Escuela Superior de Computo

# Apuntes de la Unidad de Aprendizaje: Electrónica Analógica

AUTORES:

M. en C. Rocio Almazán Farfán

Ing. Juan Carlos Martínez Díaz

Objetivo de la Unidad de Aprendizaje: Diseñar circuitos electrónicos elementales a partir de los conceptos fundamentales y de operación de los dispositivos electrónicos básicos, para aplicarlos como circuitos acondicionadores.

# UNIDAD TEMÁTICA 1: TEORÍA DE LOS SEMICONDUCTORES

## 1.1 INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES SEMICONDUCTORES

En los últimos años hemos sido testigos de los cambios en la industria de la electrónica. Las ventajas asociadas con los sistemas actuales, comparados con las redes de bulbos de los años anteriores, resultan, en su mayor parte, obvias de inmediato: son más pequeños y ligeros, no tienen requerimientos de calentamiento o disipación de calor, tienen una construcción más robusta, son más eficientes y no requieren de un periodo de calentamiento. La miniaturización desarrollada en los años recientes se ha dado por resultado sistemas tan pequeños. Los límites de la miniaturización dependen de tres factores: la calidad del material semiconductor, la técnica del diseño de redes y los límites de la manufactura y el equipo de procesamiento, como un ejemplo claro tenemos al elemento llamado diodo como se muestra su símbolo en la figura 1.1.

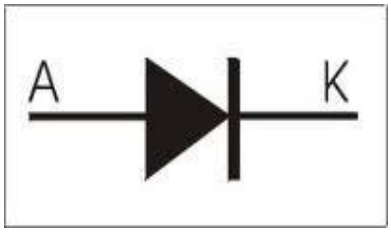



FIGURA 1.1.1 Símbolo de un diodo.

## INTRODUCCIÓN AL DIODO

Con sus características que son parecidas a un interruptor sencillo, este dispositivo tiene varias aplicaciones que van desde circuitos simples hasta las aplicaciones más complejas. El diodo ideal es un dispositivo con dos terminales, que tiene el símbolo y características que se muestran en las siguientes figuras.

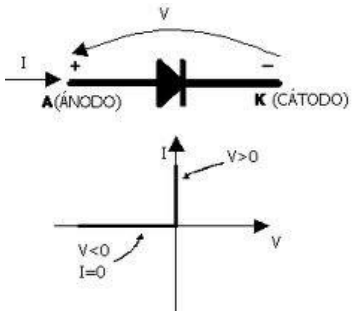
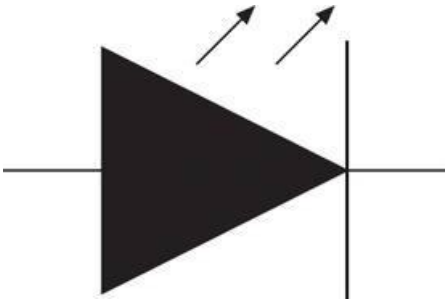



FIGURA 1.1.2.a Curva característica del diodo.



De manera ideal, un diodo conducirá corriente en la dirección que define la flecha en el símbolo, y actuará como un circuito abierto en cualquier intento por establecer corriente en dirección opuesta.

FIGURA 1.1.2.b Símbolo del diodo.

## MATERIALES SEMICONDUCTORES

Un semiconductor, es un material que posee un grado de conductividad sobre algún punto entre los extremos de un aislante y de un conductor.

Los materiales semiconductores más conocidos son: Silicio (Si) y el Germanio (Ge), los cuales poseen cuatro electrones de valencia en su último nivel. Por otra parte, hay que decir que tales materiales forman también estructura cristalina.

Hay que destacar que, para añadir energía al material semiconductor, además de calor, también se puede emplear luz.

## TEORÍA DE BANDAS

Esta teoría explica el comportamiento de los materiales al paso de la corriente desde una perspectiva.

Definamos bandas de valencia (BV) al conjunto de energía que posee los electrones de valencia.

Definimos la banda de conducción (BC) al conjunto de energía que posee los electrones para desligarse de sus átomos. Los electrones que están en esta banda pueden circular por el material si existe una tensión eléctrica que los empuje entre dos puntos.

En base en estos conceptos tenemos 3 casos:

**Conductor:** en este caso la energía de la banda de valencia mayor que la de los electrones de la banda de conducción. Así pues, las bandas se superponen y muchos electrones de valencia se sitúan sobre la de conducción con suma facilidad.

**Aislante:** en este caso la energía de la banda de conducción es mucho mayor que la energía de la banda de valencia. En este caso, existe una brecha entre la banda de valencia y la de conducción de modo que, los electrones de valencia no pueden acceder a la banda de conducción que estará vacía. Es por esto que el aislante no conduce. Solo a temperaturas muy altas.

**Semiconductores:** en este caso, la banda de conducción sigue siendo mayor que la banda de valencia, pero la brecha entre ambas es mucho más pequeña, de modo que, con el incremento pequeño de energía, los conductores pueden circular por el medio. Cuando un electrón salta desde la banda de valencia a la de conducción deja un hueco en la banda de valencia que, aunque parezca extraño, también se considera portador de corriente eléctrica.

En resumen: en los semiconductores hay dos tipos de portadores de corriente eléctrica:

- los electrones con carga negativa
- los huecos con carga positiva

## MATERIALES EXTRÍNSECOS TIPO p y TIPO n

Un material semiconductor que haya sido sujeto al proceso de dopado se le denomina un material extrínseco.
Existen dos tipos de materiales extrínsecos de gran importancia para la fabricación de dispositivos semiconductores: tipo n y el tipo p.

## MATERIALES TIPO n

Tanto un material tipo n como el tipo de material tipo p se forman mediante la adición de un número predeterminado de átomos de impureza de germanio o silicio. El tipo n se crea por medio de elementos de impureza que posee cinco electrones de valencia. Como se indica en la figura 1.1.3.

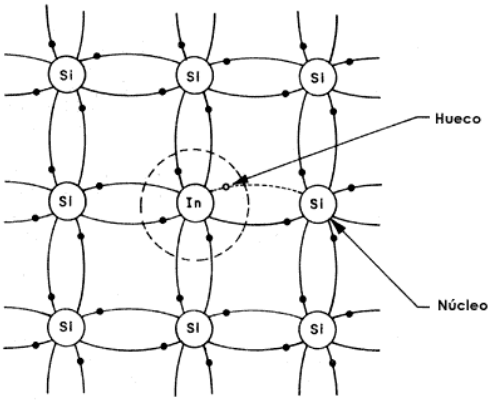



FIGURA 1.1.3 Ejemplo de dopaje tipo n.

## MATERIALES TIPO p

El material tipo p se forma mediante el dopado de un cristal puro de germanio o de silicio con átomos de impureza que poseen tres electrones de valencia. Los elementos que se utilizan con frecuencia para este propósito son boro, galio e indio.

.

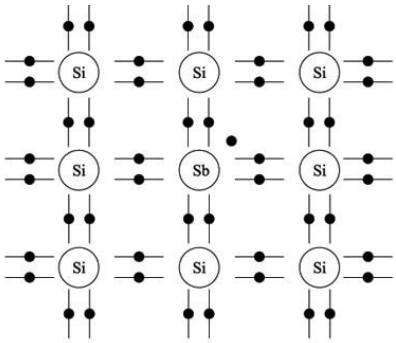



FIGURA 1.1.4 Ejemplo de dopaje tipo p.

## FLUJO DE ELECTRONES COMPARADO CON FLUJO DE HUECOS

El efecto del hueco sobre la conducción. Si un electrón de valencia adquiere suficiente energía cinética para romper su unión covalente y llena un hueco, entonces se creerá un hueco en la unión covalente que libero el electrón.

Sin embargo, existe una transferencia de huecos hacia la izquierda y de electrones hacia la derecha. La dirección que se utiliza indicada por la dirección del flujo de huecos.

## PORTADORES MAYORITARIOS Y MINORITARIOS

En el estado intrínseco, el número de electrones libres se debe sólo de aquellos electrones de banda de valencia que han adquirido suficiente energía de las fuentes térmicas para romper la unión covalente o las pocas impurezas que no pudieron eliminarse. En un material tipo n el número de huecos no ha cambiado de manera significativa de su nivel intrínseco. Por estas razones

En un material tipo n, al electrón se le llama portadores mayoritarios y el hueco es el portador minoritario.

Para el material tipo p, el número de huecos supera por mucho el número de electrones. Por lo tanto:

Es un material tipo p el hueco es el portador mayoritario y el electrón es el portador minoritario

Cuando el quinto electrón de un átomo donador deja a su átomo, el átomo restante adquiere una carga positiva, de ahí el signo positivo en la representación del ion donador. Por razones analógicas, el signo negativo aparece en el ion receptor.

Los materiales tipo p y n representan los bloques de construcción básicos de los dispositivos semiconductores. Como podemos observar se encontrará que la unión de un solo material tipo n con un material tipo tendrá por resultado un elemento semiconductor de importancia considerable en los sistemas electrónicos.

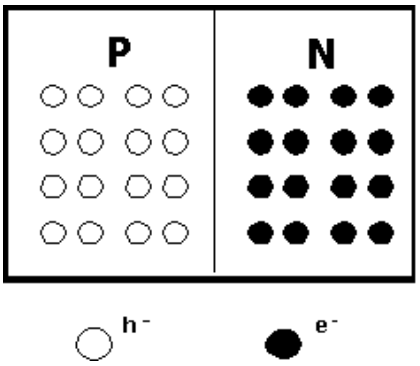



FIGURA 1.1.5 Portadores mayoritarios y minoritarios.

## 1.2 DIODOS SEMICONDUCTORES

El diodo semiconductor se forma con solo juntar un material tipo p y tipo n como explicamos en la introducción, en el momento en que son “unidos” los dos materiales, los electrones y los huecos en la región de la unión se combinan, dando como resultado una falta de portadores en la región cercana a la unión.

A esta región de iones positivos y negativos descubiertos se le llama región de agotamiento. Debido al agotamiento de portadores de esta región.

Los diodos muestran un comportamiento que depende de la dirección del voltaje aplicado. Un dispositivo diodo es un elemento de dos terminales (dio=dos

electrodos). Sus características se asemejan a las de un sencillo interruptor, contiene una unión solida rectificante, que se diseña especialmente para manejar bajas frecuencias y grandes corrientes (sentido directo).

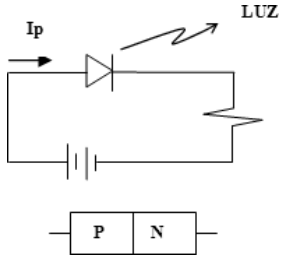



FIGURA 1.2.1 Comportamiento del diodo.

Ahora que pasaría si:

La aplicación de un voltaje a través de sus terminales permite tres posibilidades: sin polarización (VD= 0v), polarización directa (VD>0v) y polarización inversa (vd<0v).

## SIN POLARIZACIÓN (VD=0V)

Cualquiera de los portadores minoritarios (huecos) en el material tipo n que se encuentre dentro de la región de agotamiento. Pasará directamente al material tipo p, mientras más cercano se encuentre el portador minoritario a la unión, mayor será la atracción de la capa de iones negativos y menor la oposición de los iones positivos en la región de agotamiento del material tipo n.

Los portadores mayoritarios (electrones) del material tipo n deben sobreponerse a la fuerzas de atracción de la capa de iones positivos del material tipo n y la capa de iones negativos en el material tipo p, con el fin de migrar hacia el área localizada más allá del área de agotamiento del material tipo p.

Si examinamos la figura 1.7 se puede observar las magnitudes de flujo tales que el flujo neto en cualquier dirección es igual a cero. La longitud de la línea que representa el flujo del huecos de una escala mayor que el flujo de los electrones con objeto de demostrar que la magnitud de cada uno no

necesariamente debe ser la misma para la cancelación del flujo, y que los niveles de dopado para los materiales pueden dar como resultado el flujo de portadores desigual a los huecos.

En conclusión podemos definir qué:

En ausencia de un voltaje de polarización aplicado, el flujo neto de la carga en cualquier dirección para cada diodo semiconductor es cero.

## CONDICIONES DE POLARIZACIÓN INVERSA (VD< 0V)

En este caso , el polo negativo de una batería se conecta a la zona p y el polo positivo a la zona n, lo que hace aumentar la zona de carga especial , y la tensión en dicha zona hasta que alcanza el valor de la tensión de la batería. Por lo tanto podemos definir qué:

- ✓ El polo positivo atrae a los electrones libres de la zona n, los cuales salen del cristal n y se introducen en el conductor dentro del cual se desplazan hasta llegar a la batería. A medida que los electrones libres abandonan la zona n, los átomos pentavalentes que antes eran neutros, al verse desprendidos de su electrón en la órbita de conducción, adquiere estabilidad.

- ✓ El polo negativo cede electrones libres a los átomos trivalentes de la zona p. En caso de que cuando los electrones libres cedidos entren en la zona p, caen dentro de estos huecos con los que los átomos trivalentes adquieran estabilidad.

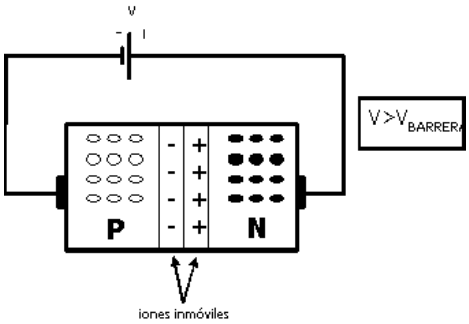



FIGURA 1.2.2 Polarización en inversa.

## CURVA CARACTERISTICA DEL DIODO

- ✓ TENSIÓN UMBRAL DE PARTIDA: La tensión umbral de polarización directa coincide en valor con la tensión de la zona de carga especial del diodo no polarizado. Al polarizar directamente el diodo, la barrera de potencial inicial se va reduciendo, incrementando la corriente. Sin embargo cuando la tensión externa supera la tensión umbral, la barrera de potencial desaparece, de forma que para pequeños incrementos de tensión se producen variaciones de intensidad de corriente.

- ✓ CORRIENTE MÁXIMA (Imax): Es la intensidad de corriente máxima que puede conducir el diodo.

- ✓ CORRIENTE INVERSA DE SATURACIÓN (Is): Es la pequeña corriente que se establece al polarizar inversamente el diodo por la formación de pares electrón-hueco debido a la temperatura.

- ✓ CORRIENTE SUPERFICIAL DE FUGAS: Es la pequeña corriente que circula por la superficie del diodo. Esta corriente es función de la tensión aplicada al diodo, con lo que aumenta la tensión, aumenta la corriente superficial de fuga.

- ✓ TENSIÓN DE RUPTURA: Es la tensión inversa máxima que el diodo puede soportar antes de darse el efecto de avalancha.

- ✓ EFECTO DE AVALANCHA: En polarización inversa se generan pares electrón-hueco que provocan la corriente inversa de saturación. Si la tensión inversa es elevada los electrones se aceleran incrementando su energía cinética de forma que al chocar con electrones de valencia pueden provocar su salto a la banda de conducción. Estos electrones liberados, a su vez, se aceleran por efecto de la tensión, chocando con más electrones de valencia y liberándose a su vez.

- ✓ EFECTO ZENER: Cuanto más dopado este el material, menor es la anchura de la zona de carga.

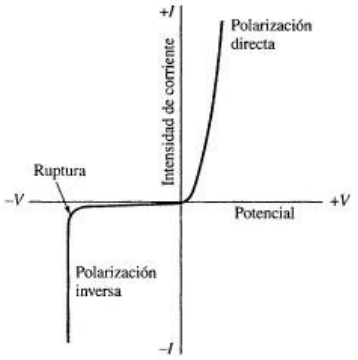



FIGURA 1.2.3 Curva que representa la polarización en inversa y directa.

## TIPOS DE DIODOS SEMICONDUCTORES

Existen varios tipos de diodos, que pueden diferir en su aspecto físico, impurezas, uso de electrodos, que tienen características eléctricas particulares usados para una aplicación especial en un circuito. El funcionamiento de estos diodos es fundamentado por principios de la mecánica cuántica y teoría de bandas.

- ✓ DIODO DE SILICIO: Suelen tener un tamaño milimétrico y alineados, constituyen detectores multicanal que permiten obtener espectros en milisegundos. Son menos sensibles que los fotomultiplicadores. Es un

semiconductor de tipo p en contacto con un semiconductor de tipo n.

- ✓ DIODOS DE CRISTAL: Consiste en un cable de metal afilado presionado contra un cristal semiconductor. Los diodos de cristal tienen una gran aplicación en los radios.

- ✓ DIODOS DE CORRIENTE CONSTANTE: Permite una corriente a través de ellos para alcanzar un valor adecuado y así estabilizar en un valor específico.

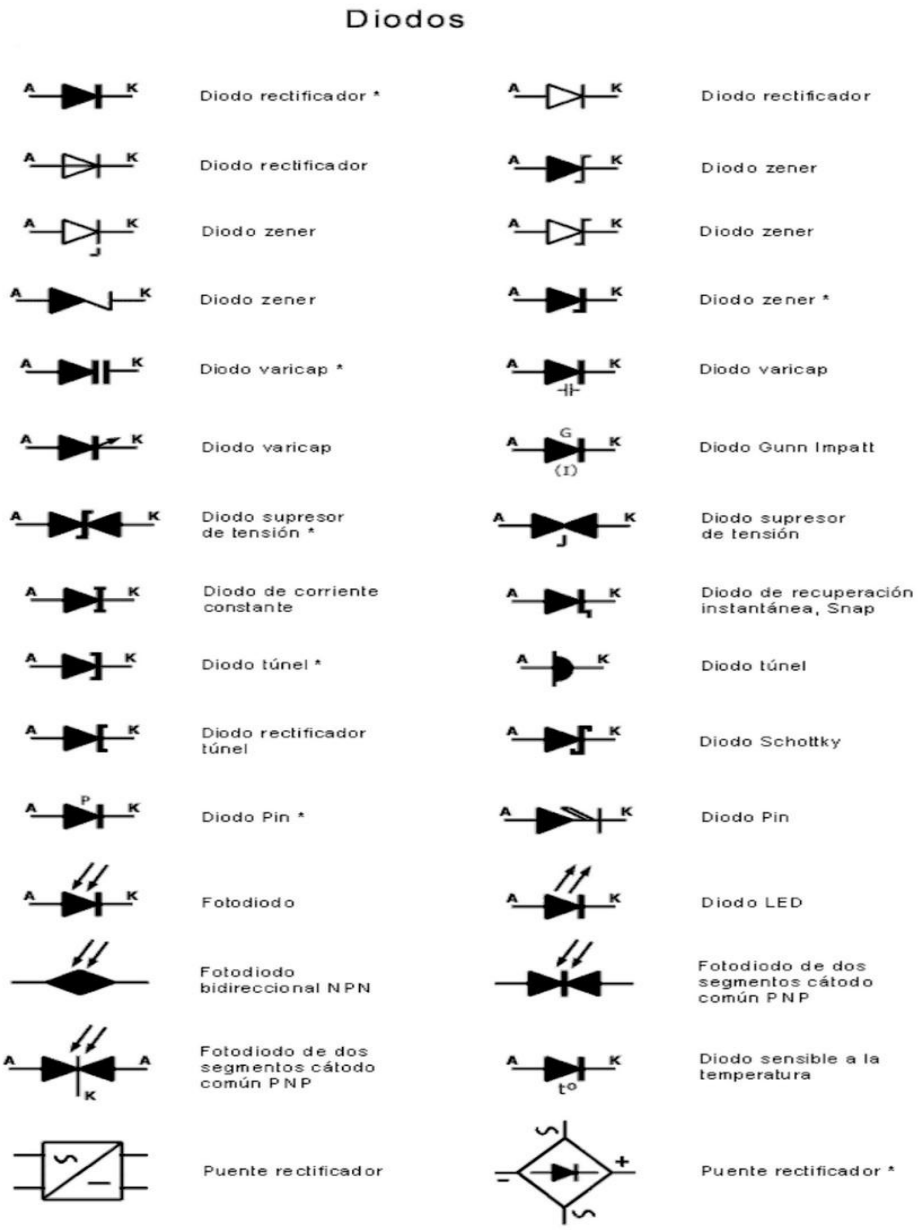



FIGURA 1.2.4 Clasificación de diversos diodos.

## 1.2.1 DIODO RECTIFICADOR

El diodo rectificador convierte un voltaje de C.A. en un voltaje unidireccional que se

utiliza como fuente de alimentación de C.D. El rectificador también se le conoce como convertidor C.A. a C.D.

## RECTIFICADOR

La operación del rectificador se divide en dos intervalos

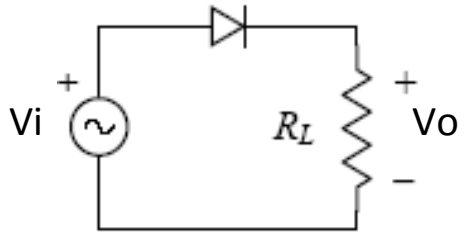
a) El intervalo $0 \leq wt \leq \pi$ durante el semi ciclo positivo del voltaje de entrada, el diodo D1 conduce y se comporta como un cortocircuito.

b) El intervalo $\pi \leq wt \leq 2\pi$ durante el semi ciclo negativo del voltaje de entrada el diodo D1 se polariza en inversa y se polariza como circuito abierto.

## RECTIFICADOR DE MEDIA ONDA

El rectificador de media onda es un circuito empleado para eliminar la parte negativa o positiva de una señal de corriente alterna de entrada (Vi).

Es el circuito más sencillo que puede construirse con un diodo.




1.2.5 Rectificador de media onda

Análisis del circuito (diodo ideal).

Los diodos ideales, permiten el paso de toda la corriente en una única dirección, la correspondiente a la polarización directa, y no conducen cuando se polarizan inversamente, además su voltaje es positivo.

**POLARIZACIÓN DIRECTA** (Vi > 0)

En este caso, el diodo permite el paso de la corriente sin restricción, provocando una caída de potencial que suele ser de 0,7 V. Este voltaje de 0,7V se debe a que usualmente se utilizan diodos de silicio. En el caso del germanio, que es el segundo más usado, la caída de potencial es de 0,3 V. Vo = Vi - VD → Vo = Vi - 0,7 y la intensidad de la corriente puede fácilmente calcularse mediante la ley de Ohm.

**POLARIZACIÓN INVERSA** (Vi < 0)

En este caso, el diodo no conduce, quedando el circuito abierto. No existe corriente por el circuito, y en la resistencia de carga RL no hay caída de tensión, esto supone que toda la tensión de entrada estará en los extremos del diodo 1:

Vo = 0

Vdiodo = Vi

I = 0

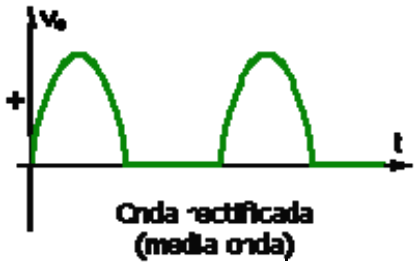



FIGURA 1.2.6 Señal de un rectificador de media onda.

## RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Para un rectificador de media onda, el voltaje promedio de (Cd) es de solo 0.318Vm. El voltaje de salida de un rectificador de onda completa es el doble, ocurre al

combinar dos rectificadores de media onda.

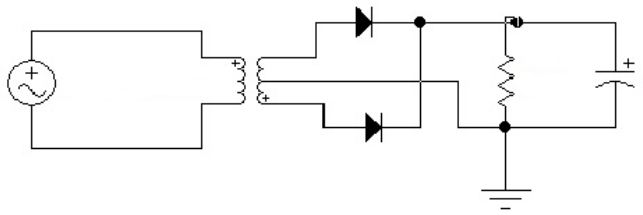


FIGURA 1.2.7 Rectificador de onda completa.

## RECTIFICADOR DE ONDA COMPLETA TIPO PUENTE

Para este circuito necesitaremos 4 diodos.

Ventajas:

1- Necesita un transformador del lado de la entrada.
2- PIV nominal de los diodos es Vm.

Desventajas:

1- No proporcionar aislamiento eléctrico.
2- Requiere más diodos que la versión con derivado central.

En el rectificador en puente se hacen necesarios cuatro diodos en comparación con el circuito anterior. La operación del rectificador en puente consiste que durante los semi ciclos positivos del voltaje de entrada Vs es positivo y la corriente es conducida a través del diodo D1, el resistor R y el diodo D2. Entre tanto los diodos D3 y D4 están polarizados inversamente; hay dos diodos en serie en la trayectoria de conducción y por lo tanto Vo será menor que Vs por dos caídas del diodo, esta es una desventaja del rectificador en puente. Para determinar el voltaje inverso de pico (PIV) se emplea la siguiente ecuación:

$$PIV = Vs - 2V_{DO} + V_{DO} = V_s - V_{DO}$$

Otra ventaja de este circuito es que solo se hace necesaria aproximadamente la mitad del número de vueltas para el devanado secundario del transformador. Se

puede visualizar que cada mitad del devanado secundario del transformador con derivación central se utiliza sólo la mitad del tiempo.

## VOLTAJE DE RIZO

Observamos que en los rectificadores el voltaje de salida es pulsante y contiene rizos, también lo que requiere es un filtro a la salida del rectificador. Para aislar el voltaje de salida C.D se puede considerar que el voltaje de salida está formado por dos componentes, voltaje de rizo y voltaje promedio.

- ✓ El voltaje rizo Vr, es la diferencia entre Vo y vo (CD).
- ✓ El voltaje Vr se puede expresar como

$$V_r = \begin{cases} V_s - v_{oCD} = V_m sen(W_t) - V_{oCD} & 0 \leq W_t \leq \pi \\ V_{oCD}\ para\ \pi \leq W_t = 2\pi & \end{cases}$$

*Ecuación 1. 1*

$$V_r{}^2{}_{RMS} = V_o{}^2{}_{RMS} - V_o{}^2{}_{CD} \qquad (1)$$

Si:

*Ecuación 1. 2*

$$v_{O_{CD}} = \frac{V_m}{\pi} \rightarrow V_m = v_{O_{CD}}\pi \qquad (2)$$

y

$$v_{O_{RMS}} = 0.5V_m$$

*Ecuación 1. 3*

$$v_{O_{RMS}} = v_{O_{CD}}\pi(0.5) \qquad (3)$$

Sustituyendo 3 en 1

$$Vr^2{}_{RMS} = Vo^2{}_{CD}[(\pi^2 x 0.5^2) - 1]$$

*Ecuación 1. 4*

$$Vr_{RMS} = 1.21Vo_{CD} \qquad (4)$$

El contenido de Rizo del voltaje de salida se mide mediante un factor conocido como Factor de Rizo (F.R) el cual se define como:

*Ecuación 1. 5*

$$F.R = \frac{Vr_{RMS}}{Vo_{CD}} = \frac{1.21Vo_{CD}}{Vo_{CD}} \qquad (5)$$

F.R = 1.21 o 121%

## TRANSFORMADOR

Es una maquina estática de C.A para transferir la energía eléctrica de un circuito en corriente alterna a otro, sin variación de la frecuencia. Esta transferencia va acompañada, de un cambio de tensión.

Este puede recibir energía y devolverlo a una tensión más elevada, y en cuyo caso se le denomina transformador elevador, o puede devolver, a una tensión más baja, en cuyo caso es un transformador reductor.

En el caso en que la energía suministrada tenga la misma tensión, que la recibida en el transformador se dice entonces que este tiene una relación de transformación iguala a la unidad.

La f.e.m total inducida en cada uno de los arrollamientos debe ser proporcional al número de espiras que lo componen

*Ecuación 1. 6*

$$\frac{E1}{E2} = \frac{N1}{N2} \qquad (6)$$

La relación de tensiones E1, E2 y la relación de vueltas N1 Y N2 son ambas proporcionales a la relación inversa de las corrientes I2: I1.

*Ecuación 1. 7*

$$\frac{E1}{E2} = \frac{I2}{I1} \qquad (7)$$

*Ecuación 1. 8*

$$\frac{N1}{N2} = \frac{I2}{I1} \qquad (8)$$

O relación de vueltas

*Ecuación 1. 9*

$$\frac{E1}{E2} = \frac{Np}{Ns} = n \qquad (9)$$

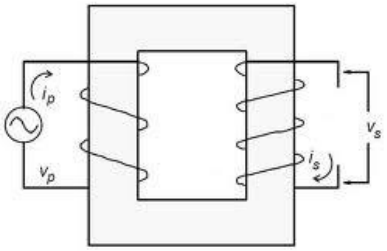



FIGURA 1.2.8 Transformador.

## RECTIFICADOR DE FILTRO CAPACITIVO

El capacitor es un elemento que almacena energía y que trata de mantener un voltaje constante. Con lo que se evita cualquier cambio del voltaje a través de la carga.

La primera parte del circuito consta de una fuente de voltaje alterna, seguido de un diodo que en esta ocasión será ideal (simplemente para facilitar la comprensión del funcionamiento) y finalmente el filtro RC.

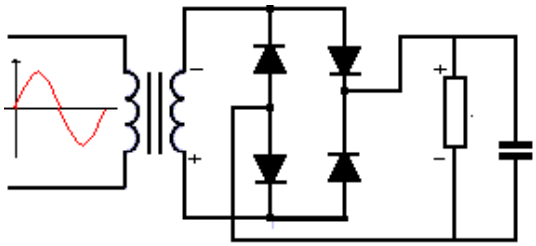


FIGURA 1.2.9 Rectificador de filtro capacitivo.

El voltaje del capacitor varía entre un valor mínimo y un valor máximo. Las formas de onda del voltaje de salida Vo.

Para Vo

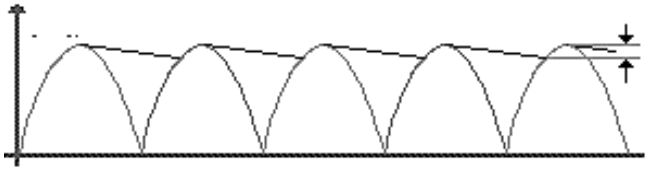


FIGURA 1.2.10a Señal de voltaje de salida.

Si f es la frecuencia de la fuente el periodo de voltaje de la entrada es T=1/f

- ✓ Para un rectificador de media onda el periodo de voltaje de rizo de salida es el periodo T del voltaje de alimentación.

- ✓ Sin embargo para un rectificador de onda completa el periodo del voltaje de rizo de salida es T/2.

T1 es el tiempo de carga del capacitor C.

T2 es el tiempo de descarga del capacitor C.

T1+T2 $\begin{cases} T/2 \text{ -> para onda completa} \\ T\text{-> para media onda} \end{cases}$

Por lo tanto T2>>T1.

El circuito equivalente de la carga se muestra a continuación

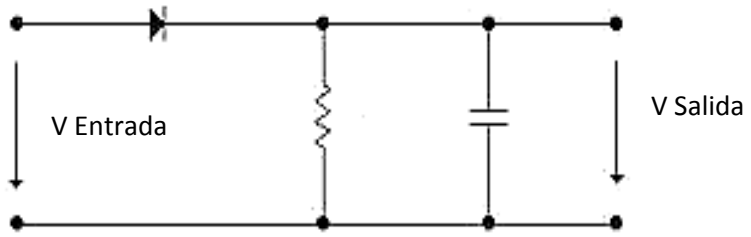



FIGURA 1.2.10b Circuito equivalente.

El capacitor se carga casi de forma instantánea del voltaje de alimentación pico Vm de modo de que Vc (t=t1)= Vm.

El capacitor se descarga de manera exponencial a través de la resistencia RL. La corriente de descarga se obtiene si se define el origen de tiempo en (T=0) como inicio del intervalo 1.

*Ecuación 1. 10*

$$\frac{1}{c}\int i_o dt - v_o(t=0) + R_L i_o = 0 \qquad (10)$$

Con la condición inicial de que:

$$v_c(t=t_1) = V_m \qquad i_o = \frac{V_m}{R_L} e^{-\frac{(t-t_1)}{R_L C}} \quad para\ \ t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$$

El voltaje de salida Vo del capacitor durante el periodo de descarga puede obtenerse de

Ecuación 1. 11

$$v_o(t) = R_L i_o = V_m e^{-\frac{(t-t2)}{R_L C}} \qquad (11)$$

El voltaje de rizo pico a pico Vr (pp) es

$$V_{r_{PP}} = v_o(t - t_1) - v_o(t = t_1 + t_2)$$

$$= V_m - V_m e^{-\frac{t_2}{R_L C}}$$

Ecuación 1. 12

$$V_{r_{PP}} = V_m \left(1 - e^{-\frac{t_2}{R_L C}}\right) \qquad (12)$$

Puesto que $e^{\wedge}(-x) \approx 1 - X$ la ecuación anterior puede simplificarse:

Ecuación 1. 13

$$V_{r_{PP}} = \begin{cases} Vm(t-1) + \dfrac{t2}{RlC} = \dfrac{Vm}{2fRlC} \;\; para\ Onda\ Completa \\ \dfrac{Vm}{fRlC} \;\; para\ \dfrac{1}{2}\ Onda \end{cases} \qquad (13)$$

Por consiguiente, el voltaje de salida promedio Vo (CD) es:

Ecuación 1. 14

$$V_{o_{CD}} = \begin{cases} \dfrac{Vm(4fRlC - 1)}{4fRlC} \;\; para\ Onda\ Completa \\ \dfrac{Vm(2fRlC - 1)}{2fRlC} \;\; para\ \dfrac{1}{2} Onda \end{cases} \qquad (14)$$

Supóngase que el voltaje de rizo es aproximadamente una onda senoidal en este caso el voltaje rms de rizo Vr(rms) del voltaje de salida se calcula dividiendo el voltaje de rizo pico entre 2.

*Ecuación 1. 15*

$$V_{r_{RMS}} = \begin{cases} \dfrac{Vr(pp)}{2\sqrt{2}} = \dfrac{Vm}{4\sqrt{2fRlC}} \;\; para\ Onda\ Completa \\ \dfrac{Vm}{2\sqrt{2fRlC}} \;\; para\ \dfrac{1}{2}\ Onda \end{cases} \qquad (15)$$

El factor de rizo del voltaje se calcula

*Ecuación 1. 16*

$$F.R. = \frac{Vr(rms)}{Vo(cd)} = \frac{Vm}{4\sqrt{2fRlC}} X \frac{4fRlC}{Vm(4fRlC-1)} \qquad (16)$$

Es un indicador de la efectividad del filtro mientras menor sea mejor será el filtro

*Ecuación 1. 17*

$$F.R. = \frac{1}{\sqrt{2(4fRlC-1)}} \;\; para\ Onda\ Completa \qquad (17)$$

*Ecuación 1. 18*

$$F.R. = \frac{1}{\sqrt{2(2fRlC-1)}} \;\; para\ \frac{1}{2}\ Onda \qquad (18)$$

# 1.2.2 DIODO ZENER

Se presenta a un potencial de polarización inversa. El diodo zener asume el estado de corto circuito después de que se alcanza el voltaje Vz.

Los diodos zener se obtienen con potenciales zener de 2.4 a 200v y valores nominales de potencia de ¼ a 50 W. debido a su más alta temperatura y su capacidad de corriente, suele referirse el silicio en la fabricación de los diodos zener.

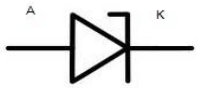



Figura 1.2.11 Símbolo del diodo zener.

El diodo zener tiene la configuración ánodo, cátodo (se polariza inversamente con respecto al diodo convencional).

## CARACTERÍSTICAS

Si a un diodo zener se le aplica una corriente eléctrica de ánodo a cátodo (polarización directa) toma las características de un diodo rectificador básico.

Pero si se le suministra corriente eléctrica del cátodo al ánodo. El diodo solo dejara pasar corriente constante.

Como podemos observar mediante este análisis podemos ver que el diodo zener debe ser polarizado al revés para que adopte su característica de regulador de tensión.

## Vi y R FIJAS

Como podemos observar las redes simples del diodo zener se encuentra en la figura 1.17. Se observa que el voltaje es fijo, así como la resistencia de carga.

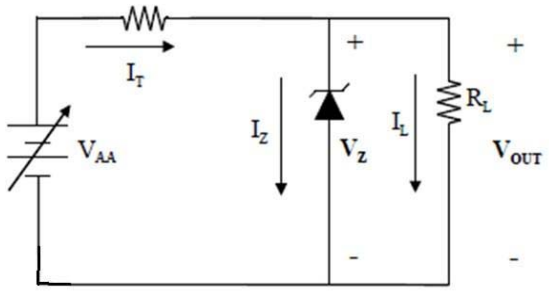



FIGURA 1.2.12 Análisis del diodo zener.

Ahora vamos a hacer el análisis en dos pasos:

1- Determinar el estado del diodo zener mediante su eliminación de red y calculando el voltaje a través del estado abierto resultante. Donde aplicando la regla del divisor del voltaje resultara:

*Ecuación 1. 19*

$$V = V_l = \frac{R_L}{R + R_L} \qquad (19)$$

SI V ≥$V_Z$, el diodo zener está en estado “encendido” y se puede sustituir el modelo equivalente. Si V<$V_Z$, el diodo está “apagado” y se sustituye la equivalencia de circuito abierto.

2- Sustituir el circuito equivalente adecuado y resolverlo para las incógnitas adecuadas.

Para la red en el estado “encendido” dará por resultado la red equivalente de la figura. Puesto que los voltajes a través de los elementos paralelos deben ser los mismos, se encuentra que:

$$V_L=V_Z$$

La corriente del diodo zener debe determinarse por la aplicación de la ley de corriente de Kirchhoff esto es:

$I_R=I_Z+I_L$ o $I_Z=I_R-I_L$

Donde

*Ecuación 1. 20*

$$I_l = \frac{V_L}{R_L} \qquad y \qquad I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V_i - V_L}{R} \qquad (20)$$

La potencia disipada por el diodo zener está determinada por:

$$Pz=Vz*Iz$$

Los diodos zener se utilizan con mayor frecuencia en las redes reguladoras o como un voltaje de referencia. Si el diodo zener emplea como un voltaje de referencia, ofrecerá un nivel para comprobarlo en función de otros voltajes.

## VI FIJO, RL VARIABLE

Debido el voltaje Vz existe un rango de valores de resistencia que aseguran que el dispositivo zener está en estado “encendido”. Una resistencia de carga $R_L$ muy pequeña genera un voltaje $V_L$ a través de la resistencia menor que $V_Z$ y el dispositivo zener estará en estado “apagado”.

Para determinar la resistencia de carga mínima que encenderá el diodo Zener, simplemente se calcula el valor de $R_L$ y dará como resultado un voltaje de carga $V_L$ = Vz, esto es:

*Ecuación 1. 21*

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R} \qquad (21)$$

Resolviendo $R_L$ tenemos:

*Ecuación 1. 22*

$$R_{Lmin} = \frac{RV_Z}{V_i - V_z} \qquad (22)$$

Cualquier valor de resistencia de carga mayor que el $R_L$ que se obtiene asegura que el diodo zener está en estado encendido y que el diodo puede ser remplazado por su fuente equivalente Vz.

La condición definida por la ecuación pasada establece que $R_L$ es mínima, pero su vez específica el IL máximo como:

*Ecuación 1. 23*

$$I_{Lmax} = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_{Lmin}} \qquad (23)$$

Una vez que el diodo está en estado "encendido", el voltaje a través de R permanece constante en:

$$V_R = V_i - V_Z$$

$I_R$ pertenece fija en:

*Ecuación 1. 24*

$$I_R = \frac{V_R}{R} \qquad (24)$$

La corriente zener:

*Ecuación 1. 25*

$$I_Z = I_R - I_L \qquad (25)$$

Resultando un $I_Z$ mínimo cuando $I_L$ es un máximo, y un $I_L$ es un valor mínimo debido a que $I_R$ es constante. Dado que $Iz$ está limitada a $Iz^M$, afecta el rango de $R_L$ y por lo tanto $I_L$.

Sustituyendo $Iz^M$ por Iz establece el $I_L$ mínimo como:

*Ecuación 1. 26*

$$I_Z = I_R - I_L \qquad (26)$$

Y la resistencia de carga máxima como:

*Ecuación 1. 27*

$$R_{Lmax} = \frac{V_Z}{I_{Lmin}} \qquad (27)$$

**$R_L$ FIJA, Vi VARIABLE**

Para los valores fijos de $R_L$, el voltaje Vi debe ser lo suficientemente grande para encender el diodo zener. El voltaje de encendido mínimo Vi= Vimin está determinado por:

*Ecuación 1. 28*

$$V_L = V_Z = \frac{R_L V_i}{R_L + R} \qquad (28)$$

*Ecuación 1. 29*

$$V_{imin} = \frac{(R_L + R)V_Z}{R_L} \qquad (29)$$

El valor máximo de Vi está limitado por la corriente zener máxima $Iz_M$. Debido a que $Iz_M = IR - IL$.

*Ecuación 1. 30*

$$I_{Rmax} = I_{ZM} + I_L \qquad (30)$$

Debido a que IL está fija en $V_{zI}R_L$ y que $I_{zM}$ es el valor máximo de Iz, el máximo Vi se define por:

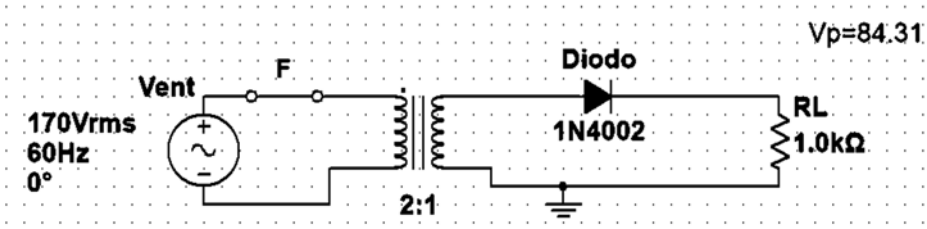
$$V_{imax} = V_{Rmax} + V_Z$$

*Ecuación 1. 31*

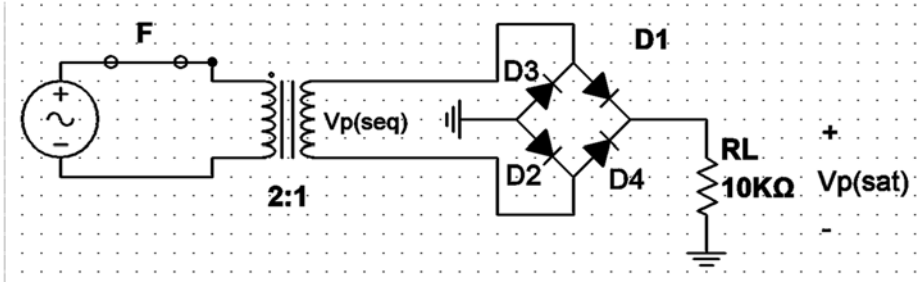
$$V_{imax} = I_{Rmax}R + V_Z \qquad (31)$$

## Ejercicios Propuestos

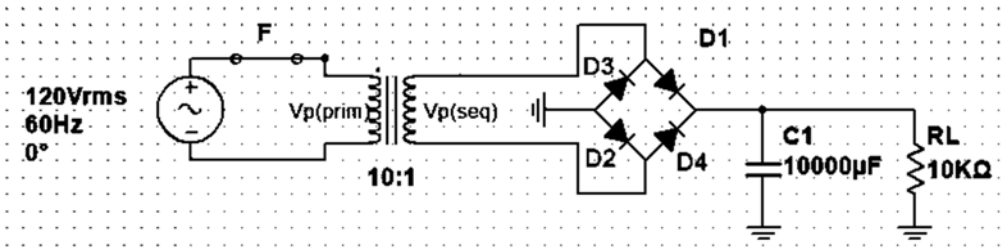
1. Determine el valor pico del voltaje de salida si la relación de vueltas es de 0.5.



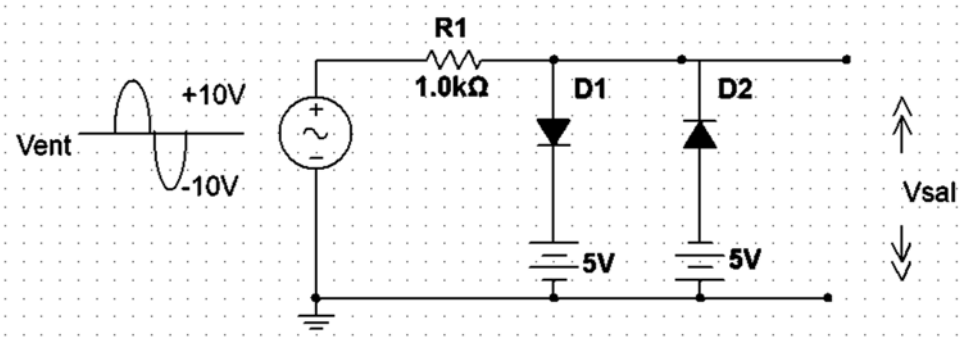

2. Determine el voltaje pico de salida para el rectificador tipo puente. Suponiendo el modelo práctico ¿Qué voltaje pico inverso nominal se requiere para los diodos? Se especifica que el transformador, tiene un voltaje rms de 12v en el secundario para los 120 V estándar a través del primario.




3. Determine el factor de rizo para el rectificador tipo puente con carga capacitivo.




4. Determine la forma de onda del voltaje de salida.




## 1.3 REGULADORES DE VOLTAJE

Un regulador de voltaje (también llamado estabilizador de voltaje o acondicionador de voltaje) es un equipo eléctrico que acepta una tensión eléctrica de voltaje variable a la entrada, dentro de un parámetro predeterminado mantiene a la salida una tensión constante (regulada).

Son diversos tipos de reguladores de voltaje, los más comunes son de dos tipos: para uso doméstico o industrial. Los primeros son utilizados en su mayoría para proteger equipo de cómputo, video, o electrodomésticos. Los segundos protegen instalaciones eléctricas completas, aparatos o equipo eléctrico sofisticado, fabricas, entre otros. El costo de un regulador de voltaje estará determinado en la mayoría de los casos por su calidad y vida útil en funcionamiento continuo.
Los últimos dos dígitos de la parte numérica designan el voltaje de salida. Por ejemplo el 7805 es un regulador de +5V.

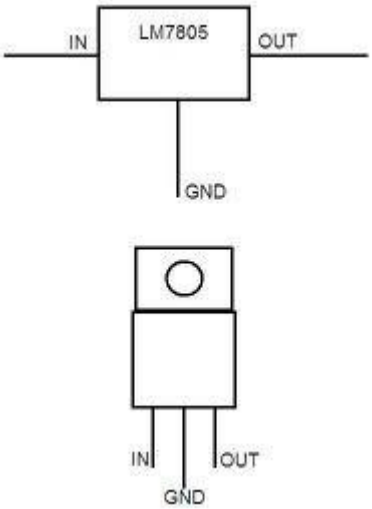



FIGURA 1.3.1 Regulador de voltaje.

| Número de tipo | Voltaje de salida |
|---|---|
| 7805 | +5.0 v |
| 7806 | +6.0 v |
| 7808 | +8.0 v |
| 7815 | +15.0 v |
| 7818 | +18.0 v |
| 7824 | +24.0v |

El capacitor de salida actúa básicamente como un filtro de línea a fin de mejorar la respuesta a oscilaciones momentáneas. El capacitor de entrada es para prevenir oscilaciones no deseadas cuando el regulador se encuentra a cierta distancia del filtro o de la fuente de alimentación.

## REGULADORES LINEALES Y DE VOLTAJE NEGATIVO FIJO.

| Número de tipo | Voltaje de salida |
|---|---|
| 7905 | -5.0v |
| 7905.2 | -5.2v |
| 7906 | -6.0v |
| 7908 | -12.0v |
| 7915 | -15.0v |

| | |
|---|---|
| 7918 | -18.0v |
| 7924 | -24.0v |

## REGULADORES LINEALES DE VOLTAJE NEGATIVO AJUSTABLE

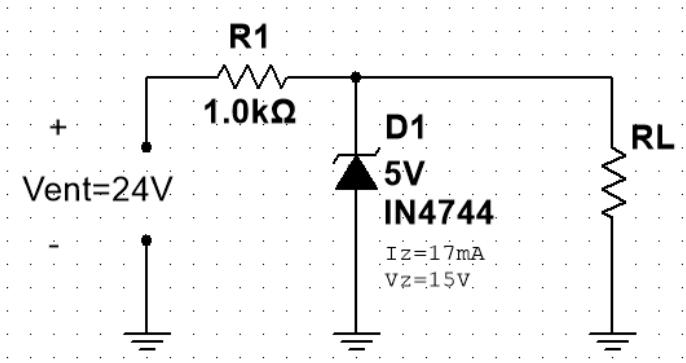
El LM337 requiere dos resistores externos para el ajuste de voltaje de salida. El voltaje de salida. Puede ajustarse desde -1.2v hasta -37v, dependiendo de los valores de los resistores externos.

### Ejercicios de repaso

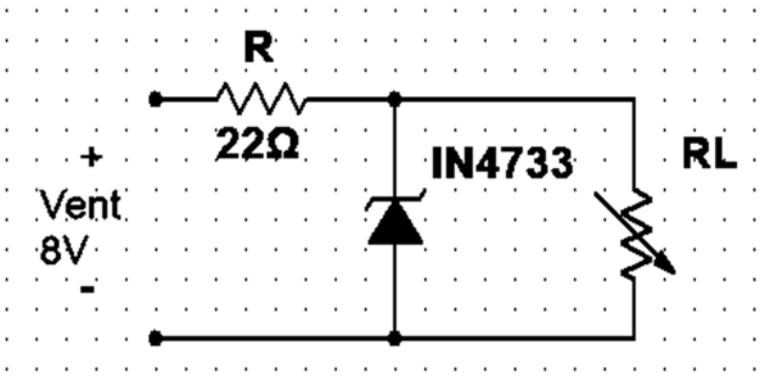
1. Para el siguiente circuito:
   a. Determine Vsal con $I_{ZK}$ e $I_{ZM}$
   b. Calcule el valor de R que deberá ser utilizado
   c. Determine el valor mínimo de $R_L$ que puede ser utilizado

   $Z_Z = 14\Omega$

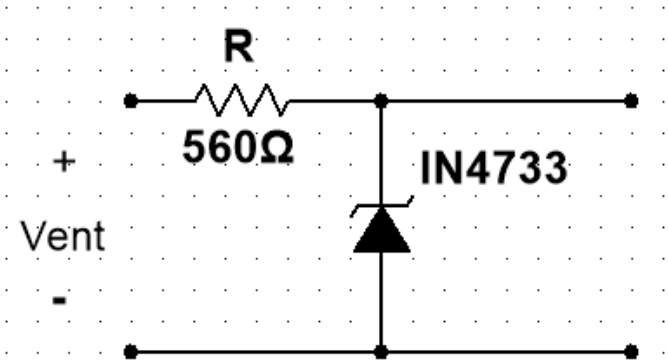
   $I_{ZK} = 0.25mA$




2. Se muestra un regulador zener con carga, Vz=5.1 con Iz=49mA, IZK=1mA, Zz=7.0 e IZK=70mA. Determine las corrientes de carga mínimas y máximas permisibles.




3. Determine el voltaje de entrada mínimo requerido para establecer la regulación. Suponga un diodo zener ideal con IZK=1.5Ma Y Vz=14V.




## 1.4 TRANSISTOR BIPOLAR (BJT)

Un transistor sin polarización es similar a dos diodos contrapuestos. Cada diodo tiene una barrera de polarización de 0.7 v. si se conectan fuentes de tensión externas para polarizar al transistor, se obtiene corriente a través de las diferentes partes del transistor.

Casi todos los electrones libres van hacia el colector, estando ya en el colector son atraídos por la fuente $V_{CC}$, como consecuencia, los electrones libres circulan a través del colector hasta que alcancen la terminal positiva de la fuente.

Como el emisor es la fuente de electrones, su corriente es mayor, casi todos los electrones del emisor circulan hacia el colector, por tanto la corriente de colector es iguala a la corriente del emisor.

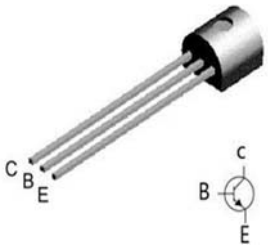



FIGURA1.4.1 BJT con sus respectivas entradas.

**ESTRUCTURA**

Un transistor de unión bipolar consiste en tres regiones semiconductoras dopadas: la región del emisor, la región de la base y la región del colector. Estas regiones son, respectivamente, tipo P, tipo N y tipo P en un PNP, y tipo N, tipo P, y tipo N en un transistor NPN. Cada región del semiconductor está conectada a un terminal, denominado emisor (E), base (B) o colector (C), según corresponda.

La base está físicamente localizada entre el emisor y el colector, y está compuesta de material semiconductor ligeramente dopado y de alta resistividad. El colector rodea la región del emisor, haciendo casi imposible para los electrones inyectados en la región de la base escapar de ser colectados, lo que hace que el valor resultante de α se acerque mucho hacia la unidad, y por eso, otorgar al transistor un valor grande de β.

**FUNCIONAMIENTO**

En una configuración normal, la unión emisor-base se polariza en directa y la unión base-colector en inversa. Debido a la agitación térmica los portadores de carga del emisor pueden atravesar la barrera de potencial emisor-base y llegar a la base. A su vez, prácticamente todos los portadores que llegaron son impulsados por el campo eléctrico que existe entre la base y el colector.

Un transistor NPN puede ser considerado como dos diodos con la región del ánodo compartida. En una operación típica, la unión base-emisor está polarizada en directa y la unión base-colector está polarizada en inversa. En un transistor NPN,

por ejemplo, cuando una tensión positiva es aplicada en la unión base-emisor, el equilibrio entre los portadores generados térmicamente y el campo eléctrico repelente de la región agotada se desbalancea, permitiendo a los electrones excitados térmicamente inyectarse en la región de la base. Estos electrones "vagan" a través de la base, desde la región de alta concentración cercana al emisor hasta la región de baja concentración cercana al colector. Estos electrones en la base son llamados portadores minoritarios debido a que la base está dopada con material P, los cuales generan "huecos" como portadores mayoritarios en la base.

La región de la base en un transistor debe ser constructivamente delgada, para que los portadores puedan difundirse a través de esta en mucho menos tiempo que la vida útil del portador minoritario del semiconductor, para minimizar el porcentaje de portadores que se recombinan antes de alcanzar la unión base- colector. El espesor de la base debe ser menor al ancho de difusión de los electrones.

## EL ALFA Y BETA DEL TRANSISTOR

Una forma de medir la eficiencia del BJT es a través de la proporción de electrones capaces de cruzar la base y alcanzar el colector. El alto dopaje de la región del emisor y el bajo dopaje de la región de la base pueden causar que muchos más electrones sean inyectados desde el emisor hacia la base que huecos desde la base hacia el emisor. La ganancia de corriente emisor común está representada por hfe. Esto es aproximadamente la tasa de corriente continua de colector a la corriente continua de la base en la región activa directa y es típicamente mayor a 100. Otro parámetro importante es la ganancia de corriente base común, La ganancia de corriente base común es aproximadamente la ganancia de corriente desde emisor a colector en la región activa directa. Esta tasa usualmente tiene un valor cercano a la unidad; que oscila entre 0.98 y 0.998.

## TIPO DE TRANSISTORES

- ✓ **NPN**

NPN es uno de los dos tipos de transistores bipolares, en los cuales las letras "N" y "P" se refieren a los portadores de carga mayoritarios dentro de las diferentes regiones del transistor.

Los transistores NPN consisten en una capa de material semiconductor dopado P (la "base") entre dos capas de material dopado N. Una pequeña corriente ingresando a la base en configuración emisor-común es amplificada en la salida del colector.

- ✓ **PNP**

El otro tipo de transistor de unión bipolar es el PNP con las letras "P" y "N" refiriéndose a las cargas mayoritarias dentro de las diferentes regiones del transistor.

Los transistores PNP consisten en una capa de material semiconductor dopado N entre dos capas de material dopado P. Los transistores PNP son comúnmente operados con el colector a masa y el emisor conectado al terminal positivo de la fuente de alimentación a través de una carga eléctrica externa. Una pequeña corriente circulando desde la base permite que una corriente mucho mayor circule desde el emisor hacia el colector.

## 1.4.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL BJT

La operación básica del transistor la explicaremos utilizando el transistor PNP de la figura 1.20. La operación del transistor NPN es exactamente la misma que si se intercambian funciones que cumplen un electrón y un hueco. En la figura 1.20 observamos que el espesor de la región de agotamiento se redujo debido a la polarización aplicada, lo que da por resultado un flujo muy considerable de

portadores mayoritarios desde el material tipo p hacia el tipo n.

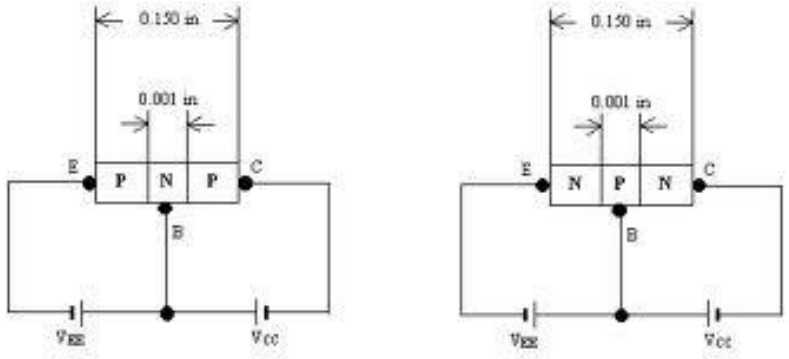



FIGURA 1.4.2 Composición del transistor.

En resumen podemos decir que:

La unión p-n de un transistor tiene polarización inversa, mientras que la otra tiene polarización directa. Al aplicar la ley de corriente de Kirchhoff al transistor como si fuera un solo nodo se obtiene.

*Ecuación 1. 32*

$$IE = IC + IB \qquad (32)$$

Sin embargo, la corriente del colector está formada por dos componentes: los portadores mayoritarios y minoritarios. Al componente de corriente minoritario se le denomina corriente de fuga y se le asigna el símbolo Ico, que se representa por la siguiente ecuación:

*Ecuación 1. 33*

$$I_c = I_{C_{MAYORITARIO}} - I_{CO_{MINORITARIO}} \qquad (33)$$

- ✓ CURVA CARACTERÍSTICA DE SALIDA

Se puede variar $V_{BB}$ Y $V_{CC}$ para establecer diferentes tensiones y corrientes en el transistor.

✓ ZONA ACTIVA

El diodo del emisor esta polarizado en directa y el diodo de colector en inversa. El colector recoge casi todos los electrones que el emisor envía a la base en la parte horizontal de la curva. La corriente de colector es constante en esta zona.

Se utiliza como amplificador en señales débiles.

✓ ZONA DE RUPTURA

El transistor nunca debe de funcionar en esta zona.

✓ ZONA DE SATURACIÓN

La parte ascendente de la curva donde $V_{CE}$ está comprendida entre cero y unas pocas decenas de voltaje. En esta zona, el diodo de colector tiene insuficiente tensión positiva para reconocer todos los electrones libres, inyectados en la base. La corriente $I_B$ es mayor que la normal y la ganancia en corriente $Bdc_G$ es menor de lo normal.

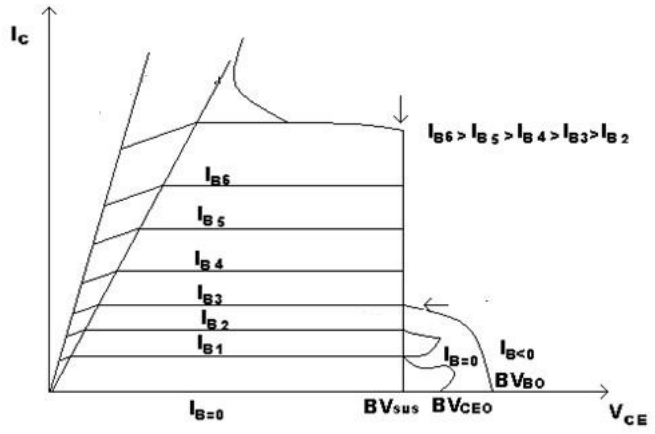



FIGURA 1.4.3 Representación del BJT.

**POLARIZACIÓN DE EMISOR**

La fuente de polarización de la base se aplica directamente a la base. El emisor ya está puesto a tierra ahora $V_E$ es mayor que la masa.

ZONA DE CORTE

La corriente de base es 0 aunque todavía existe $I_B$ (poca). La corriente del colector existe una pequeña corriente de colector aunque no existe $I_B$ ya que tiene una corriente inversa de portadores minoritarios y una corriente de fuga.

**POLARIZACIÓN DE TRANSISTORES**

- ✓ POLARIZACIÓN DE DIVISIÓN DE VOLTAJE

La polarización por divisor de voltaje mantiene un valor fijo de corriente de Ie a la ganancia de corriente emisor dando lugar a la independencia del punto Q frente a la ganancia de corriente.

- ✓ POLARIZACIÓN FIJA

Se mantienen las corrientes y voltajes de C.D. en base y el colector. Malla de salida. La corriente del colector se relaciona con la corriente de la base mediante la ganancia de corriente.

- ✓ CONFIGURACIÓN POLARIZACIÓN FIJA DE EMISOR COMUN

Se inicia eliminando los efectos de cd de $V_{CC}$ sustituyendo las capacidades de acoplamiento. Note que I no es la corriente base sino corriente de la fuente.

$Z_0$: la impedancia de salida, se define como la impedancia $Z_0$ determinada

Cuando Vi=0.
Si Vi=0, Ii, Ib=0 y hfe Ib=0

## 1.4.2 EL BJT EN ESTADO DE CONMUTACIÓN

Vc es opuesto al que se aplica a la base, no hay fuente conectada en la base. La única fuente esta en colector o salida. Se requiere que el punto de operación cambie desde el estado de corte al estado de saturación.

Si $I_c = I_{CE0} = 0$

Cuando $I_B = 0mA$ y $V_{CE} = V_{CE_{sat}} = 0v$

Si Vi= 5v el transistor estará encendido y se tendrá una completa saturación con $I_B$ mayor que el asociado con la curva de $I_B$ que aparece en el nivel de saturación. El nivel de saturación para la corriente de colector se define cómo

*Ecuación 1. 34*

$$I_{C_{sat}} = \frac{V_{CC}}{Rc} \qquad (34)$$

$I_B$ en la región activa, antes de la saturación se aproxima mediante

*Ecuación 1. 35*

$$I_{Bmax} \cong \frac{I_{C_{sat}}}{Rc} \qquad (35)$$

Para la saturación se debe garantizar la siguiente ecuación

$$I_B > \frac{I_{C_{sat}}}{\beta_{CD}}$$

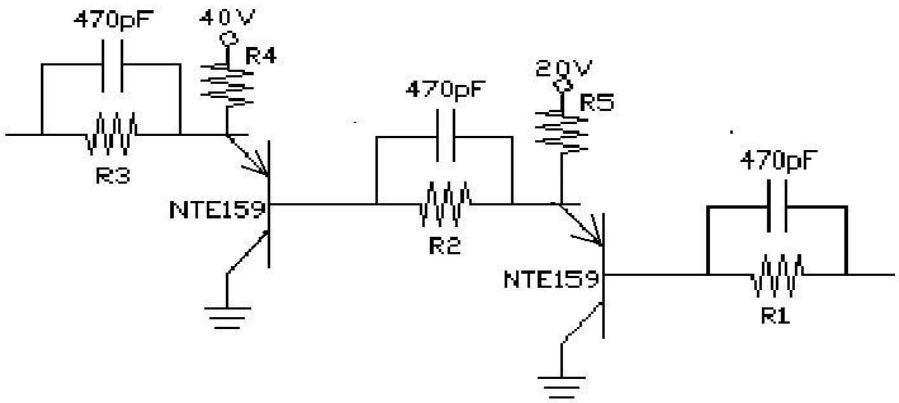



FIGURA 1.4.4 Circuitos de un transistor en conmutación.

El transistor puede emplearse como un interruptor. En el nivel de saturación la corriente Ic es bastante alta, mientras que el voltaje Vce es muy bajo y se obtiene el nivel de resistencia

*Ecuación 1. 36*

$$R_{sat} = \frac{V_{CE_{sat}}}{I_{C_{sat}}} \qquad (36)$$

- ✓ CONFIGURACIÓN BASE COMÚN

La terminal de la base está más cerca de un potencial de tierra. El conjunto de entradas para el amplificador en base común relaciona una corriente de entrada $I_E$ con un voltaje de entrada $V_{BE}$ para varios niveles de voltaje de salida.

En la región activa actúa la unión base-emisor, se polariza en directa, en tanto que la unión colector – base se polariza en inversa.

En la región de corte las uniones base-emisor y colector-base de un transistor se polariza en inversa.

En la región de saturación las uniones base-emisor y colector-base se polarizan en directa.

En la región de corte, tanto la unión base-colector como la unión emisor- base de un transistor tiene polarización inversa.

En la región de saturación, tanto la unión base-colector como la unión emisor- base están en polarización directa.

- ✓ CONFIGURACIÓN EMISOR-COMÚN

La configuración del transistor se le denomina configuración de emisor común debido a que el emisor es común o hace referencia a las terminales de entrada como de salida.

Las corrientes del emisor, colector y base se muestran en dirección convencional para la corriente. Al cambio de la configuración del transistor aún se puede analizar

las relaciones de corriente que se desarrollaron para la configuración de base común.

En la región activa de un amplificador de base común la unión del colector- base se encuentra polarizada inversamente, mientras que la unión base- emisor se encuentra polarizada directamente.

Para propósitos de amplificación lineal, el corte para la configuración de emisor común se definirá mediante Ic=Iceo.

- ✓ CONFIGURACIÓN DE COLECTOR COMUN

La configuración de colector común se utiliza sobre todo para propósitos de acoplamiento de impedancia, debido a que tiene una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, contrariamente a las configuraciones de base común y de emisor común.

Cuando seleccionamos un transistor tendremos que conocer el tipo de encapsulado, así como el esquema de identificación de las terminales. También tendremos que conocer una serie de valores máximos de tensiones, corrientes y potencias que no debemos sobrepasar para no destruir el dispositivo. El parámetro de la potencia disipada por el transistor es especialmente crítico con la temperatura, de modo que esta potencia disminuye a medida que crece el valor de la temperatura. Todos estos valores críticos los proporcionan los fabricantes en las hojas de características de los distintos dispositivos.

Una forma de identificar un transistor NPN o PNP es mediante un polímetro: Este dispone de dos orificios para insertar el transistor, uno para un NPN y otro para el PNP. Para obtener la medida de la ganancia es necesario insertarlo en su orificio apropiado, con lo que queda determinado si es un NPN o un PNP.

# 1.4.3 CONFIGURACIÓN PAR DIFERENCIAL

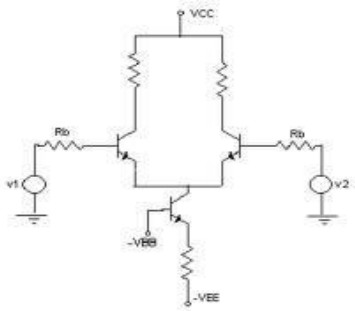



FIGURA 1.4.5 Configuración par diferencia.

Algunos circuitos tienen dos entradas y dos salidas por separado, y que los emisores se hallan conectados juntos. Son posibles una gran variedad de combinaciones de señal de entrada.

1) Si una señal de entrada se aplica a cualquiera de las entradas, con la otra entrada conectada a tierra, el modo de operación se conoce como de una sola entrada.

2) Si se aplican dos señales de entrada de polarización opuestas, el modo de operación se conoce como de doble entrada.

3) Si se aplica la misma señal a ambas entradas, el modo de operación se le conoce como de modo común.

- ✓ UNA SOLA ENTRADA

Debido a la conexión de emisor-común la señal de entrada opera ambos transistores, resultando en las salidas de ambos transistores.

- ✓ ENTRADA DOBLE

Se aplican dos señales de entrada, resultando la diferencia de las entradas en las salidas de ambos colectores, debido a la diferencia de las señales aplicadas a ambas entradas.

- ✓ MODO COMÚN

La señal común de entrada resulta en señales opuestas en cada colector,

cancelándose estos de tal modo que la señal resultante de salida es igual a cero. Desde un punto de vista práctico, las señales opuestas se cancelan por completo y se obtiene como resultado de una señal pequeña.

La principal característica del amplificador diferencial es la ganancia tan grande que se no obtiene cuando se aplican señales opuestas a la entradas en comparación con las ganancias tan pequeñas de las entradas en modo común.
El cociente del modo doble entrada con respecto a la ganancia en modo común se denomina rechazo en modo común.

- ✓ UNA SOLA ENTRADA

Si el voltaje de salida se aplica a T1, en la salida 1 aparecerá un voltaje amplificado e invertido. En el emisor de T1 aparecerá también un voltaje de señal en fase. Como los emisores de T1 y T2 son comunes, la señal del emisor se convierte en una entrada a T2, que funciona como amplificador de base-común. La señal es amplificada por T2, y aparece, sin inversión, en la salida 2. En el caso de que la señal es aplicada a la entrada 2, con la entrada 1 a la tierra como en la figura 1.24, entonces en la salida 2 aparece un volteje de señal amplificado e invertido, en este caso T1 actúa como amplificador en base-común y en la salida 1 aparece un voltaje de señal amplificado y no invertido.

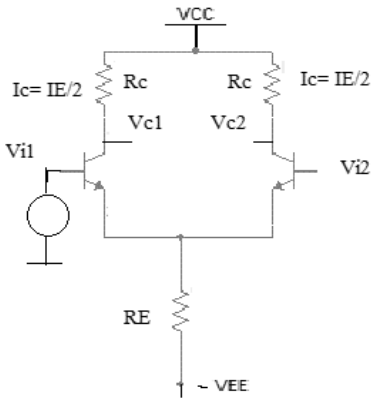



FIGURA 1.4.6 Configuración una sola entrada.

- ✓ ENTRADA DOBLE O ENTRADA N DIFERENCIAL

A la entrada se le aplica dos señales con polaridad opuesta (desfasada). Cada entrada afecta las salidas. Se muestran las señales de salida debidas a la señal en la entrada 1, operando solo como entrada de terminal sencilla.

Las señales de salida debidas a la señal de entrada 2, operando sola como entrada de terminal sencilla. Obsérvese que, en las partes que las señales en la salida 1 son de la misma polaridad, lo anterior se aplica para la salía 2. Por superposición de ambas señales de salida 1 y de ambas señales de salida 2 se obtiene la operación diferencial total como se muestra en la figura 1.25.

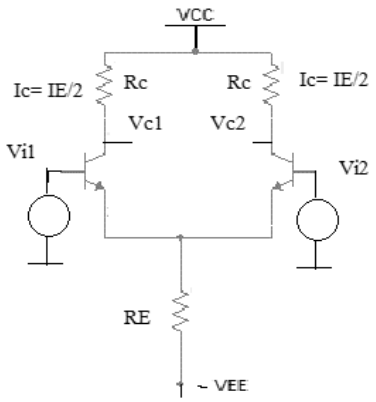



FIGURA 1.4.7 Representación de entrada diferencial VEE.

- ✓ ENTRADA EN COMÚN

Dos voltajes de señal de la misma fase, frecuencia y amplitud se aplican a las dos entradas, como se muestra en la figura 1.26.

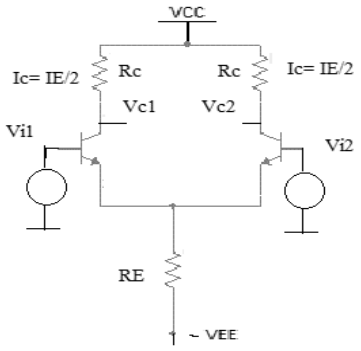



Figura 1.4.8 Configuración en Modo Común.

Nuevamente, la operación básica puede comprenderse considerando que cada señal de entrada actúa de manera individual. El funcionamiento se muestra en la figura 1.26.

Obsérvese que las señales correspondientes en la salida 1 son de polarización opuestas, y que así son también las de la salida 2.

Cuando estas señales se superponen, se cancelan originando un voltaje de salida nulo. Esta acción se le denomina RECHAZO EN MODO COMUN. Su importancia se manifiesta cuando una señal indeseada aparece comúnmente en ambas entradas del amplificador diferencial. Rechazo de modo común significa que esta señal indeseable no aparecerá en las salidas para distorsionar la señal deseada. Las señales en modo común (ruido) son el resultado de la captación de energía radiante en las líneas de entrada, de líneas ascendentes.

Las señales deseadas aparecen solamente en una entrada o con polaridades opuestas en ambas líneas de entrada. Estas señales deseadas son amplificadas y aparecen en las salidas.

La medida de la capacidad de un amplificador para rechazar señales en modo común es un parámetro denominado. RAZON DE RECHAZO EN MODO COMUN (RRMC).

## GANANCIA EN MODO COMUN

Idealmente, un amplificador diferencial proporciona una ganancia muy alta para las señales deseadas (terminal simple o diferencial), y ganancia cero para las señales de modo común. Sin embargo, los Amplificadores Diferenciales prácticos muestran una ganancia en modo común muy pequeña (usualmente menor de 1), a la vez proporciona una ganancia de voltaje diferencial alta (generalmente de varios miles).

En la medida en que la ganancia diferencial. Sea más alta que la del modo común, mejor será el desempeño del amplificador diferencial en términos de rechazo a las señales en modo común.

Una medida aceptable del desempeño de un amplificador diferencial para rechazar señales en modo común indeseables es la razón de la ganancia diferencial Av (d)

a la ganancia en modo común, Acm.

*Ecuación 1. 37*

$$RRMC = \frac{Av(d)}{Acm} = \frac{20\log\big(Av(d)\big)}{Acm(db)} \qquad (37)$$

-$T_1$ Y $T_2$ son iguales.
- Por tanto existe una perfecta simetría en ambos métodos del circuito

Del amplificador
*Ecuación 1. 38*

$$Vd=V_2-V_1 \qquad (38)$$

Vd= diferencia entre las tensiones de entrada
La ecuación 1 es la tensión de entrada en modo diferencial
Hallando un término que designe el valor medio de las tensiones de entrada, que llamaremos Va

$$Va = \frac{V_2 + V_1}{2}$$

Va es el promedio de las tensiones de entrada, se le denomina tensión de entrada en modo-común.
Resolviendo 1 y 2 hallamos $V_1$ y $V_2$ como función de Vd. Y Va

*Ecuación 1. 39*

$$V_2 = V_a + \frac{V_d}{2} \qquad (39)$$

*Ecuación 1. 40*

$$V_1 = V_a - \frac{V_d}{2} \qquad (40)$$

Si $V_1$= -V= $V_2$, la entrada en modo común es cero, y la entrada en modo diferencial es $V_d$.=2 $V_2$=-2$V_1$
Si $V_1$-$V_2$ la entrada en modo diferencial es cero y la entrada en modo común

$Va=V_1=V_2$

Calculando la ganancia en voltaje para 1 sola entrada, $V_2=0$

$I_{b1}=I_{b2}=I_b$.

Como $R_E$ muy grande (idealmente de magnitud)

*Ecuación 1. 41*

$$-V_{i1} + I_{bhie} + I_{bhie} = 0 \qquad (41)$$

Como $\beta_1 = \beta_2 = \beta$

*Ecuación 1. 42*

$$I_c = hfeI_b = hfe\frac{V_i}{2hie} \qquad (42)$$

El voltaje de salida es:

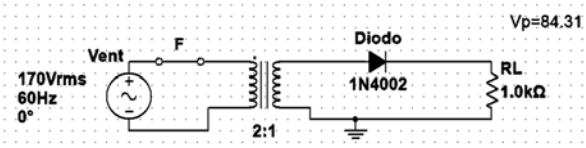
$$V_o = I_c R_c$$

*Ecuación 1. 43*

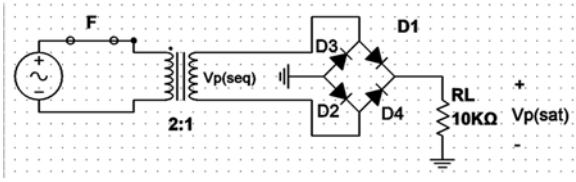
$$V_o = \frac{hfe}{2hie}R_c \qquad (43)$$

## Ejercicios de repaso

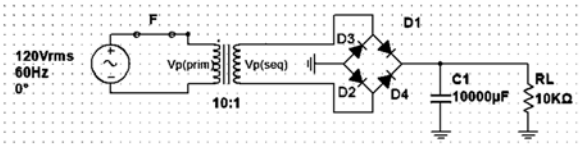
1. Determine el valor pico del voltaje de salida si la relación de vueltas es de 0.5.



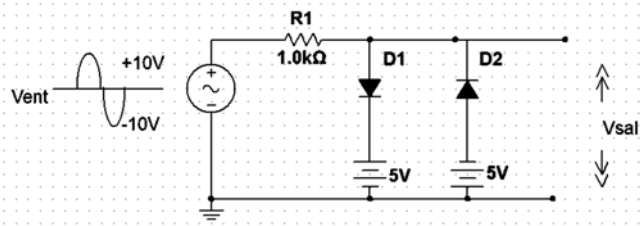

2. Determine el voltaje pico de salida para el rectificador tipo puente. Suponiendo el modelo práctico ¿Qué voltaje pico inverso nominal se requiere para los diodos? Se especifica que el transformador, tiene un voltaje rms de 12v en el secundario para los 120 V estándar a través del primario




3. Determine el factor de rizo para el rectificador tipo puente con carga capacitivo

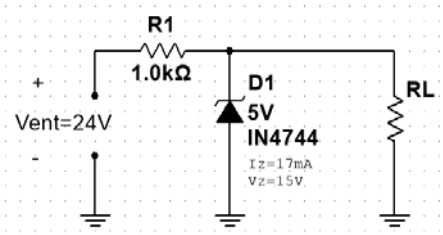



4. Determine la forma de onda del voltaje de salida

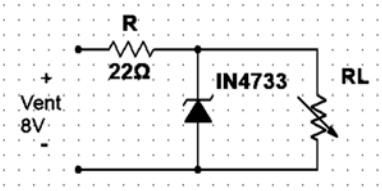



5. Para el siguiente circuito:
   a. Determine Vsal con $I_{ZK}$ e $I_{ZM}$
   b. Calcule el valor de R que deberá ser utilizado
   c. Determine el valor mínimo de $R_L$ que puede ser utilizado

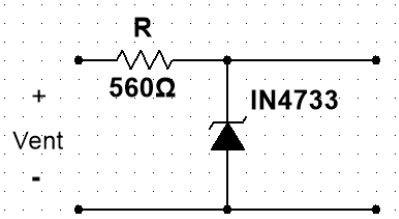
   $Z_Z = 14\Omega$, $I_{ZK} = 0.25mA$



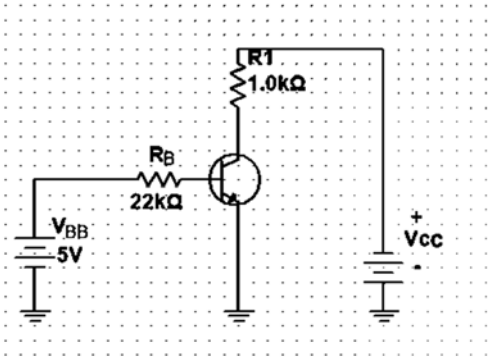

6. Se muestra un regulador zener con carga, Vz=5.1 con Iz=49mA, IZK=1mA, Zz=7.0 e IZK=70mA. Determine las corrientes de carga mínimas y máximas permisibles.



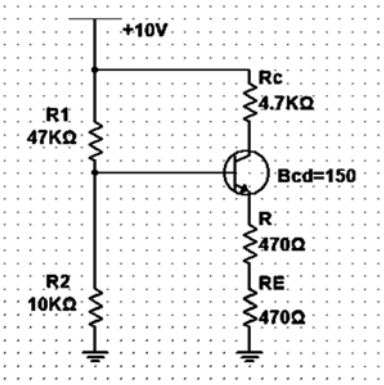

7. Determine el voltaje de entrada mínimo requerido para establecer la regulación. Suponga un diodo zener ideal con IZK=1.5Ma Y Vz=14V.



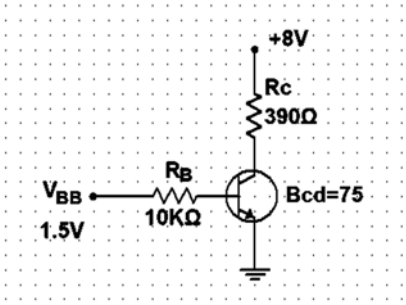

8. El transistor tiene los siguientes valores nominales máximos: $P_{D(MAX)} = 800mW, V_{CE(MAX)} = 5V\ e\ I_{C(MAX)} = 100\ mA.$ Determine el valor máximo al cual Vcc puede ser ajustado sin exceder un valor nominal. ¿Qué valor nominal se excederá primero?



9. Determine los valores de polarización en cd utilizando el siguiente circuito equivalente




10. Determine si el transistor está polarizado en corte, saturación o en la región lineal. Recuerde que Ic=βcd$I_C$ es válida sólo en la región lineal



# UNIDAD TEMÁTICA II AMPLIFICADORES OPERACIONALES

## 2.1 INTRODUCCIÓN A LOS AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional es uno de los dispositivos de mayor uso en aplicaciones lineales, con frecuencia se conoce en inglés como OP-AMP.

El término “operacional” de estos amplificadores originalmente se refería a operaciones matemáticas. Los primeros OP-AM se usaban en circuitos para sumar, restar, multiplicar e incluso resolver ecuaciones diferenciales.

Al emplear un instrumento para efectuar medición de alguna cantidad están involucrados de alguna manera, la variable a medir; el procesador o acondicionador y un elemento final.

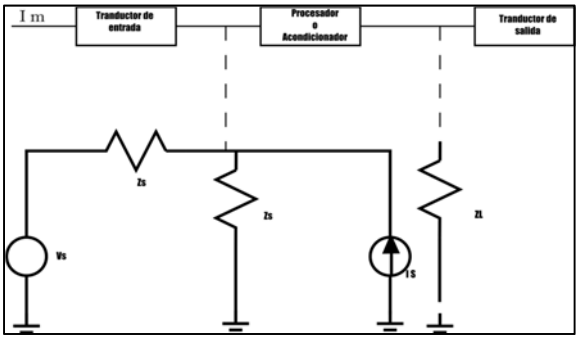



FIGURA 2.1.1 Estructura del OP-AMP.

Im = variable a medir de naturaleza:

- ✓ Mecánica
- ✓ Nuclear
- ✓ Hidráulica
- ✓ Química
- ✓ Acústica
- ✓ Tiempo

Io = Información en forma:

- ✓ Mecánica
- ✓ Óptica
- ✓ Acústica

En el caso de la instrumentación electrónica de medición el procesador opera sobre cantidades de naturaleza eléctrica (Q, I, V).Para medir cantidades de otra naturaleza diferente y aplicar la instrumentación electrónica a otros campos de la ingeniería se emplean transductores adecuados para convertir la variable a medir en una señal eléctrica, a este transductor se le llama de entrada.

En algunos instrumentos, después del procesador, se emplea un segundo transductor llamado transductor de salida como elemento final para transformar la señal eléctrica en alguna cantidad mecánica, óptica o acústica.

Considerando el procesador, el transductor de entrada puede representarse como una fuente de señal eléctrica caracterizada por su equivalente de Thevenin o Norton, dependiendo el mecanismo del transductor.

Similarmente el elemento final o transductor de salida puede caracterizarse por una impedancia Zl.

De esta manera se puede considerar que el procesador opera sobre señales de naturaleza eléctrica tanto a la entrada como a la salida. Por otra parte dependiendo de las características de Zs, ZL, Vs o Is y del tipo de instrumento, en general el procesador realiza una o más de las siguientes funciones:

- ✓ Amplificador de potencia, voltaje o corriente.
- ✓ Modificador de impedancias.
- ✓ Limitar señales para proteger el elemento final.
- ✓ Compensar no linealidades.
- ✓ Eliminar o atenuar señales indeseables.
- ✓ Acondicionar señales para su empleo en procesadores complejos.

En la actualidad se ha popularizado el empleo de OP-AMP para realizar (en gran parte) las funciones mencionadas; también se emplean en otros tipos de instrumentos electrónicos como fuentes de alimentación, generadores, moduladores, etc.

Un amplificador operacional es la forma más generalizada de un amplificador de alta ganancia acoplado a C.D. Con entrada diferencial. Usualmente se diseña para amplificar

señales sobre un amplio rango de frecuencia y normalmente se emplea con circuitos de electro alimentación externa.

Un amplificador operacional (OP-AMP) es un elemento activo con una alta relación de ganancia, diseñado para emplearse con otros elementos de circuito y efectuar una operación específica de procesamiento de señales.

## CIRCUITO DE INTERFAZ PARA UN TRANSDUCTOR

Un cliente desea automatizar una medición de presión, y para ello necesita convertir la salida del transductor de presión en una entrada de computadora. Esa conversión puede hacerse con un circuito integrado digital, llamado convertidor analógico – digital (CAD) que requiere un voltaje de entrada de 0 – 10 V cuando la salida del transductor varía de -250mV a 250mV. Se debe diseñar un circuito entre el transductor y el convertidor. Esto es, diseñar un circuito que cambie el intervalo de 0 a 10 V.

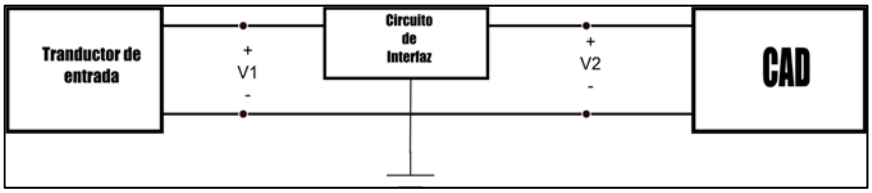



Figura 2.1.2 Circuito interfaz para un transductor.

Según las especificaciones:

*Ecuación 2. 1*

$$-250\ \text{mV} <= \ \text{V1} \ <= \ 250\ \text{mV} \qquad (1)$$

*Ecuación 2. 2*

$$0\,\mathrm{V} <= \mathrm{V2} \qquad (2)$$

Se necesita una relación sencilla entre V1 y V2 para que no se pierda la información acerca de la presión. Por ejemplo:

*Ecuación 2. 3*

$$V2 = aV1 + b \qquad (3)$$

Los coeficientes a y b se pueden calcular si se establece que V2= 0V cuando V1= -250 mV, y que V2=10V cuando V1 =250 mV esto es:

*Ecuación 2. 4*

$$0\,V = a\,(-250\,mV + b) \qquad (4)$$

*Ecuación 2. 5*

$$10\,V = a\,(250\,mV + b) \qquad (5)$$

Al resolver estas ecuaciones simultáneas se obtiene:

*Ecuación 2. 6*

$$a = 20\,V \qquad (6)$$

*Ecuación 2. 7*

$$b = 5V \qquad (7)$$

El objetivo es diseñar un circuito que tenga voltaje de entrada V1 y voltaje de salida V2. Estos voltajes deben de estar relacionados mediante la ecuación:

*Ecuación 2. 8*

$$V2 = 20\,V1 + 5V \qquad (8)$$

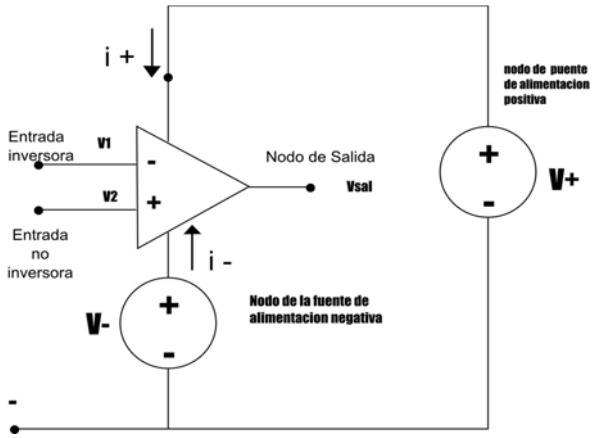



Figura 2.1.3 Símbolo común de un OP-AMP.

Un circuito de este tipo puede ser diseñado usando amplificadores operacionales.

En la figura 2.1.4 se muestra el símbolo común de un OP-AMP. Tiene dos terminales de entrada denominadas entrada inversora (-) y entrada no inversora (+), así como la terminal de salida.

El OP-AMP de la figura 2.1.3 tiene 5 terminales:

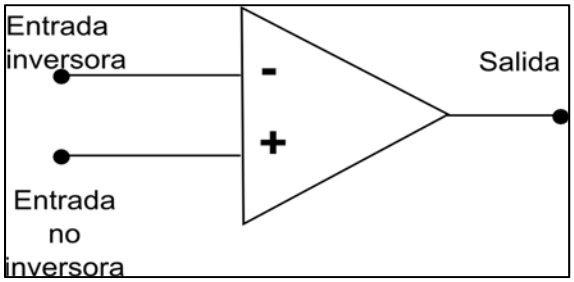



Figura 2.1.4 Terminales del OP-AMP.

Obsérvese que las terminales + y – indican la entrada no inversora e inversora respectivamente.

Las fuentes de poder se usan para polarizar al OP-AMP. En otras palabras, causan ciertas condiciones necesarias para que el OP-AMP trabaje en forma correcta. Una vez que el OP-AMP se ha polarizado, las fuentes de poder tienen poco efecto en su funcionamiento. No conviene incluir las fuentes de poder en los diagramas eléctricos, porque tienden a dificultar su interpretación. Se sobre entiende que las fuentes de poder son parte del circuito aun cuando no se indiquen.

## MODELO IDEAL DEL OP-AMP

Es conveniente introducir las características de un OP-AMP ideal, considerando que la mayoría de sus aplicaciones pueden analizarse y diseñarse por separado, el amplificador ideal obteniendo. Así UN OP-AMP ideal tiene las siguientes características:

- ✓ Resistencia de entrada infinita.
- ✓ Resistencia de salida.
- ✓ Ganancia de Voltaje infinito
- ✓ Ancho de banda infinito
- ✓ Balance Perfecto.
- ✓ Corriente de entrada cero
- ✓ Factor de rechazo en modo común infinito
- ✓ Todas las características iguales a cualquier temperatura.

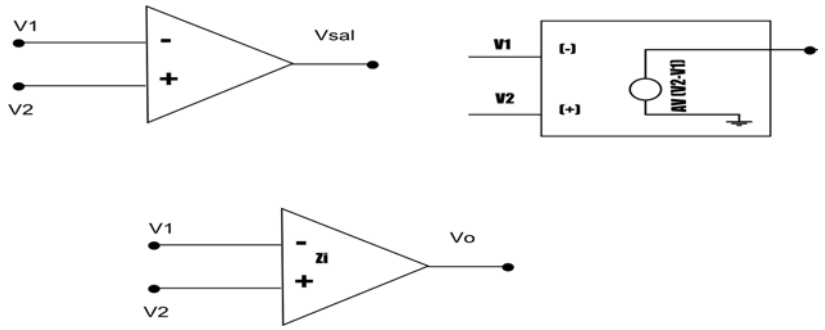



Figura. 2.1.5 Símbolo OP-AMP.

En la fig. 2.1.5 se muestra el símbolo empleado para representar el OP-AMP así como el circuito equivalente idealizado.

El modelo de circuito equivalente real de un OP-AMP consiste en una impedancia de entrada Zi conectada entre las dos terminales de entrada V1 y V2. El circuito de salida consiste de una fuente controlada de voltaje Av igual a Vd en serie con una resistencia de salida Ro conectada entre la terminal de salida y tierra.

Puesto que hemos supuesto que la fuente controlada de voltaje es:

*Ecuación 2. 9*

$$Av = Vd \qquad (9)$$

Tácticamente admitimos que la ganancia en modo común es nula. Este supuesto es válido para la mayoría de aplicaciones de los operacionales.

La figura del OP-AMP real se muestra a continuación

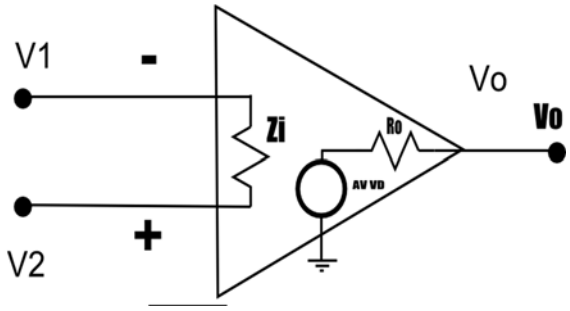



Figura 2.1.6 OP-AMP real.

La ganancia de voltaje Av del operacional suele ser grande (Típicamente 100,000) en comparación con la ganancia total del sistema en que se emplea.

Suele ser muy cómodo suponer que AV es infinito. Análogamente Zi es mucho mayor que las resistencias externas del sistema y a menudo se supone también que es infinita. La $R_0$ es, por otra parte, típicamente 100ohms y en muchas aplicaciones puede ser despreciable. Cuando se admiten estas aproximaciones se dice que el operacional es ideal.

Una observación muy importante que se debe hacer acerca de un operacional ideal es que el voltaje de entrada diferencial es:

*Ecuación 2. 10*

$$Vd = V2 - V1 \neq 0 \qquad (10)$$

La razón es que:

*Ecuación 2. 11*

$$Vd = \frac{Vo}{AV} \qquad (11)$$

Y si Vo es finita y AV es infinita, Vd debe de ser cero.

En la práctica el voltaje de salida de un operacional es menor de 10 V

Si suponemos que AV = 100,000, el voltaje de entrada diferencial que produce 10 V en la salida es:

*Ecuación 2. 12*

$$Av = \frac{Vo}{Vd} => Vd = \frac{Vo}{Av} \qquad (12)$$

*Ecuación 2. 13*

$$Vd = \frac{10\,V}{100000} = 100\,\mu V \qquad (13)$$

La cual es una cantidad tan pequeña que usualmente puede ser despreciada. Así pues generalmente Vd es casi 0, incluso en un operacional real y decimos que "la entrada de un operacional es un corto circuito virtual".

Esto implica que V1 es diferente a V2, y puesto que Zi, que es la impedancia entre $V_1$ y $V_2$, es muy grande, la corriente en Zi puede ser generalmente despreciada, siendo del orden de:

*Ecuación 2. 14*

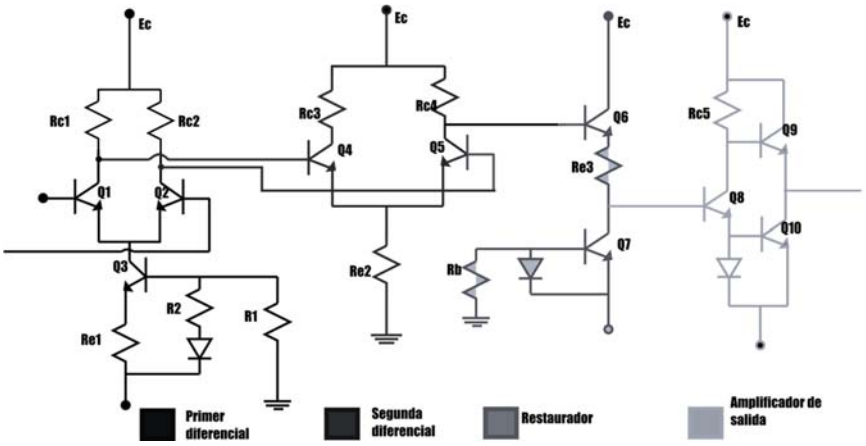
$$Izi = \frac{Vd}{Zi} = 100\,\mu V \qquad (14)$$

*Ecuación 2. 15*

$$Izi = 1\,nA \qquad (15)$$

# ARQUITECTURAS DE OP – AMP (A BLOQUES)

El amplificador diferencial y de la etapa de ganancia de voltaje son las únicas etapas que brindan la ganancia del voltaje.




En la figura 2.1.7 se muestra el diagrama eléctrico correspondiente.

Las salidas diferenciales de la primera etapa se acoplan directamente con las entradas diferenciales de la segunda etapa. La salida del restaurador de nivel. La salida del restaurador se conecta para excitar a un seguidor- emisor a fin de obtener una impedancia de salida relativamente baja. Ambas etapas diferenciales juntas proporcionan una amplia ganancia en voltaje y un FRMC (factor de rechazo en modo común) grande.

# PARÁMETROS IDEALES Y REALES DEL OP-AMP

Voltaje de compensación (Offset) en la entrada. El OP-AMP ideal produce cero volts de salida para cero volts de entrada, existe un balance perfecto entre los voltajes de entrada, es decir:

*Ecuación 2. 16*

$$Vo = 0 \ cuando \ V1 = V2 \qquad (16)$$

Teniéndose que:

*Ecuación 2. 17*

$$V1 - V2 = 0 \qquad (17)$$

Sin embargo en el OP-AMP real, debido al desbalance de los voltajes de la unión Base-Emisor $V_1$-$V_2$ diferente a 0, por lo que el voltaje ≠ 0 como se ilustra en la figura 2.1.8.

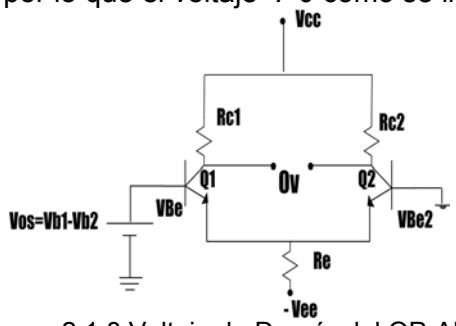



Figura 2.1.8 Voltaje de Desvío del OP-AMP

El voltaje de salida de la etapa de entrada diferencial se expresa como:

*Ecuación 2. 18*

$$Vsal = I_{C2}R_{C2} - I_{C1}R_{C1} \qquad (18)$$

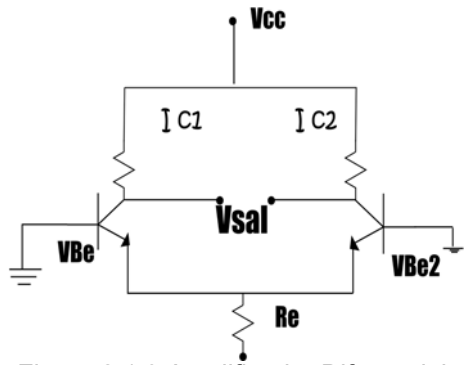



Figura 2.1.9 Amplificador Diferencial.

Una pequeña diferencia en los voltajes base emisor de Q1 y Q2 origina una pequeña diferencia en las corrientes del colector. Lo anterior origina un valor no nulo de Vsal. Para eliminar esta desventaja se debe aplicar un voltaje entre las terminales de entrada para balancear cualquier diferencia de voltajes Base-Emisor y obtener así la salida a 0. A este voltaje requerido para balancear el amplificador (obtener la salida 0) se le llama voltaje de entrada de desbalance Vos (input offset- voltaje). En la figura 2.1.9 se muestra la señal Vos, necesaria para Vsal=0.

Deriva del voltaje de compensación en la entrada con la temperatura (Drift del voltaje de offset).

Especifica la cantidad de cambio que tiene lugar en el voltaje de compensación de entrada por cada cambio de 1 grado en la temperatura. El rango de valores usuales varía de 5micro volts por °C hasta 50 micros Volts por °C. Comúnmente un OP-AMP con valor nominal más alto de voltaje de compensación de entrada presenta una derivada más elevada.

## 2.2 CONFIGURACIONES BÁSICAS

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones (1) inversora y (2) no inversora. Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas. Además, existen variaciones estrechamente relacionadas de estos dos circuitos, más otro circuito básico que es una combinación de los dos primeros: el amplificador diferencial.

### 2.2.1 AMPLIFICADOR INVERSOR

La siguiente figura ilustra la primera configuración básica del AO. El amplificador inversor. En este circuito, la entrada (+) está a tierra, y la señal se aplica a la entrada (-) a través de R1, con realimentación desde la salida a través de R2.

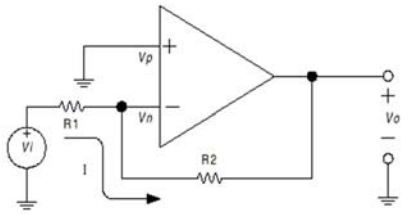



Figura 2.2.1 Amplificador Inversor.

Aplicando las propiedades anteriormente establecidas del OP-AMP ideal, las características distintivas de este circuito se pueden analizar como sigue:

Puesto que el amplificador tiene ganancia infinita, desarrollará su voltaje de salida, $V_0$, con voltaje de entrada nula. Ya que, la entrada diferencial de A es:

*Ecuación 2. 19*

$$Vd = Vp - Vn \implies Vd = 0 \;\; Y\, si \;\; Vd = 0 \qquad (19)$$

Entonces toda la voltaje de entrada Vi, deberá aparecer en $R_1$, obteniendo una corriente en $R_1$.

*Ecuación 2. 20*

$$I = \frac{V_i}{R_1} \qquad (20)$$

Vn está a un potencial cero, es un punto de tierra virtual.

Toda la corriente I que circula por $R_1$ pasará por $R_2$, puesto que no se derivará ninguna corriente hacia la entrada del operacional (Impedancia infinita), así pues el producto de I por R2 será igual a - V0

*Ecuación 2. 21*

$$I = -\frac{V_0}{R_2} \qquad (21)$$

Ecuación 2. 22

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_0}{R_2} \qquad (22)$$

Por lo que:

Ecuación 2. 23

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i \qquad (23)$$

Luego la ganancia del amplificador inversor:

Ecuación 2. 24

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \qquad (24)$$

Deben observarse otras propiedades adicionales del amplificador inversor ideal. La ganancia se puede variar ajustando $R_1$, o bien $R_2$. Si $R_2$ varía desde cero hasta infinito, la ganancia variará también desde cero hasta infinito, puesto que es directamente proporcional a $R_2$. La impedancia de entrada es igual a $R_1$, y $V_i$ y $R_1$ únicamente determinan la corriente I, por lo que la corriente que circula por $R_2$ es siempre I, para cualquier valor de dicha $R_2$.

La entrada del amplificador, o el punto de conexión de la entrada y las señales de realimentación, es un nudo de voltaje nulo, independientemente de la corriente I. Luego, esta conexión es un punto de tierra virtual, un punto en el que siempre habrá el mismo potencial que en la entrada (+). Por tanto, este punto en el que se suman las señales de salida y entrada, se conoce también como nodo suma. Esta última característica conduce al tercer axioma básico de los amplificadores operacionales, el cual se aplica a la operación en bucle cerrado:

En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia.

Esta propiedad puede aún ser o no ser obvia, a partir de la teoría de voltaje de entrada de diferencial nula. Es, sin embargo, muy útil para entender el circuito del OP-AMP, ver la entrada (+) como un terminal de referencia, el cual controlará el nivel que ambas entradas asumen. Luego este voltaje puede ser tierra (como en la figura 2.2.1), o cualquier potencial que se desee.

## 2.2.2 AMPLIFICADOR NO-INVERSOR

La segunda configuración básica del AO ideal es el amplificador no inversor, mostrado en la siguiente figura.

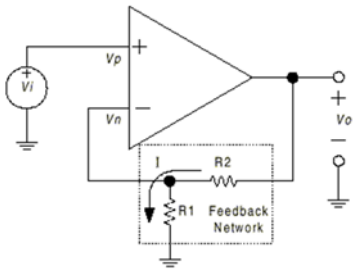



Figura 2.2.2 Amplificador No Inversor.

En este circuito, la voltaje $V_i$ se aplica a la entrada (+), y una fracción de la señal de salida Vo, se aplica a la entrada (-) a través del divisor de voltaje $R_1$ - $R_2$. Puesto que no fluye corriente de entrada en ninguna terminal de entrada, y ya que $V_d = 0$, la voltaje en $R_1$ será igual a $V_i$.

Así pues

*Ecuación 2. 25*

$$V_i = I \cdot R_1 \qquad (25)$$

Y como

*Ecuación 2. 26*

$$V_0 = I \cdot (R_1 + R_2) \qquad (26)$$

Tendremos que:

*Ecuación 2. 27*

$$V_0 = \frac{V_i}{R_1} \cdot (R_1 + R_2) \qquad (27)$$

Si se expresa en términos de ganancia:

Ecuación 2. 28

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \qquad (28)$$

Es la ecuación característica de ganancia para el amplificador no inversor ideal.

También se pueden deducir propiedades adicionales para esta configuración. El límite inferior de ganancia se produce cuando $R_2 = 0$, lo que da lugar a una ganancia unitaria.

En el amplificador inversor, la corriente a través de $R_1$ siempre determina la corriente a través de $R_2$, independientemente del valor de $R_2$, esto también es cierto en el amplificador no inversor. Luego $R_2$ puede utilizarse como un control de ganancia lineal, capaz de incrementar la ganancia desde el mínimo unidad hasta un máximo de infinito. La impedancia de entrada es infinita, puesto que se trata de un amplificador ideal.

## 2.2.3 SUMADOR INVERSOR

Utilizando la característica de tierra virtual en el nudo suma (-) del amplificador inversor, se obtiene una útil modificación, el sumador inversor.

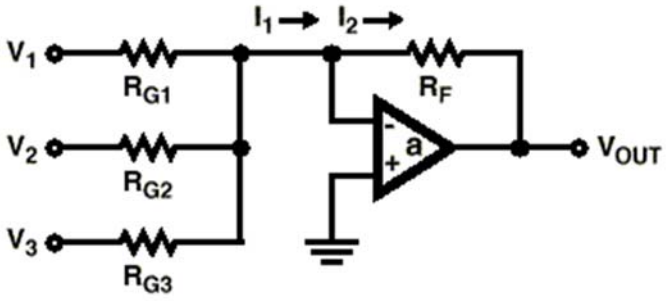



Figura 2.2.3 Sumador Inversor.

En este circuito, como en el amplificador inversor, el voltaje V(+) está conectada a tierra, por lo que el voltaje V(-) estará a una tierra virtual, y como la impedancia de entrada es infinita toda la corriente $I_1$ circulará a través de $R_F$ y la llamaremos $I_2$. Lo que ocurre en este caso es que la corriente $I_1$ es la suma algebraica de las corrientes proporcionadas por $V_1$, $V_2$ y $V_3$, es decir:

Ecuación 2. 29

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{G1}} + \frac{V_2}{R_{G2}} + \frac{V_3}{R_{G3}} \qquad (29)$$

Y también

Ecuación 2. 30

$$I_2 = -\frac{V_{OUT}}{R_F} \qquad (30)$$

Como $I_1 = I_2$ concluimos que:

Ecuación 2. 31

$$V_{OUT} = -(V_1 \cdot \frac{R_F}{R_{G1}} + V_2 \cdot \frac{R_F}{R_{G2}} + V_3 \cdot \frac{R_F}{R_{G3}}) \qquad (31)$$

Que establece que la voltaje de salida es la suma algebraica invertida de las tensiones de entrada multiplicadas por un factor corrector, que el alumno puede observar que en el caso en que $R_F = R\ G_1 = R\ G_2 = R\ G_3$ ==> $V_{OUT} = -(V_1 + V_2 + V_3)$,

La ganancia global del circuito la establece $R_F$, la cual, en este sentido, se comporta como en el amplificador inversor básico. A las ganancias de los canales individuales se les aplica independientemente los factores de escala $R\ G_1$, $R\ G_2$, $R\ G_3$,... etc. Del mismo modo, $R\ G_1$, $R\ G_2$ y $R\ G_3$ son las impedancias de entrada de los respectivos canales.

Otra característica interesante de esta configuración es el hecho de que la mezcla de señales lineales, en el nodo suma, no produce interacción entre las entradas, puesto que todas las fuentes de señal alimentan el punto de tierra virtual. El circuito puede acomodar cualquier número de entradas añadiendo resistencias de entrada adicionales en el nodo suma.

Aunque los circuitos precedentes se han descrito en términos de entrada y de resistencias de realimentación, las resistencias se pueden reemplazar por elementos complejos, y los axiomas de los amplificadores operacionales se mantendrán como verdaderos. Dos circuitos que demuestran esto, son dos nuevas modificaciones del amplificador inversor.

## 2.2.4 RESTADOR

Se ha visto que ambas configuraciones básicas del OP-AMP actúan para mantener constantemente la corriente de realimentación, $I_F$ igual a $I_{IN}$.

El amplificador operacional restador básico puede considerarse que está formado por un amplificador operacional inversor y por otro amplificador operacional no inversor.

Como ocurría en el amplificador inversor, V(-) = 0, puesto que V(+) = 0, y por tener impedancia infinita toda la corriente de entrada $I_{IN}$ pasa hacia el condensador CF, llamaremos a esta corriente IF.

El elemento realimentador en el integrador es el condensador CF. Por consiguiente, la corriente constante IF, en CF da lugar a una rampa lineal de voltaje. El voltaje de salida es, por tanto, la integral de la corriente de entrada, que es forzada a cargar CF por el lazo de realimentación.

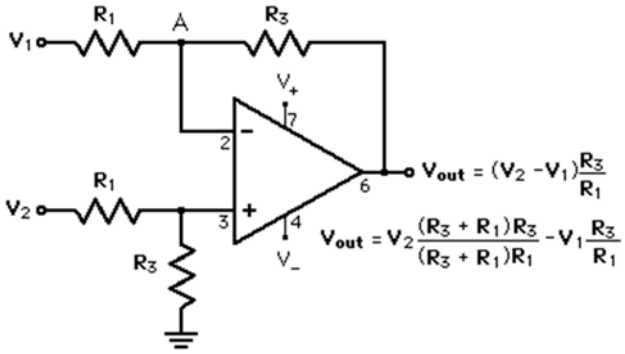



Figura 2.2.4 Amplificador Sumador.

## 2.3 COMPARADORES

En efecto, los OP-AMP´s pueden actuar como comparadores cuando su ganancia en lazo abierto sea muy elevada y su velocidad (SR) alta.

La función del comparador consiste en cotejar dos voltajes, obteniéndose como resultados dos posibles situaciones, correspondientes a los niveles alto o bajo. Ya vimos que en lazo abierto, el OP-AMP de propósito general se comporta como detector de nivel y los voltajes

alto y bajo de salida corresponden a las de saturación del componente. Precisamente es ésta la tercera limitación crítica a la hora de decidirse por un OP-AMP de propósito general en una aplicación de comparación, ya que los niveles de salida pueden no ser adecuados a la aplicación, como por ejemplo para direccional una lógica TTL. El concepto de salida en “colector abierto” soluciona este problema.

### 2.3.1 DETECTORES DE CRUCE POR CERO

Los detectores de cruce por cero se utilizan para detectar los tipos de señales, o diferentes significados de señales. Algo muy simple sería considerar una señal que en su parte positiva indicará un '1 lógico' y en su parte negativa un '0 lógico'. El detector de cruce por cero es parte del circuito de detección 'por nivel' para determinar si se ha recibido un 'uno' o un 'cero'. Con señales analógicas los detectores de cruce por cero operan con formas de ondas mucho más variantes que las del caso digital, se pueden utilizar para determinar el tipo de la forma de onda, el nivel promedio de la señal, ayudar a integrar o diferenciar señales, etc.

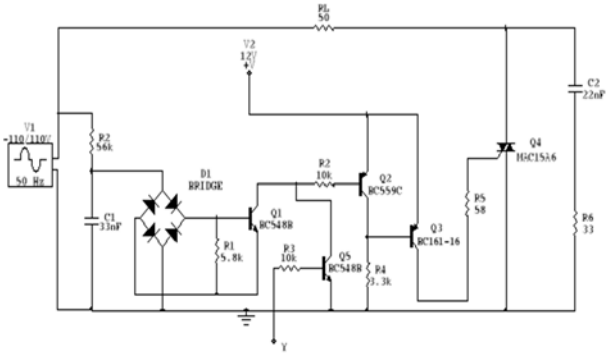



Figura 2.3.1 Detector de Cruce por cero

## 2.3.2 DETECTORES DE NIVEL

La función de un detector de nivel, también llamado detector de umbral, monitorea una variable física que pueda ser expresada en términos de un voltaje, y enviar una señal cada vez que la variable sobrepase o caiga por debajo de un valor preestablecido llamado el valor de referencia.

Entonces, se usa la salida del detector para ejecutar una acción específica de acuerdo con lo que requiera la aplicación. Algunos ejemplos típicos son la activación de un indicador de alarma, como un diodo de luz (LED) o un zumbador, el encendido de un motor o calentador, o la generación de una interrupción en el microprocesador.

Como se muestra en la figura 2.3.2, los componentes básicos de un detector de nivel son:

a).- Una referencia de voltaje VREF para crear un umbral estable.

b).- Un divisor de voltaje R1 y R2, para escalar la entrada.

c).- Un comparador.

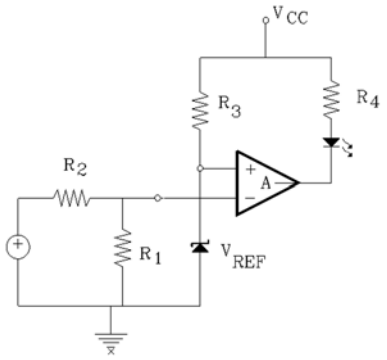



Figura 2.3.2 Detector de Nivel.

El comparador de activa cada vez que el voltaje de entrada se eleva por encima de la caída de voltaje en R1, es tal que:

*Ecuación 2. 32*

$$V_{REF} = V_T \left[ \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right] \qquad (32)$$

Ecuación 2. 33

$$V_T = V_{REF}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right) \qquad (33)$$

Si el voltaje de entrada es menor que $V_T$ el led está apagado, si es mayor que $V_T$ hace que el led se encienda, lo que proporciona una indicación del momento en que el voltaje de entrada se eleva por encima de $V_T$.

Si se intercambian las terminales de entrada, se invierte la lógica de encendido del led, la función de $R_3$ es polarizar el diodo para tener su referencia y la de $R_4$ es fijar la corriente necesaria para encender el led.

## 2.3.3 DETECTORES CON HISTÉRESIS

Hay una técnica estándar para mostrar el comportamiento de un comparador en una gráfica en lugar de dos gráficas. Al graficar $E_i$ en el eje horizontal y $V_o$ en el eje vertical, se obtiene la característica de voltaje de entrada-salida, como en la figura siguiente.

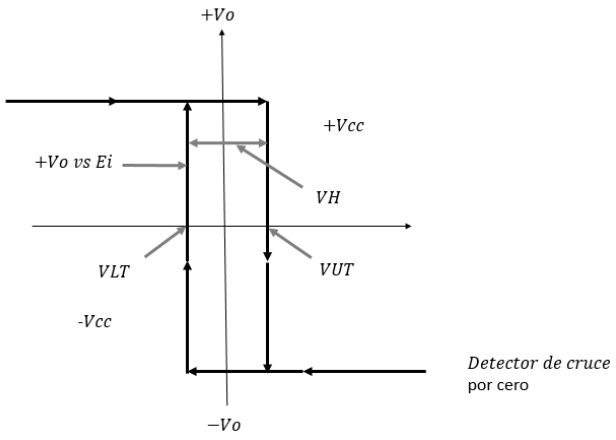



Figura 2.3.3 Gráfica de transferencia del detector con Histéresis.

Para $E_i$ menor de $V_{LT}$, $V_o = +V_{cc}$. La línea vertical de bajada muestra $V_o$ que va desde $+V_{cc}$ hasta $-V_{cc}$ conforme $E_i$ se vuelve mayor que $V_{UT}$. La línea vertical de subida muestra $V_o$ cambiando desde $-V_{cc}$ hasta $+V_{cc}$ cuando $E_i$ se vuelve menor que $V_{LT}$.

La diferencia en voltajes entre $V_{UT}$ y $V_{LT}$ se denomina "Voltaje de Histéresis $V_H$".

Siempre que cualquier circuito cambia de un estado a un segundo estado a cierta señal de entrada, entonces revierte del segundo al primer estado a una señal de entrada diferente, se dice que el circuito exhibe "histéresis". Para el comparador de realimentación positiva, la diferencia en las señales de entrada es:

*Ecuación 2. 34*

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} \qquad (34)$$

## DETECTORES DE NIVEL DE VOLTAJE CON HISTÉRESIS

También es deseable Tener una colección de circuitos que presentan histéresis alrededor de un voltaje de centro que es positivo o negativo.

Como pudimos observar en la ecuación 77, el voltaje de histéresis $V_H$ debe centrarse en el promedio de $V_{UT}$ y $V_{LT}$. Este promedio se denomina voltaje centrado $V_{CTR}$, donde

*Ecuación 2. 35*

$$VCTR = \frac{(VUT + VLT)}{2} \qquad (35)$$

Cuando se trata de construir este tipo de detector de nivel de voltaje, es deseable tener cuatro características:

1) Una resistencia ajustable para establecer y disminuir el valor de $V_H$.

2) Una resistencia ajustable separada para establecer el valor de $V_{CTR}$.

3) El ajuste de $V_H$ y $V_{CTR}$ no debe interaccionar.

4) El voltaje centrado $V_{CTR}$ debe igualar, o estar relacionado en forma simple con un voltaje externo de referencia $V_{ref}$.

## 2.4 CONFIGURACIONES ESPECIALES

Ya se han observa las configuraciones básicas del OP-AMP, ahora veremos algunas de la configuraciones especiales del OP-AMP, llamadas así por las operaciones especiales que realiza.

### 2.4.1 INTEGRADOR

Se ha visto que ambas configuraciones básicas del OP-AMP actúan para mantener constantemente la corriente de realimentación, $I_F$ igual a $I_{IN}$.

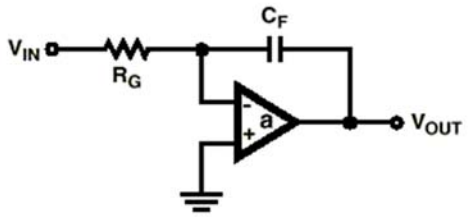



Figura 2.4.1 Integrador.

Una modificación del amplificador inversor es el integrador, mostrado en la figura 2.4.1. Se aplica un voltaje de entrada $V_{IN}$, a $R_G$, lo que da lugar a una corriente $I_{IN}$.

Como ocurría en el amplificador inversor, V(-) = 0, puesto que V(+) = 0, y por tener impedancia infinita toda la corriente de entrada $I_{IN}$ pasa hacia el condensador $C_F$, llamaremos a esta corriente $I_F$.

El elemento realimentador en el integrador es el condensador $C_F$. Por consiguiente, la corriente constante $I_F$, en $C_F$ da lugar a una rampa lineal de voltaje. El voltaje de salida es, por tanto, la integral de la corriente de entrada, que es forzada a cargar a $C_F$ por el lazo de realimentación.

La variación de voltaje en $C_F$ es

*Ecuación 2. 36*

$$-\Delta V_{OUT} = \frac{I_{IN} \cdot \Delta t}{C_F} \qquad (36)$$

Lo que hace que la salida varíe por unidad de tiempo según:

*Ecuación 2. 37*

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta t} = \frac{-V_{IN}}{R_G \cdot C_F} \qquad (37)$$

Como en otras configuraciones del amplificador inversor, la impedancia de entrada es simplemente $R_G$. Observe el siguiente diagrama de señales para este circuito.

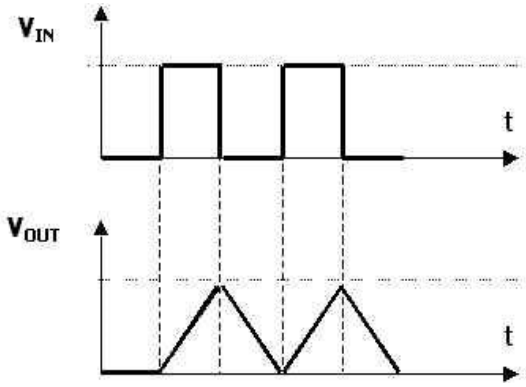



Figura 2.4.2 Muestra el comportamiento de $C_F$ en el OP-AMP.

Por supuesto la rampa dependerá de los valores de la señal de entrada, de la resistencia y del condensador.

## 2.4.2 DERIVADOR

Derivador es un circuito en el que la señal de salida es proporcional a la derivada en el tiempo de la señal de entrada.

En otras palabras la salida es proporcional a la velocidad de variación de la señal de la entrada.

*Ecuación 2. 38*

$$Velocidad\ de\ cambio = \frac{\Delta\, Vent}{\Delta\, t} \qquad (38)$$

$\Delta$ = cambio

Señal de entrada es un voltaje fijo (ejemplo: 3 Voltios):

La velocidad de variación de la señal de entrada es cero y por consiguiente la salida también será cero.

Señal de entrada es una onda cuadrada:

Cada vez que la señal cambia de nivel hay un brusca variación en la señal de entrada (se pasa de un nivel de voltaje a otro en un tiempo muy corto) y en la salida se observan unos picos, tanto en el sentido positivo como negativo (dependiendo del sentido de la variación).

Para evitar esto se coloca en la entrada un resistor R1 y un capacitor C1 se agrega en paralelo con la resistencia de realimentación para reducir la inclinación a oscilar del circuito.

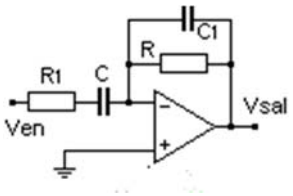



Figura 2.4.3 Circuito del Derivador.

Estos dos últimos componentes reducen la capacidad de derivación del circuito, pero sólo lo hacen hasta la frecuencia que determinan los resistores y capacitores.

## 2.4.3 ANTILOGARITMICO

Para convertir a partir de logaritmos (es decir, para obtener antilogaritmos), debe tomarse la exponencial del logaritmo. Puesto que $e^{\ln x} = X$. Al tomar la exponencial de un logaritmo se obtiene el antilogaritmo. Usando un dispositivo logarítmico como elemento de entrada de un amplificador, como se indica en el diagrama del amplificador se obtiene una respuesta exponencial y, por lo tanto, se tiene un amplificador anti logarítmico.

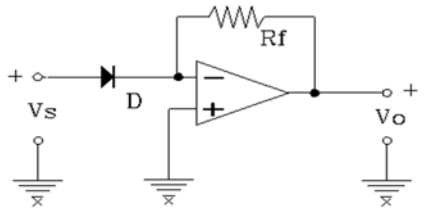



Figura 2.4.4 OP-AMO Anti logarítmico.

## 2.4.4 LOGARITMICO

Mediante la inclusión de elementos no lineales en la red de retroalimentación, los amplificadores operacionales se utilizan para llevar a cabo operaciones no lineales en las señales analógicas.

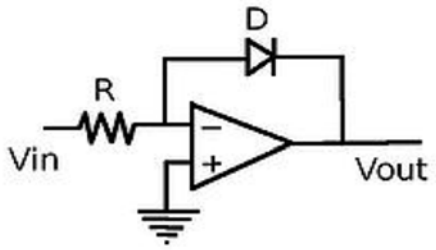



Figura 2.4.5 OP-AMP logarítmico.

El amplificador logarítmico que se muestra en la figura, es un ejemplo de esta aplicación, se usa extensamente en sistemas de instrumentación, detecta y registra señales dentro de un amplio rango. La operación de este circuito sufre las mismas restricciones que un circuito sumador, debido a su alta impedancia de entrada, el voltaje de entrada del amplificador operacional es cero, el resistor R sirve para convertir el voltaje de entrada en una corriente, el circuito en las terminales de salida genera voltaje proporcional a la corriente de retroalimentación que en su región activa se relaciona de manera logarítmica, se produce así una característica de transferencia logarítmica.

## 2.4.5 OSCILADOR DE RELAJACIÓN

Un oscilador de relajación es un circuito que produce una salida que conmuta entre dos valores definidos de voltaje, pasando de uno a otro en un tiempo mínimo en comparación con el tiempo que transcurre en cada uno de los valores extremos. Es decir, el voltaje de salida es esencialmente una onda cuadrada.

Puede construirse un oscilador de este tipo a partir de uno sinusoidal haciendo G · H >> 1. Sin embargo, es más frecuente utilizar circuitos que se basan en la carga y descarga de un capacitor. La forma más sencilla es mediante el comparador regenerativo, también llamado Schmitt trigger.

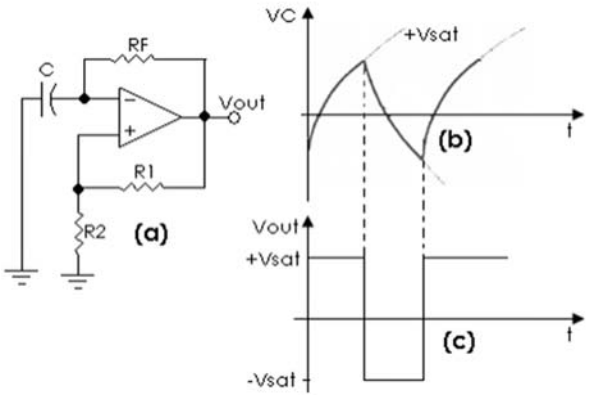



Figura 2.4.6 Oscilador de relajación y su comportamiento.

# 2.5 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN

Un amplificador de instrumentación es un dispositivo creado a partir de amplificadores operacionales. Está diseñado para tener una alta impedancia de entrada y un alto rechazo al modo común (CMRR). Se puede construir a base de componentes discretos o se puede encontrar encapsulado (por ejemplo el INA114).

La operación que realiza es la resta de sus dos entradas multiplicada por un factor.

Su utilización es común en aparatos que trabajan con señales muy débiles, tales como equipos médicos (por ejemplo, el electrocardiograma), para minimizar el error de medida.

Al existir realimentación negativa se puede considerar un cortocircuito virtual entre las entradas inversora y no inversora (símbolos - y + respectivamente) de los dos operacionales. Por ello se tendrán los voltajes en dichos terminales y por lo tanto en los extremos de la resistencia Rg

Así que por ella circulará una corriente

*Ecuación 2. 39*

$$I_g = (V_2 - V_1)\left(\frac{1}{R_g}\right) \qquad (39)$$

Y debido a la alta impedancia de entrada del A.O., esa corriente será la misma que atraviesa las resistencias R1 Por lo tanto el voltaje que cae en toda la rama formada por Rg, $R_1$y$R_1$ será:

*Ecuación 2. 40*

$$V_{intermedia} = \frac{(V_2 - V_1)}{R_g}(R_g + 2R_1) = (V_2 - V_1)\left(\frac{R_g}{R_g} + \frac{2R_1}{R_g}\right) \qquad (40)$$

Simplificando:

*Ecuación 2. 41*

$$V_{intermedia} = (V_2 - V_1)\left(1 + \frac{2R_1}{R_g}\right) \qquad (41)$$

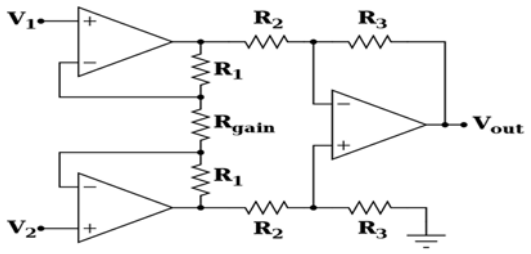



Figura 2.5.1 Amplificador de Instrumentación.

## 2.6 FILTROS ACTIVOS

Un filtro activo es un filtro electrónico analógico distinguido por el uso de uno o más componentes activos (que proporcionan una cierta forma de amplificación de energía), que lo diferencian de los filtros pasivos que solamente usan componentes pasivos. Típicamente este elemento activo puede ser un tubo de vacío, un transistor o un amplificador operacional.

Un filtro activo puede presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la señal de entrada. En su implementación se combinan elementos activos y pasivos, siendo frecuente el uso de amplificadores operacionales, que permite obtener resonancia y un elevado factor Q sin el empleo de bobinas.

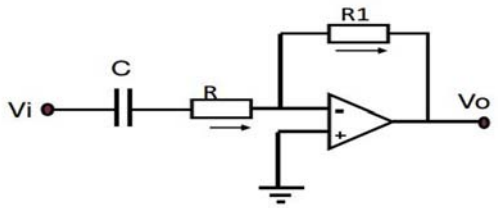



Figura 2.6.1 Filtro Activo.

## 2.6.1 CLASIFICACIÓN DE FILTROS SEGÚN SU FUNCIÓN

Los filtros son redes que permiten el paso o detienen el paso de un determinado grupo de frecuencias (banda de frecuencias).

Tipos de filtro:

- Filtros pasa bajas

- Filtros pasa altas

- Filtros pasa banda

- Filtros supresores de banda

En los filtros pasa baja y pasa alta, una de sus principales característica es su frecuencia de corte, que delimita el grupo de las frecuencias que pasan o no pasan por el filtro.

En el filtro pasa bajas pasarán las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte y en el filtro pasa altas pasarán las frecuencias por encima de la frecuencia de corte.

## 2.6.2 PASA BAJAS

Este filtro deja pasar las frecuencias más bajas con una ganancia, y al llegar a cierta frecuencia, la ganancia empieza a disminuir.

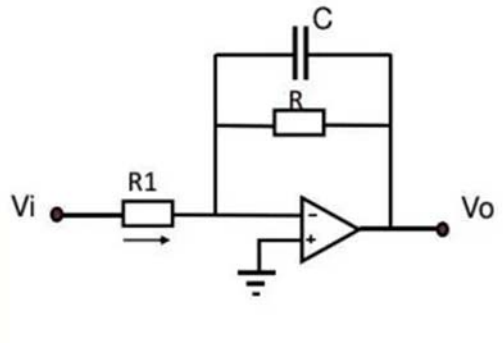



Figura 2.6.2 Filtro Pasa Bajas.

Su función de transferencia es:

*Ecuación 2. 42*

$$\frac{Vo}{Vi} = -\frac{R}{R1} \cdot \frac{1}{1 + jwRC} \qquad (42)$$

Donde podemos distinguir dos partes: la ganancia estática de las frecuencias más bajas ($-R/R_1$) y el factor de atenuación según la frecuencia en la que se encuentre.

La frecuencia a la que empieza a disminuir, llamada frecuencia de corte, se trata de la frecuencia en la que el factor de atenuación dependiente de la frecuencia deja de ser despreciable. Exactamente, se considera justo la frecuencia de corte cuando se da una ganancia de -3 dB respecto a la ganancia estática. A partir de ahí, la ganancia tiene una pendiente de -20 dB/déc.

Ésta frecuencia es exactamente…

*Ecuación 2. 43*

$$Wo = \frac{1}{RC} \qquad (43)$$

## 2.6.3 PASA ALTAS

De la misma forma pero al contrario, podemos encontrar un filtro que atenúa las frecuencias bajas, según aumenta la frecuencia, la ganancia va aumentando con una pendiente de +20 dB/déc. Una vez llegada a la frecuencia de corte, se establece una ganancia estática.

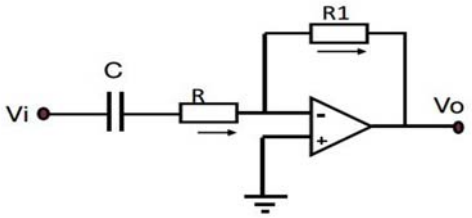



Figura 2.6.3 Filtro Pasa Bajas.

Ecuación 2. 44

$$\frac{Vo}{Vi} = -\frac{R1}{R} \cdot \frac{jwRC}{1 + jwRC} \qquad (44)$$

Una curiosidad de éste filtro es que elimina la continua totalmente (que no es capaz de atravesar el condensador), por lo que podemos usarlo para quitar el offset a una señal.

## 2.6.4 PASA BANDA

El filtro Pasa Banda tiene la siguiente curva de respuesta de frecuencia. Dejará pasar todas las voltajes de la señal de entrada que tengan frecuencias entre la frecuencia de corte inferior $f_1$ y la de corte superior $f_2$. Los voltajes fuera de este rango de frecuencias serán atenuadas y serán menores al 70.7 % del voltaje de entrada. La frecuencia central de este tipo de filtro se obtiene con la siguiente fórmula: fo = 1 / [2πC x (R3R)1/2].

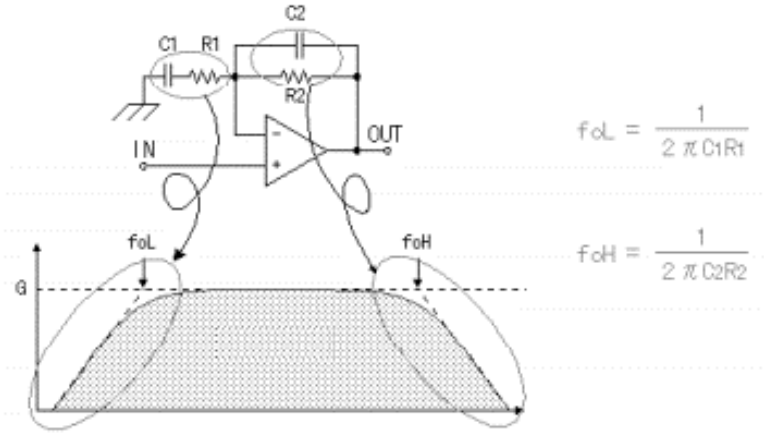


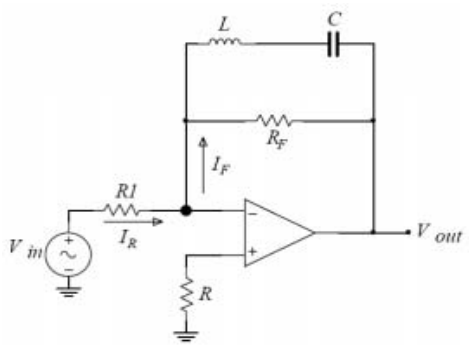

Figura 2.6.4 Filtro Pasa Banda y su señal de transferencia.

Si se seleccionan los capacitores y resistores de modo que: C1 = C2 = C y R1 = R2 = R, el ancho de banda será: $BW = f2 - f1 = 1.41\,R\,/\,[CR3\,(R3R)1/2]$ El factor de calidad Q = fo / BW. Las líneas discontinuas verticales sobre f1 y f2 y la línea horizontal del 70.7% representan la respuesta de un filtro pasa banda ideal.

## 2.6.5 RECHAZA BANDA

Es un filtro electrónico que no permite el paso de señales cuyas frecuencias se encuentran comprendidas entre las frecuencias de corte superior e inferior.

Pueden implementarse de diversas formas. Una de ellas consistirá en dos filtros, uno paso bajo cuya frecuencia de corte sea la inferior del filtro elimina banda y otro paso alto cuya frecuencia de corte sea la superior del filtro elimina banda. Como ambos son sistemas lineales e invariantes, la respuesta en frecuencia de un filtro banda eliminada se puede obtener como la suma de la respuesta paso bajo y la respuesta paso alto (hay que tener en cuenta que ambas respuestas no deben estar solapadas para que el filtro elimine la banda que interese suprimir), ello se implementará mediante un sumador analógico, hecho habitualmente con un amplificador operacional.



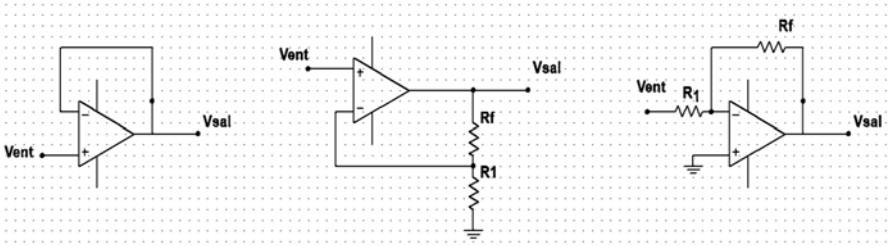

$$Z_\omega = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

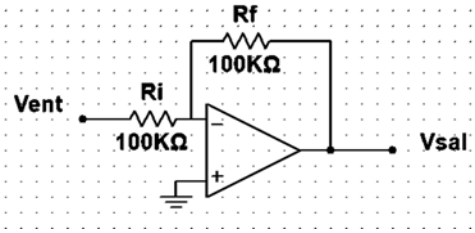
Figura 2.6.5 Filtro Rechaza Banda.

## Ejercicios de Repaso

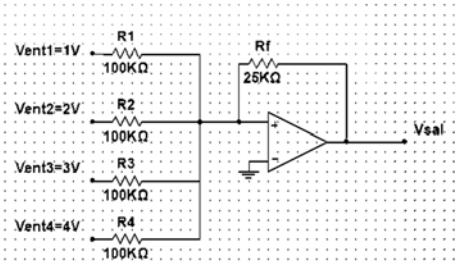
1. Identificar cada una de las configuraciones de amplificador operacional



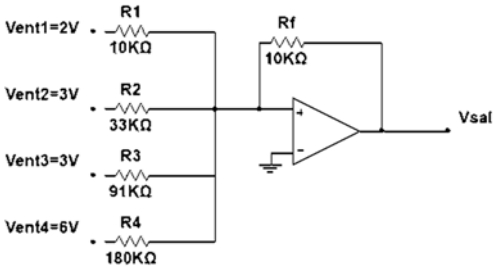

2. Determine la ganancia del amplificador. Si se aplica un voltaje de señal de 10 mV.¿Cuál es el voltaje de salida?



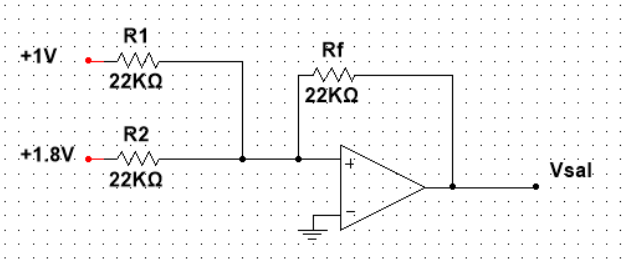

3. Demuestre que el amplificador produce una salida cuya magnitud es el promedio matemático de los voltajes de entrada



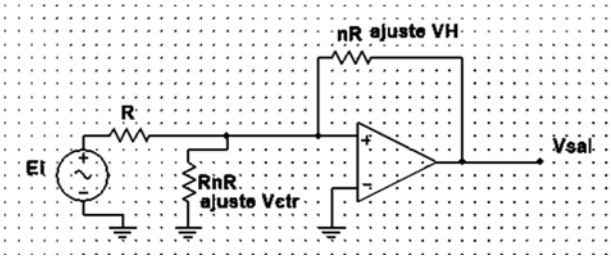

4. Determine el voltaje de salida cuando los voltajes de entrada mostrados se aplican al sumador escalador. ¿Cuál es la corriente a través de Rf?



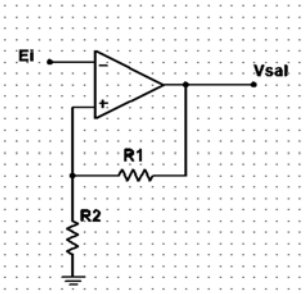

5. Determine lo siguiente:
   a. $V_{R1}$ y $V_{R2}$
   b. La corriente a través de $R_f$
   c. Vsal




6. Suponga que desea monitorear una batería de 12V. Se desea conectar la batería a un cargador cuando el voltaje de ésta se encuentra debajo de 10.5 V. Cuando el voltaje de la batería alcance 13.5 V se desea que el cargador se desconecte. Por lo tanto, $V_{LT} = 10.5V$ y $V_{UT} = 13.5V$.Considere que el voltaje de alimentación -V se utiliza como $V_{ref}$ y suponga que es igual a -15.6V. Además, suponga que $\pm V_{sat} = \pm 13.0V$. Calcule:
   a. $V_H$ y $V_{ctr}$
   b. La resistencia mR
   c. La resistencia nR

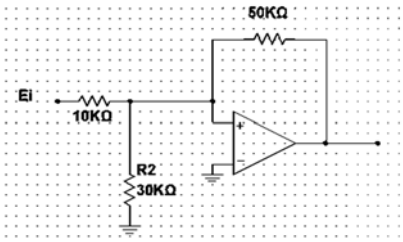



7. Si R1=25KΩ y R2=5KΩ. Suponga para simplificar que $\pm Vsat = \pm 15V$. Calcule:
   a. $V_{UT}$
   b. $V_{LT}$
   c. $V_H$

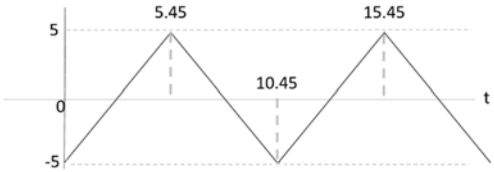


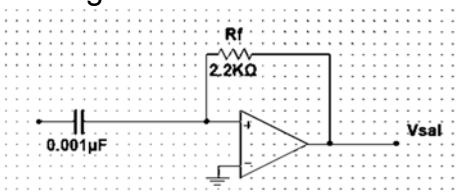

8. Calcule:
   a. $V_{ctr}$
   b. $V_H$
   c. $V_{UT}$
   d. $V_{LT}$

   Suponga que $\pm Vsat = \pm 15V$

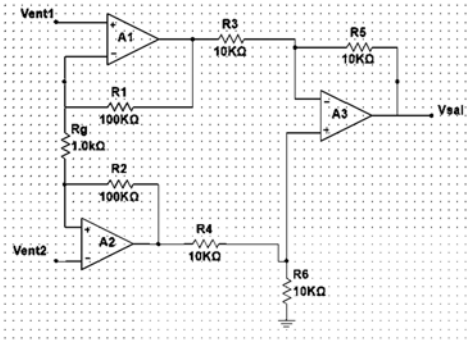



9. Determine el voltaje de salida del diferenciador basado en un amplificador operacional para la entrada de onda triangular mostrada

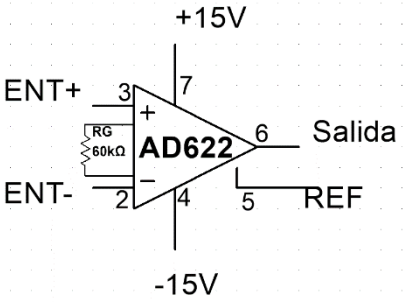


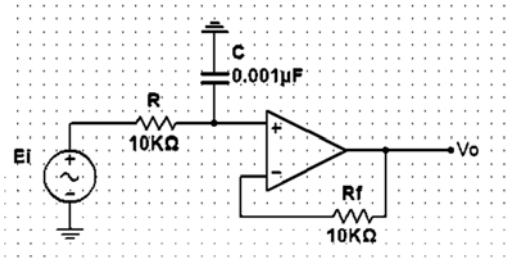

10. Determine las ganancias de voltaje de los amplificadores operacionales A1 y A2 con la configuración de amplificador de instrumentación.



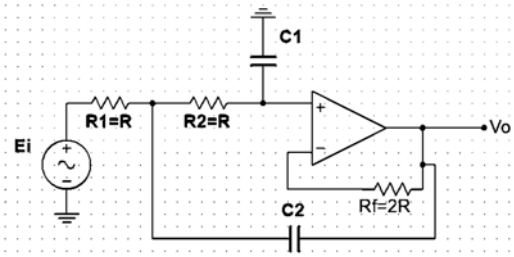

11. ¿Cuál es la ganancia de voltaje del amplificador de instrumentación AD622?



12. Suponga que R=10KΩ y C=0.001$\mu f$. ¿Cuál es la frecuencia de corte?




13. Calcule R1 y R2, para una frecuencia de corte de 1Khz. Suponga que C1=0.01 $\mu f$. Elija C2=2C1 y R1=R2=R.



# UNIDAD TEMATICA III
# CONVERTIDORES

## 3.1 INTRODUCCION A LOS CONVERTIDORES

Los convertidores de señal son típicamente receptores que recogen las señales de entrada y luego se transforma en una señal de salida en otra forma. El receptor por lo general incluye una memoria con dos secciones. Una de la señal de entrada y la otra de la señal de salida. La conversión se realiza efectivamente dentro de la sección de la memoria. La forma más conocida de los convertidores de señal son los convertidores analógico/digital.

Los convertidores de señal de reciben la señal en forma digital y transmite la señal en forma analógica para la transmisión de sonido e imágenes.

### 3.1.1 CONCEPTO BÁSICO DE SEÑALES ANALÓGICAS Y DIGITALES.

### SEÑALES ANALÓGICAS.

Son variables eléctricas que evolucionan en el tiempo en forma análoga a alguna variable física. Estas variables pueden presentarse en la forma de una corriente, un voltaje o una carga eléctrica. Varían en forma continua entre un límite inferior y un

límite superior. Cuando estos límites coinciden con los límites que admite un determinado dispositivo, se dice que la señal está normalizada. La ventaja de trabajar con señales normalizadas es que se aprovecha mejor la relación señal/ruido del dispositivo.

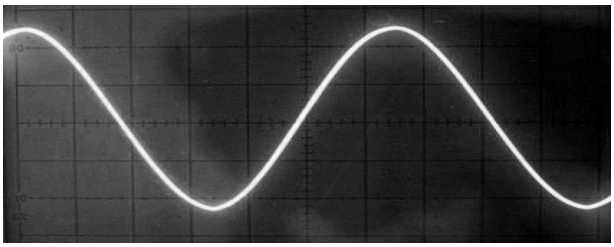


Figura 3.1.1 Señal Analógica.

**SEÑALES DIGITALES.**

Son variables eléctricas con dos niveles que se alternan en el tiempo transmitiendo información según un código previamente dado. Cada nivel eléctrico representa uno de dos símbolos: 0 ó 1, V o F, etc. Los niveles específicos dependen del tipo de dispositivos utilizado.

Por ejemplo si se emplean componentes de la familia lógica TTL (transistor-transistor-logic) los niveles son 0 V y 5 V, aunque cualquier valor por debajo de 0,8 V es correctamente interpretado como un 0 y cualquier valor por encima de 2 V es interpretado como un 1 (los niveles de salida están por debajo de 0,4 V y por encima de 2,4 V respectivamente). En el caso de la familia CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor), los valores dependen de la alimentación.
Para alimentación de +5 V, los valores ideales son también 0 V y 5 V, pero se reconoce un 0 hasta 2,25 V y un 1 a partir de 2,75 V.

Estos ejemplos muestran uno de los principales atractivos de las señales digitales, su gran inmunidad al ruido. Las señales digitales descritas tienen la particularidad de tener sólo dos estados y por lo tanto permiten representar, transmitir o almacenar

información binaria. Para transmitir más información se requiere mayor cantidad de estados, que pueden lograrse combinando varias señales en paralelo (simultáneas), cada una de las cuales transmite una información binaria. Si hay n señales binarias, el resultado es que pueden representarse 2n estados. El conjunto de n señales constituye una palabra. Otra variante es enviar por una línea única, en forma secuencial, la información. Si se sabe cuándo comienza, y qué longitud tiene una palabra (conjunto ordenado de estados binarios que constituye un estado 2n-ario), se puede conocer su estado.

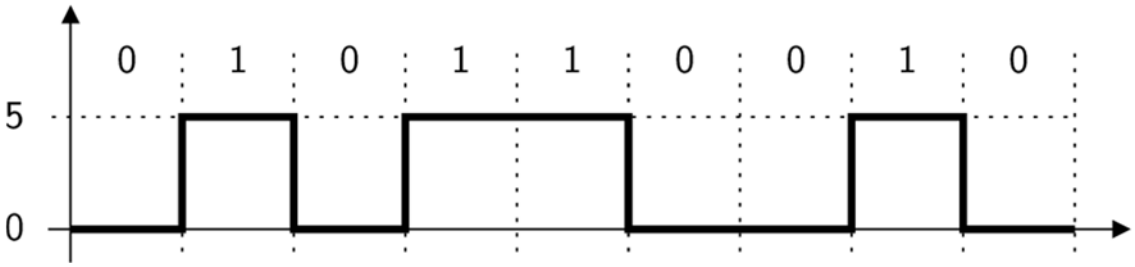



FIGURA 3.1.2 Señal Digital.

### 3.1.2 TERMINOLOGÍA DE CONVERTIDORES

- ✓ **Electrónica de potencia:** Rama de la ingeniería eléctrica que consigue adaptar y transformar la electricidad, con la finalidad de alimentar otros equipos, transportar energía, controlar el funcionamiento de máquinas eléctricas, etc.

- ✓ **Aplicación de dispositivos electrónicos**: Principalmente semiconductores, al control y transformación de potencia eléctrica. Esto incluye tanto aplicaciones en sistemas de control como de suministro eléctrico a consumos industriales o incluso la interconexión sistemas eléctricos de potencia.

El principal objetivo de esta disciplina es el procesamiento de energía con la máxima eficiencia posible, por lo que se evitan utilizar elementos resistivos, potenciales generadores de pérdidas por efecto Joule. Los principales dispositivos utilizados por tanto son bobinas y condensadores, así como semiconductores trabajando en modo corte/saturación (on/off).

Conversión de potencia, es el proceso de convertir una forma de energía en otra, esto puede incluir procesos electromecánicos o electroquímicos.

Dichos dispositivos son empleados en equipos que se denominan convertidores estáticos de potencia, clasificados en:

- ✓ Rectificadores: convierten corriente alterna en corriente continua
- ✓ Inversores: convierten corriente continua en corriente alterna
- ✓ Ciclo conversores: convierten corriente alterna en corriente alterna
- ✓ Choppers: convierten corriente continua en corriente continua

En la actualidad esta disciplina está cobrando cada vez más importancia debido principalmente a la elevada eficiencia de los convertidores electrónicos en comparación a los métodos tradicionales, y su mayor versatilidad. Un paso imprescindible para que se produjera esta revolución fue el desarrollo de dispositivos capaces de manejar las elevadas potencias necesarias en tareas de distribución eléctrica o manejo de potentes motores.

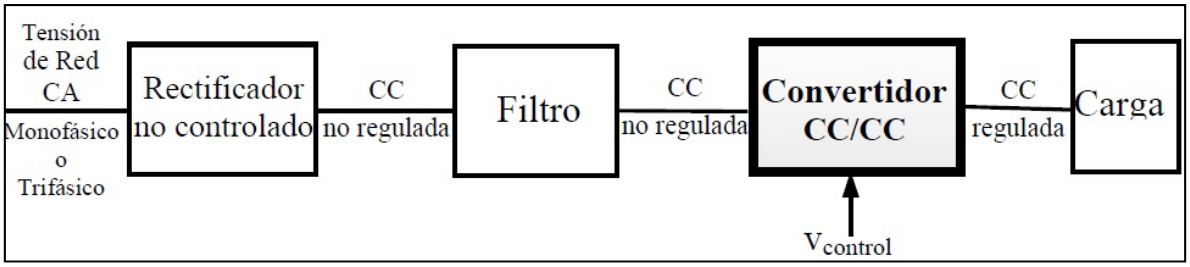



FIGURA 3.1.3 Procesamiento de Señales.

## 3.2 CONVERTIDORES D/A

Un convertidor Digital/Analógico (DAC), es un elemento que recibe información de entrada digital, en forma de una palabra de "n" bits y la transforma a señal analógica, cada una de las combinaciones binarias de entrada es convertida en niveles lógicos de voltaje de salida.

Un convertidor digital analógico transfiere información expresada en forma digital a una forma analógica, para ubicar la función de este dispositivo conviene recordar que un sistema combina y relaciona diversos subsistemas que trabajan diferentes tipos de información analógica, como son; magnitudes eléctricas, mecánicas, etc., lo mismo que un micrófono, un graficador, o un motor y estos deberán interactuar con subsistemas que trabajan con información digital, como una computadora, un sistema lógico, un sistema con microprocesador, con microcontrolador o con algún indicador numérico.

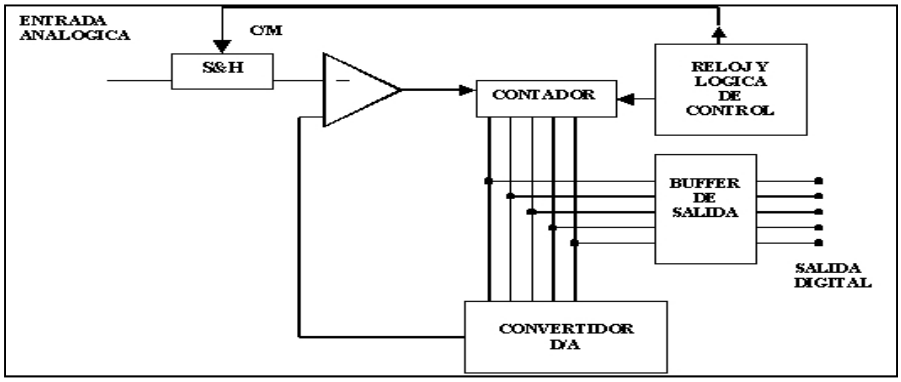



Figura 3.2.1 Estructura del convertidor Digital Analógico.

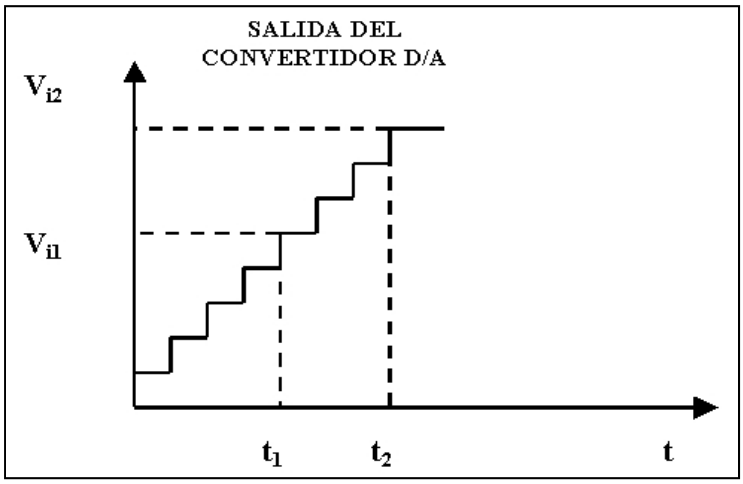



Figura 3.2.2 Grafica del comportamiento del convertidor Digital Analógico.

**Errores**

Error en los convertidores. La calidad de un conversor DAC será inversamente proporcional a la diferencia entre el funcionamiento teórico o ideal y el real:

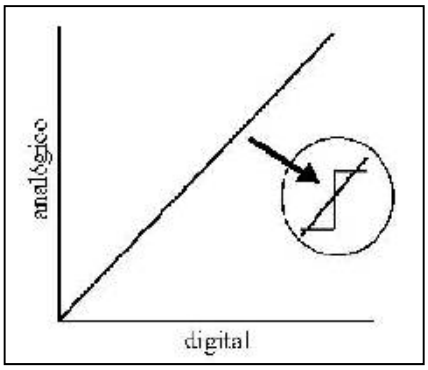



FIGURA 3.2.3 Muestra del error en una señal.

**Error de cuantificación:**

En un DAC ideal la relación entre la entrada digital (Bites) y la salida analógica (volts) es lineal. La resolución es igual al incremento más pequeño que puede experimentar la señal digital que es igual al cambio del bit menos significativo. El error es siempre menor al 1 bit menos significativo.

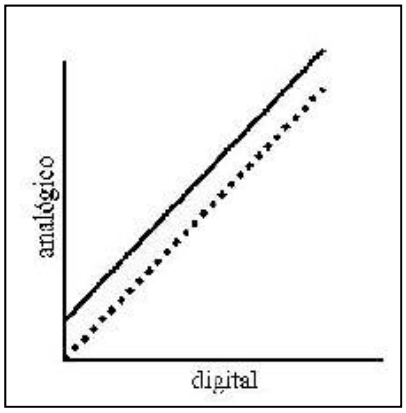



FIGURA 3.2.4 Error de Cuantificación.

**Error de offset:**

En un DAC real la señal analógica se encuentra desplazada respecto del valor que le corresponde al 1 ideal. Este corrimiento equivale a que para una entrada digital igual a 0 se tiene un valor de voltaje de salida del convertidor (error de cero). Este error es fácilmente compensable mediante las prácticas habituales de corrección de offset en AO (Amplificador Operacional) Por otro lado, como en todo OP-AMP no nos libramos del corrimiento del offset en función de la temperatura.

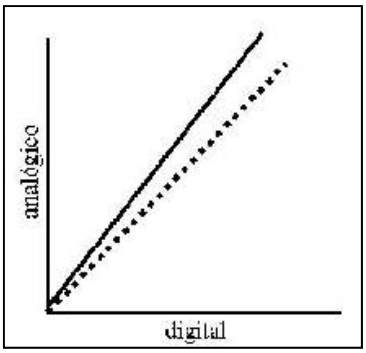



FIGURA 3.2.5 Error de Offset.

**Error de amplificación:**

La diferencia entre la salida real y la salida ideal aumenta con el valor de la entrada. Esto ocurre debido al desajuste de las resistencias (En el lazo de realimentación). Esta diferencia se puede corregir en los circuitos integrados aplicados mediante

acción de las resistencias, a las que se tiene acceso desde el exterior del circuito integrado. Otra fuente para este error es la propia fuente de voltaje de referencia.

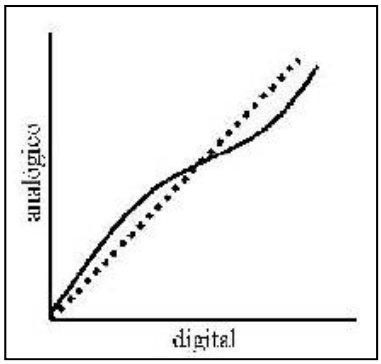



FIGURA 3.2.6 Error de Aplicación.

**Error de linealidad:**

Este es la discrepancia entre el valor que debiera tener el voltaje de salida respecto de la palabra de entrada (Bites). Ocurre debido a pequeñas diferencias de valores entre las resistencias que componen la red R2R. Es habitual que el mismo circuito integrado se provee con distintas precisiones. También se puede corregir por programación.

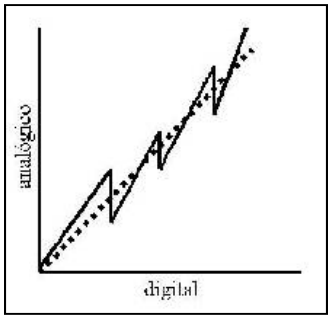



FIGURA 3.2.7 Error de Linealidad.

**Error de monotoneidad:**

Una señal de entrada que va aumentando no siempre produce una señal de salida en aumento. Este error se debe a diferencias de valores entre las resistencias de la red R2R. Se nota en particular convertidores “Armados” con resistencias de baja

calidad. Y es producido cuando el bit menos significativo altera más el valor de la salida que el bit predecesor debido a errores en las resistencias asociadas.

## 3.2.1 CONVERTIDORES DE RESISTENCIAS PONDERADAS

Una red de resistencias ponderadas es aquella en la que se implementa un circuito en donde los conmutadores electrónicos conectan una señal de referencia a un juego de resistencias, cuyos valores están escogidos de tal forma que provocan a la salida una señal de amplitud proporcional al peso binario del interruptor correspondiente. El DAC más sencillo que se puede concebir consta simplemente de un voltaje de referencia y de un grupo de resistencias que se conectan o no de acuerdo al estado de un interruptor asociado.

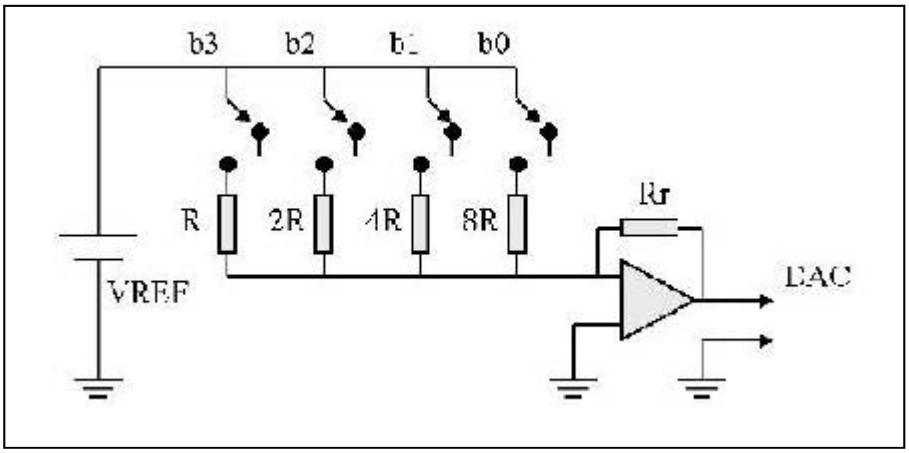



FIGURA 3.2.8 Circuito Convertidor de Resistencias Ponderadas.

El voltaje de salida del amplificador operacional viene dada por:

*Ecuación 3. 1*

$$V_o = \left(\frac{R_o}{8R} + \frac{R_1}{4R} + \frac{R_2}{8R} + \frac{R_4}{R}\right)R_r \qquad (1)$$

Dónde:

Vo: Es el voltaje de salida del operacional.

VREF: Es el voltaje de referencia.

Rr: Es la resistencia de realimentación del amplificador operacional.

S0, S1, S2, S3 son los valores lógicos (0 o 1) de los correspondientes bits.

**INCONVENIENTES**

La gran desventaja que posee este tipo de convertidores es que tecnológicamente es difícil fabricar n resistencias que sigan una progresión geométrica y cubran un margen tan amplio con la precisión requerida, sobre todo cuando crece un poco el número de bits. Además los tiempos de conmutación para cada línea, serán cada vez mayores conforme nos acerquemos al LSB, pues al haber una resistencia de mayor valor, la propagación de la intensidad se realiza más lentamente debido a la mayor constante de tiempo que presentan las capacidades parásitas involucradas en el circuito (la capacidad puede ser la misma, pero la resistencia es mucho mayor).

## 3.2.2 CONVERTIDOR R-R2

**CONVERSORES D/A CON RED R-2R EN ESCALERA**

El principio de este convertidor consiste en dividir en dos, la corriente que hay en cada nodo. Por ejemplo, si nos fijamos en el nodo A de la figura 3.2.9, la mitad de la corriente que fluye a la derecha del nodo es aportada a través de la resistencia de valor 2R correspondiente al MSB y la otra mitad es aportada a través de la resistencia de valor R, por la que circula la corriente asociada a los bits de un peso menor al MSB. La red está construida de tal forma que el efecto de la puesta a "1" de una línea de entrada provoca, en la entrada del amplificador operacional, una intensidad de corriente proporcional al peso del bit.

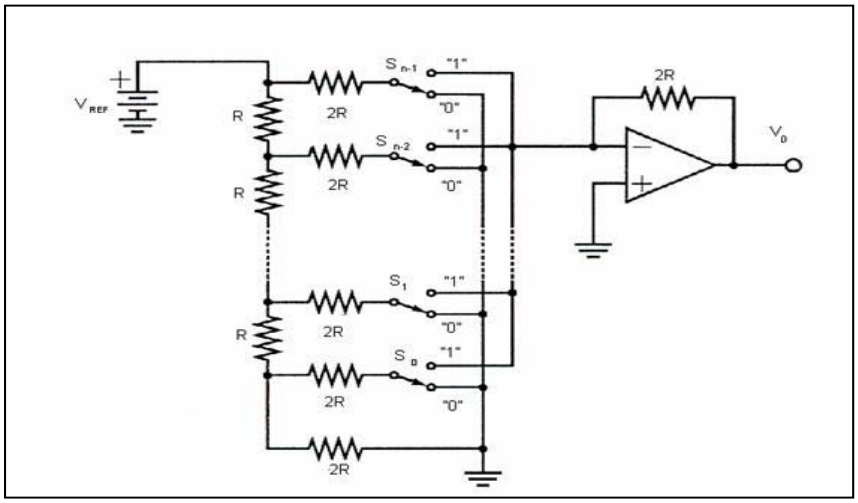



Figura 3.2.9 Convertidor D/A en escalera R2R.

## VENTAJAS

Solamente emplea resistencias de dos valores diferentes (R y 2R), por lo que resuelve el problema que se planteó anteriormente en cuanto a la gran disparidad de los valores resistivos. Mediante los convertidores R-2R necesitamos unos valores resistivos que son fáciles de obtener, la variación de las resistencias con la temperatura será similar en todas ellas y se pueden emplear valores pequeños cuando sea necesario implementar convertidores de alta velocidad.

## INCONVENIENTES

La desventaja que poseen reside en que necesitamos el doble de resistencias que en el caso del convertidor de resistencias ponderadas. Además la corriente que inyecta el bit menos significativo, tiene un retardo de propagación superior a la inyectada por el MSB, lo cual puede provocar un mayor tiempo de conversión.

## CONVERTIDORES D/A CON RED R-2R EN ESCALERA INVERTIDA

La configuración de los convertidores con red R-2R en escalera poseía una desventaja frente al nuevo modelo de escalera invertida. Si retrocedemos a la figura 3.2.9 del esquema del conversor anterior podemos observar que la red R-2R está

conectada directamente a la entrada del amplificador operacional, mientras que los interruptores conectan el extremo de cada resistencia al voltaje de referencia $V_{REF}$, o bien a tierra. Si ahora nos fijamos en la siguiente figura 3.2.10 podemos observar que la red R-2R se ha invertido.

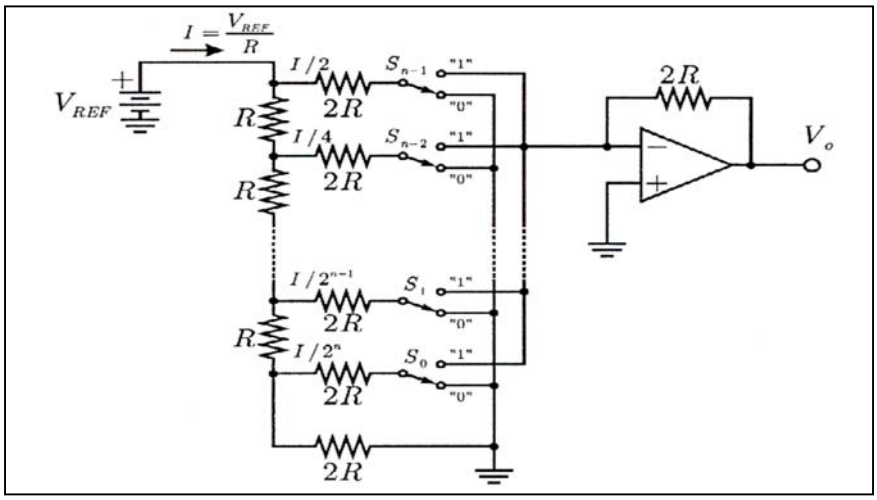



Figura 3.2.10 Convertidor D/A en red escalera invertida.

Así se ha conectado la salida de dicha red al voltaje de referencia, mientras que ahora cada una de las resistencias se conecta o bien a tierra o a la entrada del amplificador operacional.

**VENTAJAS**

En esta configuración de red en escalera invertida, la intensidad que circula por la red no cambia, independientemente del estado del interruptor de cada resistencia. Implica que la caída de voltaje en las resistencias no varía y, por tanto, no se produce retardo de propagación por la carga o descarga de capacitancias parásitas. Por otro lado, la intensidad de corriente suministrada por el voltaje de referencia, $V_{REF}$, es constante ya que, independientemente de la posición del interruptor, dicha fuente siempre ve una resistencia equivalente de valor R.

Además en la red en escalera convencional, los interruptores deben conectar y desconectar todo el voltaje de referencia, mientras que en la red en escalera

invertida esto no es así, por lo que no se verán obligados a trabajar con un margen dinámico muy grande.

## 3.3 CONVETIDOR A/D

Si el convertidor **DAC** es la voz de un sistema de control ya que expresa el resultado del análisis realizado por el sistema de control, el convertidor **ADC (Analógico Digital)** serían los ojos, ya que son el medio por el cual el sistema de control "ve" la información del sistema.

El convertidor ADC es el componente básico para que un ordenador o sistema de control pueda realizar la medición de una señal analógica adquirida mediante algún tipo de sensor. Estos elementos convierten una señal que varía en forma continua en una señal que lo hace en saltos (Resolución) y cada cierto tiempo (Muestreo). Las limitaciones que presentan los diversos tipos de convertidores ADC son las mismas que definimos al comentar sobre los convertidores DAC. Sin embargo en este tipo de convertidores la falta de monotoneidad se denomina "Código Perdido" (Missing Code).

El convertidor ADC elemental está constituido por una serie de comparadores analógicos ajustados ellos a diversos niveles de un único voltaje de referencia (de precisión) en forma secuencial y progresiva al ingresar en los comparadores un voltaje desconocido, se accionarán estos de acuerdo al valor de este voltaje, todos los comparadores cuyo voltaje de referencia sea menor al voltaje desconocido darán como resultado "1" en su salida, y los comparadores cuyos voltajes de referencia sean superiores al voltaje desconocido darán un resultado "0" en su salida, estos datos se "Interpretan" mediante una serie de compuertas de lógica digital dando como resultado un valor binario que se corresponde a una aproximación del voltaje de entrada.

Esta conversión se realiza a gran velocidad y el hecho de que la conversión y presentación se efectúa durante el tiempo de un único pulso de reloj dio el nombre a este tipo de convertidores “Convertidores tipo Flash”.

Un importante defecto de este tipo de convertidores es la necesidad de emplear un gran número de comparadores, esto provoca que el empleo de este tipo de convertidor se limite hasta solo 8 Bites, por otro lado, tienen la ventaja de su alta velocidad de respuesta (puede llegar hasta 10MHz).

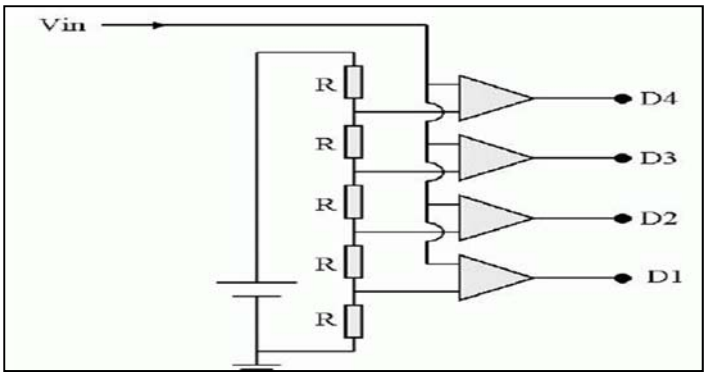



FIGURA 3.3.1 Conversión Analógica Digital.

Actualmente hay multitud de convertidores analógico digitales, resultando en ocasiones difícil decidirse por un modelo concreto. Los criterios de selección pueden ser:

• Facilidad y seguridad de suministro
• Condiciones de operación
• Velocidad de muestreo
• Resolución
• Salida de datos serie o paralelo
• Señales necesarias para su operación

• Consumo
• Precio

## 3.3.1 CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL DE RAMPA SIMPLE

Se cuentan la cantidad de pulsos necesarios para cargar un condensador “C” a intensidad constante. **I** integrador **CP** comparador **P** puerta para el conteo pulsos **S** interruptor de inicio de conversión.

El problema de precisar muchos elementos de precisión para realizar un convertidor analógico digital llevo a desarrollar otra familia de convertidores que sólo requieren una referencia de voltaje estable: son los convertidores de rampa o de integración basados en cargar un condensador mediante una corriente proporcional al voltaje de entrada. Estos convertidores, por las condiciones de diseño, presentan una excelente linealidad y elevada precisión, pudiéndose alcanzar fácilmente 16 bits a bajo costo. Sin embargo, difícilmente pueden hacer más de unas pocas muestras por segundo (modelos de 12 bits y superiores).

Una cualidad propia del diseño de estos convertidores es su gran capacidad de rechazo del ruido, especialmente el inducido por la red de suministro eléctrico (50Hz o 60Hz). Para ello hay que diseñar el sistema para que el tiempo de integración sea múltiplo del periodo de la red. La conversión se realiza midiendo el tiempo transcurrido (T) entre el momento en el que se abre el interruptor S y el momento en el que la carga del condensador de integración C hace conmutar al comparador COMP. La medida del tiempo se realiza contando pulsos de reloj (CK). La dificultad de este tipo de convertidores radica en su calibración y en el error introducido por las derivas que pueda presentar el sistema de amplificador operacional (integrador) y el comparador.

Una solución es utilizar un convertidor de doble rampa.

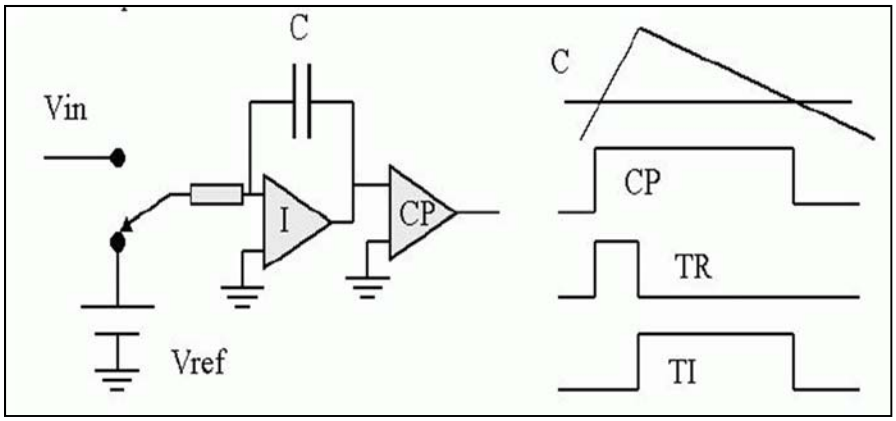



FIGURA 3.3.2 Convertidor Analógico Digital de rampa simple.

### 3.3.2 CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL DE RAMPA DOBLE

Se carga el condensador C con una corriente de referencia durante un tiempo fijo TR y se mide el tiempo necesario para descargarlo con la corriente obtenida con la señal de entrada Vin.

Este tipo de convertidores comparan el tiempo necesario para cargar el condensador C mediante la corriente suministrada por el voltaje a medir (Vin.) con el tiempo necesario para descargarlo hasta el nivel inicial (Ref.) mediante una corriente conocida y generada por la fuente de referencia.

La lógica de control conmuta la entrada del integrador entre el voltaje a medir y la fuente de referencia. Inicialmente la entrada está conectada a potencial cero. En general todos los voltímetros digitales que se encuentran comercialmente operan bajo este principio, pues son dispositivos de una elevada precisión y estabilidad intrínseca y de muy bajo costo, pues no requieren ajustes críticos.

Un convertidor analógico digital muy utilizado de doble rampa es ICL7109. Este circuito CMOS posee varias entradas de control que simplifican extraordinariamente

su operación en múltiples configuraciones, tanto conectado directamente al bus del sistema de datos como su conexión directa a un dispositivo serie (UART) lo que le permite funcionar en modo remoto.

De este convertidor existen versiones preparadas para activar directamente un visualizador de cristal líquido (LCD) como el 7106 o de diodos LED.

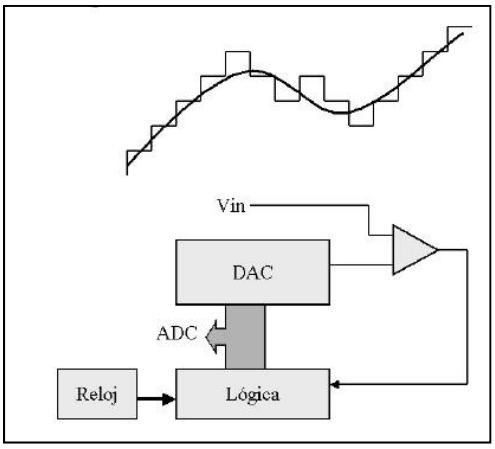



Figura 3.3.3 ADC de Rampa Doble.

## CONVERTIDOR ANALOGICO DIGITAL DE SEGUIMIENTO

La salida de un convertidor digital analógico se compara con la señal de entrada, según sea mayor o menor se incrementa o decrementa un contador asociado al convertidor digital analógico. Otra familia de convertidores analógico digital se diseñó a partir de un convertidor digital analógico del tipo R-2R, cuya salida se compara con el voltaje a medir mediante un circuito comparador.

Una pequeña lógica de control varía la señal digital presente en la entrada hasta que la salida del convertidor iguala el voltaje a medir. La realización más sencilla es utilizar un contador bi-direccional conectado a la entrada del convertidor digital analógico. Según el comparador indique un valor superior o inferior, se incrementa o decrementa el valor del contador (convertidor de seguimiento). Cuando la señal

varía más rápidamente que la velocidad del convertidor, los datos leídos quedan sistemáticamente por debajo o por arriba del valor correcto. Además, este tipo de convertidor tiene que invertir un tiempo considerable hasta que el contador alcanza el valor correcto.

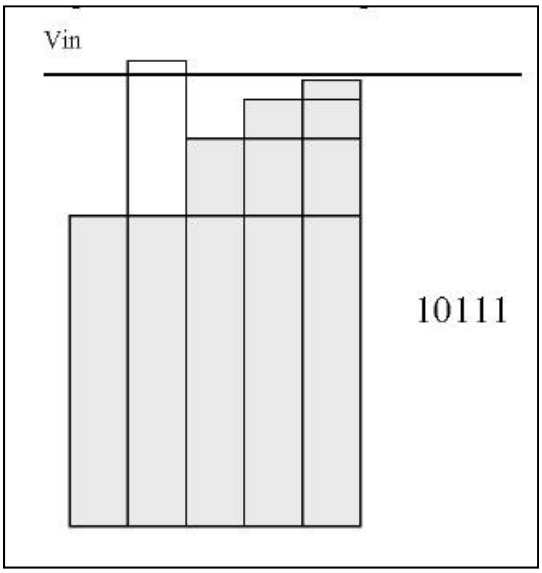



Figura 3.3.4 ADC de Seguimiento.

## 3.3.3 CONVERTIDOR DIGITAL POR APROXIMACIONES SUCESIVAS

Un circuito similar utilizado en los convertidores de seguimiento, es el de aproximaciones sucesivas, pero ahora, cada vez que se realiza una conversión se ensayan los sucesivos bits empezando por el más significativo. Según se obtenga un valor menor o mayor se añade o no el bit al control del convertidor digital analógico. El tiempo necesario (número de pulsos de reloj) es siempre igual al número de bits más uno.

Una solución a este problema es utilizar un algoritmo de aproximación sucesiva: se ensaya inicialmente con el bit más significativo, si es mayor este bit permanece a 0 durante todo el proceso y si es menor a 1. Seguidamente se ensaya con el segundo

bit más significativo y se va repitiendo el proceso. El número de ensayos a realizar es igual al número de bits a convertir más uno, mientras que en un convertidor el contador puede llegar a ser de 2n ensayos. Es muy importante que la señal de entrada no varíe durante todo el tiempo que dura la conversión, ya que un error en una sola de las comparaciones provoca que todo el código de salida sea erróneo. Para evitar que la señal de entrada varíe durante la conversión (unos pocos microsegundos) se utilizan circuitos de muestreo y retención (Sample & Hold) o cuando el espectro de la señal de entrada lo permite un simple filtro pasa bajos que limite la velocidad de variación de la señal por debajo de 1 bit menos significativo en el tiempo que dura una conversión.

Los convertidores analógico digitales disponibles en forma de circuitos integrados, como ADC0801 requieren muy pocos componentes externos: como son la referencia de voltaje, los condensadores de desacoplo y el sistema de reloj (un cristal de cuarzo, una red RC o en generador externo). Las señales de control permiten seleccionar el circuito (CS), iniciar una conversión (WR), o leer los datos (RD). El estado del convertidor (en reposo o realizando un conversión) se conoce mediante una señal fin de conversión (EOC o INTR). Muchos convertidores R-2R son unipolares, para su utilización en modo bipolar se desplaza el cero a la mitad de la voltaje de referencia, para ello basta con disponer de un divisor resistivo conectado a la entrada de convertidor, entre la voltaje de referencia y la entrada de señal (salida del amplificador de entrada).

La rapidez, precisión y estabilidad de los convertidores de aproximación sucesiva hace que estos sean los más utilizados en la gama de 8 a 16 bits y velocidades entre 10Hz y 1MHz. A velocidades menores se utilizan convertidores de doble rampa y a mayores, convertidores de tipo flash.

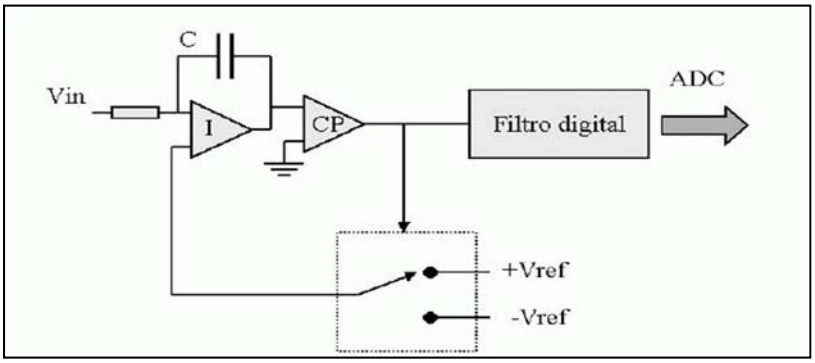



FIGURA 3.3.5 Convertidor Digital de aproximaciones sucesivas.

**CONVERTIDOR ANALÓGICO DIGITAL DELTA-SIGMA.**

Se trata de un convertidor con un integrador en el que a la señal de entrada se suma o resta un voltaje de referencia. Este proceso se hace muy rápidamente, de forma que se obtienen una secuencia de 1 y 0 según el número de transiciones hayan sido necesarias para igualar el voltaje de entrada. Un filtro digital reduce la velocidad de muestreo al valor deseado, aumentando paralelamente la resolución. Es importante proteger mediante diodos la entrada del convertidor frente a voltajes que superen la alimentación o de polaridades inversas.

Un amplificador operacional dispuesto a la entrada del convertidor permite trabajar con una elevada impedancia de entrada, amplificar la señal de entrada o disponer de un filtro pasa bajos o pasa altos.

## 3.3.4 CONVERTIDOR TIPO FLASH

Consisten en una serie de comparadores que comparan la señal de entrada con una referencia para cada nivel. El resultado de las comparaciones ingresa a un circuito lógico que “cuenta” los comparadores activados. Se muestra un ejemplo de convertidor flash de 3 bits.

Los valores de las resistencias extremas difieren de las restantes para lograr que la conmutación de un código al siguiente se produzca a mitad de camino del intervalo

que corresponde a ese código. Así, si $V_{ref}$ fuera 8V, las conmutaciones se efectuarían en 0,5 V, 1,5 V, 2,5 V, etc.

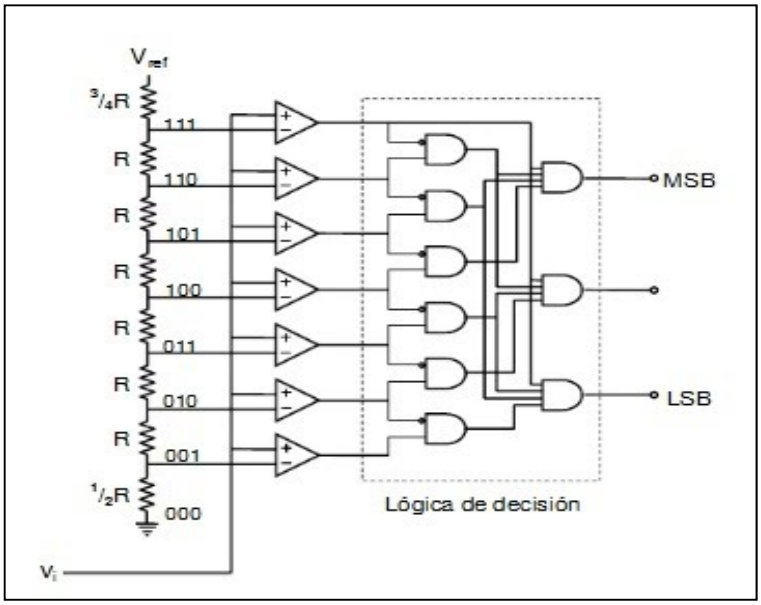



FIGURA 3.3.6 Convertidor tipo Flash.

La ventaja de este tipo de convertidores es que la conversión es prácticamente en tiempo real, salvo el tiempo de conmutación de los comparadores y la lógica. La desventaja es que cuando la resolución es alta requiere una gran cantidad de comparadores, cuyo offset debe ser menor que 1 LSB. Además, las capacidades de entrada se suman, lo cual atenta contra las altas velocidades que asegura el método de conversión. En los casos de resoluciones altas, la conversión se suele realizar en dos etapas, es decir que la mitad de comparadores y en la segunda etapa se les agrega un voltaje de referencia que los desplaza. En este caso se utilizan circuitos lógicos secuenciales.

## Ejercicios de Repaso

1. Las resistencias que forman parte de la escalera de resistencias de 4 bit del DAC Red de escalera R-2R tienen valores de R=10KΩ y de 2R=20KΩ, Vref vale 10V. Calcular:
    a. La resolución de la escalera
    b. Su ecuación de entrada-salida
    c. Isal correspondiente a una entrada digital de 1111
2. Para un circuito DAC-08, calcule Vo para las siguientes entradas:
    a. 00000001
    b. 11111111
3. Consulte la red de escalera R-2R. Defina Vref=10V, Rf=5K, R=5KΩ y 2R=10KΩ.Calcule:
    a. La resistencia de escalera características
    b. Io
    c. La resolución del voltaje
    d. La ecuación de entrada-salida
    e. $V_{oFS}$
4. La salida de un ADC de 8 bits está formada totalmente por unos cuando V1=2.55V, Calcule:
    a. Su resolución
    b. Su salida digital

En ambos casos Vi=1.28V

5. ¿Cuánto vale el error de cuantización del ADC Red de escalera R-2R?
6. Para un ADC integrador Vent=50mV
    a. ¿Cuánto dura la fase de integración Ti y el valor de Vo?
    b. ¿Cómo se llama la fase T2, cuánto vale Vref y cuánto dura T2?
    c. Calcule la salida del circuito

# Índice de Ecuaciones Unidad I

Ecuación 1. 1 ..... 16
Ecuación 1. 2 ..... 16
Ecuación 1. 3 ..... 16
Ecuación 1. 4 ..... 17
Ecuación 1. 5 ..... 17
Ecuación 1. 6 ..... 17
Ecuación 1. 7 ..... 18
Ecuación 1. 8 ..... 18
Ecuación 1. 9 ..... 18
Ecuación 1. 10 ..... 20
Ecuación 1. 11 ..... 21
Ecuación 1. 12 ..... 21
Ecuación 1. 13 ..... 21
Ecuación 1. 14 ..... 21
Ecuación 1. 15 ..... 22
Ecuación 1. 16 ..... 22
Ecuación 1. 17 ..... 22
Ecuación 1. 18 ..... 22
Ecuación 1. 19 ..... 24
Ecuación 1. 20 ..... 25
Ecuación 1. 21 ..... 25
Ecuación 1. 22 ..... 25
Ecuación 1. 23 ..... 26
Ecuación 1. 24 ..... 26
Ecuación 1. 25 ..... 26
Ecuación 1. 26 ..... 27
Ecuación 1. 27 ..... 27
Ecuación 1. 28 ..... 27
Ecuación 1. 29 ..... 27
Ecuación 1. 30 ..... 27
Ecuación 1. 31 ..... 28
Ecuación 1. 32 ..... 36
Ecuación 1. 33 ..... 36
Ecuación 1. 34 ..... 39
Ecuación 1. 35 ..... 39
Ecuación 1. 36 ..... 40
Ecuación 1. 37 ..... 46
Ecuación 1. 38 ..... 46
Ecuación 1. 39 ..... 46

Ecuación 1. 40 ..... 46
Ecuación 1. 41 ..... 47
Ecuación 1. 42 ..... 47
Ecuación 1. 43 ..... 47

## Índice de Ecuaciones Unidad II

Ecuación 2. 1 ..... 54
Ecuación 2. 2 ..... 55
Ecuación 2. 3 ..... 55
Ecuación 2. 4 ..... 55
Ecuación 2. 5 ..... 55
Ecuación 2. 6 ..... 55
Ecuación 2. 7 ..... 55
Ecuación 2. 8 ..... 56
Ecuación 2. 9 ..... 58
Ecuación 2. 10 ..... 59
Ecuación 2. 11 ..... 59
Ecuación 2. 12 ..... 60
Ecuación 2. 13 ..... 60
Ecuación 2. 14 ..... 60
Ecuación 2. 15 ..... 60
Ecuación 2. 16 ..... 61
Ecuación 2. 17 ..... 62
Ecuación 2. 18 ..... 62
Ecuación 2. 19 ..... 64
Ecuación 2. 20 ..... 64
Ecuación 2. 21 ..... 64
Ecuación 2. 22 ..... 65
Ecuación 2. 23 ..... 65
Ecuación 2. 24 ..... 65
Ecuación 2. 25 ..... 66
Ecuación 2. 26 ..... 66
Ecuación 2. 27 ..... 66
Ecuación 2. 28 ..... 67
Ecuación 2. 29 ..... 68
Ecuación 2. 30 ..... 68
Ecuación 2. 31 ..... 68
Ecuación 2. 32 ..... 71
Ecuación 2. 33 ..... 72
Ecuación 2. 34 ..... 73
Ecuación 2. 35 ..... 73
Ecuación 2. 36 ..... 75

Ecuación 2. 37 .....75
Ecuación 2. 38 .....76
Ecuación 2. 39 .....79
Ecuación 2. 40 .....79
Ecuación 2. 41 .....80
Ecuación 2. 42 .....82
Ecuación 2. 43 .....82
Ecuación 2. 44 .....83

**Índice de Ecuaciones Unidad III**

Ecuación 3. 1 .....97

**Índice de Figuras Unidad I**

FIGURA 1.1.1 Símbolo de un diodo. .....1
FIGURA 1.1.2. a Curva característica del diodo.....2
FIGURA 1.1.2. b Símbolo del diodo. .....2
FIGURA 1.1.3 Ejemplo de dopaje tipo n.....4
FIGURA 1.1.4 Ejemplo de dopaje tipo p.....5
FIGURA 1.1.5 Portadores mayoritarios y minoritarios.....6
FIGURA 1.2.1 Comportamiento del diodo. .....7
FIGURA 1.2.2 Polarización en inversa. .....9
FIGURA 1.2.3 Curva que representa la polarización en inversa y directa. .....10
FIGURA 1.2.4 Clasificación de diversos diodos. .....122
FIGURA 1.2.5 Rectificador de media onda .....13
FIGURA 1.2.6 Señal de un rectificador de media onda.....14
FIGURA 1.2.7 Rectificador de onda completa.....155
FIGURA 1.2.8 Transformador.....188
FIGURA 1.2.9 Rectificador de filtro capacitivo. .....199
FIGURA 1.2.10a Señal de voltaje de salida .....199
FIGURA 1.2.10b Circuito equivalente.....20
FIGURA 1.2.11 Símbolo del diodo zener. .....233
FIGURA 1.2.12 Análisis del diodo zener. .....244
FIGURA 1.3.1 Regulador de voltaje. .....30
FIGURA1.4.1 BJT con sus respectivas entradas. .....33
FIGURA 1.4.2 Composición del transistor.....366
FIGURA 1.4.3 Representación del BJT.....377
FIGURA 1.4.4 Circuitos de un transistor en conmutación. .....399
FIGURA 1.4.5 Configuración par diferencia .....42
FIGURA 1.4.6 Configuración una sola entrada. .....433
FIGURA 1.4.7 Representación de entrada diferencial VEE. .....444

FIGURA 1.4.8 Configuración en Modo Común. .....444

**Índice de Figuras Unidad II**

FIGURA 2.1.1 Estructura del OP-AMP. .....52
FIGURA 2.1.2 Circuito interfaz para un transductor. .....54
FIGURA 2.1.3 Símbolo común de un OP-AMP. .....56
FIGURA 2.1.4 Terminales del OP-AMP……56
FIGURA. 2.1.5 Símbolo OP-AMP. .....58
FIGURA 2.1.6 OP-AMP real. .....59
FIGURA 2.1.7 se muestra el diagrama eléctrico correspondiente. ...**¡Error! Marcador no definido.**
FIGURA 2.1.8 Voltaje de Desvío del OP-AMP .....**¡Error! Marcador no definido.**
FIGURA 2.1.9 Amplificador Diferencial. .....**¡Error! Marcador no definido.**
FIGURA 2.2.1 Amplificador Inversor. .....64
FIGURA 2.2.2 Amplificador No Inversor. .....66
FIGURA 2.2.3 Sumador Inversor. .....67
FIGURA 2.2.4 Amplificador Sumador. .....69
FIGURA 2.3.1 Detector de Cruce por cero .....70
FIGURA 2.3.2 Detector de Nivel. .....71
FIGURA 2.3.3 Gráfica de transferencia del detector con Histéresis. .....72
FIGURA 2.4.1 Integrador. .....74
FIGURA 2.4.2 Muestra el comportamiento de $C_F$ en el OP-AMP. .....75
FIGURA 2.4.3 Circuito del Derivador. .....76
FIGURA 2.4.4 OP-AMO Anti logarítmico. .....77
FIGURA 2.4.5 OP-AMP logarítmico. .....77
FIGURA 2.4.6 Oscilador de relajación y su comportamiento. .....78
FIGURA 2.5.1 Amplificador de Instrumentación. .....80
FIGURA 2.6.1 Filtro Activo. .....80
FIGURA 2.6.2 Filtro Pasa Bajas. .....81
FIGURA 2.6.3 Filtro Pasa Bajas. .....82
FIGURA 2.6.4 Filtro Pasa Banda y su señal de transferencia. .....83
FIGURA 2.6.5 Filtro Rechaza Banda. .....84

**Índice de Figuras Unidad III**

FIGURA 3.1.1 Señal Analógica. .....90
FIGURA 3.1.2 Señal Digital. .....91
FIGURA 3.2.1 Estructura del convertidor Digital Analógico. .....92
FIGURA 3.2.2 Grafica del comportamiento del convertidor Digital Analógico. .....93
FIGURA 3.2.3 Muestra del error en una señal. .....94
FIGURA 3.2.4 Error de Cuantificación. .....95
FIGURA 3.2.5 Error de Offset. .....95

FIGURA 3.2.6 Error de Aplicación. .....96
FIGURA 3.2.7 Error de Linealidad. .....96
FIGURA 3.2.8 Circuito Convertidor de Resistencias Ponderadas. .....97
FIGURA 3.2.9 Convertidor D/A en escalera R2R. .....999
FIGURA 3.2.10 Convertidor D/A en red escalera invertida.....100
FIGURA 3.3.1 Conversión Analógica Digital.....102
FIGURA 3.3.2 Convertidor Analígico Digital de rampa simple……104
FIGURA 3.3.3 ADC de Rampa Doble. .....105
FIGURA 3.3.4 ADC de Seguimiento. .....106
FIGURA 3.3.5 Convertidor Digital de aproximaciones sucesivas……108
FIGURA 3.3.6 Convertidor tipo Flash. .....1099

## Bibliografía

1. Boylestad, Robert L. Electrónica teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Pearson Educación. México 2003, 2040 pags.
2. Coughlin, Robert F. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Prentice Hall. México1992.
3. Floyd, Thomas L. Dispositivos electrónicos. Pearson Educación. México 2008.
4. Franco Sergio. Diseño con Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Analógicos. Mc Graw Hill. México 2002, 680 pags.
5. http://www.cantuss.info/a/tecnologia/2010/11/Que-son-los-Convertidores-de-Senal.html
6. http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3/da-ad.pdf
7. https://sites.google.com/site/electronicaanalogicaadancin/3-1-2-terminologia-de-convertidores
8. http://148.202.12.20/~osalas/instrumentacion/DAC.htm
9. http://laimbio08.escet.urjc.es/assets/files/docencia/ECA/TEMA_9_conversion_AD_DA.pdf
10. http://server-die.alc.upv.es/asignaturas/lsed/2003-04/0.ADDA/DA/tiposda1.htm
11. http://www.forosdeelectronica.com/f26/conversion-analogica-digital-red-r2r-14602/