poder realizar un estudio en casos especiales.

## 1.3 Justificación

En este proyecto se utiliza el simulador 20-sim, el cual es un programa de simulación y modelado, que es desarrollado por Controllab<sup>5</sup>, los modelos pueden ser introducidos en forma de ecuaciones, diagramas de bloques, gráficas y componentes físicos, 20-sim es usado para modelar sistemas complejos y desarrollo de sistemas de control.

Los diferentes tipos de convertidores A/D y D/A tienen un rango muy amplio de aplicación en la vida diaria, por lo que su estudio es de gran utilidad, debido a que se pueden implementar diversos métodos para optimizar su funcionamiento en los casos que ya se esté haciendo uso de estos mismos, o para implementarlos en nuevas aplicaciones.

## 1.4 Metodología

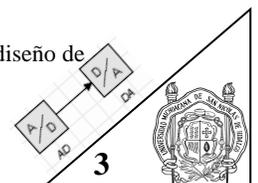
En este proyecto se analizan los diferentes tipos de convertidores A/D y D/A que existen, para poder observar las características, funcionamiento y casos especiales que los identifican.

Después de analizar los tipos de convertidores, se hace uso del ambiente de diseño dentro del programa 20-sim, para de esta manera poder realizar las simulaciones de los distintos tipos de convertidores A/D y D/A y así obtener sus funcionamientos respectivos en cada uno de los casos.

---

<sup>4</sup> 20-sim es un programa de modelado y simulación para sistemas mecatrónicos <http://www.20sim.com/>.

<sup>5</sup> Controllab Products B.V. es una compañía de ingeniería con más de 15 años de experiencia en el campo del diseño de modelos <http://www.controllab.nl/en/>.



Habiendo analizado los distintos tipos de convertidores, se puede hacer un estudio más detallado, para después pasar a los casos de estudio y observar su comportamiento en el ambiente de simulación de 20-sim.

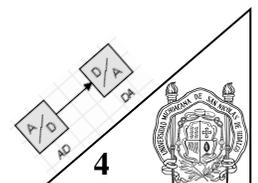
## 1.5 Contenido de la Tesis

En el **capítulo 1** Se explica la importancia de los convertidores, el uso y aplicación que tienen en la vida diaria, se definen las diferentes etapas que constituyen un proceso de conversión junto a los elementos que son necesarios para poder realizar este proceso, y se da un espacio para definir el objetivo de la tesis, el cual es hacer uso del simulador 20-sim para simular convertidores A/D y D/A.

En el **capítulo 2** Las características, funcionamiento, conceptos y distintos modos de operación de los convertidores son analizados, esto, para poder tener un mejor entendimiento de los pasos que se van dando en una conversión desde que se tiene la señal de entrada, hasta que se tiene la respuesta en la salida del convertidor que está siendo utilizada.

En el **capítulo 3** Encontramos una introducción al uso y manejo de 20-sim, en este capítulo se describe cuáles son los tipos de sistemas que pueden ser analizados con el programa, en donde se desarrolló este ambiente de programación, después de esa breve explicación, se explica el funcionamiento del simulador y las diferentes herramientas que lo complementan.

Habiendo visto el funcionamiento del simulador, se explica el circuito del convertidor digital-analógico R2R, siendo este escogido por que en los problemas prácticos es el que tiene mayor utilización, debido a que puede operar con varios bits y no presentar problemas como los demás convertidores, se simula en 20-sim y los resultados son comparados con los valores que se obtienen con la fórmula que caracteriza su funcionamiento.



Otro convertidor que se analiza en este capítulo es analógico digital, se describen las diferentes etapas que lo componen, el convertidor que se estudia en este caso, es el convertidor analógico-digital de doble rampa, el diagrama es analizado, y se realiza la simulación en 20-sim.

En el **capítulo 4** Se analizan dos casos de estudio para ver el funcionamiento de los convertidores analizados en el capítulo tres.

El primer caso de estudio, es el de un convertidor analógico digital utilizando el modelo del convertidor de doble rampa, en este caso se analiza la respuesta a la salida del convertidor, teniendo como señal de entrada, la respuesta obtenida mediante un puente de Wheatstone<sup>6</sup>.

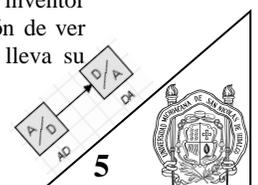
Teniendo ya definido los funcionamientos del convertidor y del puente respectivamente, se realizan las simulaciones en 20-sim y se estudian las respuestas obtenidas en dicho programa.

En el **capítulo 5** Se definen las conclusiones a las cuales se llegó después de realizar los casos de estudio, se comentan las ventajas que se tienen en 20-sim, con respecto a otros programas y el uso que se le puede dar a este proyecto.

También se hace una breve mención de los proyectos futuros que pudieran existir, en caso de que se decidiera darle continuidad a lo ya estudiado.

---

<sup>6</sup> Sir Charles Wheatstone (Gloucester, 6 de febrero de 1802-París, 19 de octubre de 1875) fue un científico e inventor británico, que destacó durante la época victoriana, incluyendo el Estereoscopio (aparato que creaba la ilusión de ver imágenes tridimensionales), y el caleidófono. Wheatstone es más conocido por el aparato eléctrico que lleva su nombre: el puente de Wheatstone, utilizado para medir las resistencias eléctricas.



# Capítulo 2

## Circuitos convertidores D/A y A/D

### 2.1 Introducción

En este capítulo se analizarán los diferentes tipos de convertidores analógico-digital (A/D) y digital-analógico (D/A), sus conceptos principales, fórmulas que los definen, y los diagramas y funcionamiento que los caracterizan.

### 2.2 Conceptos de los convertidores D/A

Existen diversos conceptos que definen el funcionamiento de los convertidores que deben ser tomados en cuenta antes de poder realizar el estudio de los convertidores, estos conceptos son la resolución, el tiempo de conversión, linealidad, monotonicidad, tiempo de establecimiento, señal analógica, señal digital, muestreo, teorema de muestreo de Nyquist.

#### 2.2.1 Resolución

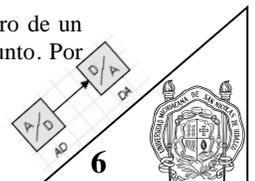
La resolución de un convertidor indica el número de valores discretos<sup>7</sup>. Valores discretos que puede producir en relación a los valores analógicos. La resolución determina la cantidad de error y por lo tanto la máxima cantidad de ruido posible sin tener que hacer un exceso de muestreo. La resolución se calcula de la siguiente manera.

$$\text{Resolucion} = 2^n \quad (2.1)$$

Donde n es el número de bits.

---

<sup>7</sup> En procesamiento digital de señales se define como valor discreto. Solo puede tomar algunos valores dentro de un mínimo conjunto numerable, es decir, no acepta cualquier valor, únicamente aquellos que pertenecen al conjunto. Por ejemplo cero y uno.



### 2.2.2 Tiempo de Conversión

Es el tiempo que requiere un convertidor para realizar completamente la conversión de un dato.

### 2.2.3 Linealidad

Es el máximo error de salida real y salida ideal cuando ya se han compensado los errores de cero y ganancia.

### 2.2.4 Monotonicidad

Se dice que se da la monotonicidad si una señal tiene una pendiente que no cambia de signo, es decir que siempre es creciente o decreciente, pero sólo una.

### 2.2.5 Tiempo de establecimiento

Se define como el tiempo que tarda un convertidor D/A desde que se produce un cambio en la entrada, hasta que se obtiene la salida correspondiente dentro de un rango de error definido.

### 2.2.6 Señal analógica

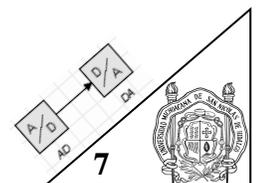
Una Señal Analógica es una señal continua en la que es variable su amplitud y periodo en función del tiempo. Algunas magnitudes físicas comúnmente portadoras de una señal de este tipo son eléctricas como la intensidad, la tensión y la potencia, pero también pueden ser hidráulicas como la presión, térmicas como la temperatura, mecánicas.

### 2.2.7 Señal digital

La señal digital es una señal que a diferencia a de una señal analógica, solo puede tomar dos valores, siendo estos uno y cero.

### 2.2.8 Muestreo

El muestreo es la cuantización de una señal analógica para poder convertirla a una señal digital, se caracteriza por ser una secuencia de muestras tomadas en un intervalo de tiempo.



### 2.2.9 Teorema de muestreo de Nyquist

El Teorema de Nyquist, establece que la frecuencia de muestreo mínima  $f_s$ . Debe ser como mínimo el doble que el ancho de banda de la señal muestreada como se indica en (2.2). Si no ocurre esta situación, se tiene lugar el fenómeno denominado aliasing.

$$f_s = 2 f_m \quad (2.2)$$

Donde  $f_s$ . Es la frecuencia de muestreo y  $f_m$  es el ancho de banda de la señal muestreada.

### 2.2.10 Descripción del proceso de conversión Digital/Analógico

A continuación se muestra en un diagrama de bloques el procedimiento que se lleva a cabo en el proceso de conversión digital/analógico.

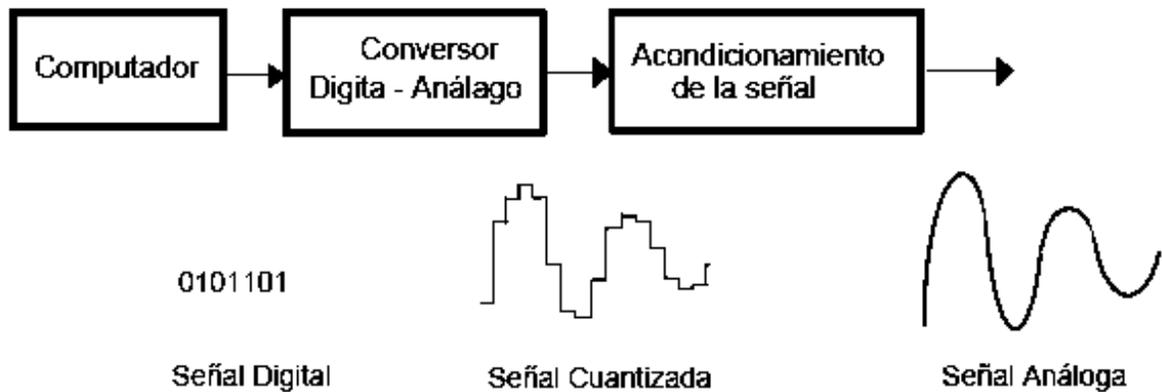


Figura 2.1- Proceso de conversión Digital/Analógico.

Se define como muestreo a la cantidad de veces que se mide el valor de una señal en un determinado periodo de tiempo.

De acuerdo con el teorema de Nyquist-Shannon, la cantidad de veces que una señal debe ser medida para no perder información debe de ser al menos el doble de la frecuencia máxima que alcanza dicha señal.

En otras palabras, si se quiere muestrear una señal de frecuencia de 3 KHz<sup>8</sup>, para no perder información se deben de tomar 6000 muestras por segundo.

El teorema también establece que la tasa de muestreo sólo determinara el ancho de banda base de la señal muestreada, es decir, que limitara la frecuencia máxima de los componentes sinusoidales que componen una onda periódica, visto desde la perspectiva matemática, una mayor tasa de muestreo para una señal no debe de ser interpretada como una mayor fidelidad al momento de realizar la reconstrucción de la señal.

El proceso de muestreo es reversible, esto quiere decir, siguiendo el análisis desde el punto de vista matemático, que la reconstrucción se puede realizar en un modo exacto.

La tasa de muestreo se determina multiplicando por dos el ancho de banda base de la señal a muestrear y añadiendo un margen (un 10% en un CD de audio, por ejemplo) para contemplar las limitaciones prácticas de los filtros no ideales (reales)

## 2.3 Tipos de convertidores Digital/Analógico

A continuación se describen los diferentes tipos de convertidores D/A, el funcionamiento que los caracteriza, sus circuitos y fórmulas que los describen.

### 2.3.1 Convertidor Digital/Analógico Tipo Sumador Con Entradas Ponderadas

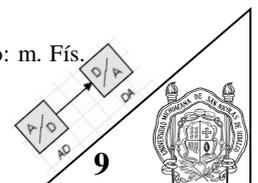
Un convertidor D/A tipo sumador con resistencias ponderadas, es aquel en el que se implementa un circuito en el cual los datos digitales son conectados a un juego de resistencias, cuyos valores son escogidos de tal forma que generan una señal analógica de amplitud proporcional al dato binario que es introducido.

Los valores de las resistencias van desde el bit menos significativo (LSB) al bit más significativo (MSB), esto se puede observar más claramente en la figura 2.2.

Para el MSB se supone un valor de R, que va a ser el valor del bit N-1, para el bit N-2 se va a tener un valor de dos veces el de R, y así sucesivamente dependiendo del número de bits que se quieran convertir.

---

<sup>8</sup> De acuerdo a la Real Academia Española, Kilo Hertz equivalente a 1000 Hertz o hercios, y lo define como: m. Fís. Unidad de frecuencia del sistema internacional, que equivale a 1 ciclo por segundo. (Símbolo. Hz).



Uno de los inconvenientes de este convertidor es que con los valores de resistencias que se tienen en la actualidad, resulta difícil seguir una progresión geométrica requerida, si el número de bits crece de una manera considerable, y también se aumenta la posibilidad de tener ruido en la señal analógica que se va a obtener al final.

También cabe mencionar, que los tiempos de conmutación para cada bit, serán mayores conforme nos aproximemos al LSB, esto debido a que al haber una mayor resistencia, los voltajes podrán verse afectados al sufrir una atenuación mayor.

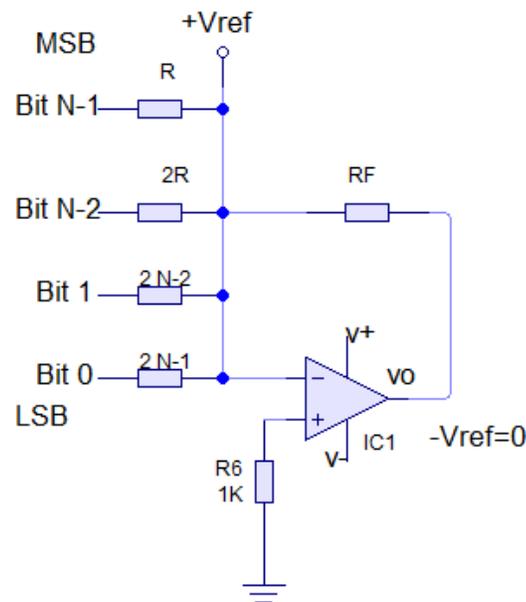


Figura 2.2- Convertidor tipo sumador de resistencias ponderadas.

Para el  $i$ -ésimo bit

$$I_i = \frac{V_{+ref} - V_{-ref}}{R2^{N-i-1}} \quad (2.3)$$

$$\Delta v = \frac{-V_{Ref}}{2^n} n \quad (2.4)$$

### 2.3.2 Convertidor Digital/Analógico Tipo Escalera R-2R

Este convertidor soluciona los problemas que presenta el convertidor de resistencias ponderadas al momento de aumentar el número de bits, ya que sólo se utilizan resistencias con valores “R” y “2R”, generando así que la corriente que circula a través de las resistencias 2R se encuentra en aumento geométrico, a una razón de  $\frac{1}{2}$  debido a que en cada nodo en donde se unen R-R, la impedancia del circuito es igualmente a R de acuerdo al teorema de Thevenin<sup>9</sup>.

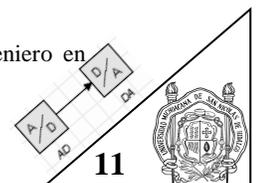
El cual menciona que si una parte de un circuito eléctrico está comprendida entre dos terminales A y B, esta parte puede sustituirse por un circuito equivalente que esté constituido únicamente por una fuente de voltaje en serie con una resistencia, de forma que al conectar un elemento entre los dos terminales A y B, la tensión que cae en él y la intensidad que lo atraviesa son las mismas tanto en el circuito real como en el equivalente.

De manera que cualquier corriente procedente de los interruptores cuando se cierran, a través de una resistencia 2R, se divide en los nodos en dos corrientes de igual valor, que corresponde a la mitad de la corriente entrante.

Cada vez que la corriente de entrada, en progresión hacia el amplificador operacional, cruce un nuevo nodo, va a ser dividida de nuevo, para llegar al amplificador con un valor inversamente proporcional a una potencia de 2, dependiendo del número de nodos (o bits) según sea el caso.

---

<sup>9</sup> Léon Charles Thévenin (Meaux, 30 de marzo de 1857 - París, 21 de septiembre de 1926) fue un ingeniero en telegrafía francés, que extendió el análisis de la Ley de Ohm a los circuitos eléctricos complejos).



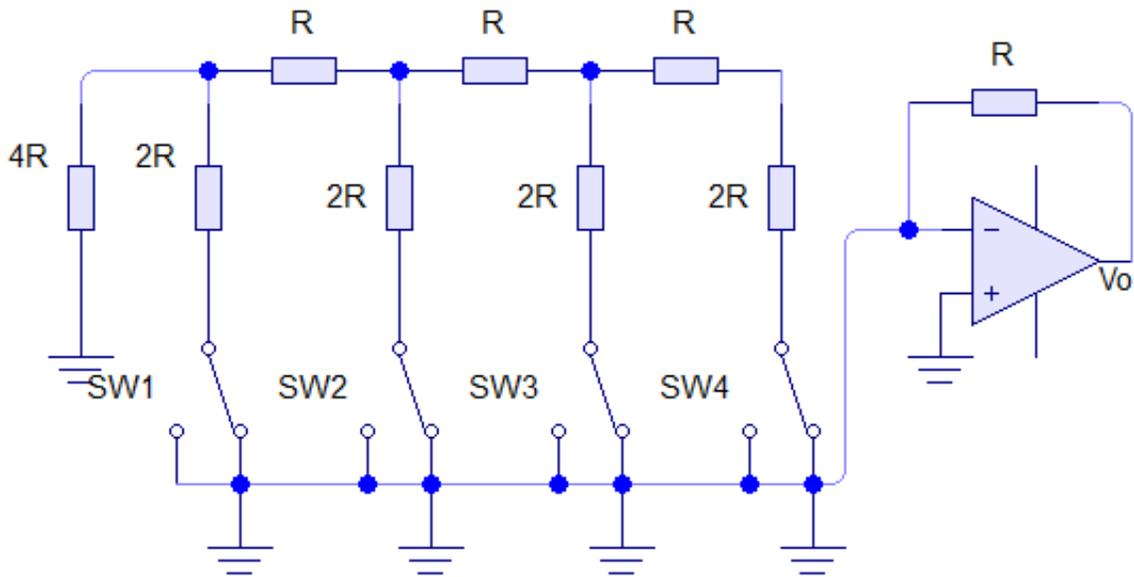


Figura 2.3- Convertidor tipo Escalera R-2R.

El amplificador sumador con la escalera de resistencias R-2R mostrado produce la salida.

$$V_{out} = \frac{R_f}{R} V_{ref} \left[ \frac{D_0}{16} + \frac{D_1}{8} + \frac{D_2}{4} + \frac{D_3}{2} \right] \quad (2.5)$$

Donde las  $D_s$  toman los valores 0 ó 1. Estas entradas digitales TTL<sup>10</sup>, las cuales cierran los interruptores con el 1 lógico y los deja en su estado básico de tierra para la lógica 0. Esto se muestra para 4 bits en la figura 2.3, pero se puede extender a cualquier número con solo los valores de las resistencias R y 2R.

<sup>10</sup> TTL es el acrónimo en inglés de transistor-transistor logic, es decir, lógica transistor a transistor. Es una tecnología de construcción de circuitos electrónicos digitales.

## 2.4 Conversión Analógico/Digital

La conversión A/D tiene su principio de funcionamiento basado en el teorema de muestreo y en los conceptos de cuantificación y codificación.

Este tipo de conversión consiste en la codificación de señales analógicas en señales digitales, para poder facilitar su procesamiento ya sea mediante codificación<sup>11</sup> o compresión<sup>12</sup>. Y de este modo, obtener una señal digital más inmune al ruido y demás interferencias a las que son susceptibles las señales analógicas.

Una señal analógica tiene la característica de que su amplitud puede tomar cualquier valor, esto significa que su nivel en cualquier muestra no está limitado a un conjunto finito de niveles predeterminados, como es el caso de las señales cuantificadas.

Las señales analógicas cuentan con un ruido que se traduce en un intervalo de incertidumbre, esto quiere decir que si se obtiene una muestra a una señal analógica en un instante determinado, es imposible determinar cuál es el valor exacto de la muestra dentro de un intervalo de incertidumbre que introduce el ruido, por ejemplo si se mide 1.23456V, pero la señal de muestra está comprendida entre 1.23V y 1.24V, y no es físicamente posible determinar con total precisión, debido al ruido que se pudiera presentar.

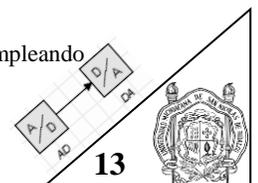
En cambio en una señal digital las dimensiones de tiempo y amplitud no son continuas, sino que son discretas, lo que significa que la señal solo tomar valores determinados en momentos también discretos.

Con frecuencia es más fácil obtener precisión y mantener la forma de onda de la señal analógica original (dentro de los límites de precisión que se presentan antes de su conversión)

---

<sup>11</sup> Codificación: proceso de conversión de un sistema de datos de origen a otro sistema de datos de destino.

<sup>12</sup> Compresión: Reducción del volumen de datos tratables para representar una determinada información empleando una menor cantidad de espacio.



### 2.4.1 Descripción de los convertidores Analógico/Digital

Un convertidor analógico/digital convierte un nivel de voltaje analógico de entrada en un número binario de salida normalmente, la relación entre voltaje de entrada y el número de salida es lineal.

Esto consiste básicamente en realizar de una manera periódica medidas de la amplitud de la señal de entrada y traducirlas a un lenguaje numérico.

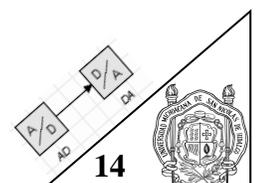
Las ventajas de digitalizar una señal, es que si se presentan problemas de atenuación, la señal puede ser amplificada y al mismo tiempo reconstruida, se cuenta con sistemas de detección y corrección de errores, facilidad para el procesamiento de la señal.

Algunos convertidores A/D requieren que el voltaje de entrada permanezca estable durante el proceso de conversión, el cual puede ser de algunos microsegundos, para proporcionar un nivel estable, se utiliza el amplificador muestreador retenedor.

Siempre que se utilizan sistemas digitales para interactuar con procesos físicos, por ejemplo, en el monitoreo, medición o control de los mismos, se hace de vital importancia el uso de interfaces analógico/digital.

Debido a la naturaleza analógica de las variables que están involucradas en procesos físicos, por ejemplo temperatura, flujo de agua, voltaje, posición, velocidad, etc.

A continuación en la figura siguiente se muestra una señal analógica y su correspondiente señal digitalizada, así como los impulsos de muestras necesarios para llevar a cabo el proceso de discretización.



## 2.4.2 Ejemplo de conversión analógica digital

Consideremos la señal analógica que se muestra en la figura 2.4.

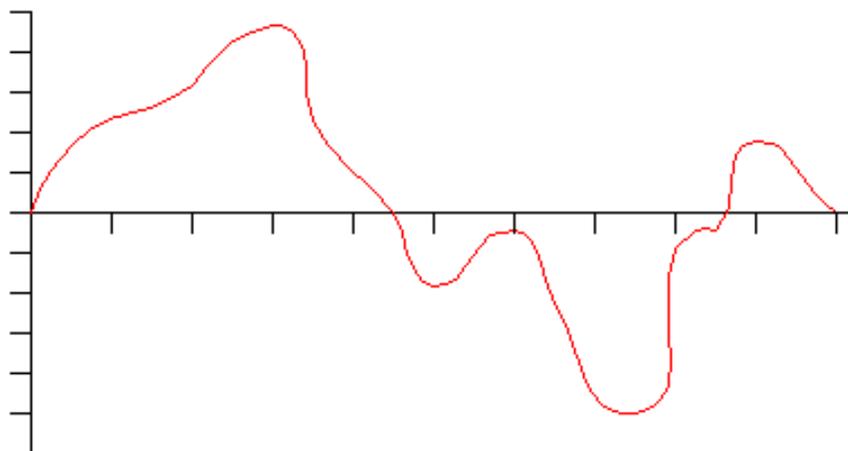


Figura 2.4- Señal Analógica.

Si asumimos que:

$F_s = 1000$  muestras por segundo

$N = 10$  (dividiendo el eje y en 10 intervalos)

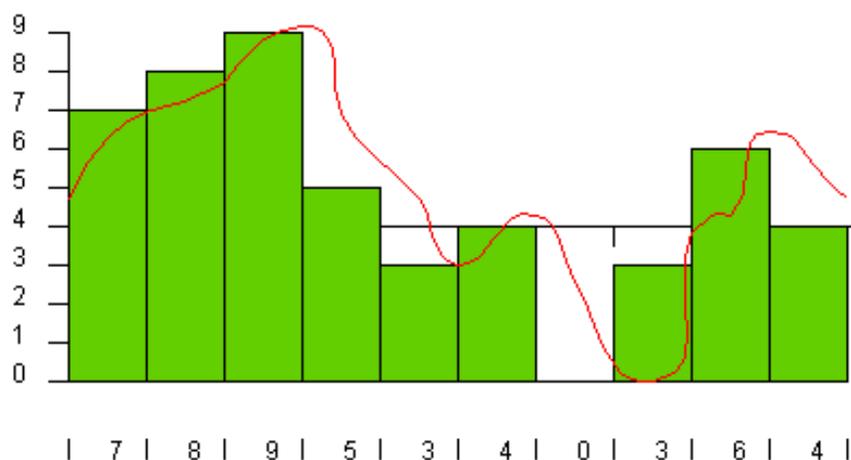
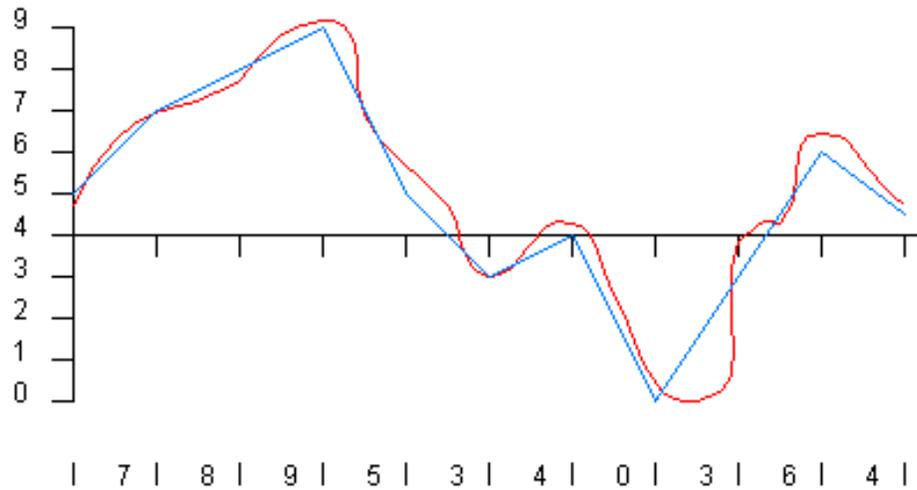


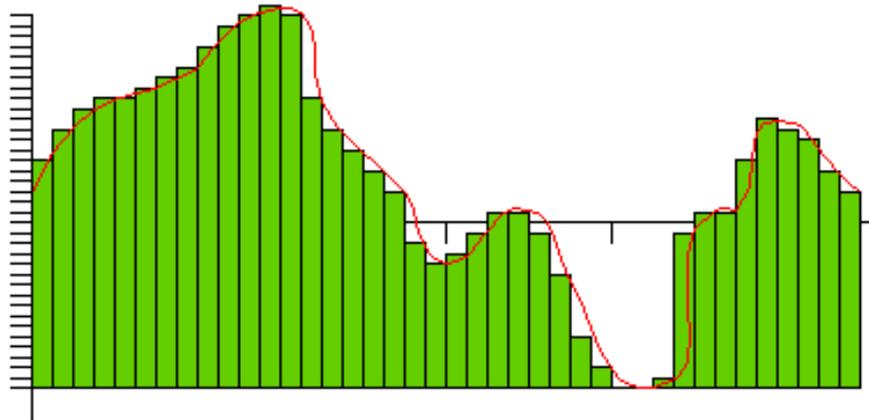
Figura 2.5- Muestreo de la Señal.

Como podemos observar el convertidor toma diez valores (0 a 9) para poder almacenar la señal, si esto lo tomamos en cuenta, en la siguiente figura podemos observar como el convertidor almacena la señal.



**Figura 2.6- Señal Muestreada.**

Los valores no fueron suficientes por los pocos puntos de muestreo, y se puede observar que la señal difiere un poco de la señal original, pero podemos aumentar los puntos como se muestra en la figura 2.7.



**Figura 2.7- Señal Muestreada con mayor resolución.**

## 2.5 Tipos de convertidores Analógico/Digital

El número de bits que pueden ser obtenidos con un convertidor es finito, el código de salida deberá ser siempre el más cercano que puede representarse mediante los bits, la conversión digital efectúa una cuantificación en la entrada analógica, acotándola entre dos niveles consecutivos cuya distancia es precisamente el grado de resolución obtenido.

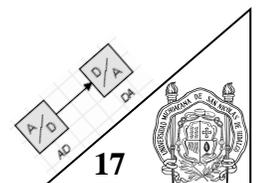
Existen diversos tipos de convertidores en igual forma utilizados para efectuar la conversión, en unos casos se efectúa la conversión directa, por comparación contra una tensión de referencia, en otros casos se efectúa una transformación a una variable intermedia, como puede ser el tiempo, también puede efectuarse la conversión AD efectuando una conversión inversa DA, usando al mismo tiempo una estructura de retroalimentación, si se usa lazo cerrado reciben entonces el nombre de servo convertidores, según sea el método utilizado se obtienen distintas características de precisión, rapidez de conversión y costo.

Los tipos de convertidores analógico/digitales que podemos encontrar son los siguientes:

- Convertidor A/D de rampa o escalera.
- Convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.
- Convertidor A/D tipo ráfaga o flash.
- Convertidor A/D integrador de doble rampa.
- Convertidor A/D de voltaje frecuencia.
- Convertidor A/D serie.

### 2.5.1 Convertidor Analógico/Digital de rampa o escalera

Este convertidor se basa en la comparación de la señal analógica en la entrada con una señal de rampa definida.



El esquema se muestra en la Fig. 2.8. Se comienza activando un pulso de inicio en la lógica de control, con esta acción el contador se inicializará en cero, entregando en sus salidas el código binario del cero digital. La secuencia pasa directamente como entrada paralelo al DAC que responde con 0 V a la salida. Esta señal es usada como entrada de referencia a un comparador, el cual compara la magnitud de la señal analógica de entrada con el valor entregado por el convertidor. Del valor que proporcione el comparador dependerá que el contador continúe contando o bien, se detenga, ya que si el comparador entrega un "1", entonces el reloj continuará alimentando al comparador.

De lo contrario si entrega un "0", el contador se detendrá. La lógica del comparador es si la señal de entrada es mayor que la referencia, entonces el comparador responderá con un "1" y se incrementa la cuenta en 1 digital, y así sucesivamente, sólo la cuenta se detendrá cuando la respuesta del DAC<sup>13</sup> sea mayor que la entrada de la señal analógica. En este caso, el reloj se detendrá y se tendrá la salida digital del valor de cuenta anterior.

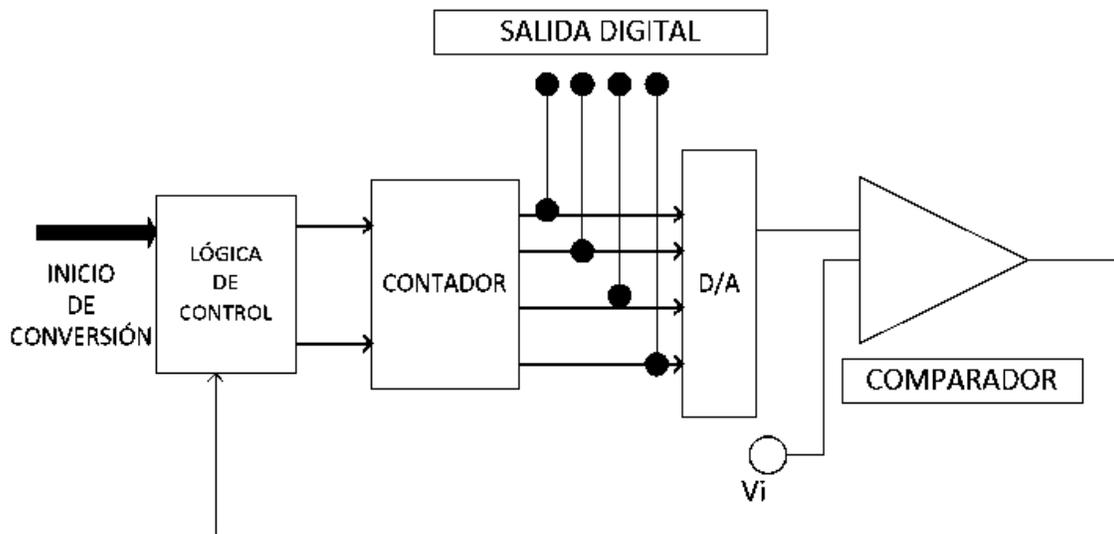


Figura 2.8- Diagrama de bloques de un convertidor A/D tipo Rampa o Escalera.

<sup>13</sup> DAC es el acrónimo en inglés de Digital-to-analog converter, que significa convertidor digital – analógico. Traducción.

## 2.5.2 Convertidor Analógico/Digital de aproximaciones sucesivas

Este tipo de convertidor es más efectivo que el que se analizó anteriormente, también es muy utilizado cuando se requieren velocidades de conversión altas, debido a que cuenta con la ventaja de tener una alta resolución y velocidad de conversión.

El esquema es prácticamente el mismo que el del convertidor A/D tipo rampa o escalera, la diferencia que existe entre el tipo rampa y el de aproximaciones sucesivas es que el contador dentro del registro no es un contador secuencial de uno en uno, sino que es un contador programable que se incrementa o decremента de acuerdo a la influencia del bit más significativo (MSB).

De esta manera no es necesario contar con  $2^n$  veces como lo hace el contador tipo rampa, ahora la cuenta máxima solo es de  $n$  veces. El esquema se muestra en la figura 2.9.

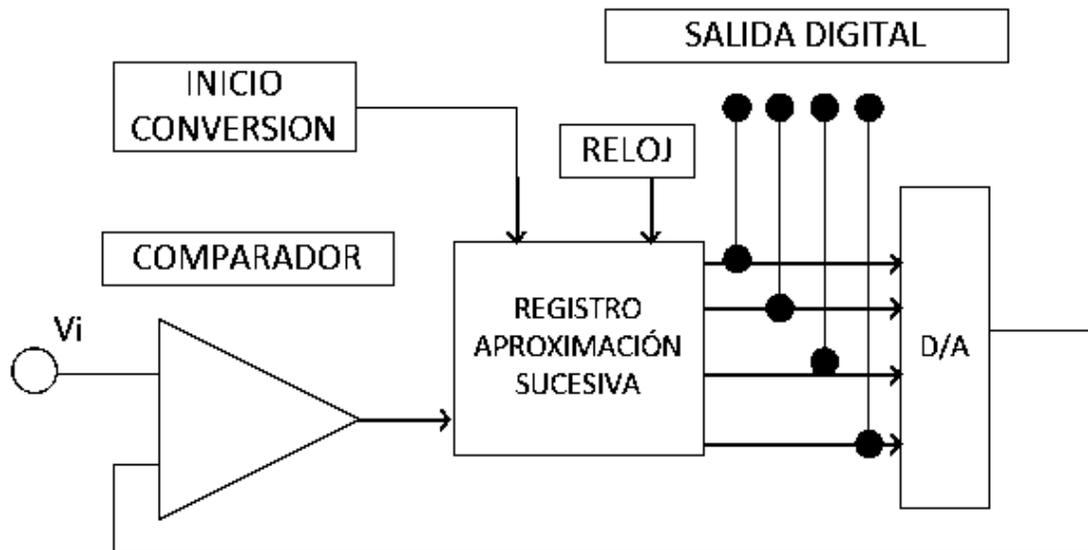


Figura 2.9- Diagrama de bloques de un convertidor A/D de aproximaciones sucesivas.

### 2.5.3 Convertidor Analógico/Digital tipo ráfaga o flash

Los convertidores de tipo ráfaga o flash o conversión directa, tienen otro propósito, la velocidad es el objetivo básico y el costo que se debe pagar por ello es un circuito muy complejo aunque sencillo a nivel de concepto.

Dos señales participan en la etapa de entrada, la propia señal analógica que se debe convertir y una señal de referencia.

En la configuración básica, la señal analógica se aplica a las puertas no inversoras de un cierto número de amplificadores operacionales que, utilizados como comparadores, están dispuestos en paralelo, a la entrada de un decodificador.

A la entrada inversora de cada comparador se aplica la tensión de referencia, que a su vez se le conecta una resistencia de valor idéntico y puesta en serie. El resultado es la diferencia de tensión entre dos comparadores sucesivos es de 1 LSB.

La complejidad de la arquitectura flash se deriva precisamente del elevado número de comparadores necesarios a medida que aumenta el número de bits que se desea obtener a la salida. El número de éstos es  $2^n - 1$ , donde  $n$  es el número de bits de salida, no es de extrañar que los convertidores de tipo flash tengan limitada la resolución debido a su elevada integración.

El resultado es que no existe ningún convertidor flash que ofrezca una resolución de 16 bit, y que más allá no son prácticos teniendo en cuenta el tamaño del chip, el correcto funcionamiento de los comparadores e incluso el precio.

Este tipo de convertidor por razones de velocidad es ampliamente usado en el campo de las telecomunicaciones, los instrumentos de medida y, en general, el tratamiento de señales rápidas como la de vídeo.

### 2.5.4 Convertidor Analógico/Digital integrador de doble rampa

Los convertidores de doble rampa tienen como punto fuerte la precisión (Fig. 2.11), y al mismo tiempo, sólo pueden aplicarse a señales cuyo nivel oscile de forma muy lenta (un valor típico de velocidad de muestreo es de 10 muestras por segundo).

Este dispositivo consiste en un integrador basado en un amplificador operacional.

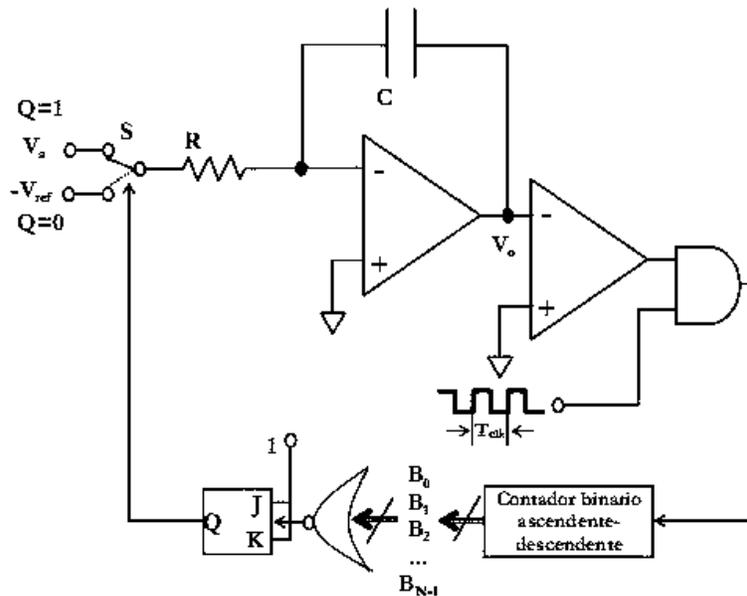


Figura 2.10- Convertidor A/D integrador de doble rampa.

Para dos entradas, la señal analógica que se va a digitalizar y una señal de referencia de valor constante. Un interruptor se encarga de que una de las dos esté conectada en todo momento al amplificador integrador. Otro interruptor se halla en paralelo con el condensador, el que permite la intervención que éste o no. El resultado de la actuación coordinada de ambos interruptores es que en la salida se obtenga una señal de doble rampa.

Una de subida (la carga del condensador con la tensión analógica en la entrada) y la de bajada (con la tensión de referencia a la entrada).

El cálculo de la señal digitalizada se fundamenta en la relación entre los tiempos de subida y bajada, de acuerdo con (2.6).

$$\frac{t_s}{t_m} = \frac{V_{ref}}{V_a} \quad (2.6)$$

Donde  $t_s$ , es el tiempo de subida o de muestreo y  $t_m$  el de bajada o de medida,  $V_{REF}$  es la tensión de referencia y  $V_a$  es la tensión analógica.

Los tiempos de muestreo y de medida son detectados por un contador que se encuentra a la salida del integrador y dependen de la resistencia, el condensador y la tensión de entrada

Dadas sus especiales características, los convertidores de doble rampa se utilizan, por ejemplo, en los voltímetros digitales<sup>14</sup>, por su exactitud e inmunidad al ruido. Pueden alcanzar una resolución de hasta 18 o 20 bits.

### 2.5.5 Convertidor Analógico/Digital de voltaje frecuencia

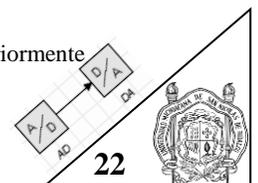
En este tipo de convertidores, el voltaje continuo de entrada se convierte en un conjunto de pulsos cuya frecuencia es proporcional a la magnitud del voltaje de alimentación.

Los pulsos se cuentan mediante un contador electrónico, durante un intervalo de tiempo específico y la cuenta resultante se exhibe como una representación digital del voltaje.

El esquema es el que se muestra en la figura 2.12. Cuando se aplica un voltaje de entrada el integrador genera un voltaje de salida de rampa con una pendiente proporcional al voltaje aplicado. Esta rampa se aplica a un generador monoestable el cual genera un

<sup>14</sup> Voltímetros digitales: Tienen prestaciones adicionales como memoria, detección de valor de pico, verdadero valor eficaz (RMS) y auto rango. El sistema de medida usa conversión analógico-digital (que suele ser empleando un integrador de doble rampa) para obtener el valor numérico mostrado en una pantalla numérica LCD.

El primer voltímetro digital fue inventado y producido por Andrew Kay de "Non-Linear Systems" (y posteriormente fundador de Kaypro) en 1954.



pulso de amplitud definido por el voltaje de entrada rampa. El pulso es realimentado a un conmutador que descarga el condensador integrador, terminando así la rampa.

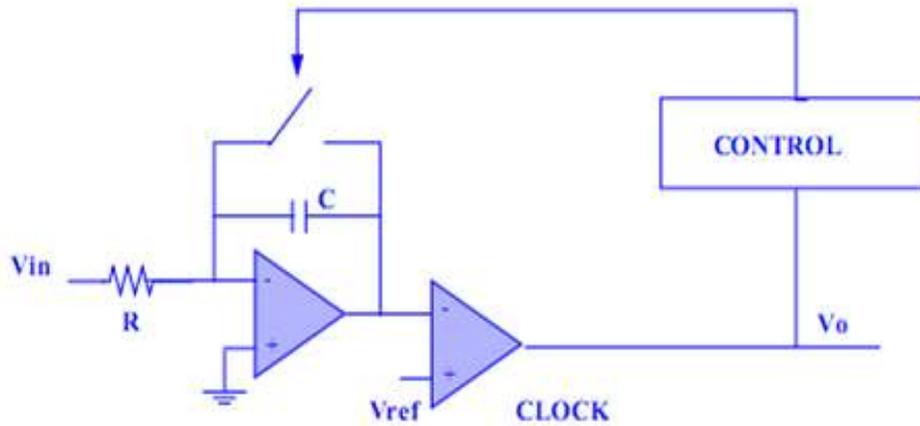


Figura 2.11- Convertidor A/D integrador de voltaje frecuencia.

$$F = \frac{V_{in}}{RCV_{Ref}} \quad (2.7)$$

Su utilización es adecuada en ambientes ruidosos, por su alta inmunidad al ruido y exactitud. Las frecuencias típicas del convertidor voltaje frecuencia son entre 10 KHz a 1 MHz.

# Capítulo 3

## Diseño de convertidores

### 3.1 Introducción

20-sim es un programa avanzado de simulación y modelado que corre sobre Microsoft Windows. Con 20-sim se pueden simular sistemas tales como eléctricos, hidráulicos, térmicos y mecánicos o cualquier combinación de los mismos. 20-sim fue desarrollado en el laboratorio de control en la universidad de Twente en Holanda, como sucesor del famoso TUTSIM<sup>15</sup>.

### 3.2 Empezando a usar 20-sim

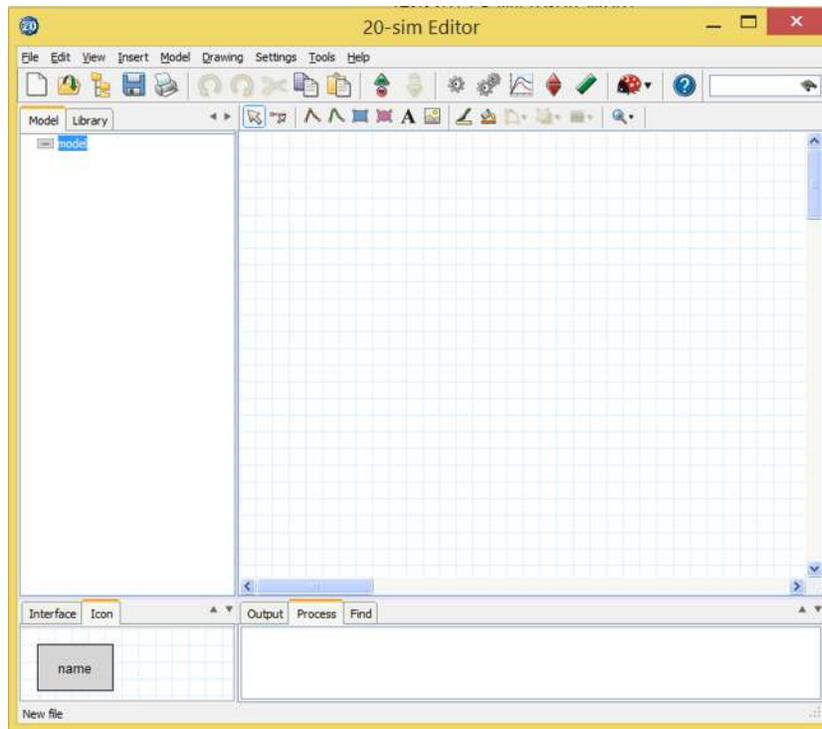
El programa consta de dos ventanas principales y muchas herramientas. La primera ventana es el editor y la segunda es el simulador. El editor es la ventana que se abre al iniciar 20-sim. En esta parte es en donde se pueden crear los modelos.

En la figura 3.1 se muestra la ventana principal de 20-sim, en esta ventana se pueden apreciar cuatro partes distintas, las cuales se mencionan a continuación:

- Model/Library
- Editor Gráfico/Equation
- Output/Process/Find
- Interface/Icon

---

<sup>15</sup> TUTSIM fue el primer programa comercial de simulación en correr en IBM-PC. Desarrollado por la universidad de Twente en Holanda Fue utilizado para modelado y simulación de sistemas multi dominio utilizando ecuaciones diferenciales y gráficos de bond. Traducción.



**Figura 3.1- Ventana del editor de 20-sim.**

El editor consta de cuatro partes:

-Model/Library: Esta parte se encuentra en medio en el lado izquierdo. La pestaña modelo muestra todos los elementos del modelo que está siendo creado en el editor. La pestaña Library muestra la librería de 20-sim.

-Editor Gráfico/Equation: Es la parte blanca en medio en el lado derecho, en este editor es en donde se pueden introducir las ecuaciones y crear los modelos gráficos.

-Output/Process/Find: Se encuentra al fondo a la derecha. La pestaña Output muestra los archivos que son abiertos y almacenados. La pestaña Process muestra los mensajes del compilador. La pestaña Find muestra los resultados de búsqueda.

-Interface/Icon: Se encuentra abajo a la izquierda. La pestaña Interface muestra la interfaz del modelo seleccionado. Dando doble clic abrirá el editor de interfaz. La pestaña Icon muestra el icono del modelo seleccionado. Dando doble clic abrirá el editor de icono.

### 3.2.1 Modelado y simulación

El modelado puede realizarse utilizando ecuaciones, diagramas de bloque, gráficos de unión, diagramas de iconos, o una combinación de estas representaciones.

Después de que el modelo ha sido creado, debe ser checado y compilado para generar un código de simulación. Esto lo hace 20-sim automáticamente cuando se abre el simulador o cuando se revisa el modelo. En algunos casos el modelo puede tener errores que pueden ser resueltos adaptando el modelo para que se corrija. Los errores son mostrados en la pestaña Process en la parte baja del editor.

### 3.2.2 Editor de ecuaciones

Si se selecciona un modelo, al dar doble clic se abre el editor de ecuaciones en la parte derecha, en esta parte se pueden editar las propiedades del modelo seleccionado.

### 3.2.3 Editor gráfico

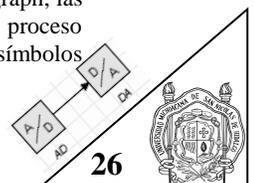
En el editor gráfico se pueden editar los diagramas de bloques, diagramas de iconos y gráficos de bond (bond graphs<sup>16</sup>), para utilizar el editor gráfico, se tiene que arrastrar el elemento desde la pestaña librería que se encuentra del lado izquierdo, se pueden utilizar los botones de la barra de herramientas para cambiar la posición y conectar los modelos.

### 3.2.4 Librerías personalizadas

20-sim permite que se puedan crear librerías e incluso iconos, de modo que si creamos un bloque lo podemos utilizar como uno de los bloques que están prediseñados en el programa.

---

<sup>16</sup> 20-sim fue el primer programa comercial en facilitar el modelado de los gráficos de bond. Estos gráficos son descripciones de sistemas físicos en forma de redes, en términos de procesos ideales. Con el método de bond graph, las características del sistema son separadas en un arreglo de elementos separados, cada elemento describe un proceso físico idealizado. Para facilitar el armado de las gráficas de bond, los elementos comunes se denotan como símbolos especiales. Traducción <http://www.20sim.com/product/bondgraphs.html>



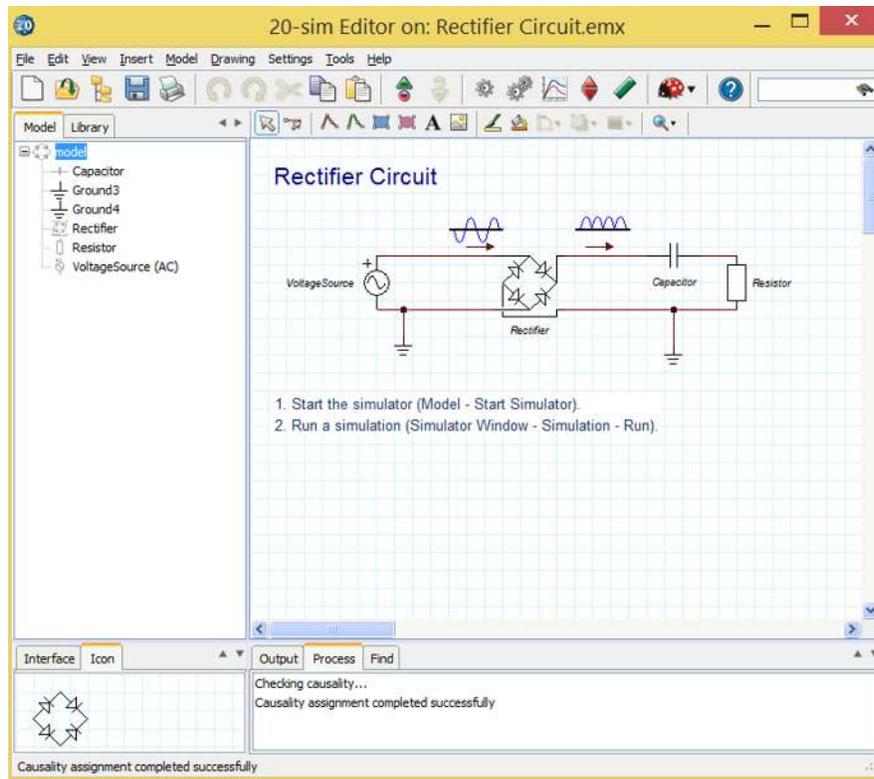


Figura 3.2- Ejemplo de un circuito rectificador en 20-sim.

Como podemos observar en la figura 3.2, 20-sim tiene un ejemplo de un circuito rectificador, en este circuito si se da doble clic en cualquiera de los componentes que lo conforman, se pueden cambiar las propiedades eléctricas de los mismos, esto se puede observar en la figura 3.3.

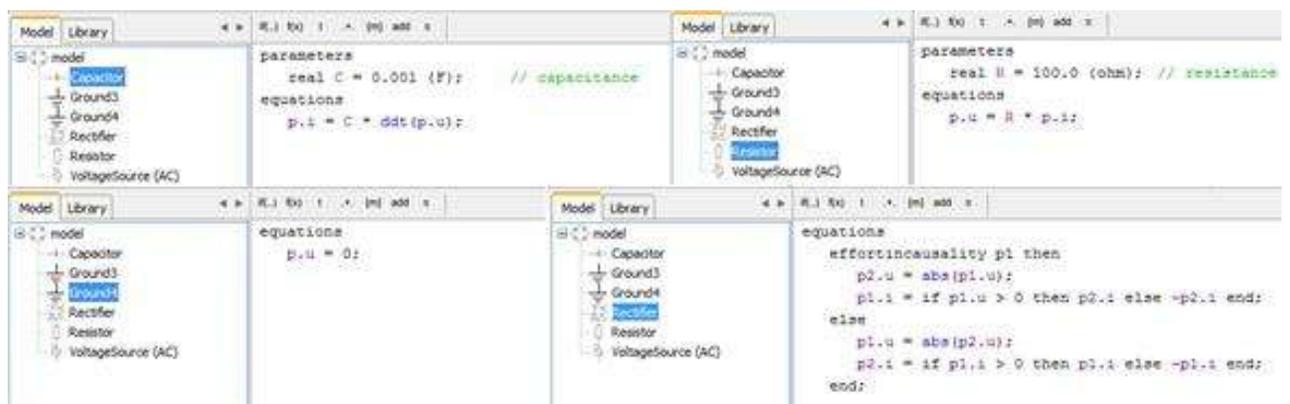


Figura 3.3 Modificando las propiedades de los bloques en 20-sim

### 3.2.5 Arrastrar y Soltar

Como se mencionó anteriormente, en 20-sim se pueden crear modelos en base a los elementos que se encuentran en la librería arrastrándolos al editor gráfico.

Esto lo podemos ver en la figura 3.2 donde se muestra el modelo de un rectificador de onda, que se encuentra en la librería en la parte de ejemplos y en redes eléctricas, se pueden modificar los valores de los parámetros en el editor de gráfico, dando doble clic en cada elemento para poder cambiar los valores.

### 3.2.6 Simulación

Para iniciar el simulador, se da clic en el icono de simulación, esto se puede observar en la figura 3.4.

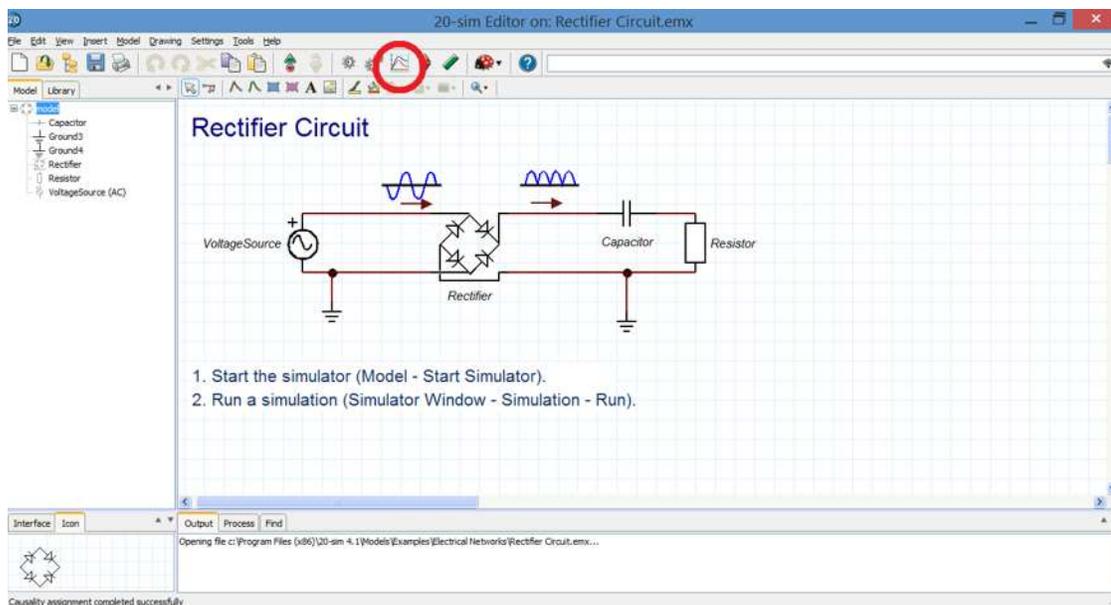
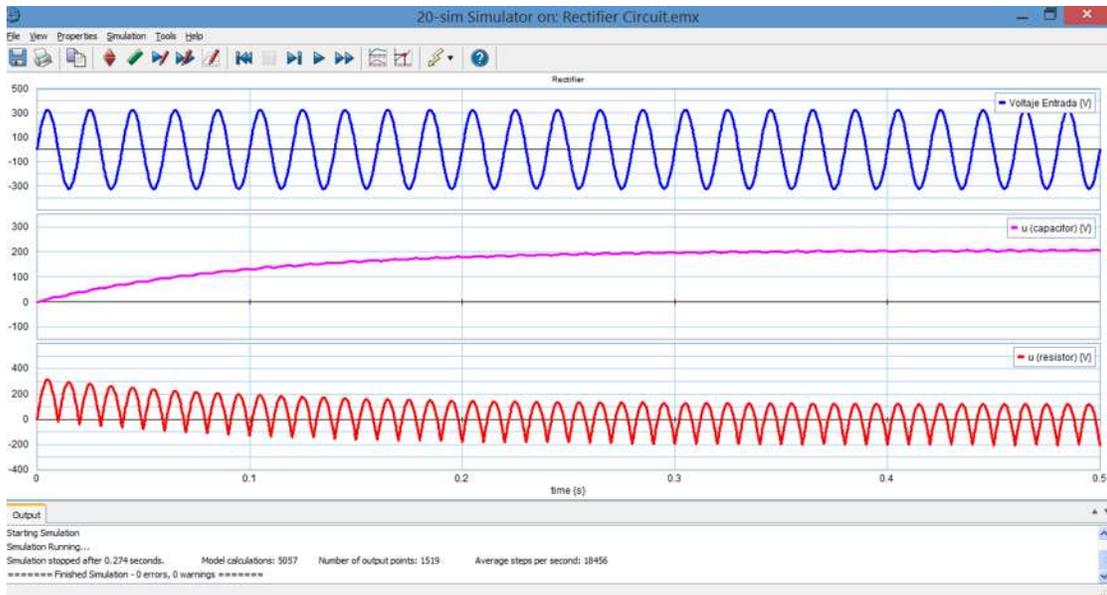


Figura 3.4 Simulación de un modelo en 20-sim.

El simulador abrirá la ventana de simulación, en donde podremos escoger las diferentes variables a analizar, y ver representados en la ventana del programa.

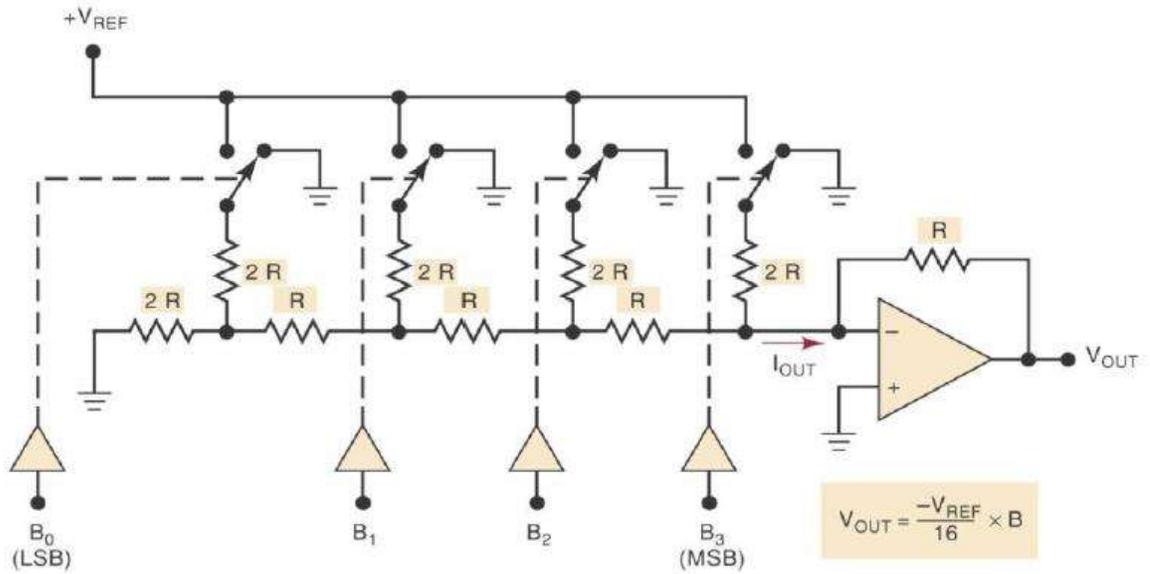


**Figura 3.5 Valores mostrados en la simulación.**

En la figura 3.5 se muestran los resultados de la simulación, como se puede observar, se graficaron los voltajes de entrada, en la resistencia, y en el capacitor, se pueden graficar todas las variables que podamos encontrar en nuestro modelo, desde corrientes hasta voltajes.

### 3.3 Convertidor Digital Analógico

El convertidor digital-analógico elegido para la simulación fue el convertidor R2R, porque de este tipo de convertidores, es el que presenta menor problema a la hora de utilizarlo, por ejemplo en comparación con uno de resistencias ponderadas, la diferencia entre en bit más significativo (MSB) y el menos significativo (LSB) suponiendo uno de 12 bits, la resistencia del MSB es de  $1\text{K}\Omega$  y la del LSB será mayor de  $2\text{M}\Omega$ , por esta razón es preferible tener un circuito que utilice resistencias que se encuentren cerca del valor que se requiere, por eso la red escalera R2R fue la que se utilizó, puesto que guarda una relación 2 a 1.



**Figura 3.6 Convertidor Digital-Analógico R2R.**

Se puede observar cómo están acomodadas las resistencias de modo que se utilizan valores distintos de R y 2R. La corriente  $I_{out}$  depende de las posiciones en las que se encuentren los interruptores que se muestran en la figura 3.6, el voltaje de salida  $V_{out}$  se obtiene de la siguiente forma:

$$V_{out} = \frac{-V_{REF}}{16} (B) \quad (3.1)$$

Donde B es el valor de la entrada binaria, la cual puede variar desde 0000 (0) a 1111 (15).

Por ejemplo, si suponemos que  $V_{REF} = 10V$  y el número 1111 (15), el voltaje que tendremos a la salida será de:

$$V_{OUT} = \frac{-V_{REF}}{16} (15) = \frac{-(10)(15)}{16} = -9.375V$$

Esto lo podemos comprobar con la simulación en 20-sim.

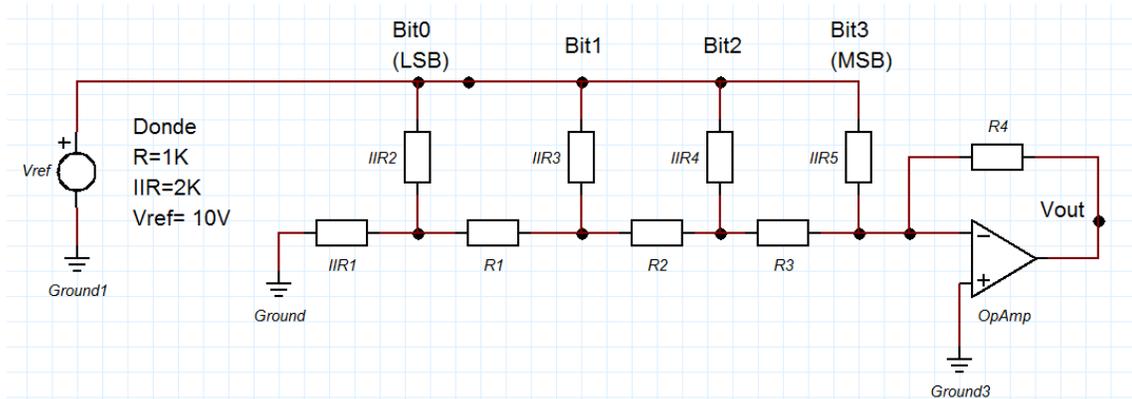


Figura 3.7 Modelo del convertidor R2R en 20-sim.

Si el modelo de la figura 3.7 lo simulamos, obtenemos que el valor del voltaje es el mismo que se había mencionado anteriormente  $V = -9.375$  Volts.

En la figura 3.8 se muestran los valores obtenidos en la simulación del convertidor analógico digital, como se había calculado los resultados si fueron los mismos que fueron calculados mediante la fórmula 3.1.

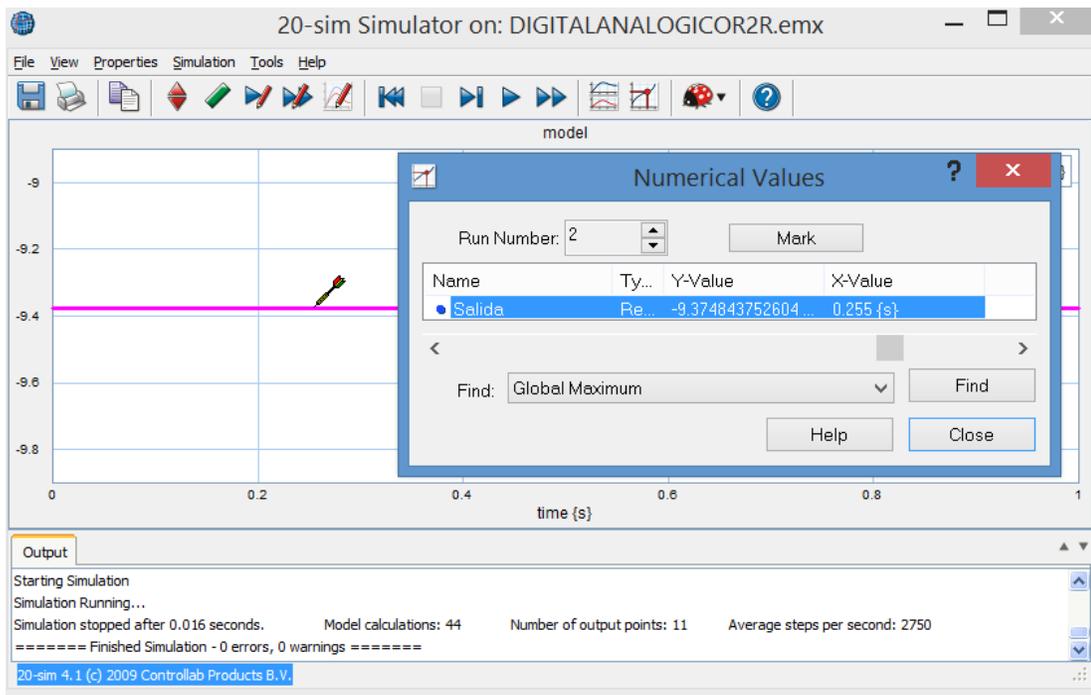


Figura 3.8 Simulación del convertidor R2R en 20-sim.

Los diferentes valores que obtenemos con este comparador se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 3.1 Voltajes obtenidos con el convertidor**

Binario	Bit	Voltaje
0000	0	0
0001	1	-0.625
0010	2	-1.25
0011	3	-1.875
0100	4	-2.5
0101	5	-3.125
0110	6	-3.75
0111	7	-4.375
1000	8	-5
1001	9	-5.625
1010	10	-6.25
1011	11	-6.875
1100	12	-7.5
1101	13	-8.125
1110	14	-8.75
1111	15	-9.375

### 3.4 Convertidor Analógico Digital

En la conversión analógico-digital, se toma un voltaje de entrada analógico y después de un tiempo determinado, se produce un código de salida digital que representa a la entrada analógica. Por lo general, este proceso de conversión es más complejo y requiere de mucho más tiempo que el proceso D/A.

Distintos tipos de convertidores analógico-digitales utilizan un convertidor digital-analógico (DAC) como parte de sus circuitos.

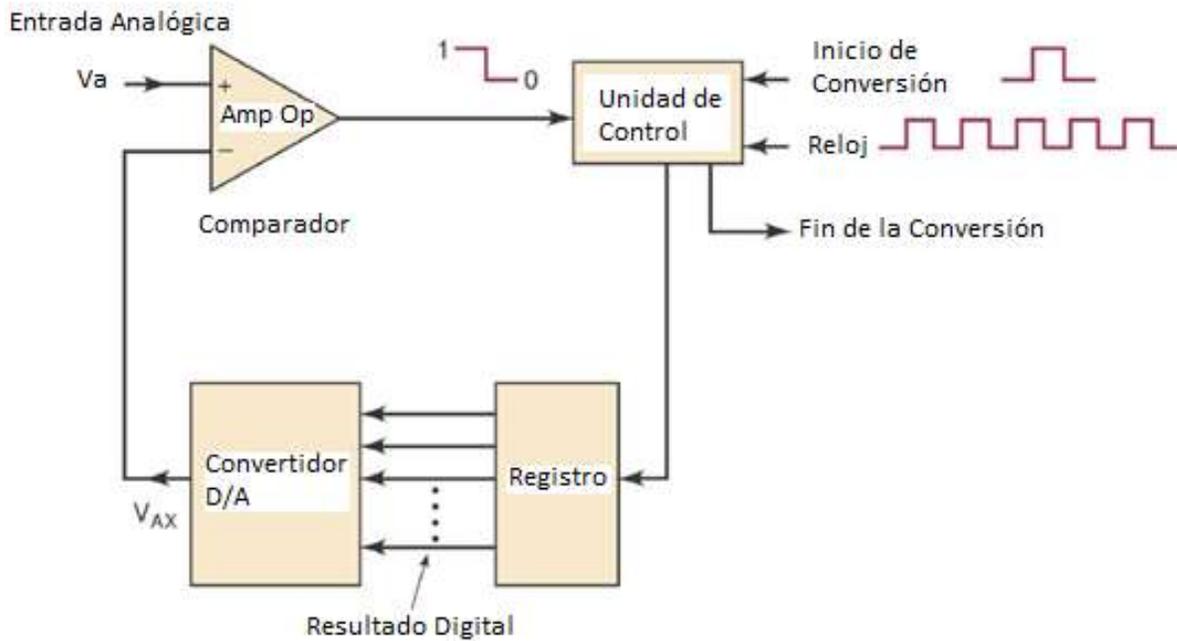


Figura 3.9 Diagrama de bloques de un convertidor analógico-digital.

La Figura 3.9 muestra el diagrama de bloques general para esta clase de convertidores.

Las etapas que componen este bloque son la **señal de reloj** que se encarga de la sincronización para la operación, la **unidad de control** está conformada por los circuitos lógicos para generar la secuencia apropiada de operaciones en respuesta a la SEÑAL DE INICIO, el cual inicia el proceso de conversión. El amplificador operacional **comparador** se utiliza para comparar las dos entradas analógicas y poder obtener una salida digital que cambia de estado, dependiendo de cuál de las entradas analógicas sea mayor.

El principio de funcionamiento de estos convertidores se realiza de la siguiente manera:

1. Se inicia el funcionamiento cuando se recibe el pulso de señal de inicio.
2. A una velocidad determinada por el reloj, la unidad de control modifica en forma continua el número binario que se almacena en el registro.
3. El DAC convierte el número binario del registro en un voltaje analógico  $V_{ax}$ .

4. El comparador resta  $V_{ax}$  con la entrada analógica  $V_a$ . Mientras que  $V_{ax} < V_a$ , la salida del comparador permanecerá en alto. Cuando  $V_{ax}$  la salida del comparador cambiara a bajo y detendrá el proceso de modificación del número de registro.

5. La lógica de control activa la señal del fin de conversión cuando se ha completado.

En la figura 3.10 se muestra un convertidor analógico-digital de rampa digital, este tipo de convertidor utiliza un contador binario como registro y permite que el reloj se vaya incrementando, hasta que  $V_{AX} \geq V_A$ . A este convertidor se le conoce como de rampa digital debido a que la forma de onda en  $V_{AX}$  es una rampa que se va incrementando como si de una escalera se tratara. También se le conoce como convertidor A/D tipo contador.

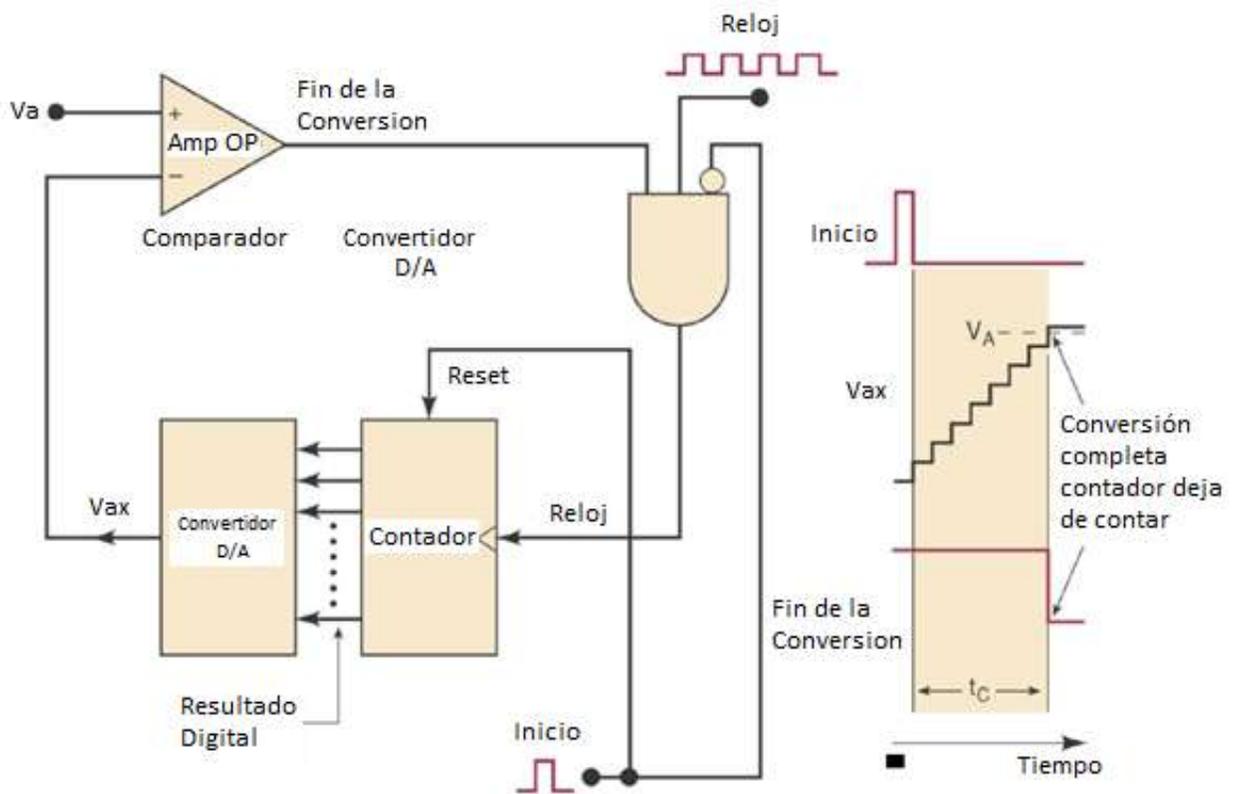


Figura 3.10 Convertidor analógico-digital de rampa digital o tipo contador.

Este convertidor está conformado por un contador, un DAC, un comparador analógico y una compuerta AND<sup>17</sup> de control. La salida del comparador sirve como la señal de fin de conversión.

### 3.4.1 Rampa creciente y decreciente

La principal ventaja del convertidor analógico digital de doble rampa reside en que no depende nada de los valores que se le asignen al capacitor. Debido al funcionamiento del circuito, este no se ve afectado por los componentes (resistencia y capacitor), si no por el tiempo que se le asigna a la rampa creciente.

Durante la fase de la rampa creciente, (iniciando con  $V_o = 0v$ ), la salida va incrementando con una rampa variable (que depende del voltaje de entrada) por un tiempo determinado  $T_1$  (que puede ser definido). De esto podemos decir que para hacer el cálculo de la rampa creciente, el voltaje será:

$$V_1 = \frac{-V_{in}}{RC} * T_1 \quad (3.2)$$

Cabe destacar, que como el integrador está invirtiendo la polaridad, se debe poner un  $V_{in}$  con polaridad contraria para conseguir una respuesta de signo positivo.

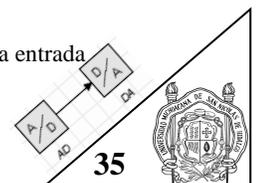
De manera similar, para la rampa decreciente el cálculo será de la siguiente manera:

$$V_2 = \frac{-V_{REF}}{RC} (T_2) \quad (3.3)$$

Como las rampas creciente y decreciente son iguales ( $V_1 = V_2$ ), se puede escribir.

$$\frac{-V_{in}}{RC} (T_1) = \frac{-V_{REF}}{RC} (T_2) \quad (3.4)$$

<sup>17</sup> En electrónica, la compuerta AND produce la multiplicación lógica; esto es: la salida es 1 si la entrada A y la entrada B están ambas en el binario 1: de otra manera, la salida es 0.



Si los valores de R y C los consideramos igual a uno, los valores quedan:

$$-V_{in} * T_1 = -V_{REF}(T_2) \quad (3.5)$$

Si despejamos  $T_2$  queda:

$$T_2 = \frac{V_{REF}}{V_{in}} (T_1) \quad (3.6)$$

Esto quiere decir, que el intervalo  $T_2$  varía en función de la división de el voltaje de entrada ( $V_{in}$ ) entre el voltaje de referencia ( $V_{REF}$ ). Dicho en otras palabras, en los convertidores de doble rampa, los valores de R y C no influyen en el proceso de conversión, el único componente de precisión que se requiere es el de la fuente que va a proporcionar el voltaje de referencia.

Teniendo calculado el tiempo que dura la rampa decreciente, podemos calcular la cantidad de pulsos que tienen que pasar hasta que se termine el ciclo de conversión. Este cálculo se define de la siguiente manera:

$$N_{PULSOS} = \frac{T_2 - T_1}{T_{CLK}} \quad (3.7)$$

Dónde:

$N_{PULSOS}$  = el número de pulsos que dura el proceso de conversión

$T_2$  = tiempo que dura la rampa decreciente

$T_1$  = tiempo que dura la rampa creciente

$T_{CLK}$  = tiempo de reloj

Después de calcular el número de pulsos no se tiene un valor en binario, se tiene que hacer la conversión de decimal a binario, mediante la codificación dependiendo el número de bits que se quieran tener para este cálculo.

### 3.5 Simulación en 20-sim de un Convertidor Digital Analógico de rampa digital

A continuación se explican los diferentes pasos que se realizaron para poder simular el convertidor en 20-sim.

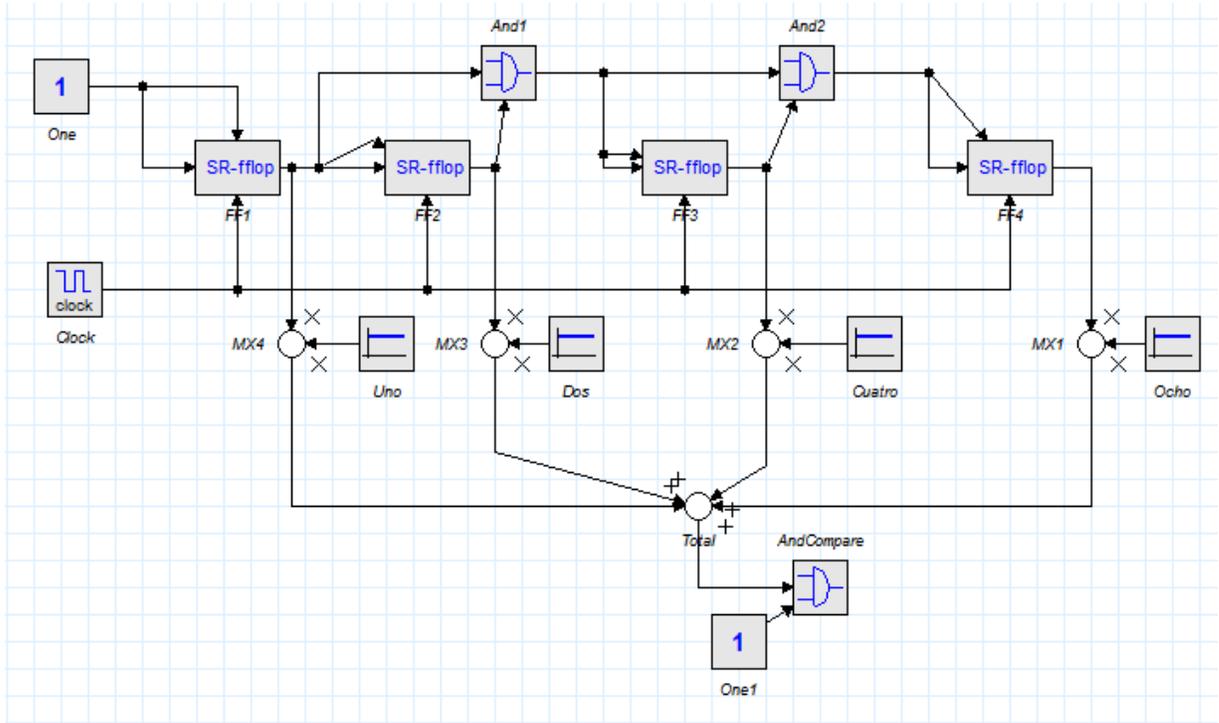


Figura 3.11 Modelo de un ADC de rampa digital o tipo contador en 20-sim.

#### 3.5.1 Contador

Un contador es un dispositivo que puede realizar una secuencia ya sea asíncrona o síncrona, cuando las entradas de reloj no están en paralelo, flip flop<sup>18</sup> activa al siguiente, en este caso de estudio se utilizó un contador síncrono, como se puede observar en la figura 3.11 cada flip flop está conectado en paralelo al mismo pulso de reloj.

El módulo de un contador está determinado por la cuenta máxima a la que es diseñado, es decir, si el contador es diseñado para que cuente de 0 a 15, su módulo es 16, y simplificado se denomina contador mod-16, que es el que se utilizó.

<sup>18</sup> En electrónica, un flip flop es un multivibrador capaz de permanecer en uno de dos estados posibles durante un tiempo indefinido si no existen perturbaciones. Esta característica es ampliamente utilizada en electrónica digital para memorizar información. El paso de un estado a otro se realiza variando sus entradas.

En este tipo de contadores se elimina el retardo que se presenta en los contadores asíncronos, donde se tiene que esperar a que un flip flop active al otro. Este efecto se consigue conectando directamente a las entradas de reloj CLK de los flip flop, es decir conectando los pulsos de reloj en paralelo y las salidas de los flip flops a las entradas J y K de los mismos, como 20-sim no cuenta con el bloque de flip flop JK, se tiene que modificar el bloque agregándole una entrada de reloj y una salida Q negada.

En la figura 3.12 se muestra el código de un flip flop SR modificado para que funcione igual que un flip flop JK ya que 20-sim no cuenta con este flip Flop, y se requiere hacer la adaptación para poder utilizarlo.

```

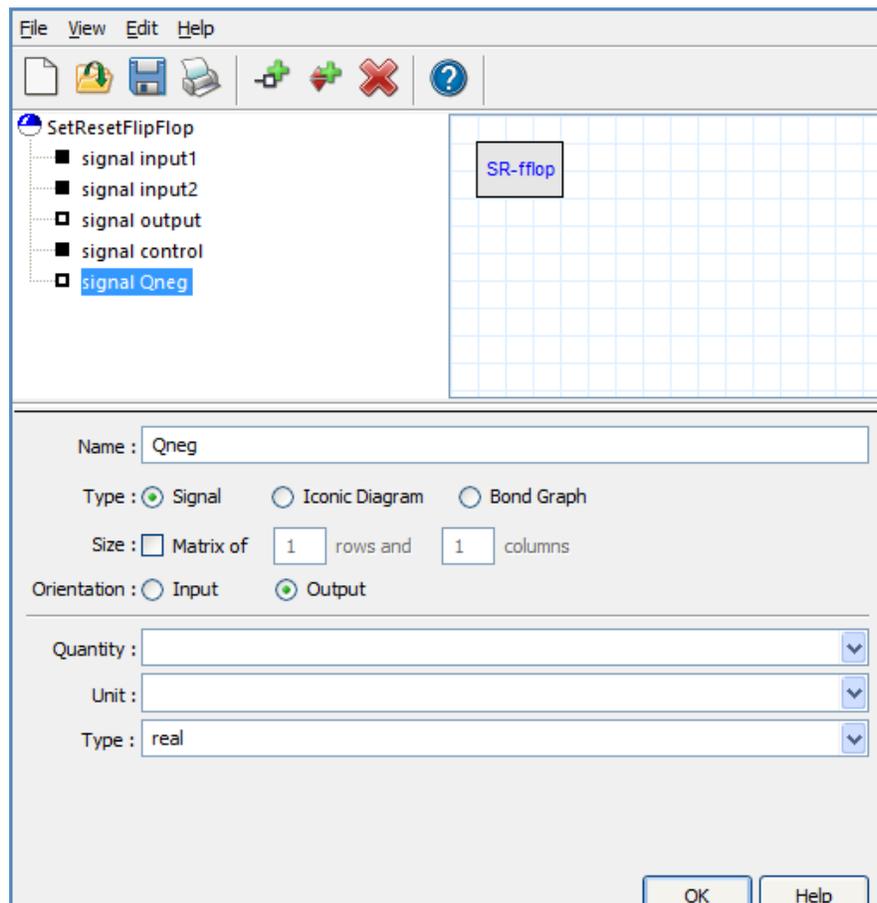
parameters
  boolean initial = true;      // initial output
variables
  real oldcontrol;             // Se define oldcontrol para
  real oldoutput;             // entrada de reloj
equations
  oldcontrol = dly (control, 0.0);
  oldoutput = dly (output, initial);
  output = if oldcontrol <= 0.5 and control >0.5 then
    if input1 <= 0.5 then
      if input2 <= 0.5 then
        oldoutput
      else
        0.0
      end
    else
      if input2 <= 0.5 then
        1.0
      else
        if oldoutput <= 0.5 then
          1.0
        else
          0.0
        end
      end
    end
  end
  end
  else
    oldoutput
  end;
  Qneg = if oldoutput <= 0.5 then // Se define la salida negada
    true
  else
    false
  end;
end;

```

Figura 3.12 Código de un Flip Flop SR modificado para que funcione como JK en 20-sim.

En 20-sim, no basta con agregar las variables en el código, también se tienen que agregar las variables en el editor de interfaz, en este caso se tiene que agregar una entrada la cuál llamamos oldcontrol, y una salida; esta va a tener el nombre de Qneg.

Para editar la interfaz, nos vamos al modelo y seleccionamos el elemento a modificar con un clic derecho y se escoge la opción Edit Interface, y después se da clic como se muestra en la figura 3.13 en la opción Add Port.



**Figura 3.13 Agregando entradas y salidas.**

En la figura 3.13 se puede observar que cuando agregamos entradas o salidas se pueden definir diferentes propiedades, según sea nuestra necesidad, por ejemplo para la señal de salida Qneg, se define que es del tipo señal, que es una salida, y que los valores que maneja son del tipo real.

De igual manera, para la entrada de reloj que llamamos oldcontrol, se realiza el mismo procedimiento, solo con la diferencia que al definirla, se indica que va a ser una salida.

Cuando se tienen las dos entradas definidas, se procede a poner los bloques en 20-sim para poder hacer el contador síncrono, como se muestra en la figura 3.14.

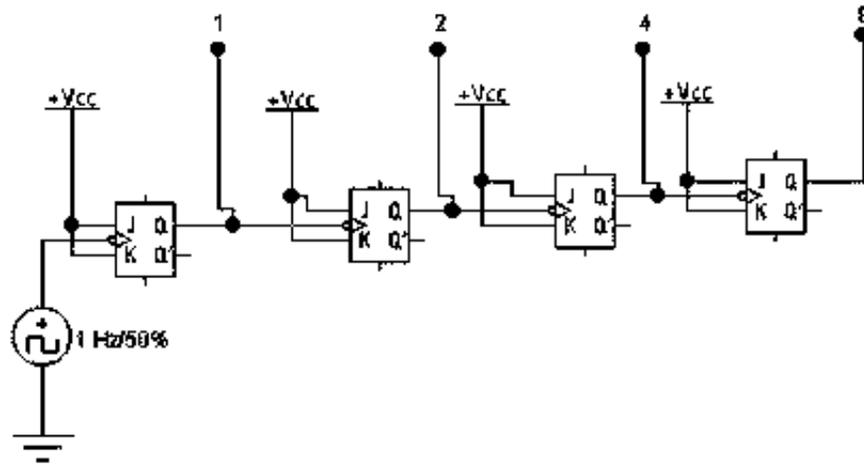


Figura 3.14 Diagrama de bloques de un contador síncrono con Flip Flops JK.

Una vez que se hizo el diagrama en 20-sim, se simuló cada una de las salidas y la señal de reloj, esto se muestra en la figura 3.15.

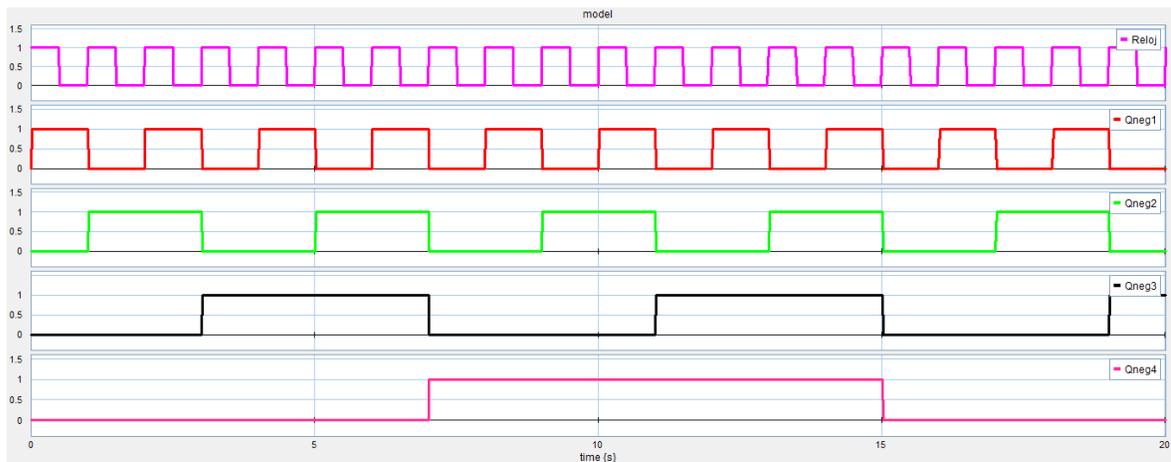


Figura 3.15 Simulación en 20-sim de un contador síncrono con Flip Flops JK.

En la figura 3.15 se aprecian las diferentes salidas de cada flip flop ( $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$ ), este contador cuenta desde 0000 (0) hasta 1111 (15). Como se mencionó anteriormente, la salida que se está utilizando en este flip flop es la salida negada.

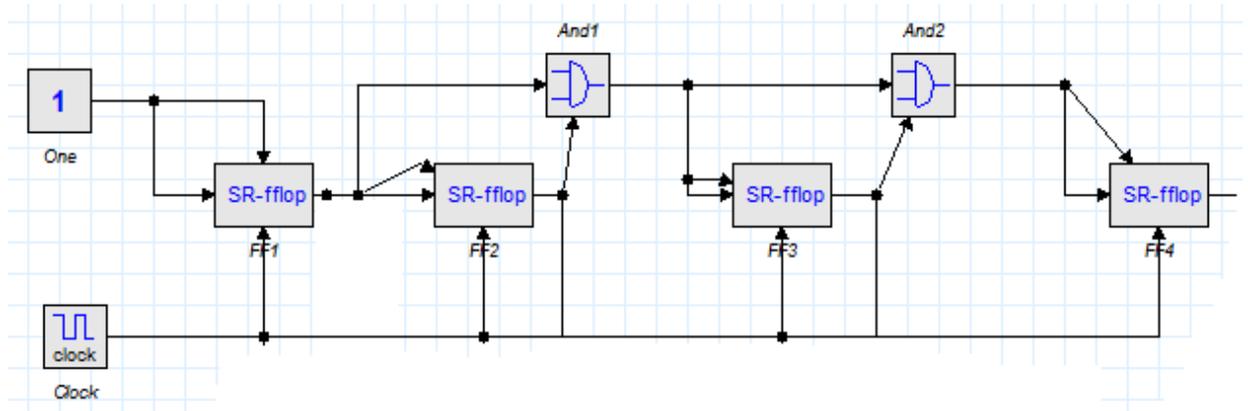


Figura 3.16 Diagrama de bloques de un contador síncrono con Flip Flops JK.

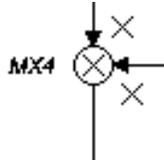
### 3.5.2 DAC

La siguiente etapa a través del convertidor es la de conversión digital-analógica, a la salida de los flip flops obtenemos valores en binario (0,1) estos valores necesitamos convertirlos a decimal para poderlos utilizar en nuestro ejemplo.

La conversión binario-decimal se realiza sumando el número binario a base de potencias de 2, por ejemplo si tenemos 4 bits:

$$\begin{aligned}
 \text{Bit4, Bit3, Bit2, Bit1} &= (\text{Bit4} \times 2^3) + (\text{Bit3} \times 2^2) + (\text{Bit2} \times 2^1) + (\text{Bit1} \times 2^0) \\
 1011 &= (1 \times 2^3) + (0 \times 2^2) + (1 \times 2^1) + (1 \times 2^0) \\
 &= (8+0+2+1) \\
 &= 11
 \end{aligned}$$

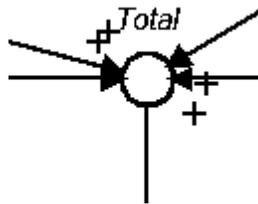
Para simplificar este proceso, lo que se hizo fue utilizar el bloque MultiplyDivide, este se encuentra en Library/Signal/BlockDiagram, y como su nombre lo dice, puede multiplicar o dividir según sea nuestra necesidad.



**Figura 3.17 Bloque MultiplyDivide para hacer la multiplicación.**

En la figura 3.17 se muestra el bloque que fue utilizado para hacer la multiplicación, como se puede ver se tienen dos entradas y una salida, en la figura se muestra la multiplicación por cuatro, esto quiere decir que la salida del flip flop (0,1) la va a estar multiplicando por cuatro mientras este corriendo la simulación.

Cuando tenemos los valores de las salidas en decimal, lo que se procede a hacer es sumarlas para solo tener un solo valor en lugar de tener 4 valores diferentes, 20-sim también tiene un bloque para hacer sumas y restas, este bloque se encuentra en Library/Signal/BlockDiagram/PlusMinus.



**Figura 3.18 Bloque PlusMinus para hacer la suma.**

En la figura 3.18 se muestra el bloque que se utilizó para sumar las diferentes salidas de cada flip flop, como se puede observar, tiene cuatro entradas, las cuales son sumadas, y el resultado de la suma se tiene a la salida, como se explicó anteriormente, los valores que esperamos van a ir desde 0 a 15.

En la figura 3.19 se puede observar que la conversión binario a decimal se está realizando correctamente, porque después de multiplicar cada salida de los flip flops y después sumarlas, en la simulación, se ve claramente, que la cuenta que va desde 0 (0000) hasta quince (1111) se da, y al llegar al número quince vuelve a iniciar desde cero.

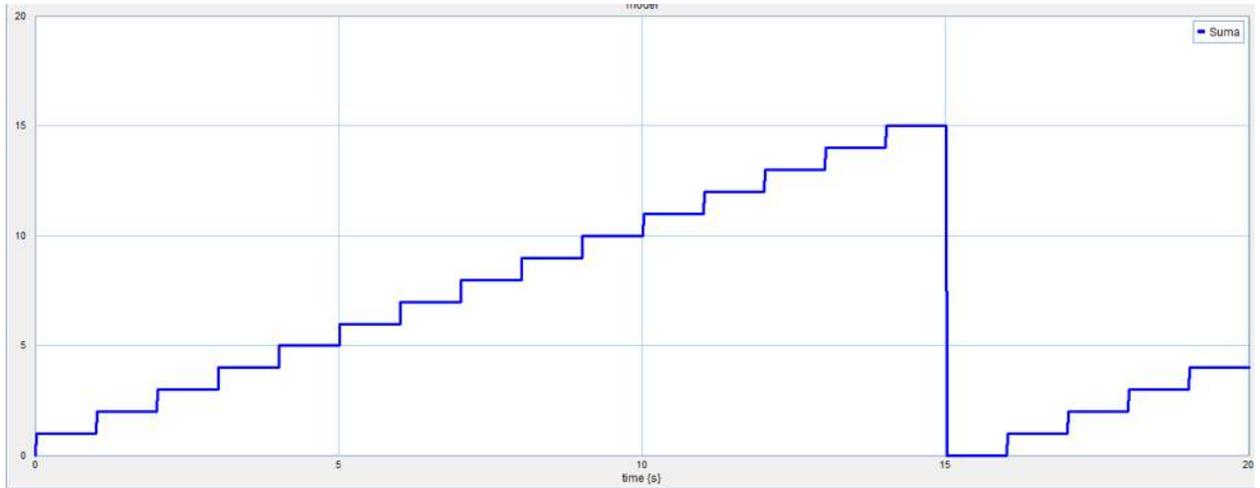


Figura 3.19 Simulación en 20-sim de las salidas de los flip flops sumadas.

### 3.5.3 Comparador

La siguiente etapa es en donde se utiliza un comparador, el cual lo que hace es comparar los valores que mandan los flip flops, para poder determinar una señal de paro, como se sabe, un comparador tiene dos entradas, en las cuales se tiene una señal de referencia y una señal a detectar.

La señal de paro o referencia fue el número quince, entonces cuando en la señal a detectar se tenga el número quince en la salida del bloque de suma, el comparador va a enviar una señal, que en este caso, será para indicarnos el final del ciclo de conversión.

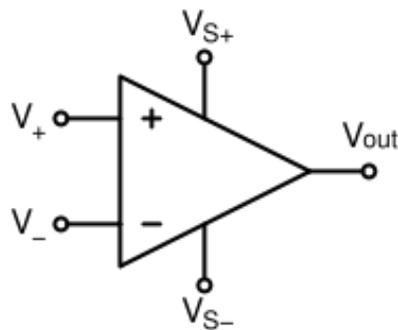


Figura 3.20 Diagrama de un amplificador operacional comparador.

En la figura 3.20 se muestra el diagrama de un amplificador operacional comparador, que es lo que se necesita para comparar dos señales, en la simulación en 20 sim, lo que se utilizo fue el bloque de una And y se modificó el código para que pudiera ser utilizado como comparador, el código original de la compuerta and, se muestra a continuación.

```

equations
  output = if input1 > 0.5 and input2 > 0.5 then
    true
  else
    false
  end;

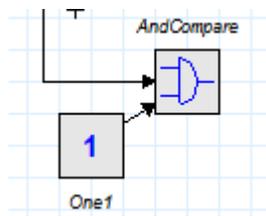
```

Lo que se tuvo que hacer fue modificarla, para esto en el código se declaró que si lo que está en la entrada uno es mayor a igual a lo que está en la entrada dos, entonces nos enviara un uno lógico.

```

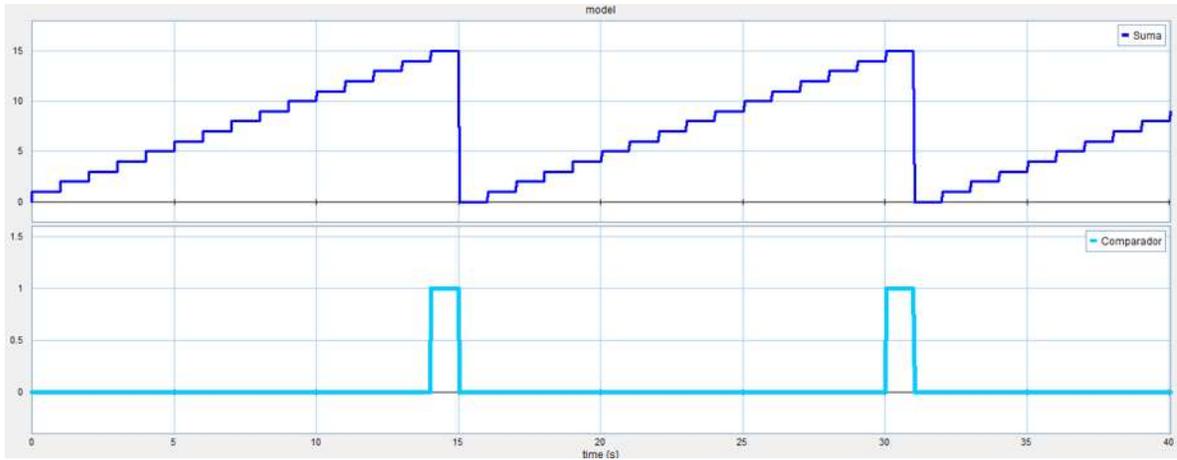
equations
  output = if input1 >= input2 then
    true
  else
    false
  end;

```



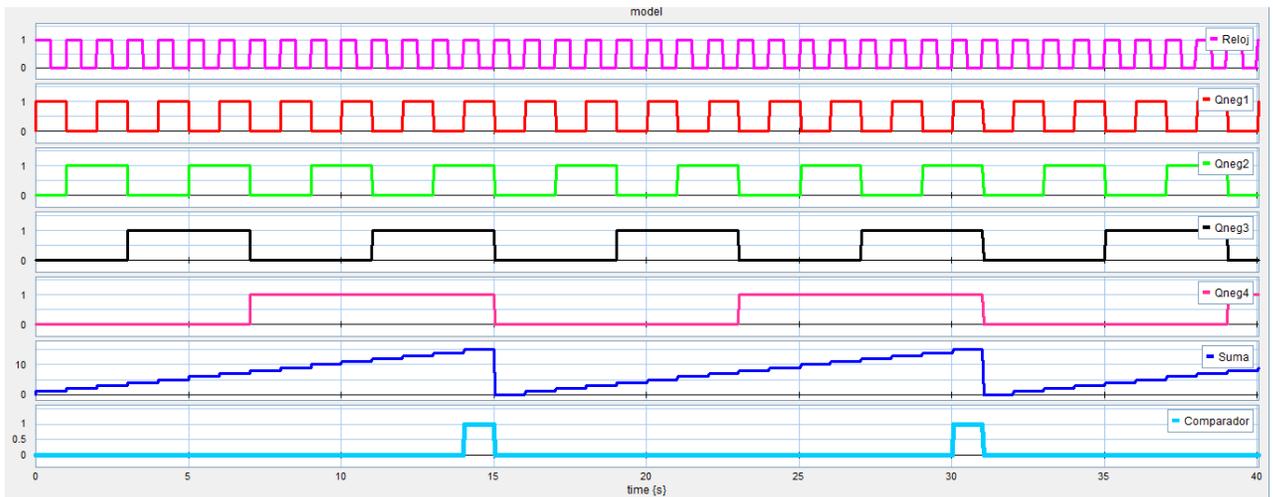
**Figura 3.21 Bloque de And utilizado como comparador en 20-sim.**

En la figura 3.21 se pueden ver los bloques que se utilizaron para poder hacer la comparación en nuestro circuito, para esto en la entrada de referencia (entrada dos) se define que tenga un valor de quince, y en la entrada uno va a llegar nuestro rango de valores de cero a quince, entonces por el código que se definió, cuando en la entrada uno tengamos el número quince, el comparador va a mandar un uno lógico (true) y esa será nuestra señal de fin de conversión.



**Figura 3.22 Simulación del comparador.**

En la figura 3.22 se muestra la simulación del comparador, y como se puede observar, nos manda un pulso de un uno lógico cada que la señal del contador llega a quince, de esta manera, ya se tiene la lógica que va a servir para marcar el fin de la conversión.



**Figura 3.23 Simulación de un convertidor analógico digital en 20-sim.**

En la figura 3.23 se muestra la simulación final del convertidor analógico-digital, se pueden observar las salidas de los cuatro Flip Flops, la señal de reloj, la suma de todas las salidas de los flip flops, y el comparador que nos va a estar marcando cada que se cumpla el final de dicha conversión.

### 3.6 Simulación en 20-sim de un Convertidor Analógico Digital de doble rampa.

A continuación se explican los diferentes pasos que se realizaron para poder simular el convertidor en 20-sim.

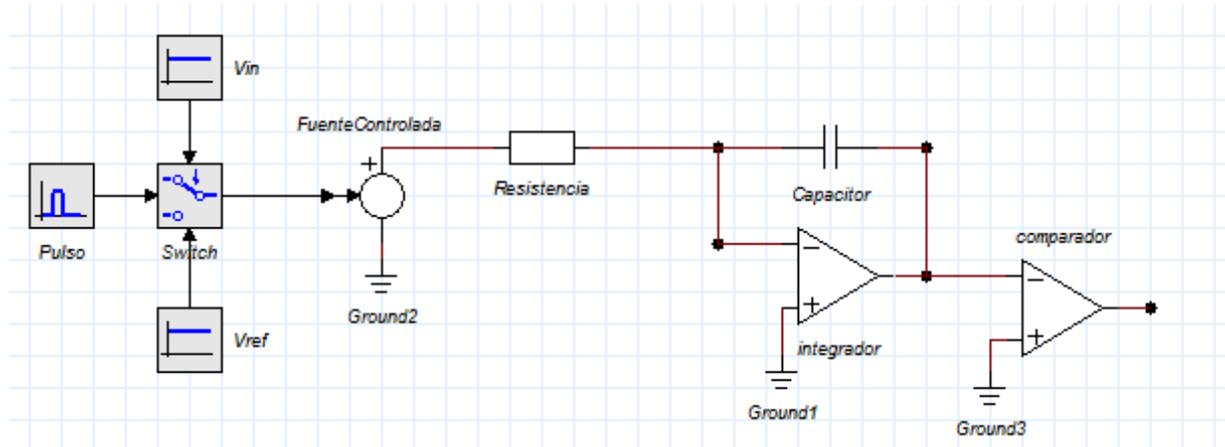


Figura 3.24 Diagrama de bloques de un convertidor A/D de doble rampa en 20-sim.

Como se puede observar en la figura 3.24, el circuito del convertidor A/D de doble rampa consta de los siguientes elementos:

- Amplificador operacional integrador (con ganancia unitaria)
- Amplificador operacional comparador (con ganancia unitaria)
- Capacitor =  $1\mu\text{F}$
- Resistencia =  $100\text{K}\Omega$
- $V_{in} = 12\text{V}$
- $V_{ref} = -15\text{V}$
- Pulso = Empieza en cero segundos, y cuando llega al valor de 0.007 segundos cambia, y manda una señal de amplitud igual a uno.

La fuente controlada de voltaje se utilizó para poder hacer la conexión de los elementos, ya que no se pueden unir directamente por que tienen diferentes dominios.

También se definió una ganancia unitaria en los amplificadores para tener valores más pequeños en la salida de cada elemento.

### 3.6.1 Switch

El switch en este convertidor se utiliza para hacer la conmutación entre el voltaje de entrada analógico y el voltaje de referencia que son necesarios para hacer la doble integración.

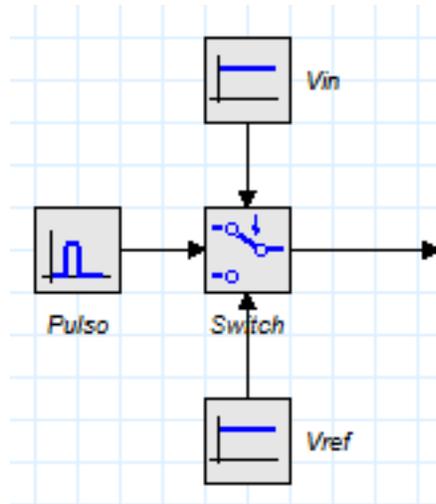


Figura 3.25 Switch utilizado para realizar la doble integración en 20-sim.

En este bloque la condición será el tiempo en el cual se quiere que se realice el cambio del voltaje de entrada por el voltaje de referencia, para esto se tiene el bloque que se llamó pulso, el bloque se describe a continuación.

```
parameters
  real start_time = 0 {s};
  real stop_time = 0.025 {s};
  real amplitude = 1 {none};
variables
  boolean hidden change;
equations
  "calculate at least at the start and stop time"
  change = timeevent (start_time) or timeevent (stop_time);

  "calculate the block signal"
  output = amplitude * (step (start_time) - step (stop_time));
```

En los parámetros se puede definir en qué momento se quiere que se mande la señal para el cambio del voltaje de entrada por el voltaje de referencia, como se observa, el pulso empieza en cero segundos, en la parte donde se define stop\_time es donde se define el tiempo de la primer rampa, también se define una amplitud de uno, por lo que nuestro pulso tiene un rango que va de cero a uno, va a ser uno antes de que se cumpla la condición de tiempo establecida, y cuando se llegue a ese tiempo, el pulso pasará a ser cero.

En el código se define la condición que mientras el valor del dato en la condición sea uno, se tendrá el valor de input\_low, que en este caso es el voltaje analógico que se está introduciendo en el convertidor, y cuando la condición sea cero, se cambiara la salida al valor que se tiene en input\_high que es el voltaje de referencia.

```
equations
    output = if condition == 1 then
        input_low
    else
        if condition == 0.0 then
            input_high
        else
            0.0
        end
    end
end;
```

Al simular esto en 20-sim, se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 3.26.

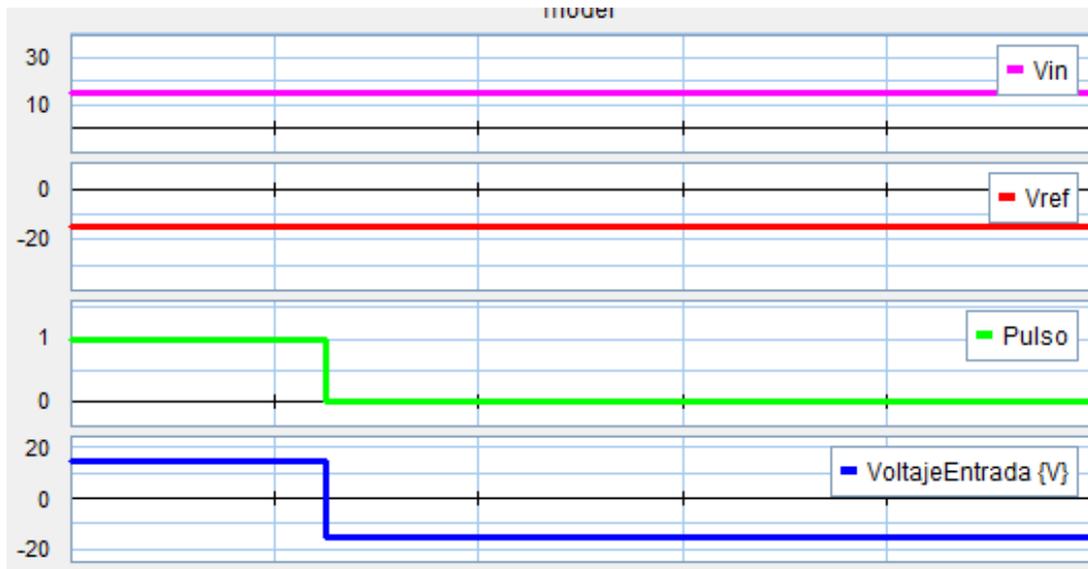


Figura 3.26 Simulación de Switch para realizar la doble integración.

### 3.6.2 Integración de doble rampa

Ahora que ya se tienen las dos rampas, el siguiente paso a realizar es integrar ese voltaje, como en 20-sim no se puede hacer la conexión directamente entre bloques y señal, se tiene que hacer el uso de una fuente controlada de voltaje, esta se encuentra en.

Library\Iconic Diagrams\Electric\Sources.

En la entrada, se conecta la salida del switch, y a la salida se conecta con la resistencia del integrador de doble rampa.

Después de la etapa de integración, se encuentra un comparador, el cual tiene como función invertir la polaridad del voltaje integrado, y entregar un voltaje positivo a la salida.

En caso de que el voltaje de entrada que se requiera integrar sea negativo, será necesario cambiar la polaridad del comparador, esto para poder observar la doble rampa con valores de voltaje positivos.

### 3.6.3 Simulación en 20-sim del convertidor A/D de doble rampa

Al simular el convertidor, se obtiene la gráfica que se muestra en la figura 3.27.

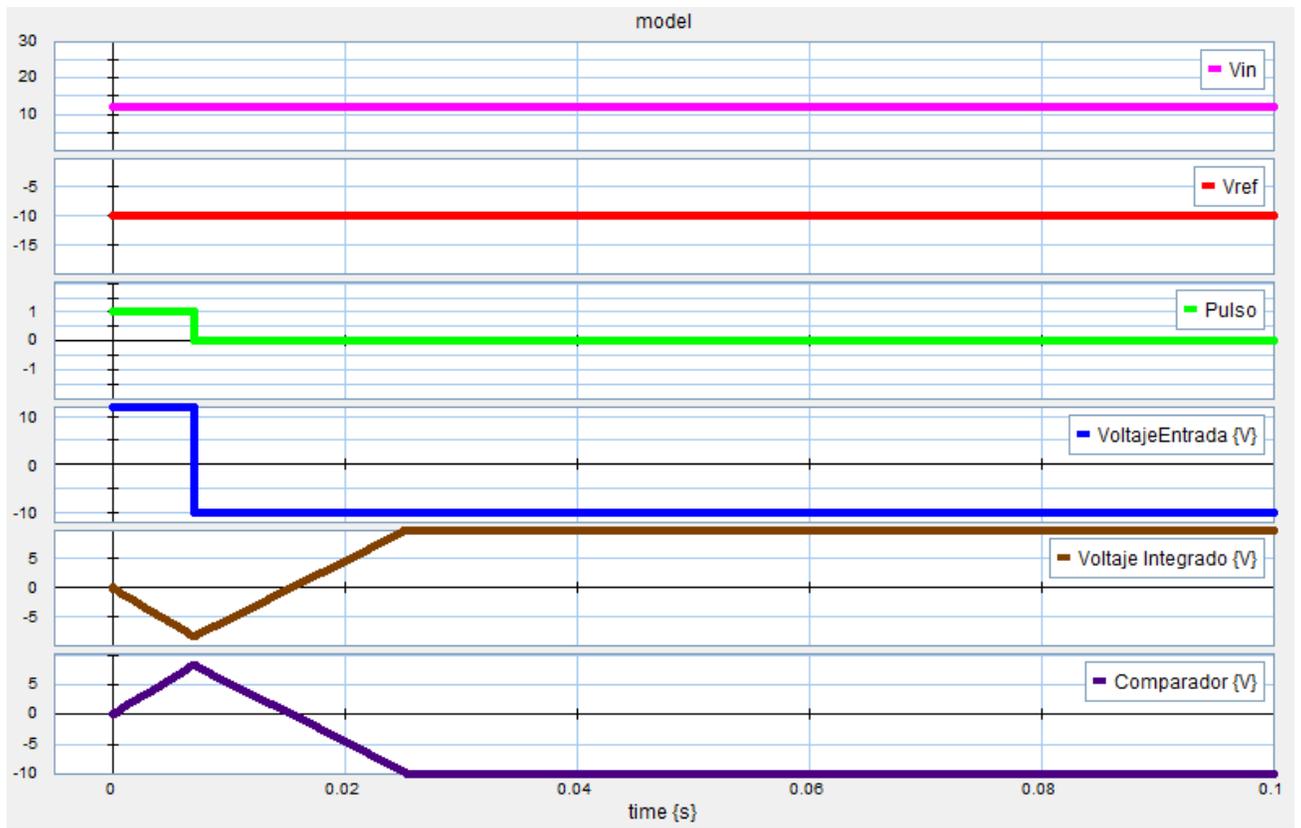


Figura 3.27 Simulación del convertidor A/D de doble rampa en 20-sim.

Los diferentes valores obtenidos en la simulación se muestran a continuación:

- En color rosa está el voltaje analógico de entrada, el cual tiene un valor de 10V.
- En color rojo es el voltaje de referencia, el cual es inverso al de entrada y tiene valor de -10V.
- En color verde se tiene el pulso generado por el switch, que cambia de uno a cero en el momento que se cumple la condición.
- En color café es el voltaje que llega al integrador, el cual cambia de 10V a -10V en el momento que el switch indica el cambio.
- En color morado se muestra el voltaje en el comparador, el cual como se mencionó con anterioridad lo que hace es cambiar la polaridad del voltaje, generando una

rampa con voltajes positivos, en caso de que fuera necesario visualizar una rampa con valores de voltaje negativos, se puede cambiar la polaridad del comparador.

El funcionamiento de este convertidor lo podemos calcular, si tomamos en cuenta los siguientes factores.

Número de bits = 12 (para tener una mejor resolución)

$T_{clk} = 1\mu S = 0.000001$  segundos

$R = 100 K\Omega$

$C = 0.1 \mu F = 0.000001$  F

$V_{entrada} = 12$  volts

$V_{ref} = -10$  volts

$R*C = 0.01$

$T_1 = 0.007$  segundos (se define en el programa como se mencionó anteriormente)

Para calcular el  $T_2$  se hace uso de la fórmula (3.6)

$$T_2 = \frac{V_{REF}}{V_{in}} (T_1) = \frac{12}{-10} (0.007 \text{ seg}) = 0.0084 \text{ segundos}$$

De manera similar se sustituye el dato calculado en la fórmula (3.7) para calcular el número de pulsos que tienen que pasar para que ocurra la conversión.

$$N_{PULSOS} = \frac{T_2 - T_1}{T_{CLK}} = \frac{0.0084 - 0.007}{0.000001} = 1,400 \text{ pulsos}$$

El resultado es de 1,400 pulsos, pero esto no nos representa nada en la conversión digital, por lo que tenemos que hacer el cambio de este número, para esto se utilizó una tabla de conversión por así decirlo para hacer el cálculo del número en binario.

**Tabla 3.2 Conversión de binario 12 bits a decimal**

2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	Decimal
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<b>Binario</b>
0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	<b>Cálculo</b>

De acuerdo a la tabla 3.2 se calcula que la palabra digital es equivalente a:

$$1024 + 256 + 64 + 32 + 16 + 8 = 1,400$$

Esto quiere decir que en binario, la respuesta sería:

**0101 0111 1000**

# Capítulo 4

## Casos de Estudio

### 4.1 Introducción

En este capítulo se analizan dos casos de estudio, en los cuales se toman en cuenta los convertidores analógico digital y digital analógico, que fueron estudiados en los capítulos anteriores. Para después presentar los resultados obtenidos mediante la simulación en 20-sim y poder comprobar los resultados.

Todo esto se realiza en base a lo estudiado en el capítulo tres, en donde se muestra la respuesta característica de cada convertidor y así en este capítulo demostrar mediante los casos de estudio que se proponen a continuación.

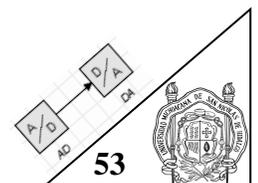
Antes de revisar el funcionamiento de los convertidores en cada caso de estudio, primero se da una breve explicación de los diferentes elementos que lo componen, para después proceder a estudiar los resultados obtenidos en la simulación.

### 4.2 Primer caso de estudio, convertidor A/D de doble rampa

En este caso de estudio, el convertidor que se analiza es el analógico digital de doble rampa, en este análisis se hace uso de un puente de Wheatstone, el cual manda dos señales de voltaje, las cuales entran a dos amplificadores operacionales seguidores de voltaje, y finalmente en la pasan esas dos señales a un amplificador diferencial.

#### 4.2.1 Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es uno de los circuitos eléctricos más famosos en la actualidad, y es utilizado para realizar la medición de resistencias. El puente de Wheatstone fue originalmente desarrollado por Charles Wheatstone para medir los valores de una resistencia desconocida, a modo de calibrar instrumentos de medición, como pueden ser voltímetros, amperímetros, y diferentes tipos de equipamiento que realicen mediciones.



A menudo, la resistencia se conoce como una flecha que cruza su símbolo como en la figura 4.1, que es una resistencia variable, esto es conocido como un potenciómetro<sup>19</sup>, esto es debido a que el valor de la resistencia puede ser modificado simplemente con hacer girar un botón.

El amperímetro<sup>20</sup>, simbolizado por un círculo con una flecha en diagonal en el centro, mide la corriente que circula a través de los nodos en los cuales se unen las resistencias, se considera que este amperímetro es ideal, ya que su resistencia interna es nula.

Su modo de operación es sencillo, los valores de  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son conocidos y se desea conocer el valor de  $R_4$ . La resistencia  $R_3$  se ajusta hasta que la corriente que fluye a través del nodo uno y el nodo dos es igual a cero; dicho esto en otras palabras, hasta que no exista un flujo de corriente a través de estos dos nodos. En ese momento se considera que el puente se encuentra balanceado.

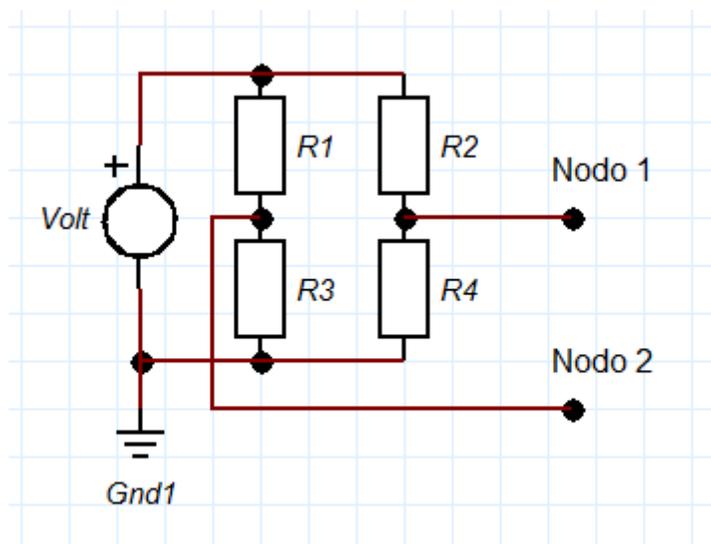


Figura 4.1 Puente de Wheatstone.

<sup>19</sup> Potenciómetro: Informalmente pot, es una resistencia con tres terminales, con un contacto que puede ser de giro o deslizable, que forma un divisor de voltaje ajustable, funciona como una resistencia variable.

<sup>20</sup> Amperímetro: Instrumento que se utiliza para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico.

El puente de Wheatstone generalmente es utilizado para encontrar el valor de resistencia o impedancia de un componente sabiendo la de los otros tres componentes, o para detectar cambios pequeños en la resistencia de un transductor, como puede ser de un termistor o una galga extensiométrica (todos cambian su resistencia sí hay alguna variación del medio ambiente).

#### 4.2.2 Amplificador de Instrumentación

El amplificador de instrumentación es muy útil para realizar actividades de medición, instrumentación o control, está diseñado con varios amplificadores operacionales y resistencias de precisión, que lo hacen bastante estable y funcional, cuando lo importante en los circuitos es la exactitud.

En la actualidad existen muchos circuitos integrados y versiones modulares disponibles en un solo circuito. Desafortunadamente, estos circuitos son costosos, aunque cuando se requiere rendimiento y precisión, el amplificador de instrumentación justifica su costo, debido a que su comportamiento no puede igualarse con los amplificadores operacionales promedio que existen en el mercado.

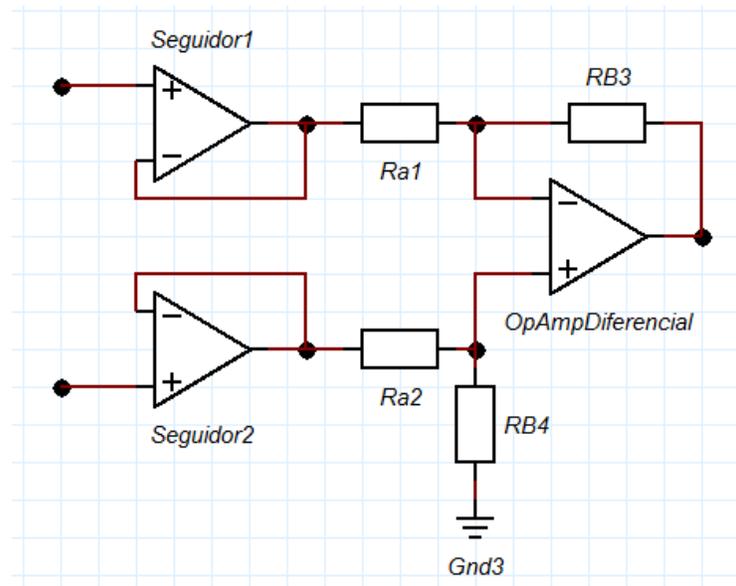
El amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial, el cual tiene una ganancia que puede establecerse de forma muy precisa; y que ha sido optimizado para que funcione de acuerdo a sus propias especificaciones aún en un entorno hostil.

Es un elemento esencial de los sistemas de medición, en los que se ensambla como un bloque funcional que ofrece características de operación propias e independientes con respecto de los otros elementos con los que interacciona.

Este tipo de circuitos amplifica la diferencia entre dos señales de entrada y rechaza cualquier señal que sea común entre ambas señales. Estos circuitos se son utilizados generalmente para amplificar señales diferenciales muy pequeñas en muchos procesos industriales, medición, adquisición de datos y aplicaciones médicas.

Ejemplos del uso cotidiano del amplificador de instrumentación puede ser para acondicionar la salida de un puente de Wheatstone, para amplificar señales eléctricas biológicas (por ejemplo las obtenidas por los electrocardiógrafos<sup>21</sup>), sensores de temperatura, detectores de humo, tarjetas de adquisición de datos y en fuentes de alimentación.

En la figura 4.2 se muestra el circuito de un amplificador de instrumentación, en donde se pueden observar los componentes que lo conforman.



**Figura 4.2 Amplificador de Instrumentación.**

Debido a las exigencias de medida que son impuestas por los sensores, estos circuitos deben cumplir unos requisitos generales:

Ganancia: seleccionable, estable y lineal.

Entrada diferencial: con CMMR alto.

Error despreciable debido a las corrientes y tensiones de offset.

Impedancia de entrada alta.

Impedancia de salida baja.

<sup>21</sup> Electrocardiógrafo: Aparato electrónico que capta y amplía la actividad eléctrica del corazón a través de electrodos colocados en las cuatro extremidades (RA, LA, RL, LL) y en seis posiciones precordiales (V1, V2, V3, V4, V5, V6). Que a su vez se encuentran estratégicamente situadas alrededor del corazón. El registro de dicha actividad es el electrocardiograma (ECG).

### 4.2.3 Simulación en 20-sim del primer caso de estudio

En este caso de estudio se analiza la respuesta que se puede obtener en un convertidor analógico digital de doble rampa, al introducirle una señal generada por un puente de Wheatstone.

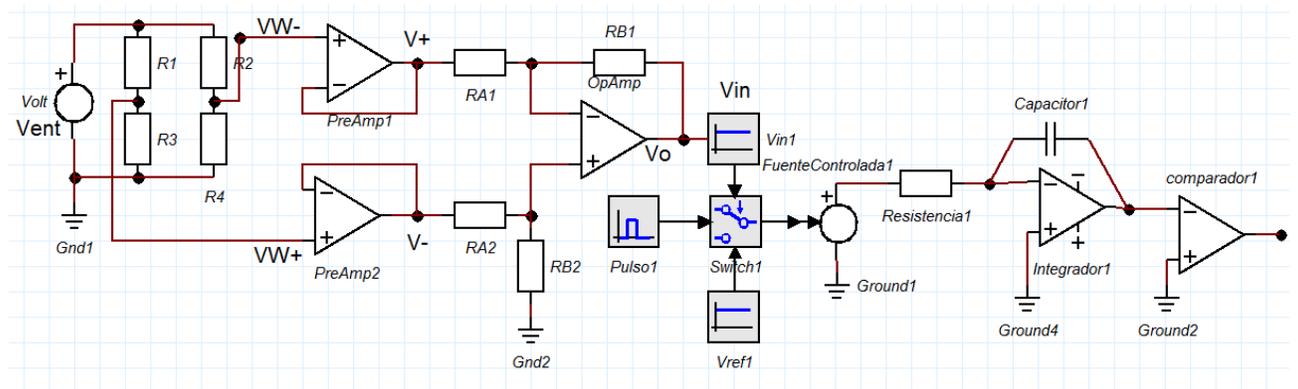
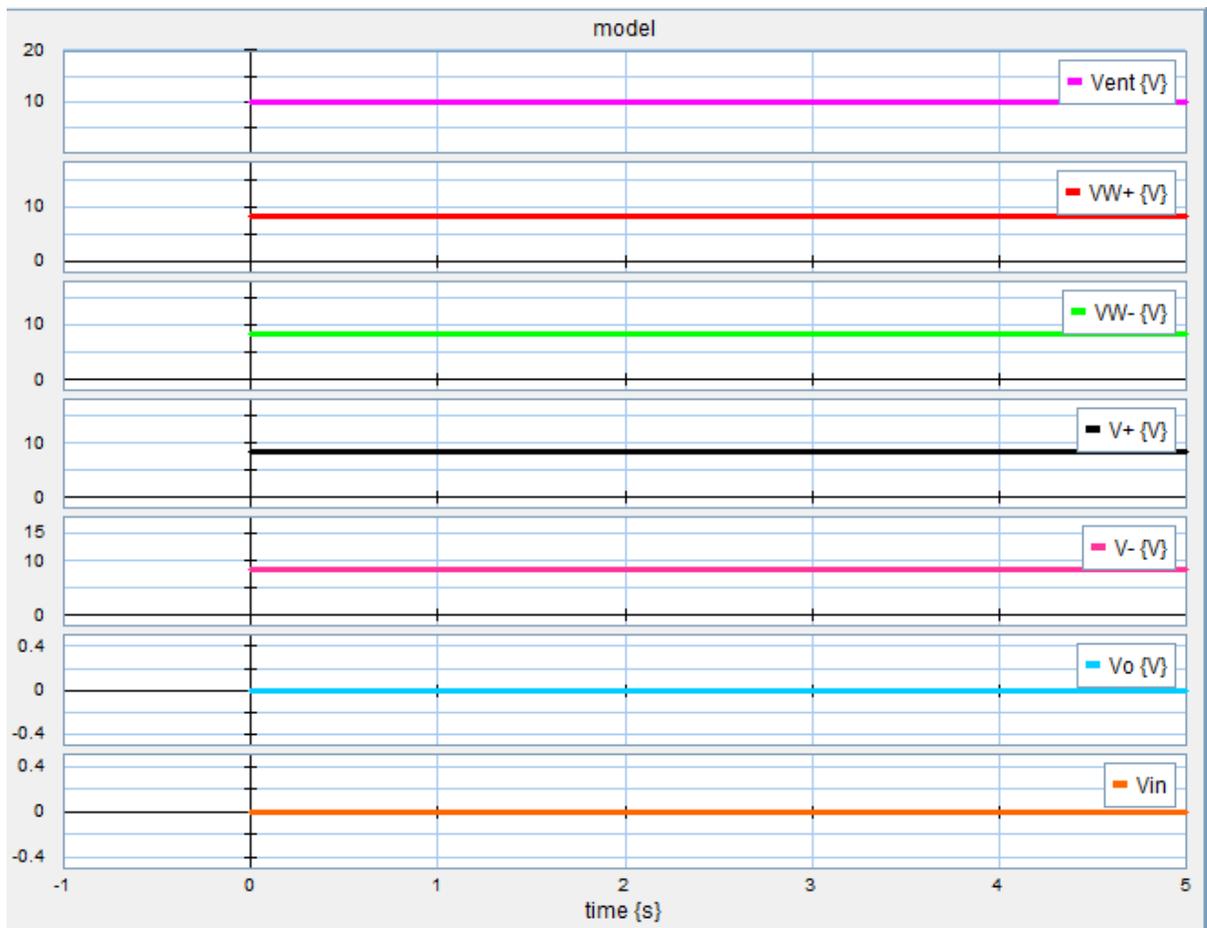


Figura 4.3 Diagrama del primer caso de estudio en 20-sim.

En la figura 4.3 se observa que se hizo la unión entre los diferentes circuitos que se han estado analizando en los capítulos anteriores, el primero es el puente de Wheatstone que al obtener el valor de una resistencia que puede ser un termistor o un sensor de temperatura, que dependiendo las condiciones puede cambiar su valor de resistividad.

La siguiente etapa en el caso de estudio es la del amplificador de instrumentación, como se mencionó anteriormente, este amplificador se utiliza porque está constituido por dos etapas, que van a ser muy útiles, estas etapas son la etapa de pre amplificación y la etapa diferencial, la finalidad de hacer esto es para poder adecuar la señal y poder tener una mejor adecuación y nuestro resultado sea más adecuado.

Una aplicación de este caso de estudio sería la de integrar un sensor de temperatura conectado en serie en una de las resistencias, de modo que si las resistencias tienen los mismos valores, entonces cuando se produzca una variación, la salida del convertidor será diferente de cero, para esto primero se muestra la simulación de un sistema balanceado, y donde se espera que la respuesta sea cero.



**Figura 4.4 Simulación del sistema balanceado en 20-sim.**

Como se dijo la salida del convertidor es cero, como se puede observar en la gráfica azul, que representa la salida y esta denotada como  $V_o$ .

Ahora si se modifica una de las resistencias que en este caso sería la resistencia que está identificada como  $R_2$ , el valor que se decidió poner es de  $1.1 \text{ K}\Omega$ , puesto que el valor que debe tener para estar balanceado el sistema es de  $1 \text{ K}\Omega$ .

Al simular el programa se puede observar una respuesta diferente a cero, esto se puede apreciar en la figura 4.5.

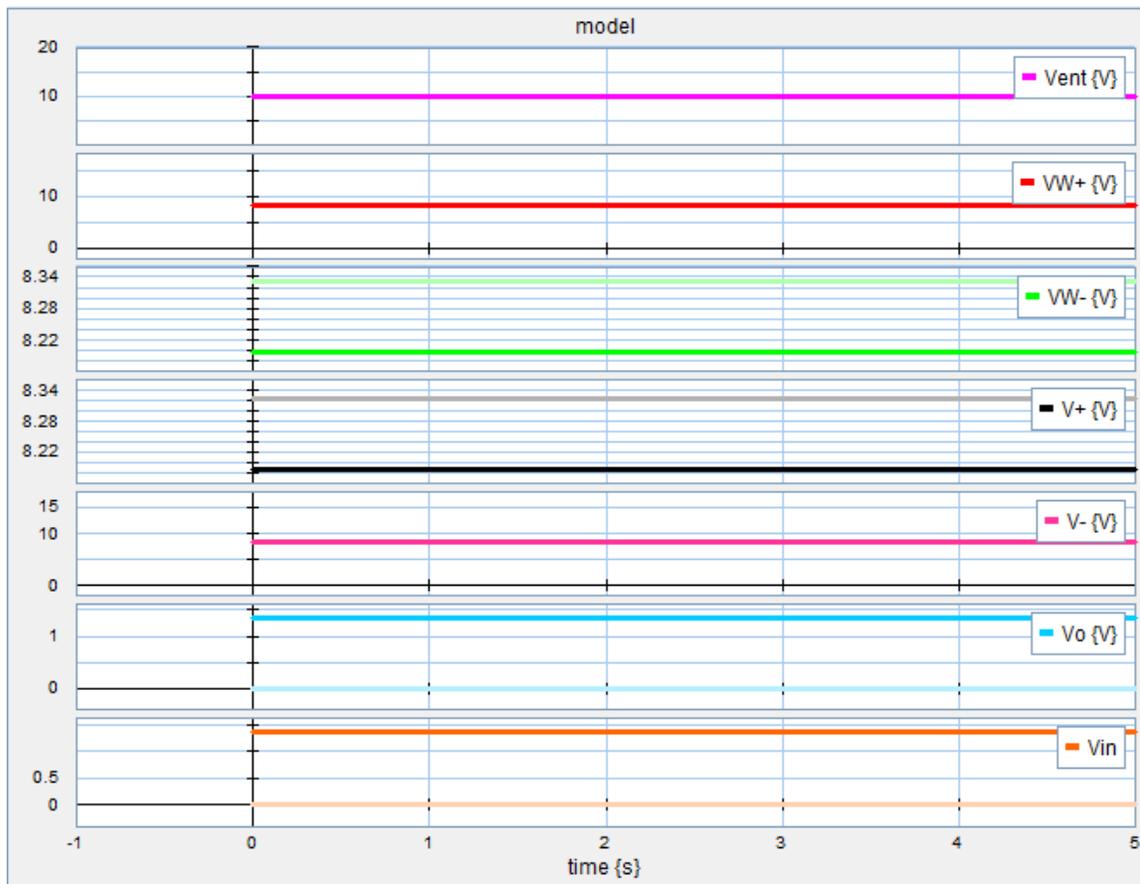


Figura 4.5 Simulación del sistema desbalanceado en 20-sim.

En la simulación se puede apreciar la diferencia entre las dos respuestas que se obtienen en el sistema, al estar balanceado; y al modificar un valor del mismo.

### 4.3 Segundo caso de estudio

El convertidor que se analiza en este caso de estudio es el convertidor digital analógico R2R, el enfoque que se le da en esta ocasión es el de tener cuatro señales de entrada, las cuales serán representadas mediante cuatro switches, mediante los cuales se va a controlar la velocidad de un motor que se conecta en la salida del convertidor, generando así una variación en la velocidad angular y el torque del motor.

Igualmente, como se analizó en el capítulo tres, se analizan cuatro bits, y la respuesta obtenida en 20-sim, será mostrada mediante la simulación correspondiente de dicho circuito.

#### 4.3.1 Bits de entrada

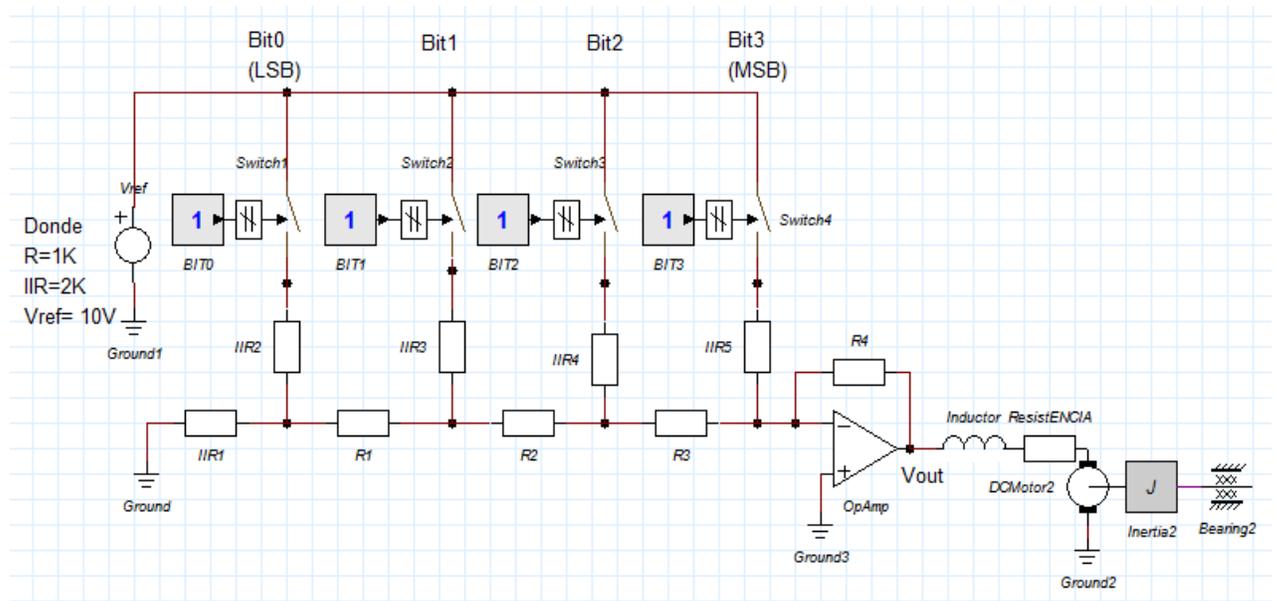


Figura 4.6 Diagrama de bloques del segundo caso de estudio en 20-sim.

En la figura 4.4 se muestra el diagrama de bloques del segundo caso de estudio, en donde los valores de los bits son introducidos de forma manual, los distintos bits están representados como BIT0, BIT1, BIT2 y BIT3, respectivamente, estos van desde el bit menos significativo hasta el bit más significativo.

Estos valores mencionados, pueden ser modificados, cambiando las propiedades de cada bloque que se encuentra definido como BIT, las propiedades de este bloque pueden ser modificadas dando clic en el bloque.

Como se puede observar en la figura 4.5, los valores que puede tomar el bloque, son solamente cero y uno. Esta será la forma de representar si se tiene un uno lógico o no.

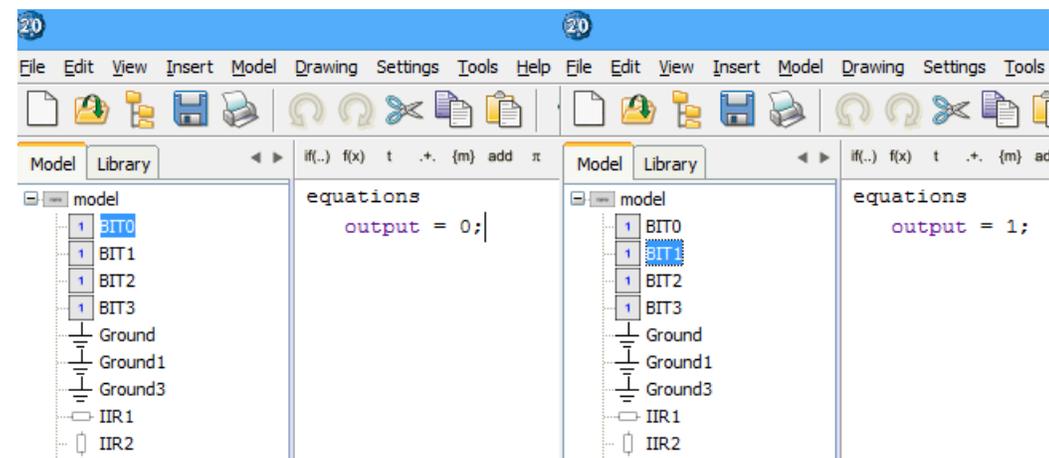
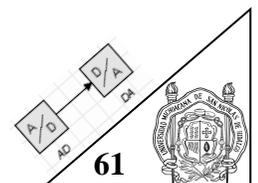


Figura 4.7 Propiedades de los bloques que representan los bits.

### 4.3.2 Switch de entrada

Cuando ya se tienen los bits establecidos, dependiendo la entrada que se quiere tener, el siguiente paso es hacer que la señal pase, o no pase hacia el convertidor, para poder realizar esta operación, fue utilizado el bloque Switch, el cual se encuentra en Library/Electric/Components/Switch.

20-sim ofrece dos variantes de ese bloque, puede ser un switch de nivel (level) o de amplitud (amplitud). El que se utiliza en este caso es el de nivel.



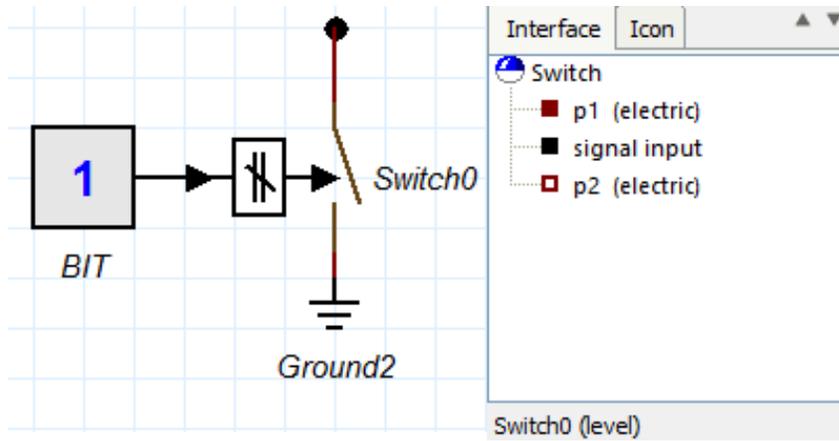


Figura 4.8 Diagrama de bloques del switch y su interfaz.

En la figura 4.6 se muestra el diagrama de bloques del switch utilizado, y su interfaz. Como se puede observar, el switch cuenta con una entrada del tipo señal, a la cuál es a donde se le conecta el bloque donde se está representando el uno o cero. Del tipo icono tiene una entrada y una salida, que dependiendo la condición interna del switch, va a actuar como un switch abierto o cerrado.

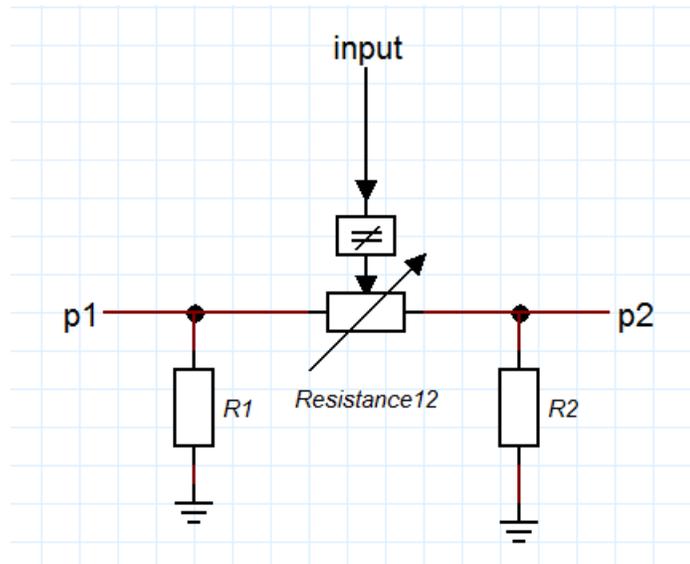


Figura 4.9 Diagrama de bloques interno del switch.

En la figura 4.7 se muestra el bloque interno del switch, para acceder a este bloque, simplemente se tiene que dar doble clic al bloque y se abrirá el diagrama que se menciona, igualmente, si se da doble clic a cada uno de los componentes de resistencia, se puede entrar a cambiar las propiedades de resistencia internas del switch,

A diferencia de las resistencias, al dar doble clic en el switch, que está representado por una especie de potenciómetro, se accede al código del bloque en donde se puede, cambiar las características del switch, que son su resistencia cuando se encuentra abierto, la resistencia cuando está cerrado, y la señal que activara esta condición.

```

if(..) f(x) t .+. {m} add π
parameters
  real Ron = 0.00001 {ohm}; // Resistencia cuando esta cerrado
  real Roff = 100000.0 {ohm}; // Resistencia cuando esta abierto
  real vt = 0.5; // Condicion de voltaje,
variables
  real R {ohm};
equations
  R = if input > vt then Ron else Roff end; //Condicion de resistencia
  p.u = R * p.i;

```

**Figura 4.10 Código del switch.**

Como se puede observar en la figura 4.8 se pueden definir las propiedades de resistencia si se encuentra abierto o cerrado el switch, esto quiere decir que para cuando esté cerrado, la resistencia sea baja, y deje fluir la corriente, y cuando esté abierto la resistencia sea tan alta que no exista tal flujo de corriente

En el código se definen las propiedades internas del switch, como se puede observar, en las propiedades de circuito abierto la resistencia es muy baja, a comparación del circuito cerrado, cuando la resistencia es más alta.

La condición en este caso es la variable vt en el código, esta variable será la condición que va a definir la limitante de voltaje por así decirlo, en el código en la sección donde dice variable se define la condición, que cuando la entrada sea mayor a vt, que en este caso es igual a 0.5, si en la señal de entrada tenemos un uno, se activará el valor de Ron, que quiere decir que se cerrara el circuito, esto quiere decir que el switch estará cerrado y dejara fluir la corriente a través de él, la condición contraria nos indicará que el switch se encuentra abierto y que no fluirá ninguna corriente por el switch.

### 4.3.3 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio

Al realizar la simulación en 20-sim, se pudo constatar que la respuesta es muy similar a la que se había estudiado en el capítulo tres en la sección 3.3.

Como ejemplo se tomaron las palabras digitales 0001, 1000 y 1111 (de MSB a LSB), que en base a la tabla 3.1, el valor del voltaje analógico que se va a tener es de -6.25 volts.

Esto se puede comprobar haciendo uso de la fórmula 3.1.

$$V_{out} = \frac{-V_{REF}}{16} * B = V_{out} = \frac{-V_{REF}}{16} * B$$

$$V_{OUT}(1) = \frac{-V_{REF}}{16} (1) = \frac{-(10) * (1)}{16} = -0.625V$$

$$V_{OUT}(8) = \frac{-V_{REF}}{16} (8) = \frac{-(10) * (8)}{16} = -5V$$

$$V_{OUT}(15) = \frac{-V_{REF}}{16} (15) = \frac{-(10) * (15)}{16} = -9.375V$$

Las simulaciones que se realizaron para 0001, 1000 y 1111 se muestran a continuación.

Simulación para 0001.

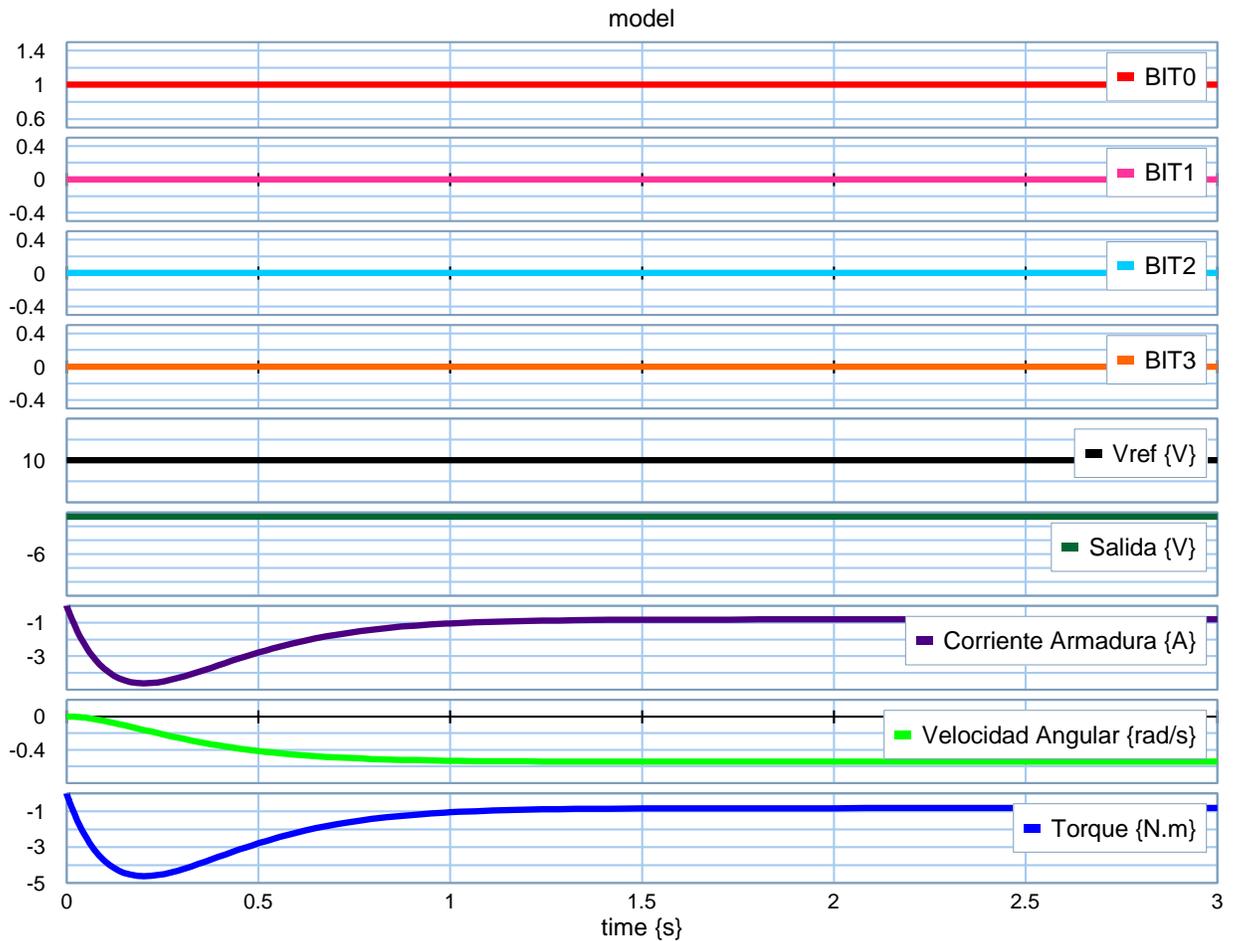


Figura 4.11 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 0001.

En la figura 4.11 se muestra la simulación introduciendo 0001, de lo que se obtienen los siguientes valores.

VSalida = - 6.25 volts

Corriente de Armadura = -4.6181 amps

Velocidad Angular (máxima) = -0.5436 rad/s

Torque (máxima) = -4.6181 N.m

Simulación para 1000.

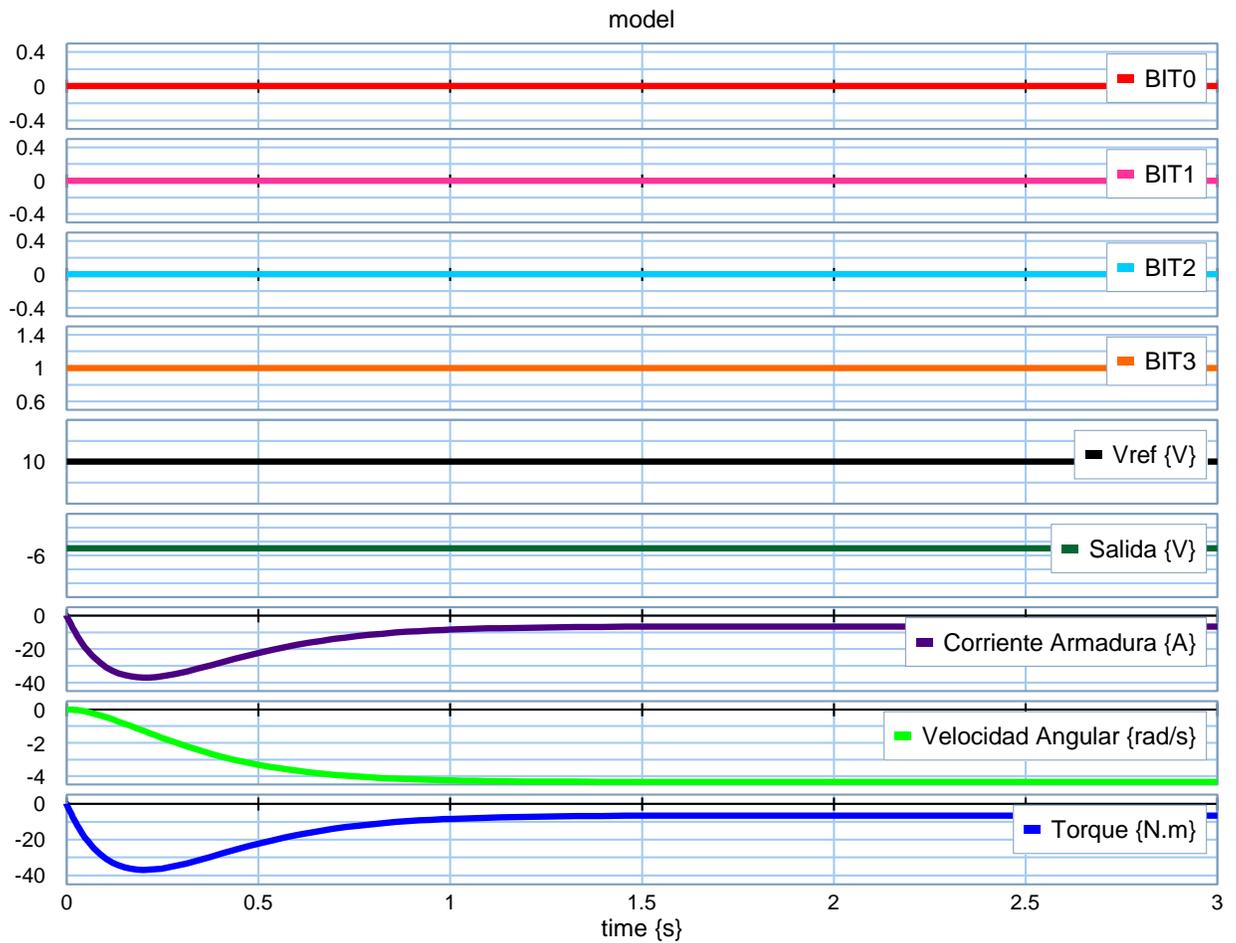


Figura 4.12 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 1000.

En la figura 4.12 se muestra la simulación introduciendo 1000, de lo que se obtienen los siguientes valores.

$V_{Salida} = -5$  volts

Corriente de Armadura = -36.9270 amps

Velocidad Angular (máxima) = -4.3477 rad/s

Torque (máxima) = -36.9270 N.m

Simulación para 1111.

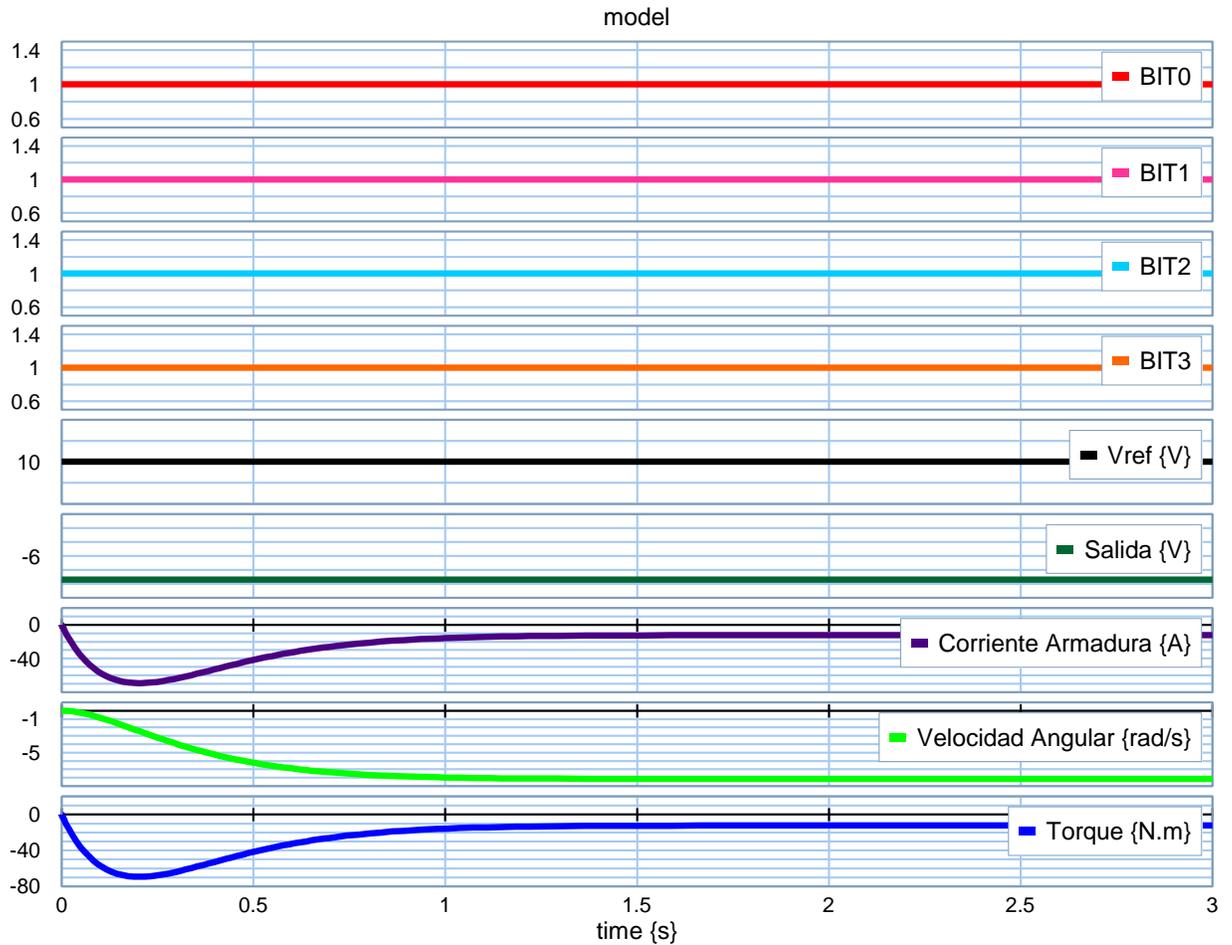


Figura 4.13 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 1111.

En la figura 4.13 se muestra la simulación introduciendo 1111, de lo que se obtienen los siguientes valores.

$V_{Salida} = -9.375$  volts

Corriente de Armadura = -69.2443 amps

Velocidad Angular (máxima) = -8.152 rad/s

Torque (máxima) = -69.244 N.m

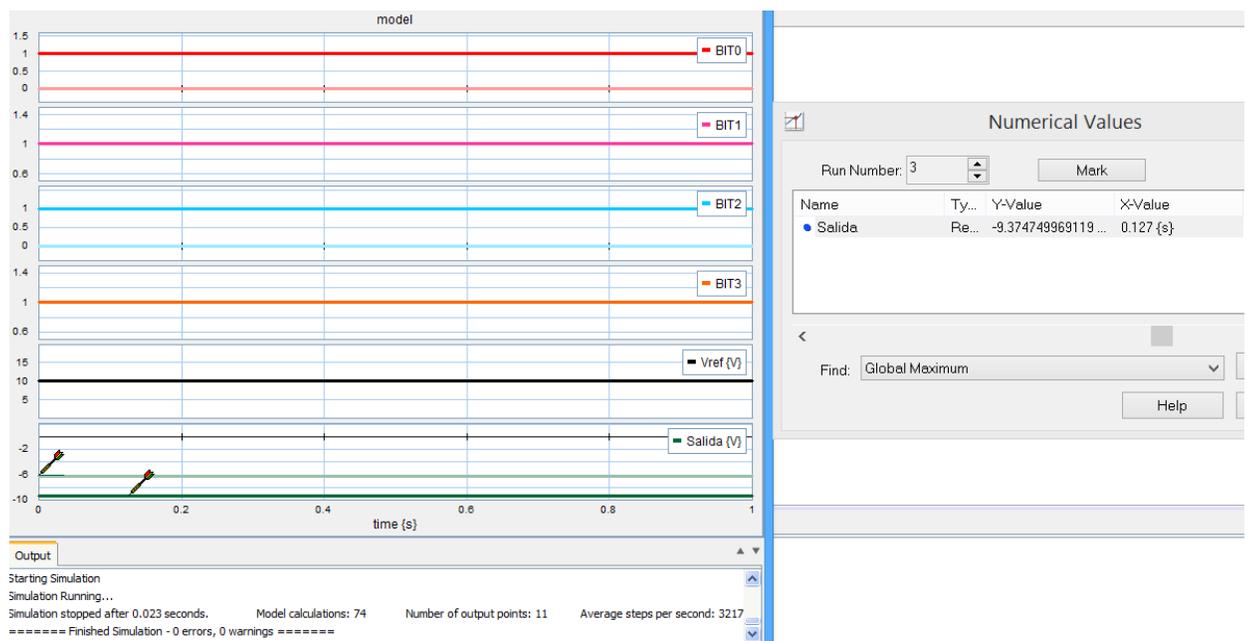
Para poder observar mejor la diferencia, los valores obtenidos se pueden comparar en la tabla.

**Tabla 4.1 Voltajes obtenidos al simular 0001, 1000 y 1111.**

Palabra Digital	0111	1000	1111
Vsalida	- 6.25 volts	-5 volts	-9.375 volts
Corriente de Armadura (Máxima)	-4.6181 amps	-36.9270 amps	-69.2443 amps
Velocidad Angular (Máxima)	-0.54 rad/s	-4.3477 rad/s	-8.152 rad/s
Torque (Máxima)	-4.61 N.m	-36.9270 N.m	-69.244 N.m

Como se puede observar, los resultados obtenidos mediante la simulación en 20-sim coinciden con los cálculos realizados con anterioridad, aunque ahora ya se tiene la posibilidad de hacer el estudio un poco más a fondo, esto debido a que como se tiene la posibilidad de escoger diferentes valores de entrada, dígase uno o cero, se pueden simular diferentes combinaciones dependiendo la necesidad.

Se entiende que cuando el convertidor se encuentre a escala completa (1111), todos los switches se van a encontrar cerrados, para esto, los bits deben ser todos uno, se realizó una simulación más para comprobar esta situación.



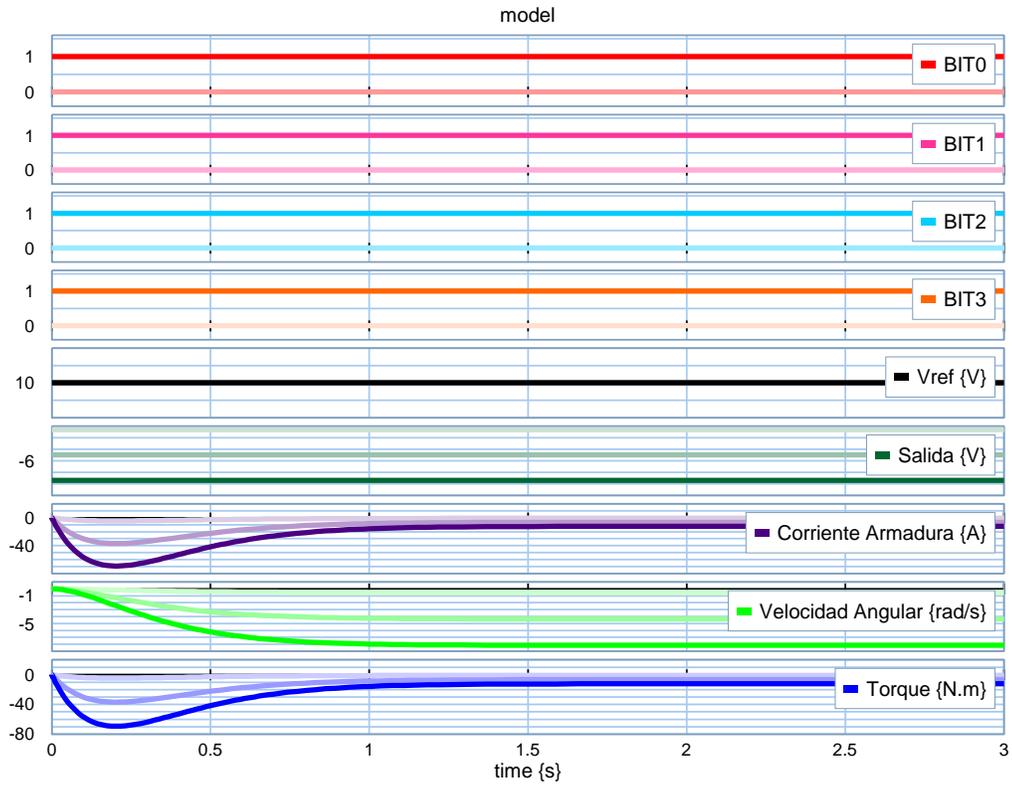
**Figura 4.14 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio a escala completa.**

$$V_{\text{out}} = \frac{-V_{\text{REF}}}{16} * BV_{\text{OUT}} = \frac{-V_{\text{REF}}}{16} (10) = \frac{-(10) * (15)}{16} = -9.375V$$

En la figura 4.14 se muestra la simulación del convertidor digital analógico R2R con una entrada digital a escala completa (1111), esto significa que todos sus bits están en alto, o que su valor es uno.

Otro aspecto a destacar de 20-sim, es que se pueden hacer varias simulaciones, y en la gráfica las mostrara todas, en la simulación a escala completa se observa que hay 2 respuestas, la simulación más reciente la muestra como lo hace normalmente, y la anterior la muestra en una especie de marca de agua, esto es de mucha utilidad si se requiere hacer varias simulaciones, como es el caso del ejemplo anterior, para poder observar los diferentes resultados que se obtienen y que sea más fácil observar el comportamiento.

Esto lo podemos comprobar haciendo una simulación para cuando se tiene 0001, 1000, 1111 y hacer una comparación de la velocidad angular y el torque para que sea más fácil distinguir las diferencias que existen entre las dos simulaciones.



**Figura 4.15 Simulación en 20-sim del segundo caso de estudio en 0001, 1000 y 1111. .**

Como se puede observar en la figura 4.15 cuando se aumenta el voltaje de salida del convertidor, también aumenta la velocidad angular y el torque en el motor.

Los voltajes resultan negativos por la respuesta que ofrece el amplificador operacional, si se requiere que la polaridad cambie, se puede hacer uso de un comparador para invertir el giro del motor.

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

En este proyecto se analizaron los convertidores analógico digital y digital analógico, desde su principio de funcionamiento y respuestas características para poder tener una idea primero, de cómo se comportan y que resultados se esperan obtener.

Habiendo estudiado los respectivos comportamientos de los distintos convertidores, se dio una breve introducción al programa 20-sim, esto se hizo para tener una mejor noción de cómo realizar las simulaciones de los convertidores estudiados.

Después de entender el funcionamiento de los convertidores, entender la programación en el simulador, se procedió a realizar el estudio de dos casos, los cuales fueron el de doble rampa, en el caso de los convertidores analógico digital, y el R2R para el caso de los convertidores digital analógico.

Una de las ventajas que se pueden observar al realizar la simulación de los convertidores, es que para los diferentes circuitos estudiados, el costo que implica la compra de componentes electrónicos no es una necesidad, ya que el programa nos facilita esto, generando un ahorro económico, aunado a esto, la simulación, ofrece parámetros muy parecidos a la realidad, por lo que los resultados que se obtienen son muy parecidos a los que se obtendrían al realizar este estudio.

Otra característica que se puede observar en 20-sim es que de los bloques, pueden ser modificados por el usuario, generando así una mayor flexibilidad para diseñar circuitos, que aparte de ser eléctricos y electrónicos, pueden ser mecánicos e hidráulicos.

Al tener esta flexibilidad, se pueden diseñar modelos que incluyan todas las características de los diferentes sistemas antes mencionados.

En la actualidad todos los sistemas de automatización y control, están definidos por variables discretas y continuas, por lo que es de una gran utilidad, contar con convertidores que nos puedan ayudar a darles una mejor adecuación, por lo que los convertidores juegan un papel muy importante, a la hora de hacer el manejo de estas.

Como se mencionó, en el capítulo dos en la naturaleza existen diferentes variables como pueden ser temperatura, presión, humedad, volumen, distancia, velocidad, aceleración, etc., Que si se realiza un estudio adecuado se pueden hacer distintos tipos de sistemas de control.

En el caso del convertidor analógico digital, se puede hacer uso de sensores de temperatura, presión, posición, los cuales tienen respuestas que pueden variar mucho en el tiempo, por lo que si se hace la caracterización del sensor, se puede tener un control acorde a las necesidades, por ejemplo el caso de un sensor de temperatura, que si llega a un valor determinado haga una acción que sea acorde a las necesidades que se requieren, esto se vio en el primer caso de estudio, en el cual mediante del puente de Wheatstone, en dicho caso de estudio se encuentran balanceadas todas las resistencias, por lo que cuando exista una variación en esta, se verá reflejado a la salida del convertidor analógico digital de doble rampa, esta resistencia que puede variar, puede ser representada por un sensor de temperatura, termistor, termopar, aunque no se limita solo a componentes que cambien su resistencia con respecto a la temperatura, también puede ser cualquier variable, siempre y cuando se escoja un transductor que cambie su resistencia, dependiendo la circunstancia que pueda cambiar dependiendo el ambiente o medio que se quiera analizar.

La ventaja principal de escoger el convertidor analógico digital de doble rampa, fue que sus tiempos de respuesta son mucho más altos que los otros convertidores, y que los tiempos de conversión pueden ser establecidos por el usuario.

Para los convertidores digital analógico, el estudio que se hizo fue el de convertidor R2R ya que este al tener resistencias con valores “R” y “2R” hace que los valores de estas resistencias, no sean tan complicados de conseguir, como es el caso del

tipo escalera resistiva, que va aumentando sus valores, hasta que pueden existir valores tan altos de resistencia, que presenten una desventaja en el momento de hacer la implementación, esto a causa de la alta impedancia y las caídas de tensión que se pudieran producir, generando así una respuesta muy diferente.

En el segundo caso de estudio, se realizó el análisis, tomando como variables de entrada unos interruptores (switch) los cuales pueden representar cualquier tipo de sistema real, en el cual los sensores por así decirlo manden una respuesta on/off según sea la forma de reaccionar que tengan respecto a la variable que están monitoreando. Y a su vez hagan que cambie la velocidad de un motor de corriente directa, el cual cuando todos los sensores manden un “uno lógico” va estar a su máxima velocidad.

Realizar este trabajo utilizando 20-sim, fue una tarea de mucho aprendizaje, debido a que para este tipo de estudios es más común usar Labview o Matlab, por lo que al iniciar este proyecto, aunado a la investigación de los diferentes circuitos estudiados, se tuvo que aprender a utilizar.

Al empezar a trabajar con 20-sim, se encontró que existen muchas similitudes con los programas antes mencionados; pero a la vez ofrece muchas ventajas, como por ejemplo la de que el usuario puede crear sus propios bloques, definiendo los comportamientos mediante la modificación de los bloques existentes en su código, y en su interface, dándonos la ventaja de crear bloques que nos ahorren la necesidad de insertar demasiados bloques.

# Bibliografía

1. Diseño de circuitos Microelectrónicos.

2da Edición

Richard C. Jaeger

Travis N. Blalock

Editorial Mc. Graw Hill

2. Integrated Electronics

For International Student Edition

Jacob Millman

Christos Halkias

Editorial Mc. Graw Hill

3. Fundamentos de Electrónica

4ta Edición

Robert L. Boylestad

Louis Nashelsky

Editorial Prentice Hall

4. Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales

4ta Edición

Robert F. Coughlin

Frederick F. Driscoll

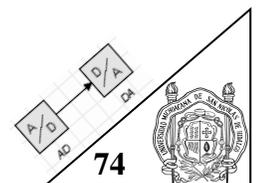
Editorial Prentice Hall

5. Fundamentos de Sistemas Digitales

7ma Edición

Thomas L. Floyd

Editorial Prentice Hall



6. Documentación de 20-sim

<http://www.20sim.com/download/manuals.html>

7. Electrocardiografía (ECG)

<http://www.dalcame.com/ecg.html#.VuofacuFNVe>

8. Diseño de un Electrocardiógrafo

<http://www.monografias.com/trabajos33/electrocardiografo/electrocardiografo.shtml>

9. Amplificador de Instrumentación

[https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador\\_de\\_instrumentaci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_de_instrumentaci%C3%B3n)

10. Análisis de Circuitos en Ingeniería.

7a Edición

William H. Hayt, Jr.

Jack E. Kemmerly

Steven M. Durbin

Editorial Mc. Graw Hill

11. Analog to Digital Converter

[http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital\\_converter#ADC\\_types](http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter#ADC_types)

12. Convertidor Analógico Digital

<http://proton.ucting.udg.mx/~sanchez/EL%20DAC.htm>

