

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL BÁSICO CON EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

$$V_o = A(v_i^+ - v_i^-)$$

Realimentación negativa

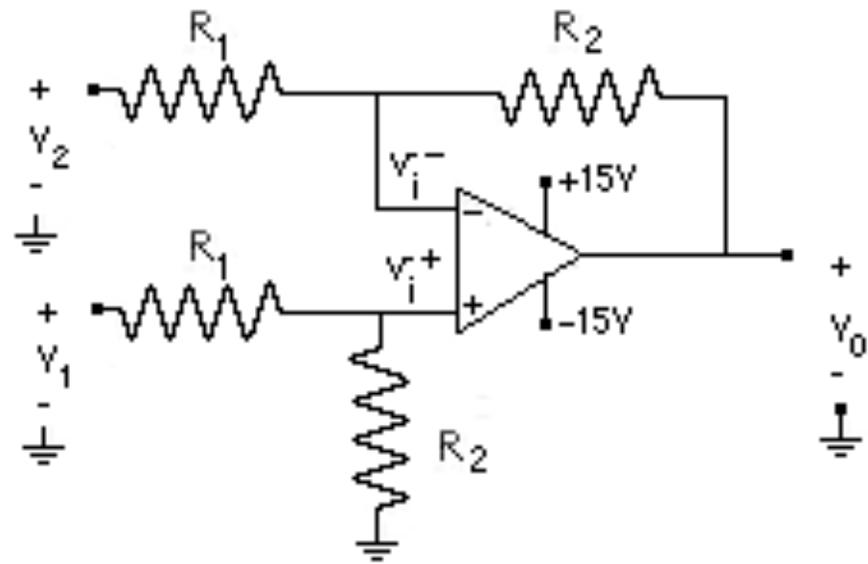
Con $A = \infty$, el voltaje de salida distinto de cero implica

$$v_i^+ = v_i^- = v_i$$

Entonces: $V_2 - v_i = R_1 I_1$ y

$$V_o - v_i = R_2 I_2$$

Si la impedancia de entrada es ∞ se cumple



$$I_1 = -I_2 \Rightarrow \frac{V_2 - v_i}{R_1} = -\frac{V_o - v_i}{R_2}$$

Despejando $\frac{V_o}{R_2}$

$$\frac{V_o}{R_2} = v_i \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) - \frac{V_2}{R_1}$$

En la entrada no inversora $v_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1$

Sustituyendo en la ecuación anterior

$$\frac{V_o}{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_2 R_1} \right) V_1 - \frac{V_2}{R_1}$$

Simplificando y despejando V_o se obtiene

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

Por lo tanto la Ganancia Diferencial está dada por

$$A_d = \frac{V_o}{V_1 - V_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

RELACIÓN DE RECHAZO EN MODO COMÚN COMMON MODE REJECTION RATIO (CMRR)

Es un parámetro que mide la calidad de un amplificador diferencial.

Se define como la relación $CMRR = 20 \log \frac{A_d}{A_{mc}}$

A_d : Ganancia en Modo Diferencial

A_{mc} : Ganancia en Modo Común, al aplicar el mismo voltaje en ambas entradas. El voltaje de salida en ese caso sería cero. Idealmente $A_{mc}=0$

Por lo tanto $CMRR \text{ ideal} = \infty$

En los amplificadores reales, la salida al aplicar voltajes iguales no es cero, pero es pequeña, por lo tanto A_{mc} es pequeña y $CMRR$ es elevada. Cuanto mayor es $CMRR$ mejor la calidad del amplificador diferencial.

SEÑALES EN MODO DIFERENCIAL Y EN MODO COMÚN

Si se tienen dos señales v_1 y v_2 en las entradas de un amplificador diferencial, puede definirse lo siguiente:

Entrada diferencial

$$v_{id} = v_2 - v_1$$

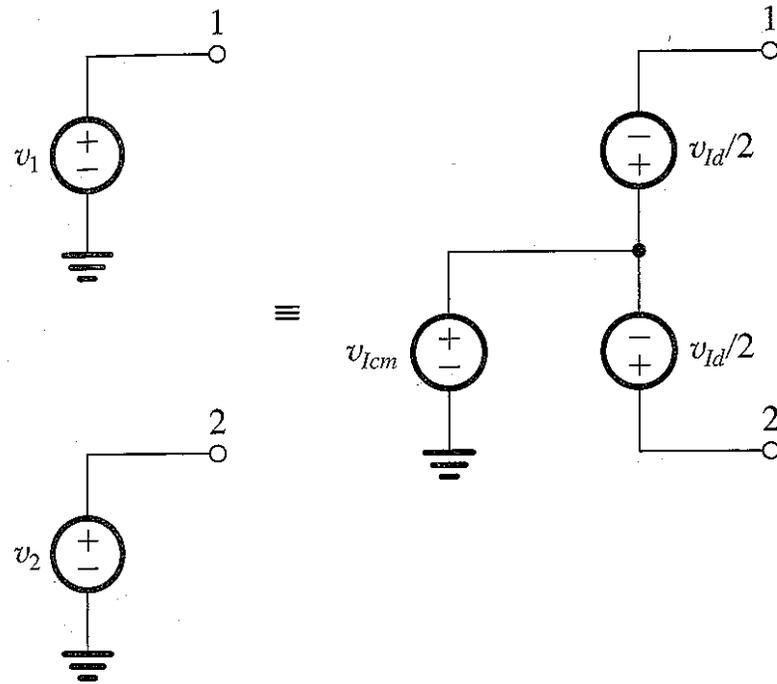
Entrada modo común

$$v_{imc} = \frac{v_2 + v_1}{2}$$

Por lo tanto

$$v_1 = v_{imc} - v_{id}/2$$

$$v_2 = v_{imc} + v_{id}/2$$



AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON LAS RESISTENCIAS NO APAREADAS

Por superposición: Cuando $v_{i1} = 0$ tenemos un amplificador inversor

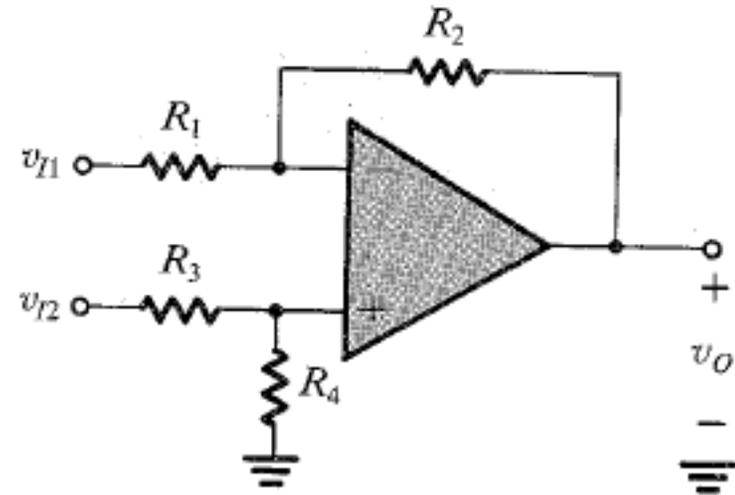
$$v_{o1} = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)v_{i1}$$

Cuando $v_{i2} = 0$ tenemos un amplificador no inversor con un divisor de voltaje a la entrada

$$v_{o2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{i2}$$

Total

$$v_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)v_{i1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_{i2}$$



Si se cumplen las relaciones $R_1 = R_3$ y $R_2 = R_4$:

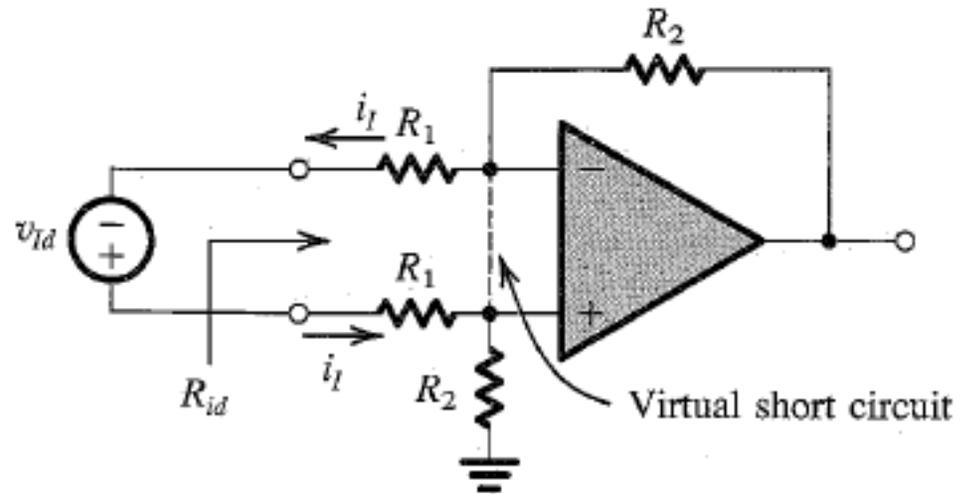
$$v_o = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)v_{i1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_2}{R_1 + R_2}v_{i2} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)(v_{i2} - v_{i1})$$

Ahora, ¿qué pasa si se aplica el mismo voltaje pero las resistencias no cumplen exactamente las relaciones indicadas?

$$v_o = \left[-\left(\frac{R_2}{R_1}\right) + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right] v_{mc}$$

Por lo tanto la selección de las resistencias del amplificador diferencial afecta el CMRR que pueda presentar.

IMPEDANCIA DE ENTRADA DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL



$$v_{id} = R_1 i_1 + v_{in} + R_1 i_1$$

$v_{in} = 0$ Tierra virtual

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_1} = 2R_1$$

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL COMERCIAL



Precision, Unity-Gain Differential Amplifier

AMP03

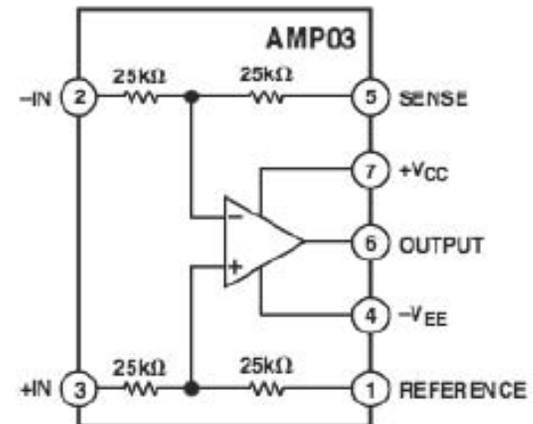
FEATURES

High CMRR: 100 dB Typ
Low Nonlinearity: 0.001% Max
Low Distortion: 0.001% Typ
Wide Bandwidth: 3 MHz Typ
Fast Slew Rate: 9.5 V/ μ s Typ
Fast Settling (0.01%): 1 μ s Typ
Low Cost

APPLICATIONS

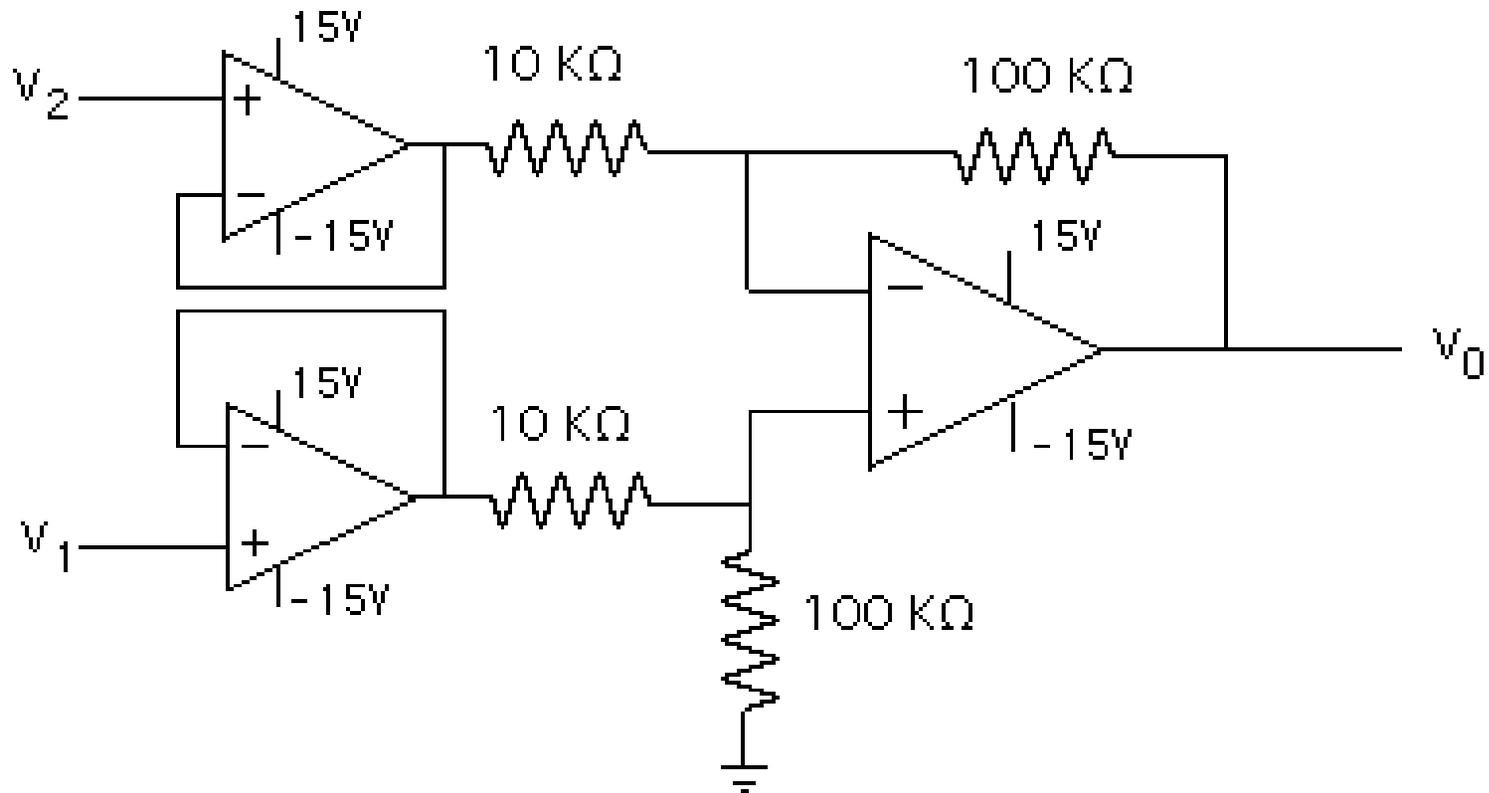
Summing Amplifiers
Instrumentation Amplifiers
Balanced Line Receivers
Current-Voltage Conversion
Absolute Value Amplifier
4 to 20 mA Current Transmitter
Precision Voltage Reference Applications
Lower Cost and Higher Speed Version of INA105

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

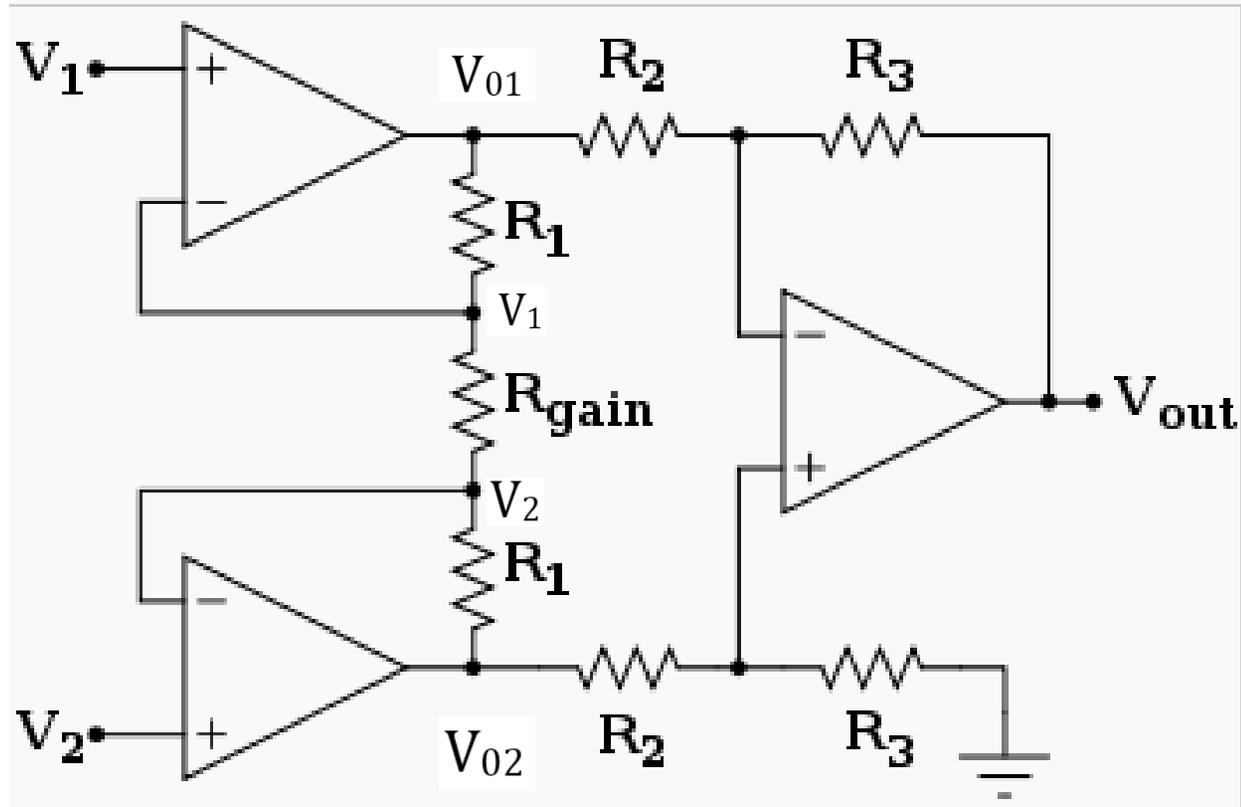


PIN CONNECTIONS

AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON ALTA IMPEDANCIA DE ENTRADA



AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN



$$i = \frac{V_{01} - V_1}{R_1}$$

$$i = \frac{V_1 - V_2}{R_{gain}}$$

$$i = \frac{V_2 - V_{02}}{R_1}$$

$$v_{01} = V_1 + iR_1$$

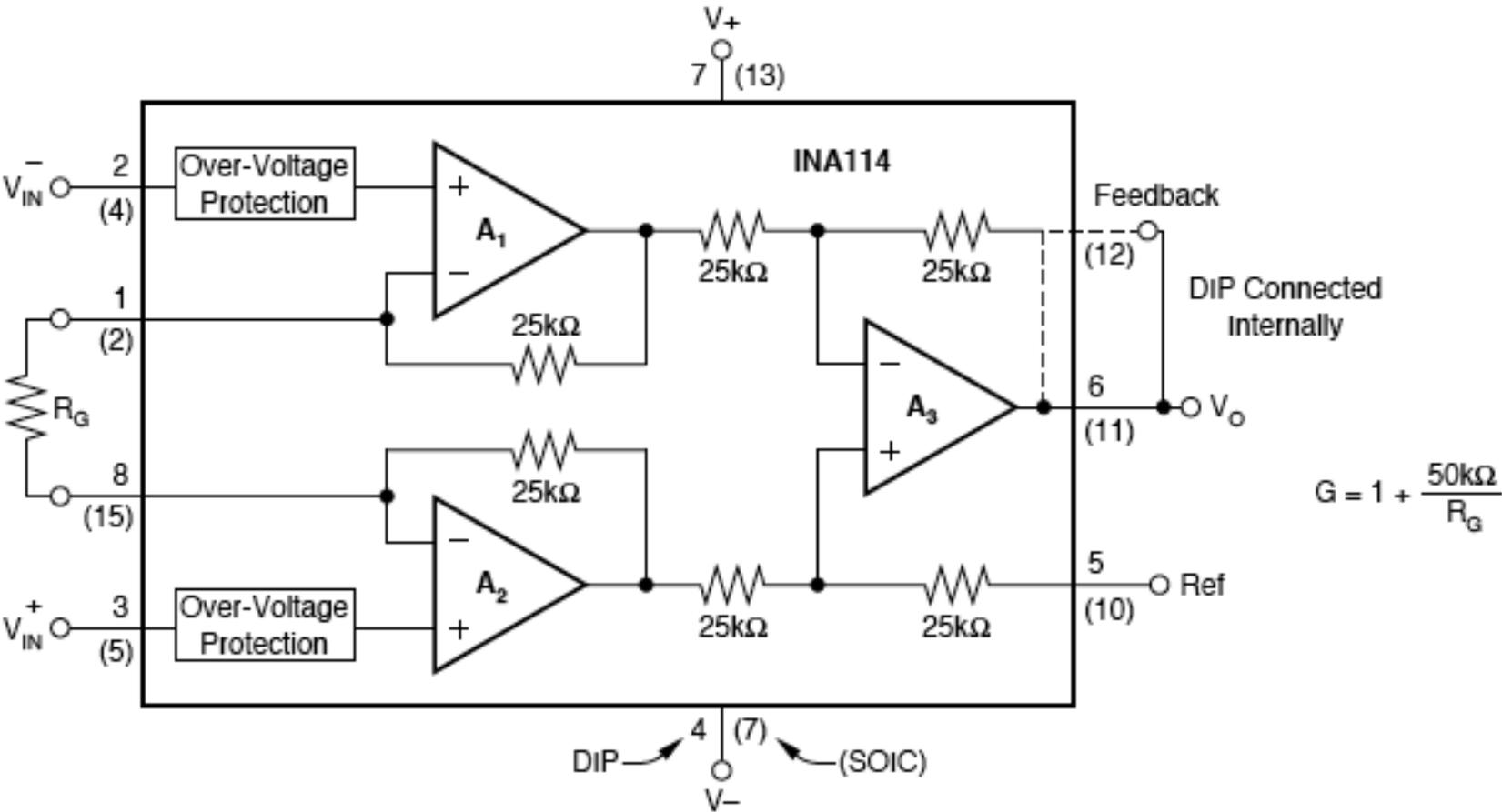
$$v_{02} = V_2 - iR_1$$

$$V_{02} - V_{01} = V_2 - V_1 - 2iR_1$$

$$V_{02} - V_{01} = V_2 - V_1 - 2 \frac{V_1 - V_2}{R_{gain}} R_1 = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) (V_2 - V_1)$$

$$V_o = \left(\frac{R_3}{R_2}\right) (v_{02} - v_{01}) = \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) (V_2 - V_1)$$

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN COMERCIAL INA114 DE TEXAS INSTRUMENT



DESCRIPCIÓN DEL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA114 (TOMADAS DE LA HOJA DE ESPECIFICACIONES)

*Es un amplificador de instrumentación de propósito general y bajo costo, que ofrece una excelente precisión y es ideal para un amplio rango de aplicaciones.

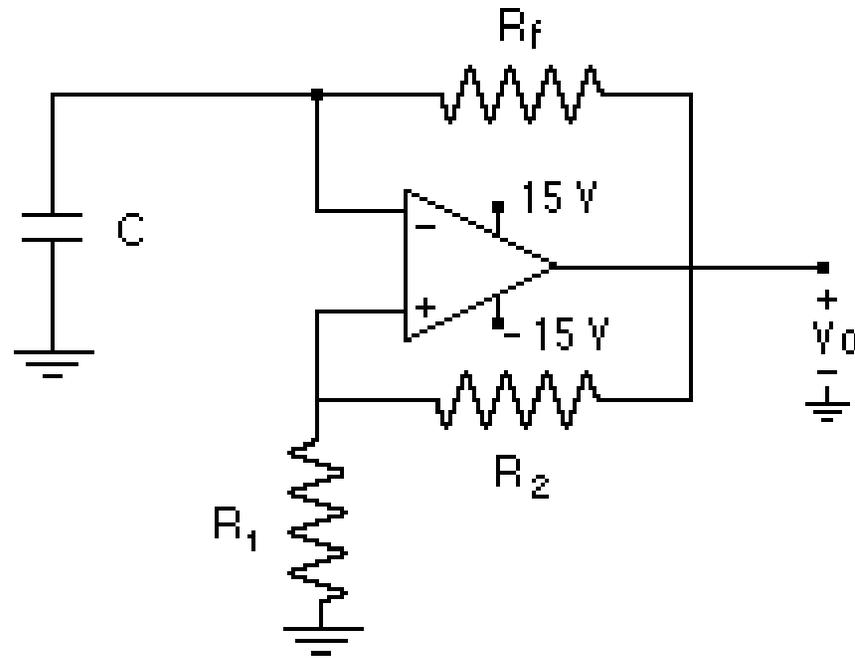
*La resistencia externa permite realizar ajustes de ganancia de 1 a 10.000. Cuenta con protección interna que le permite soportar hasta valores de 40V sin dañarse.

*Tiene un voltaje de offset muy bajo ($25\mu\text{V}$), una deriva por temperatura de $0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y una RRMC de 115dB cuando $G=1000$.

*Puede operar con fuentes de 2,25V por lo que posible usarlo en sistemas con baterías de 5V.

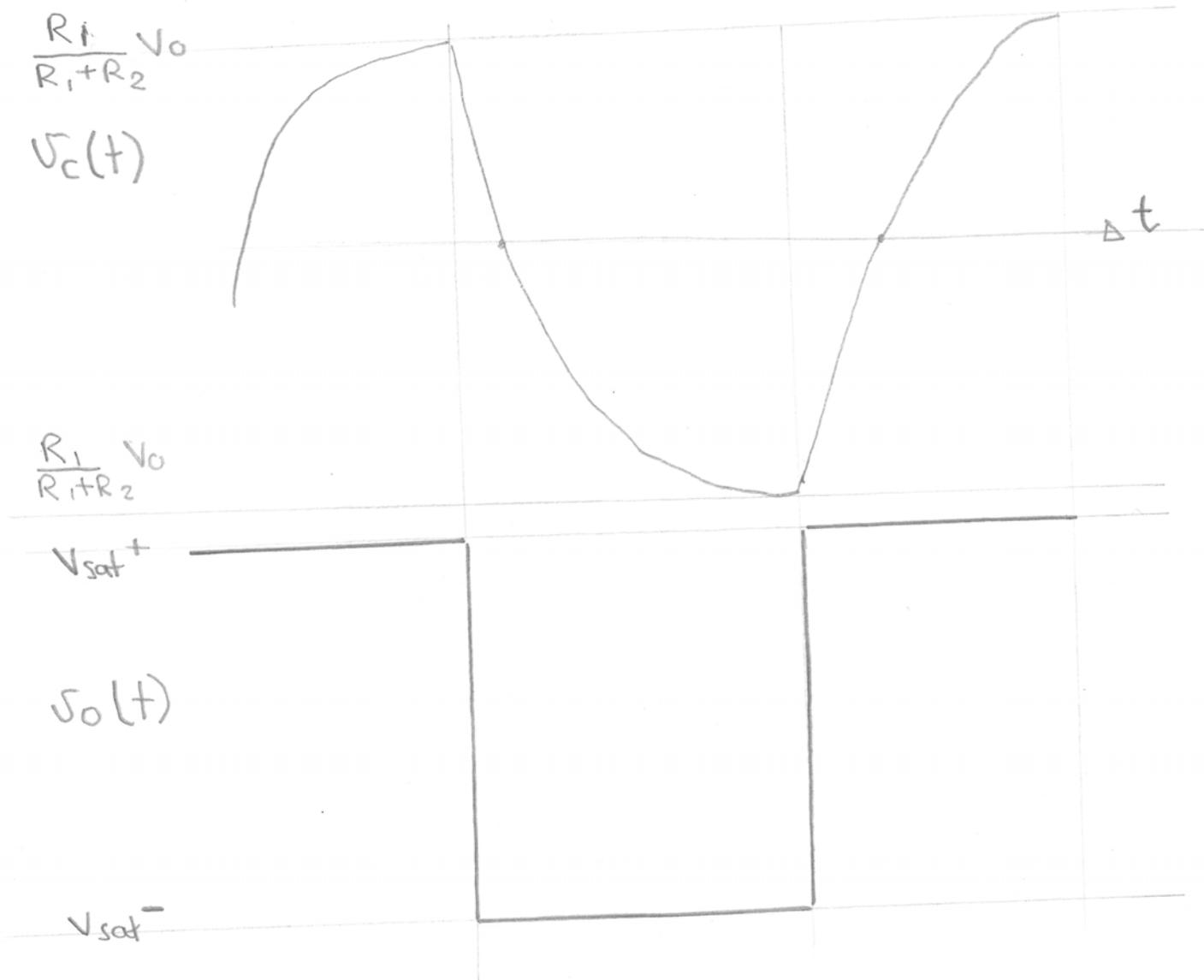
APLICACIONES NO LINEALES DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL

OSCILADOR DE ONDA CUADRADA



En este circuito el condensador se carga y se descarga, generando a la salida del amplificador operacional una forma de onda cuadrada que oscila entre el nivel de saturación del voltaje positivo y el nivel de saturación del voltaje negativo.

FORMAS DE ONDA



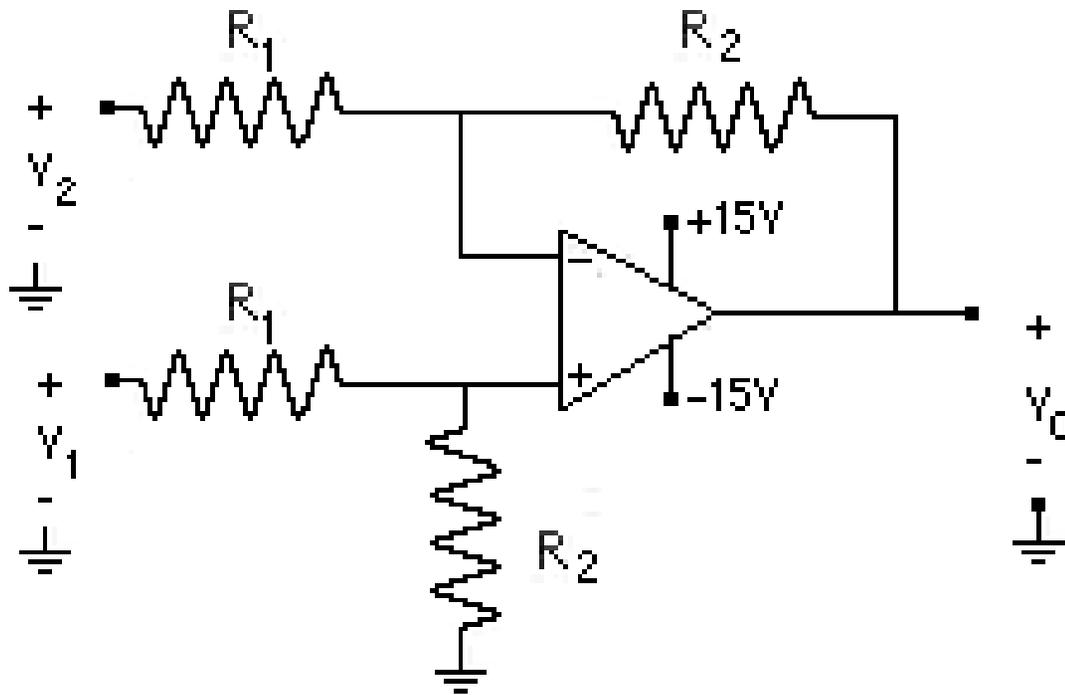
PRÁCTICA N° 1

MEDICIONES DE CARACTERÍSTICAS DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS. APLICACIÓN DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL Y OSCILADOR DE ONDA CUADRADA

- Familiarizar al estudiante con los procedimientos para medir parámetros de los circuitos con amplificadores operacionales, tales como la ganancia DC, el voltaje de “offset”, la Relación de Rechazo en Modo Común (CMRR) y las impedancias de entrada y de salida, utilizando los instrumentos adecuados.
- Familiarizar al estudiante con el funcionamiento del amplificador operacional conectado en la configuración amplificador diferencial, estudiando sus respuestas tanto con el programa de simulación como sobre el circuito real, e implementar un circuito sencillo de medición.
- Familiarizar al estudiante con el funcionamiento de un circuito no lineal con el amplificador operacional: Oscilador de onda cuadrada.

CIRCUITO DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL BÁSICO

Resistencias: $R_1 = 10\text{ K}\Omega$ $R_2 = 100\text{ K}\Omega$



PREPARACIÓN SOBRE EL AMPLIFICADOR OPERACIONAL BÁSICO

- * Deducir el voltaje de salida en función de las entradas
- * Definir voltaje de offset
- * Definir CMRR
- * Calcular la impedancia de entrada en DC para cada una de las entradas, considerando que la otra entrada se encuentra conectada a tierra.
- * Hacer el diagrama circuital completo del amplificador diferencial con el programa de simulación utilizando el modelo del 741
- * Dibujar el diagrama de cableado del amplificador diferencial básico, tal como se va a montar en el protoboard e indicar cómo se van a conectar los instrumentos para medir experimentalmente el voltaje de "offset", la relación de rechazo en modo común, la ganancia de voltaje para diferentes voltajes DC, las mediciones de la impedancia de entrada en DC para cada una de las entradas y la medición de la impedancia de salida.

PRUEBA INICIAL

Conecte ambas entradas a 0V (tierra) y mida el voltaje de salida. Si dicho voltaje es muy pequeño, del orden de los milivoltios, el amplificador operacional está funcionando correctamente. En caso contrario, está dañado y debe cambiarlo por otro.

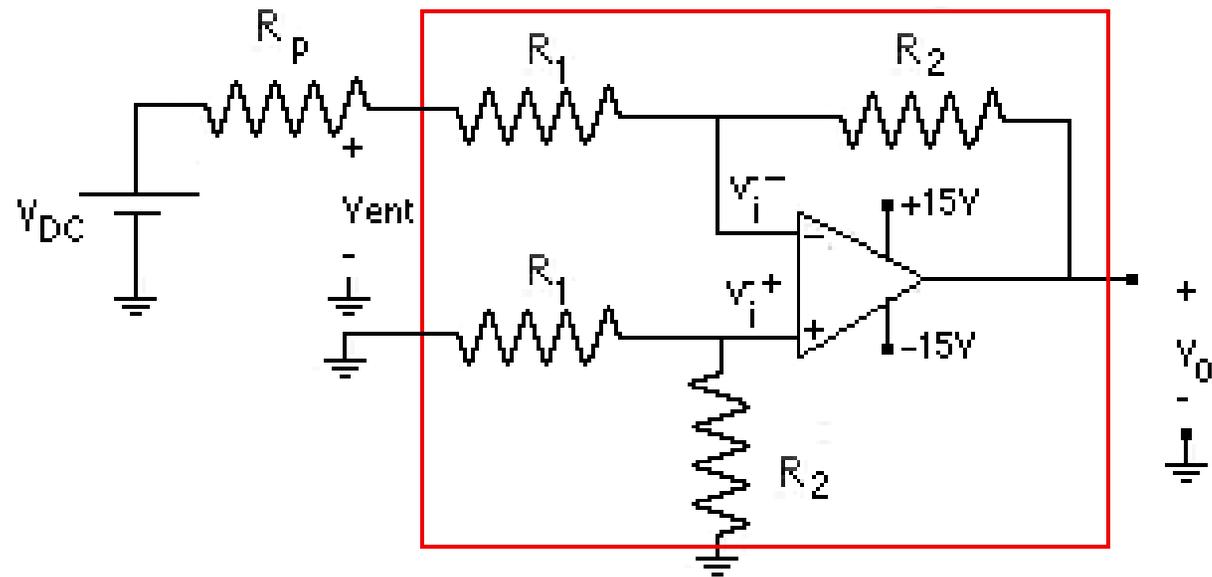
Este es también el procedimiento para medir el voltaje de "offset".

RELACIÓN DE RECHAZO EN MODO COMÚN

Voltaje salida para $V_1 = V_2 = 1V$	
Ganancia en modo común A_{CM}	
Voltaje salida para $V_1 = 0; V_2 = 1V$	
Ganancia₁ en modo diferencial A_{d1}	
Voltaje salida para $V_1 = 1; V_2 = 0V$	
Ganancia₂ en modo diferencial A_{d2}	
Ganancia modo diferencial prom. A_d	
Relación A_{d1} / A_{CM}	
CMRR = $20 \log A_{d1} / A_{CM}$	

IMPEDANCIA DE ENTRADA DE LA ENTRADA INVERSORA DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL BÁSICO, CON LA ENTRADA NO INVERSORA CONECTADA A TIERRA.

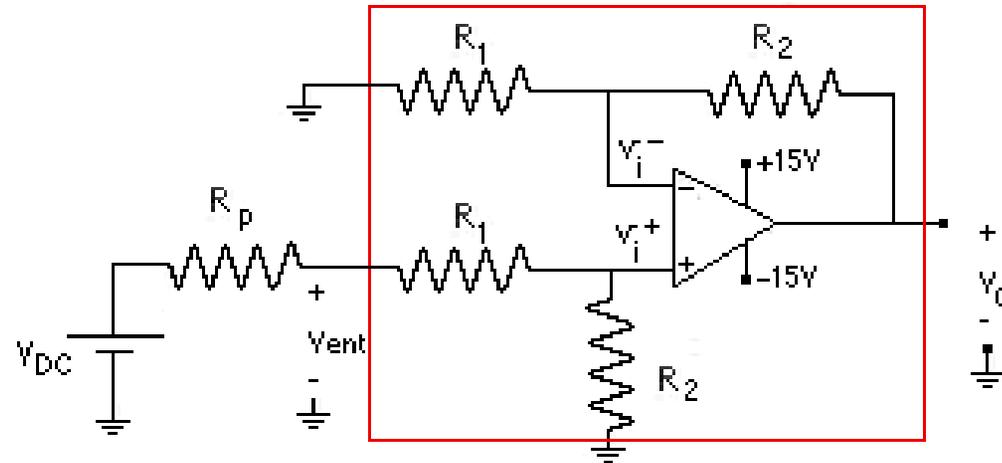
$$R_{in} = R_1$$



Se ajusta V_{DC} para que la salida sean 5V y R_p del orden de los $k\Omega$

IMPEDANCIA DE ENTRADA DE LA ENTRADA NO INVERSORA DEL AMPLIFICADOR DIFERENCIAL BÁSICO, CON LA ENTRADA INVERSORA CONECTADA A TIERRA.

$$R_{in} = R_1 + R_2$$



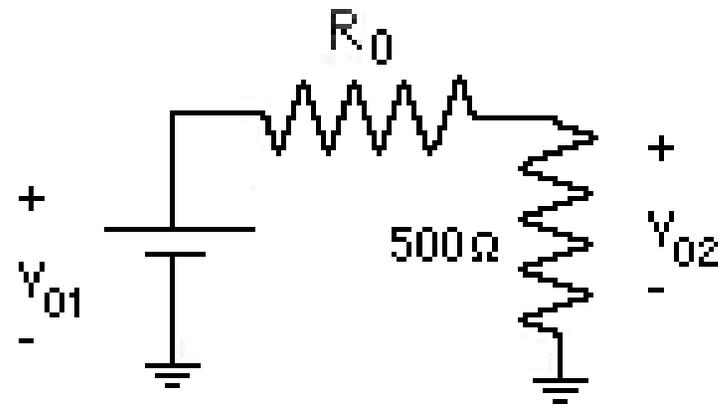
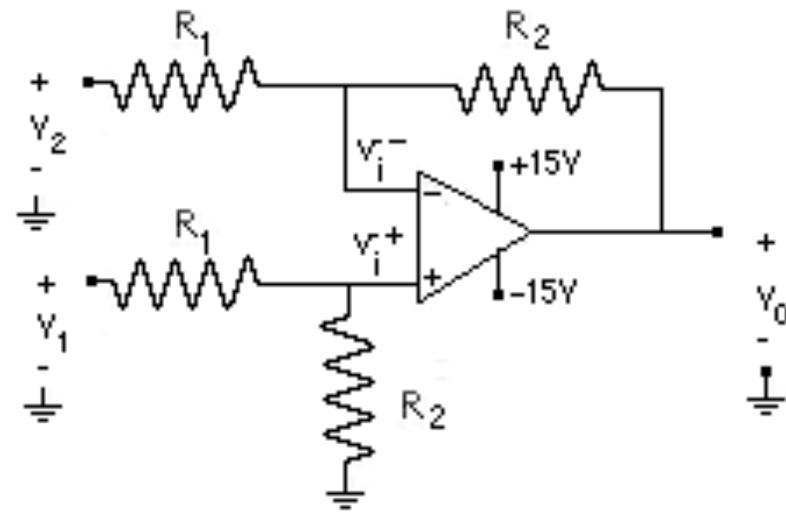
Se ajusta V_{DC} para que la salida sean 5V y R_p del orden de los $k\Omega$

IMPEDANCIA DE SALIDA

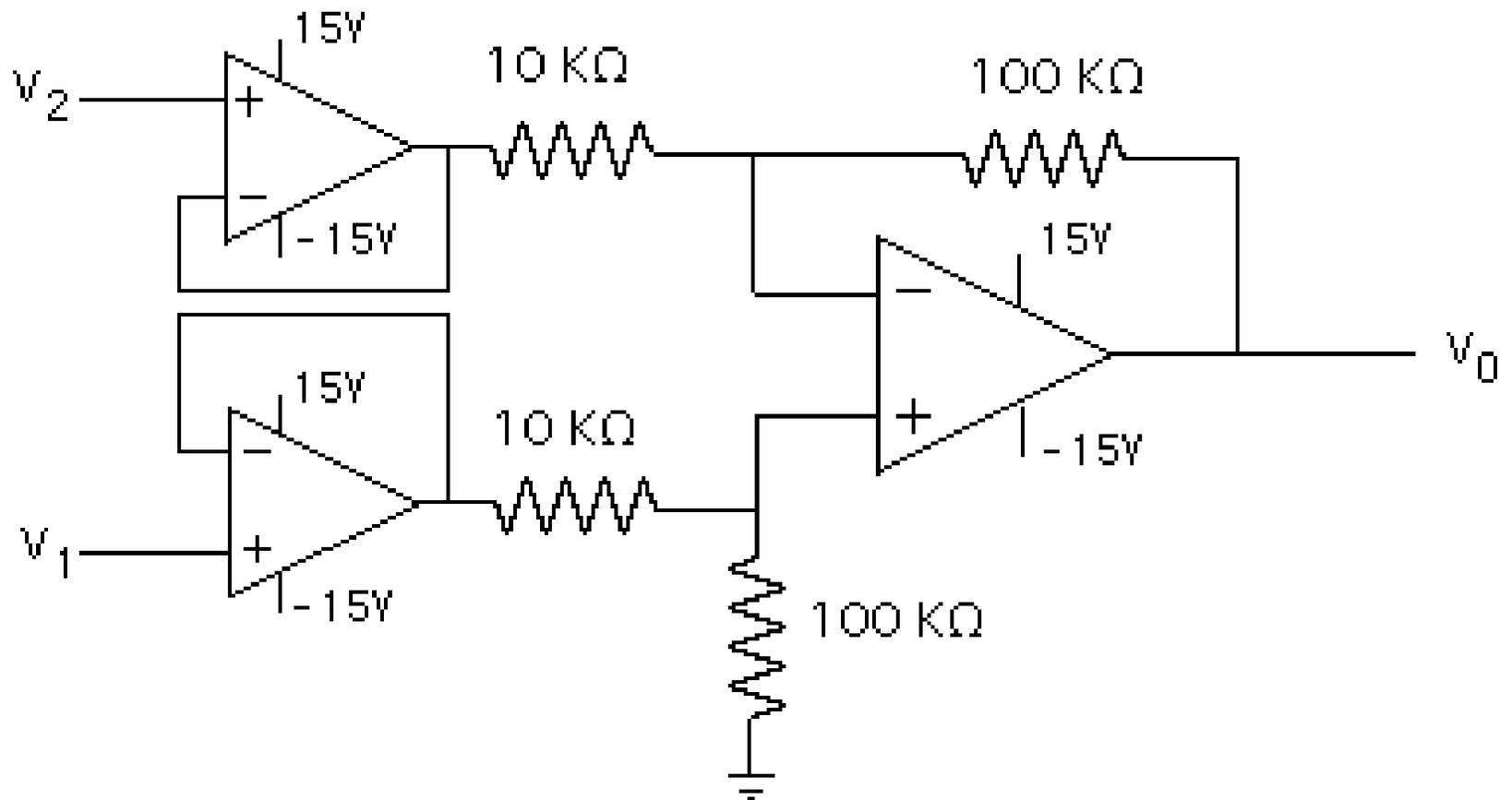
* Se aplica un voltaje de entrada que produzca una salida de 1 o 2 V y se mide cuidadosamente el voltaje de salida V_{01} .

* Se coloca una resistencia de carga de unos 100Ω a 500Ω (puede probarse con un valor menor) y se mide cuidadosamente el voltaje de salida V_{02} .

* Con esos datos se puede plantear el circuito mostrado y determinar el valor de R_o .

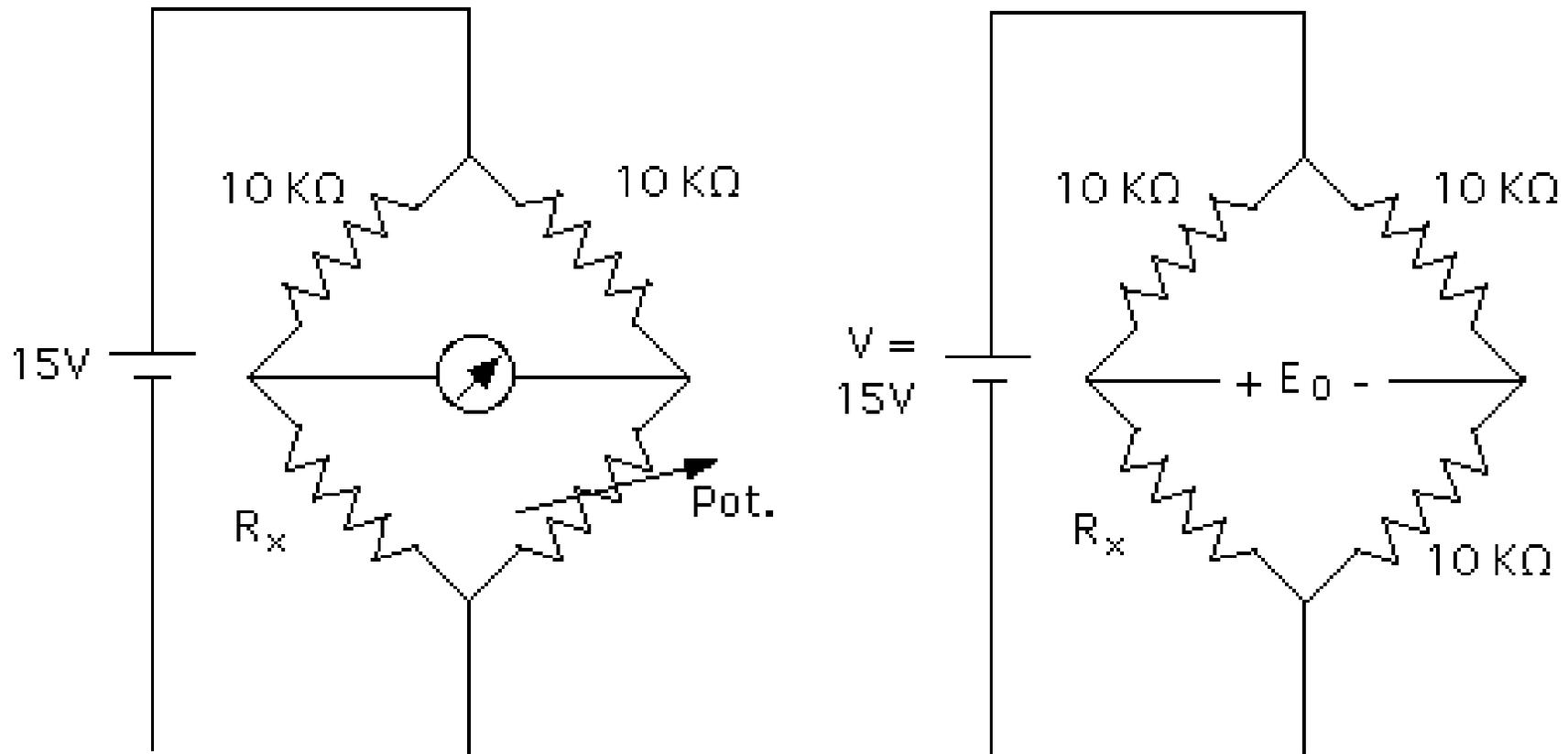


AMPLIFICADOR DIFERENCIAL CON ALTA IMPEDANCIA DE ENTRADA (AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN SIMPLE)



CIRCUITO DE MEDICIÓN DE VARIACIÓN DIFERENCIAL DEL VALOR DE UNA RESISTENCIA UTILIZANDO EL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN SIMPLE

PRIMERA ETAPA: PUENTE DE WHEATSTONE



ECUACIONES DEL PUENTE DE WHEATSTONE

$$V_a = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

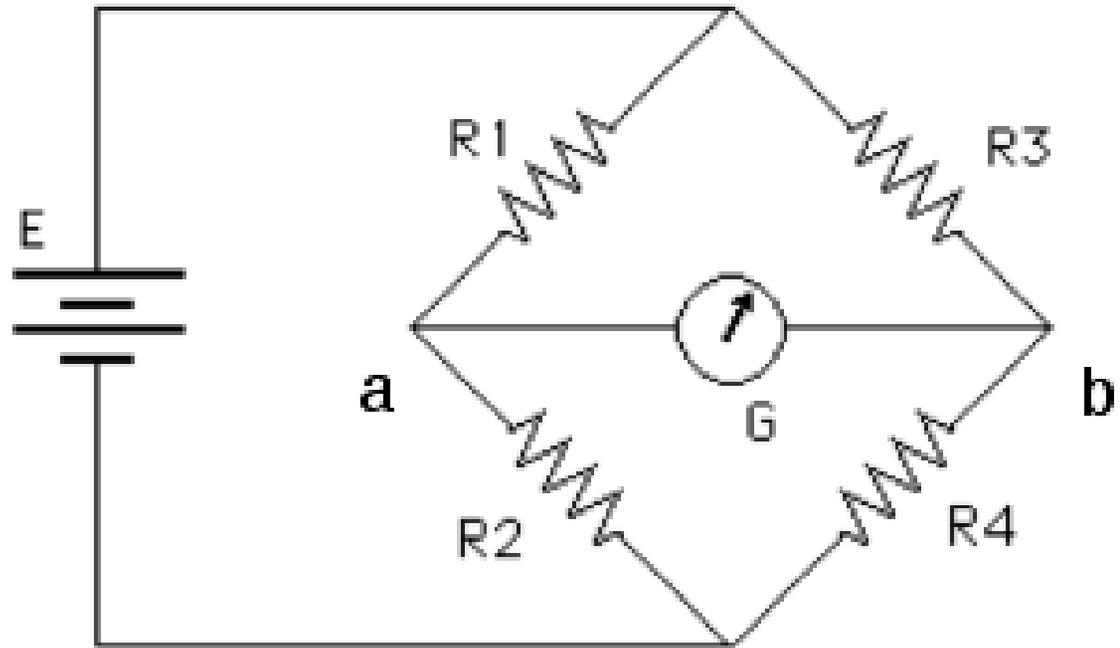
$$V_b = \frac{R_4}{R_3 + R_4} E$$

$$V_a = V_b$$

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

$$R_2 = \frac{R_1}{R_3} R_4 = KR_4$$

$$R_x = KR_{\text{var}}$$



PUENTE DE WHEATSTONE PARA MEDICIONES DIFERENCIALES

$$R_x = R + \Delta R = 10k\Omega + \Delta R = 10 + \Delta R$$

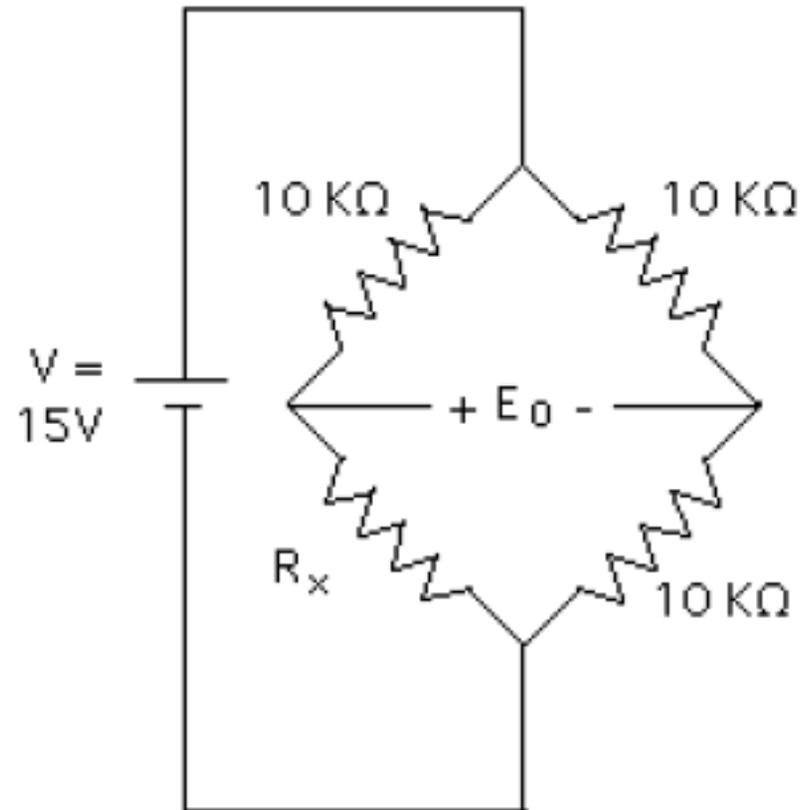
$$V_a = \frac{10 + \Delta R}{20 + \Delta R} V$$

$$V_b = \frac{10}{20} V = \frac{1}{2} V$$

$$E_o = V_a - V_b = \frac{10 + \Delta R}{20 + \Delta R} V - \frac{1}{2} V$$

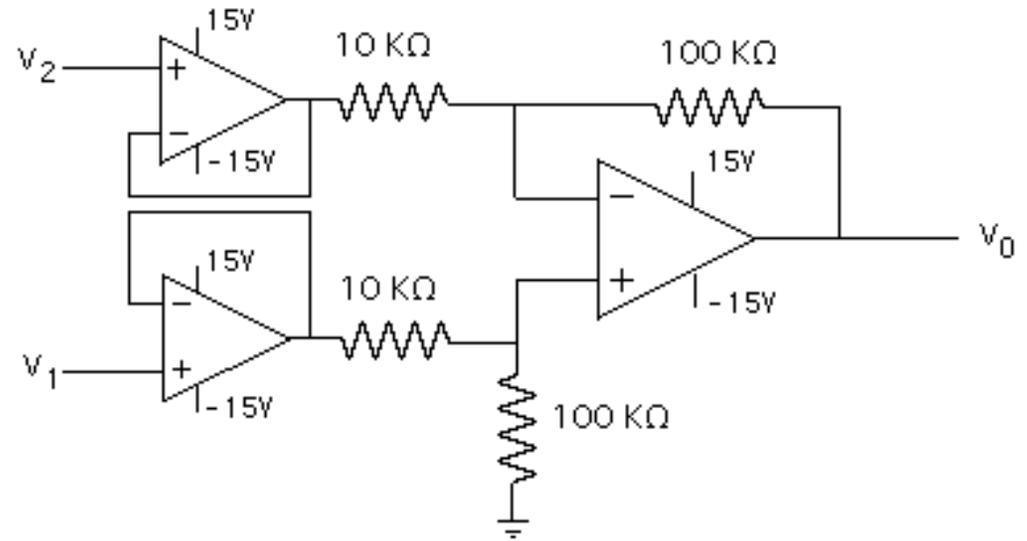
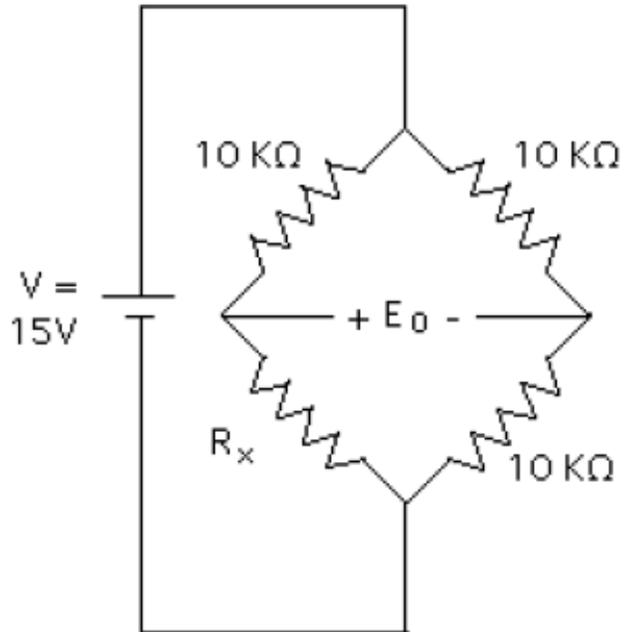
$$\frac{E_o}{V} = \frac{20 + 2\Delta R - 20 - \Delta R}{(20 + \Delta R) \times 2}$$

$$\frac{E_o}{V} = \frac{\Delta R}{2(20 + \Delta R)} \approx \frac{\Delta R}{40}$$



$$\Delta R = \frac{E_o}{V} 40(k\Omega)$$

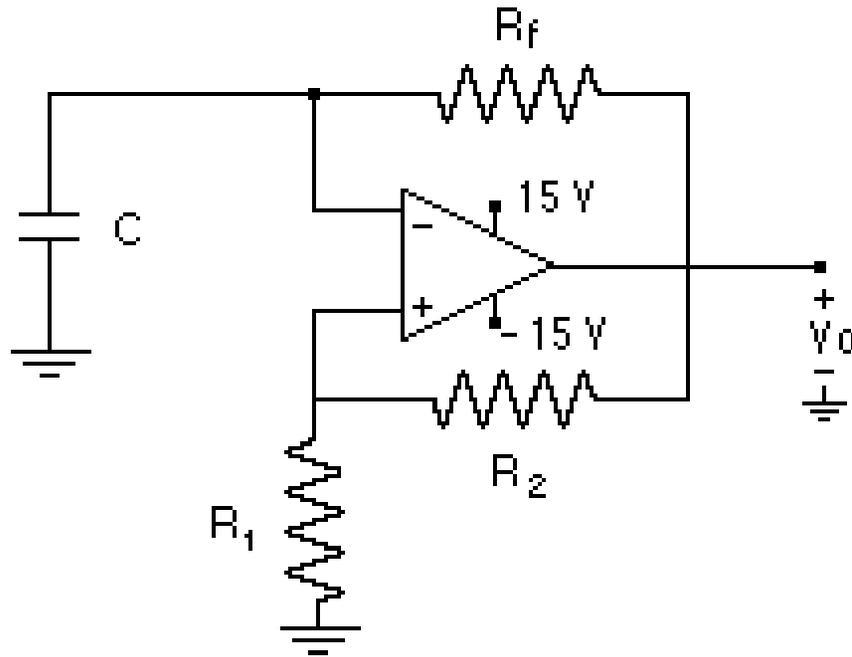
MEDIDOR DIFERENCIAL CON AMPLIFICACIÓN



$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1) = \frac{R_2}{R_1} E_0 = \frac{R_2}{R_1} \frac{V \Delta R}{40}$$

$$\Delta R = \frac{R_1}{R_2} 40 \frac{v_o}{V} (k\Omega)$$

OSCILADOR DE ONDA CUADRADA



En este circuito el condensador se carga y se descarga, generando a la salida del amplificador operacional una forma de onda cuadrada que oscila entre el nivel de saturación del voltaje positivo y el nivel de saturación del voltaje negativo.

Valores: $R_1 = 10\text{k}\Omega$, $R_2 = 33\text{k}\Omega$, $R_f = 22\text{k}\Omega$ $C = 47\text{nF}$

SIMULACIONES

Circuito oscilador de onda cuadrada

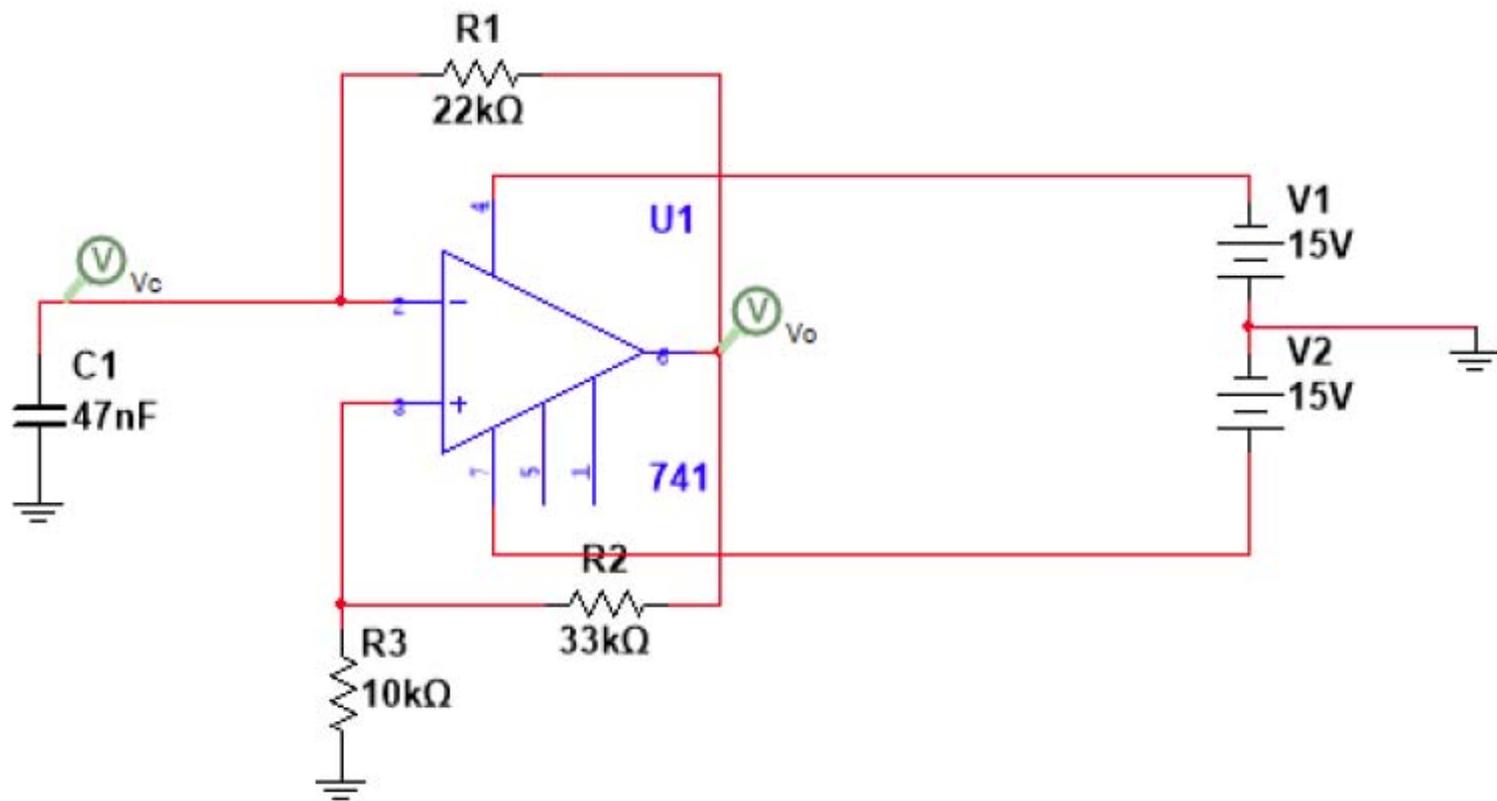


Figura 1. Diagrama

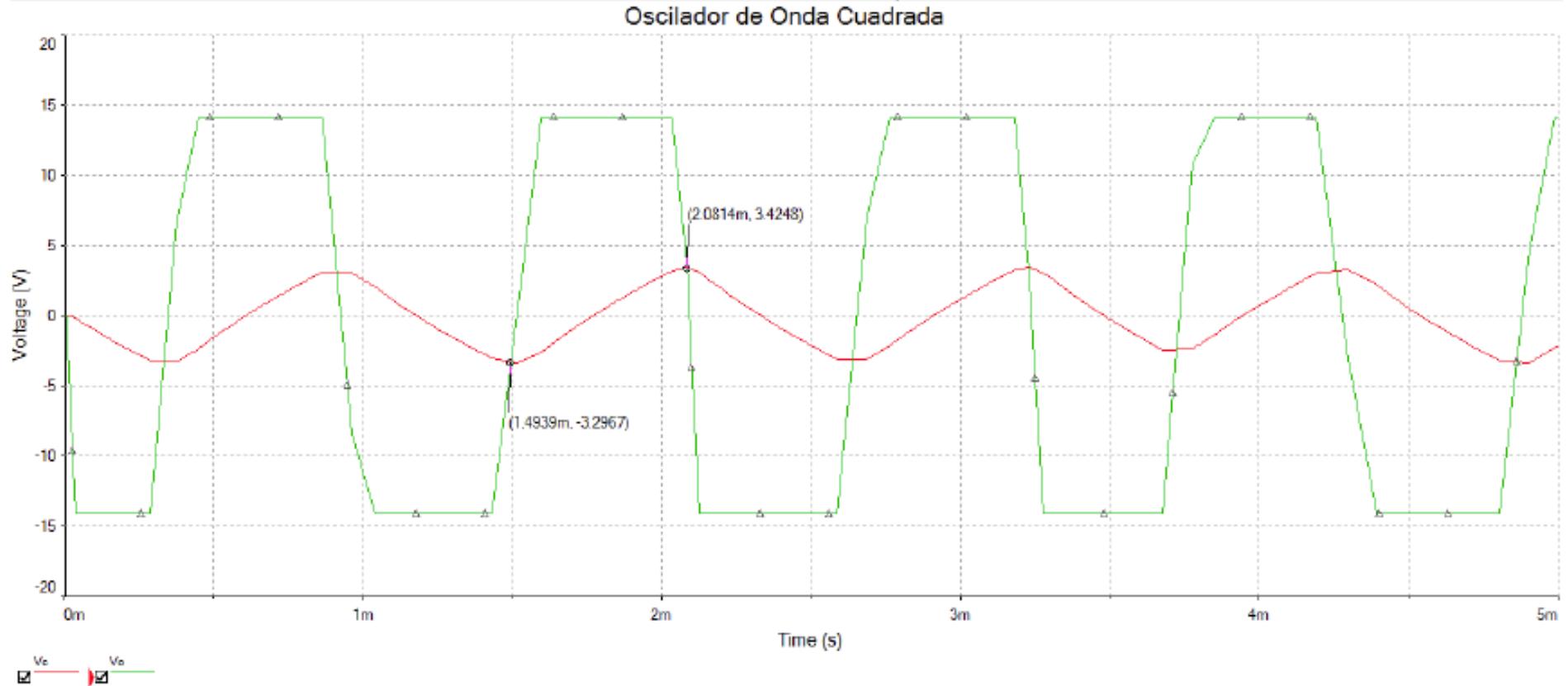


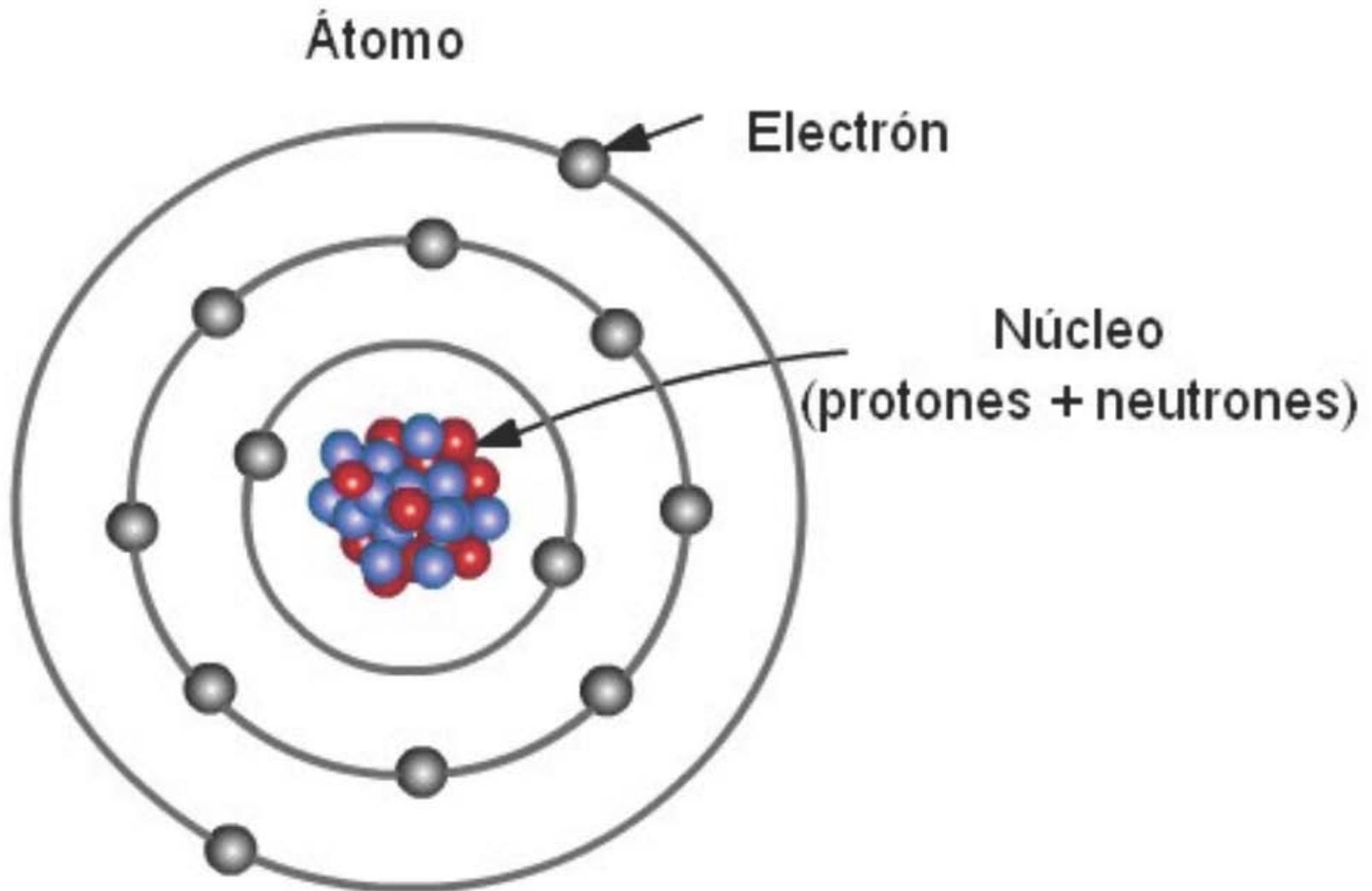
Figura 2. Gráficas

La línea verde indica el voltaje de salida del OPAMP, representa una onda cuadrada con amplitud máxima alrededor de 1V por debajo de la alimentación del OPAMP. Se observa una ligera distorsión debido a las características no ideales del OPAMP (Slew Rate).

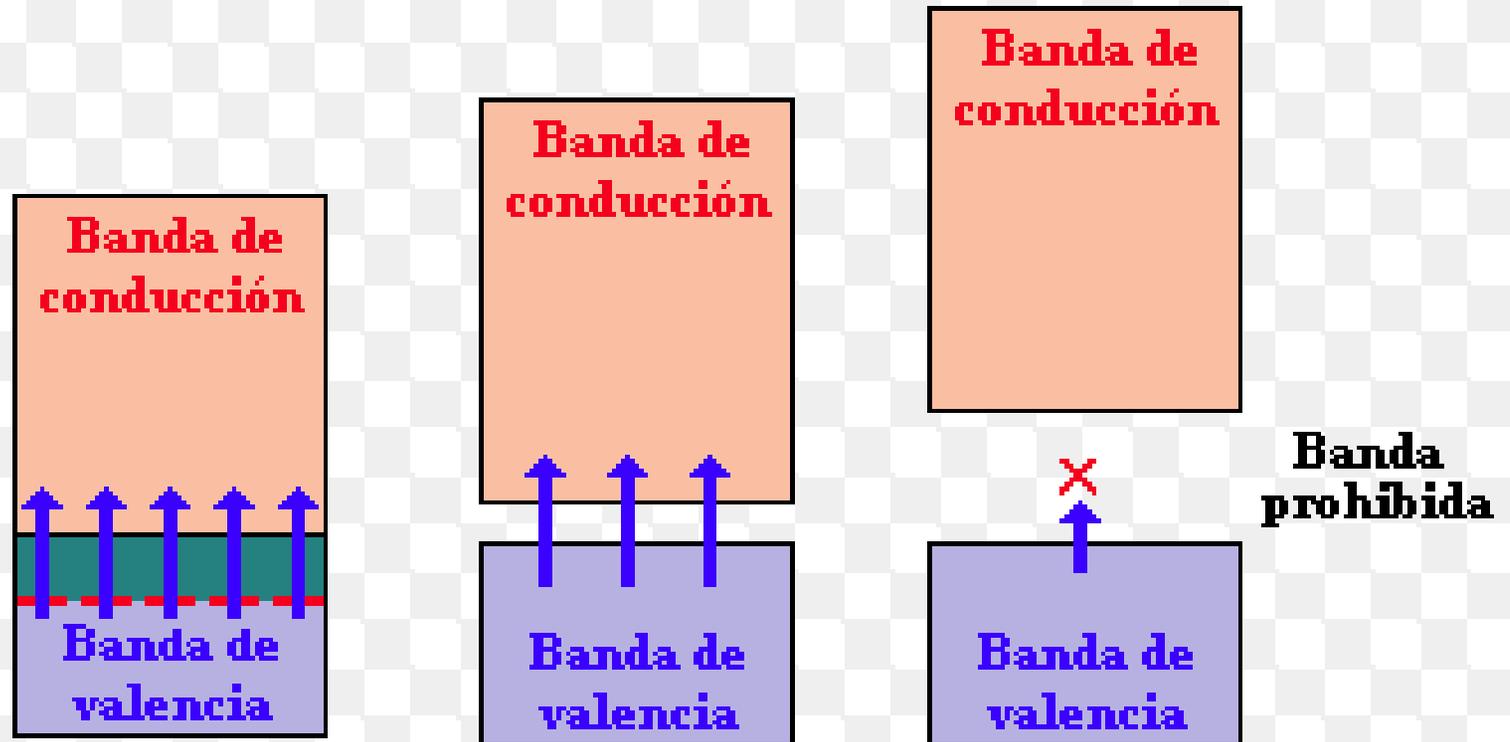
La línea roja indica el voltaje del capacitor. Se observan los ciclos de carga y descarga. Su máximo corresponde al divisor de voltaje entre R2 y R3 en $\pm 3,49V$

SEMICONDUCTORES

ESTRUCTURA DEL ÁTOMO



BANDAS DE VALENCIA Y DE CONDUCCIÓN

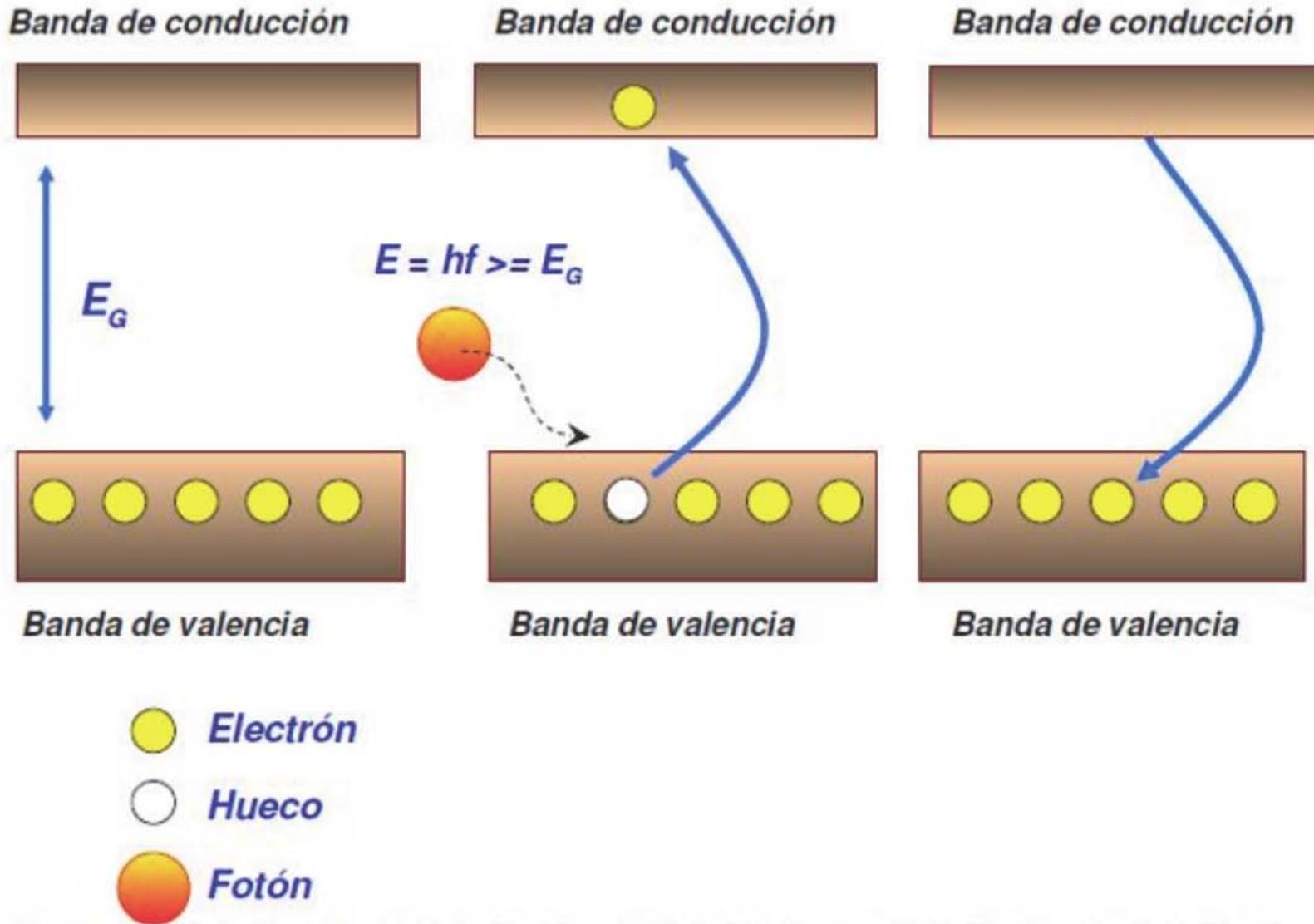


Conductor

Semiconductor

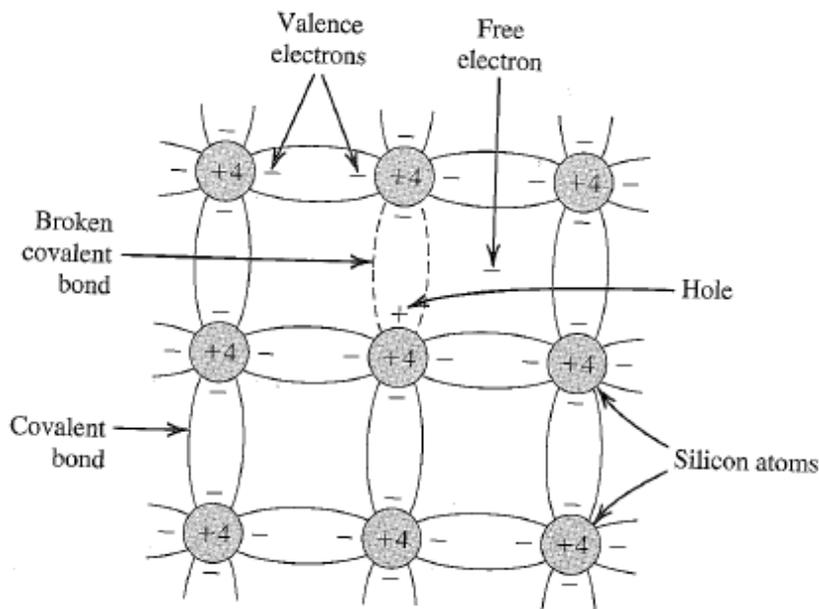
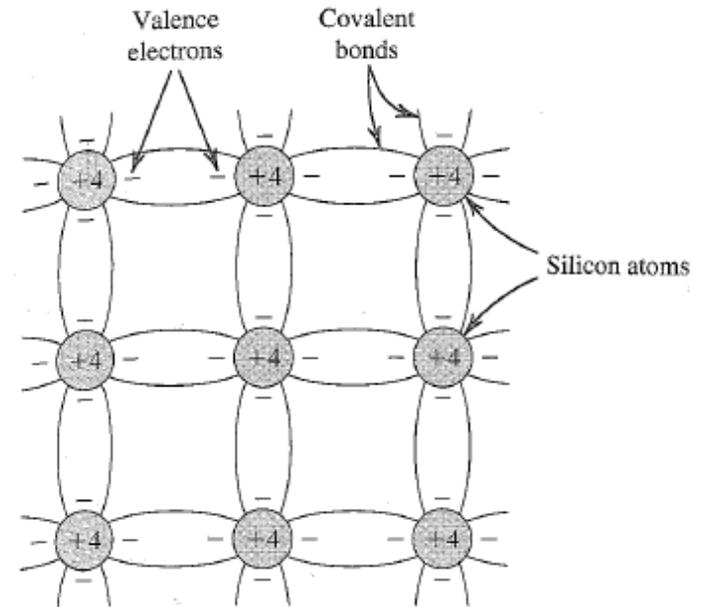
Aislante

MECANISMOS DE CONDUCCIÓN EN UN SEMICONDUCTOR



SEMICONDUCTORES

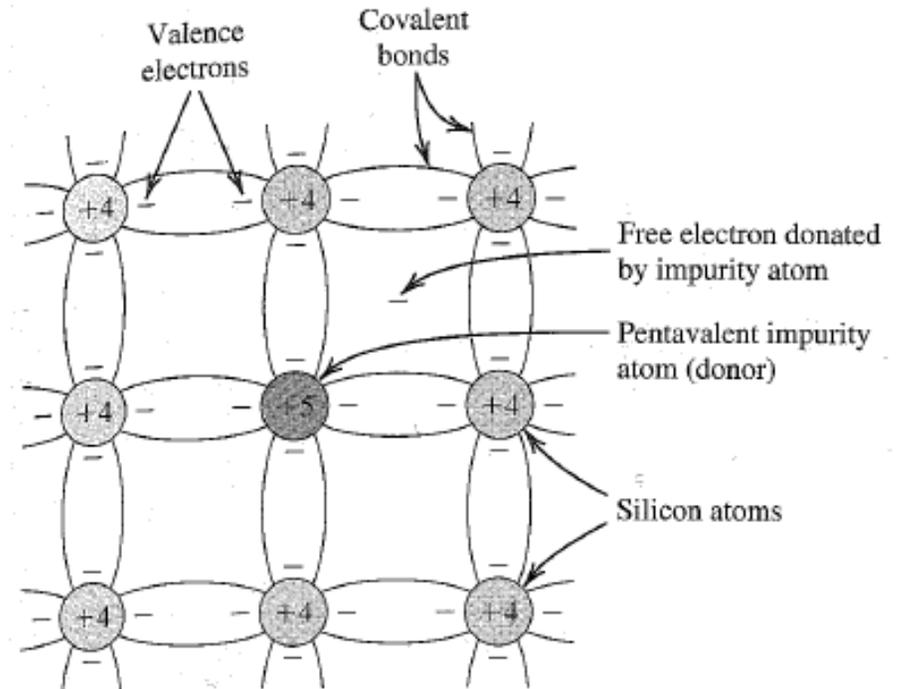
- *Semiconductor
- *Cristal de silicio
- *Enlaces covalentes. Banda de valencia
- *Semiconductor intrínseco
- *Baja temperatura: No hay conducción
- *Temperatura ambiente: Suficiente energía para que algunos electrones pasen a la banda de conducción



- * Hay electrones libres
- * Los electrones dejan espacios: Huecos
- * Los huecos los ocupan otros electrones
- * Conducción en la banda de valencia
- * Conducción en la banda de conducción
- * Electrones: Portadores negativos
- * Huecos : Portadores positivos

DOPAJE CON IMPUREZAS

- * Se difunden átomos de impurezas
- * Donantes: Valencia 5: Fósforo, Arsénico, Antimonio (Material N)
- * Aceptoras: Valencia 3: Boro, Indio, Aluminio (Material P)
- * Semiconductores extrínsecos
- * Portadores mayoritarios y minoritarios
- * En un semiconductor extrínseco la densidad de portadores mayoritarios es aproximadamente constante mientras que la densidad de portadores minoritarios aumenta con la temperatura.
- * Cuando la densidad de portadores minoritarios llega al 10% de la densidad de portadores mayoritarios, el semiconductor se comporta como intrínseco.



TIPOS DE CORRIENTE EN UN SEMICONDUCTOR

Corriente de Difusión:

- * Es el flujo de carga eléctrica asociado con el movimiento aleatorio debido a la agitación térmica.
- * Lo causa el gradiente de concentración de los portadores.
- * Los huecos y electrones se mueven en la misma dirección (de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración).
- * Las corrientes tienen signo opuesto.

Corriente de Deriva, Arrastre o Desplazamiento:

- * Es el flujo de carga eléctrica producido por la aplicación de un campo eléctrico.
- * Los huecos se mueven en una dirección en la capa de valencia y los electrones se mueven en la otra dirección en la capa de conducción.
- * Las corrientes tienen el mismo sentido.

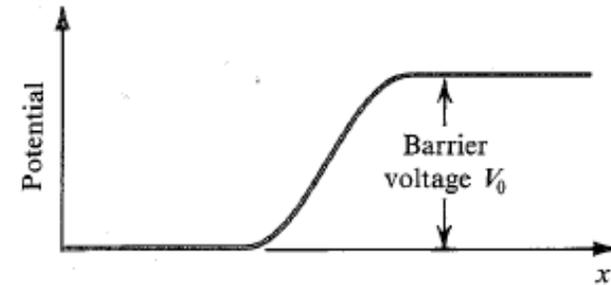
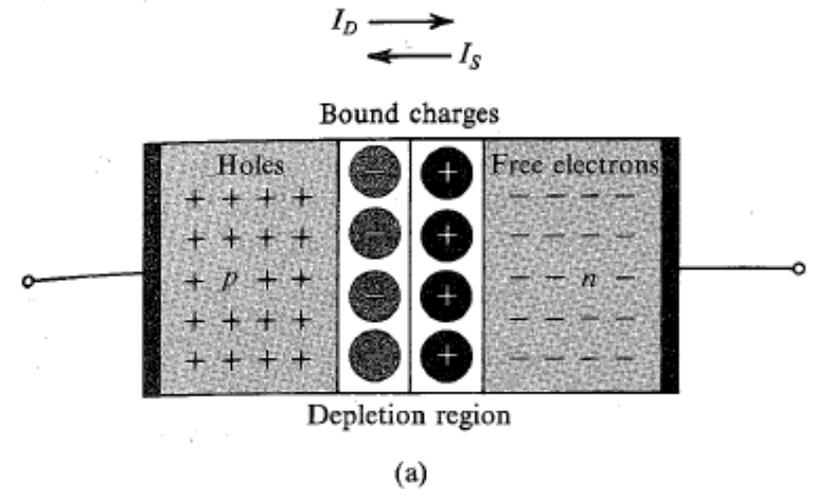
LA JUNTURA PN

*Se forma al poner en contacto un semiconductor P con uno N.

* Los huecos se difunden de P a N y los electrones de N a P, dando lugar a la **corriente de difusión I_D** , cuya dirección es de la región P a la N.

* Al cruzar la juntura, los que eran portadores mayoritarios en su región se convierten en minoritarios y se recombinan con los respectivos átomos.

*Del lado P hay átomos de impurezas aceptoras sin cubrir y del lado N impurezas donantes sin cubrir. Se forma la **región de vaciamiento** o **zona de carga espacial** al quedar átomos (iones) con carga positiva en la región N y negativa en la región P.



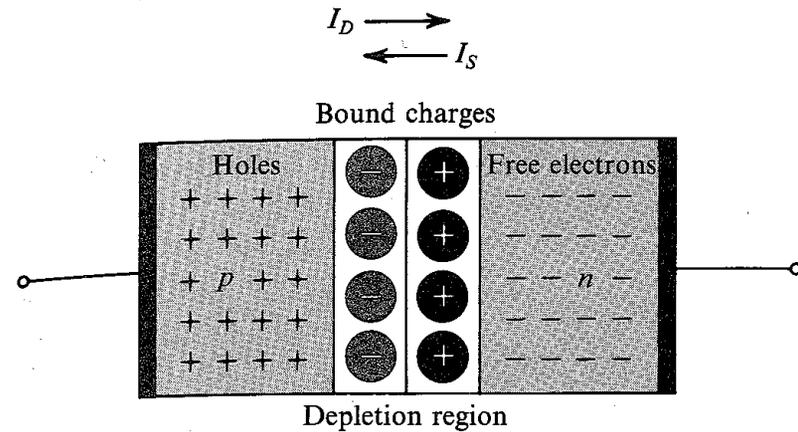
* Se genera un campo eléctrico que forma una barrera de potencial V_0 la cual se opone a que continúe la difusión.

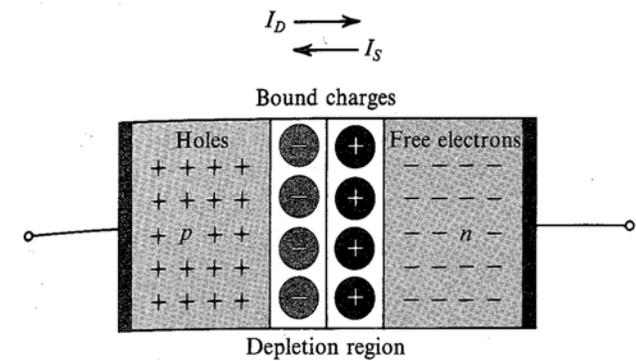
* Además de la corriente de difusión, hay **corriente de deriva** I_S debido al movimiento de los portadores minoritarios.

* Los electrones de la región P generados térmicamente que llegan a la barrera de potencial son barridos hacia la región N y los huecos de la región N generados térmicamente son barridos hacia la región P donde pasan a ser portadores mayoritarios.

* Dado que la corriente I_S se debe a los portadores minoritarios generados térmicamente, su valor depende fuertemente de la temperatura y es independiente del valor del voltaje de la barrera de potencial V_0

* Bajo condiciones de circuito abierto debe haber equilibrio $I_D = I_S$





* El equilibrio lo mantiene V_0 .

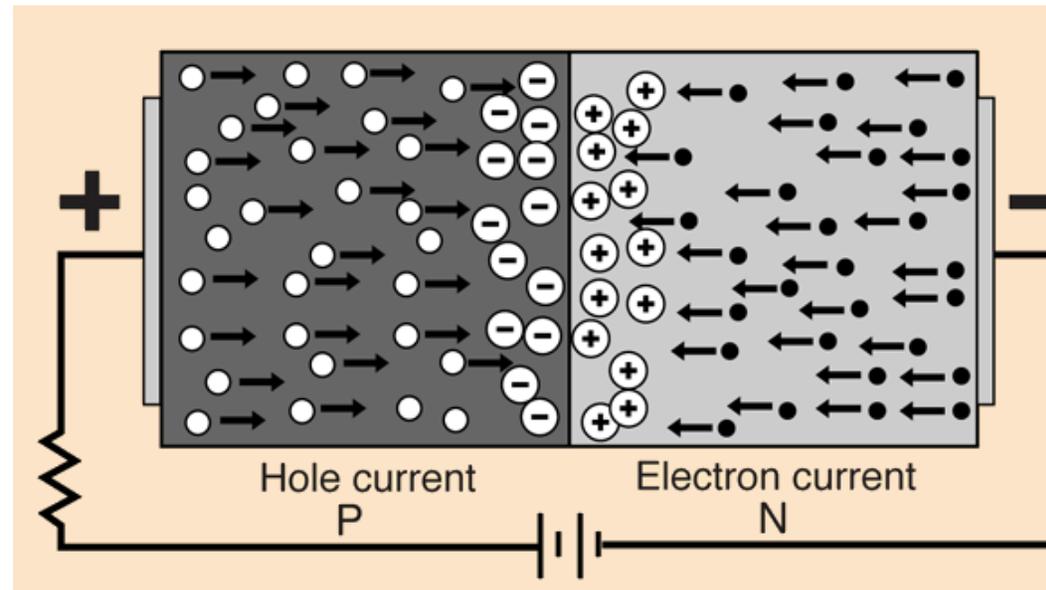
* Si I_D aumenta porque hay más difusión de una región a la otra, aumentará el número de cargas no cubiertas, por lo que aumentará V_0 , lo cual hará que la difusión disminuya, hasta que $I_D = I_S$.

* Si I_S aumenta, el número de impurezas sin cubrir de cada lado disminuye, por lo que la zona de carga espacial se hace más estrecha, el valor de V_0 disminuye, lo cual hace que aumente la corriente de difusión I_D hasta que nuevamente $I_D = I_S$.

* V_0 depende de las concentraciones de portadores y de la temperatura. Para dispositivos de silicio, su valor está entre 0,6 y 0,8 V.

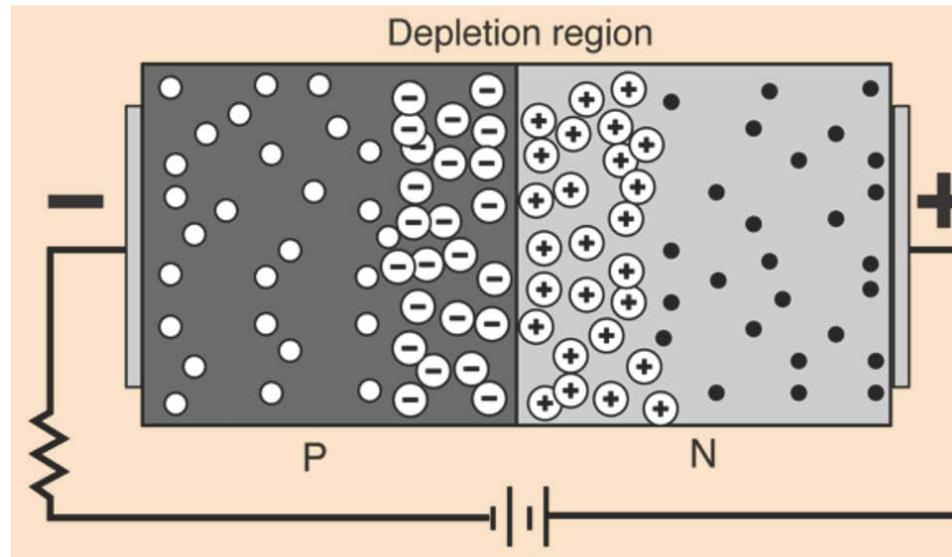
* Cuando el dispositivo no está conectado, el voltaje entre los terminales es cero. Esto se debe a que los voltajes de las juntas metal-semiconductor de los extremos, equilibran exactamente el voltaje de la zona de carga espacial. Si esto no fuera así, podríamos obtener energía de las juntas PN, lo cual viola el principio de conservación de la energía.

LA JUNTURA PN EN POLARIZACIÓN DIRECTA



Disminuye la barrera de potencial V_0 , lo cual hace que aumente la corriente de difusión tanto de los huecos como de los electrones, haciendo que circule una corriente I de la región P a la región N, donde $I = I_D - I_S$.

LA JUNTURA PN EN POLARIZACIÓN INVERSA



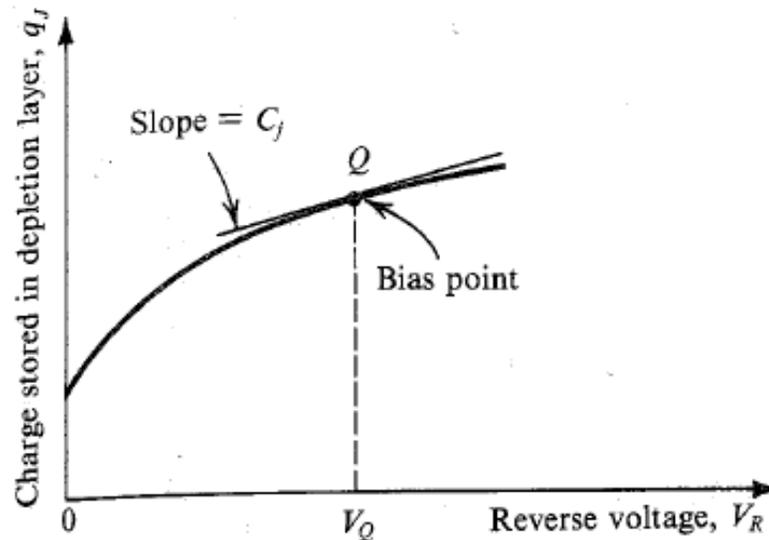
*Se incrementa el voltaje de juntura V_0 , lo cual hace que aumenten los átomos ionizados y aumenta la zona de carga espacial.

*Inicialmente se produce una corriente inversa debido al número de portadores que abandonan la zona de carga espacial.

*Una vez en equilibrio, continúa circulando una corriente comparativamente pequeña, denominada corriente inversa del dispositivo.

CAPACITANCIA DE JUNTURA

Al tener dos áreas cargadas, una con voltaje positivo y otra con voltaje negativo, se dispone de un condensador en la zona de carga espacial, cuya capacitancia depende del voltaje inverso aplicado.



Aunque la función no es lineal, puede trabajarse con valores de carga directamente proporcionales al voltaje de juntura si se consideran variaciones de voltaje pequeñas alrededor del punto Q .

REGIÓN DE RUPTURA (BREAKDOWN)

*Si se sigue aplicando voltaje negativo a la juntura PN se entra en la región de conducción inversa, o ruptura, o breakdown.

***No todos los tipos de diodos pueden operar en esa zona.** Puede ser destructivo si se sobrepasa la capacidad de disipación máxima de la juntura.

* La ruptura se puede deber al **efecto avalancha o al efecto zener.**

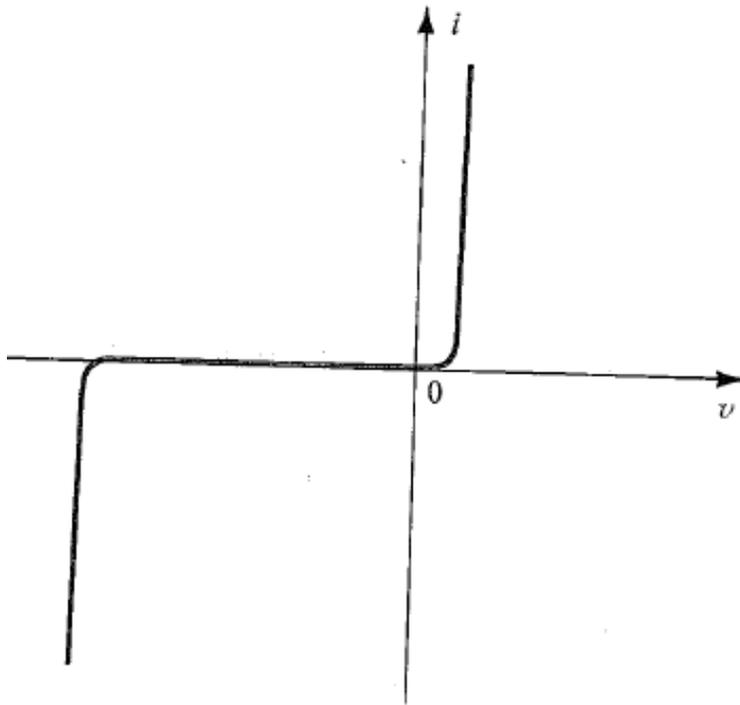
***El efecto avalancha** ocurre cuando el voltaje inverso aplicado introduce suficiente energía para que **los portadores choquen con los iones**, rompiendo un enlace covalente, lo cual genera un hueco y un electrón que se mueven en direcciones opuestas, produciendo a su vez nuevos huecos y electrones, lo cual da origen a una corriente externa con muy poco cambio en el voltaje de juntura.

***El efecto zener** ocurre cuando el campo es mucho mas intenso y la energía introducida es tan elevada que los **enlaces covalentes se rompen** sin que haya colisión. El incremento del voltaje de juntura es muy reducido.

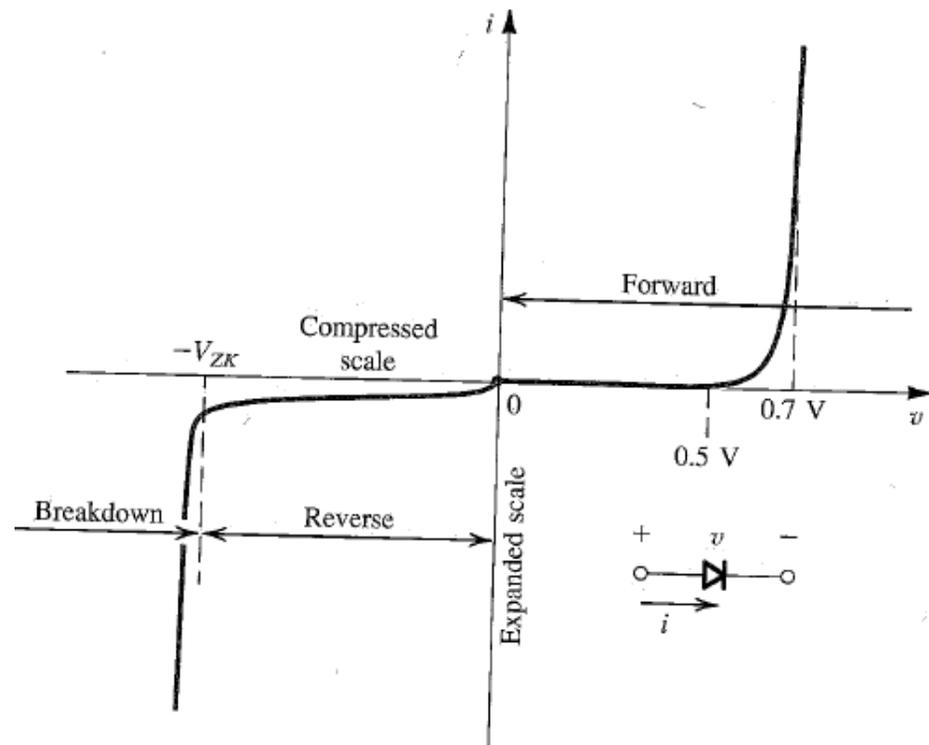
*Menor de 5V: zener; mayor de 8 voltios: avalancha; entre 5 y 8 V: ambos.

RELACIÓN CORRIENTE-VOLTAJE DE LA JUNTURA PN

$$I = I_S \left(e^{v/nv_t} - 1 \right)$$



Escalas expandidas o comprimidas para ver mas detalles



ANÁLISIS MATEMÁTICO MATERIAL SEMICONDUCTOR INTRÍNSECO EN EQUILIBRIO

Concentraciones en material intrínseco: $n = p = n_i$

Concentración intrínseca: $n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$

B: Parámetro dependiente del material. Para el silicio $5,4 \times 10^{31}$

T: Temperatura en °K

EG: Banda de energía. Para el silicio 1,12 eV. Es la mínima energía requerida para romper un enlace covalente y generar un par electrón-hueco

k: Constante de Boltzmann: $8,62 \times 10^{-5}$ eV/°K

A temperatura ambiente $n_i = 1,5 \times 10^{10}$ portadores/cm³

Un cristal de silicio tiene 5×10^{22} átomos/cm³

Están ionizados menos de uno de cada 10^{12} átomos

CORRIENTE DE DIFUSIÓN

Corriente de difusión de los huecos
 dp/dx negativo, J_p positivo en dirección x

Corriente de difusión de los electrones
 dn/dx negativo, J_n negativo en dirección x

J : Densidad de corriente en A/cm^2

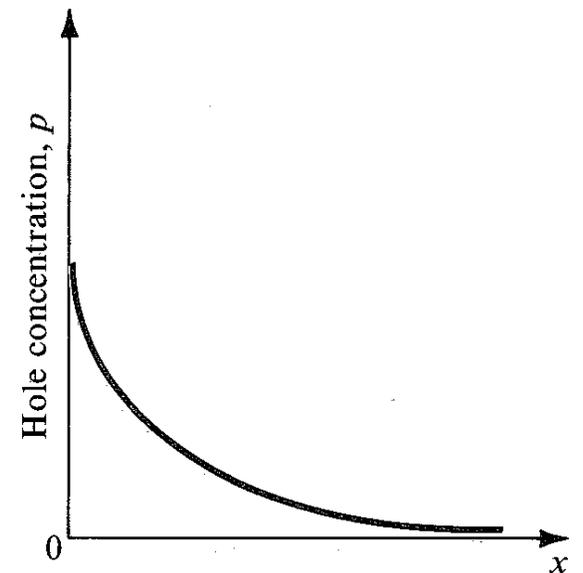
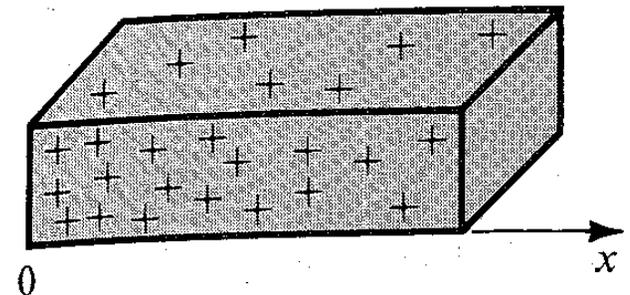
D_p : Constante de difusión de los huecos.
Silicio $12\text{ cm}^2/s$

D_n : Constante de difusión de los electrones.
Silicio $34\text{ cm}^2/s$

q : Carga del electrón $1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$



CORRIENTE DE DERIVA, ARRASTRE O DESPLAZAMIENTO AL APLICAR UN CAMPO ELÉCTRICO "E"

Corriente de deriva de los huecos

$$J_{p-drift} = qp\mu_p E$$

Corriente de deriva de los electrones

$$J_{n-drift} = qn\mu_n E$$

Corriente de deriva total

$$J_{drift} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$$

Resistividad

$$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$$

μ_n : Movilidad de los electrones. Silicio 1350 cm²/V-s

μ_p : Movilidad de los huecos. Silicio 480 cm²/V-s

Relación de Einstein:

$V_T = 25,2$ mV a 300°K

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{KT}{q} = V_T$$

MATERIAL SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO N

Impurezas donantes: Fósforo.

Densidad de impurezas donantes: N_D

Átomos ionizados tienen carga positiva

Portadores mayoritarios: Electrones. Portadores minoritarios: Huecos

Densidad de portadores mayoritarios en equilibrio: n_{n0}

Densidad de portadores minoritarios en equilibrio: p_{n0}

$$n_{n0} \approx N_D$$

En equilibrio térmico se cumple:

$$n_{n0} p_{n0} = n_i^2$$

Por lo tanto, en un material tipo N en equilibrio térmico, la concentración de portadores mayoritarios (electrones) permanece prácticamente constante, mientras que la concentración de portadores minoritarios (huecos) depende de la temperatura

$$p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

MATERIAL SEMICONDUCTOR EXTRÍNSECO TIPO P

Impurezas donantes: Boro.

Densidad de impurezas donantes: N_A

Átomos ionizados tienen carga negativa

Portadores mayoritarios: Huecos. Portadores minoritarios: Electrones

Densidad de portadores mayoritarios en equilibrio: p_{p0}

$$p_{p0} \cong N_A$$

Densidad de portadores minoritarios en equilibrio: n_{p0}

En equilibrio térmico se cumple:

Por lo tanto, en un material tipo N en equilibrio térmico, la concentración de portadores mayoritarios (electrones) permanece prácticamente constante, mientras que la concentración de portadores minoritarios (huecos) depende de la temperatura

$$n_{p0} \cong \frac{n_i^2}{N_A}$$

EL VOLTAJE DE JUNTURA

$$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

Para el silicio, los valores típicos del voltaje de juntura a temperatura ambiente, están entre 0,6 y 0,8 V

ANCHO DE LA REGIÓN DE CARGA ESPACIAL

Por lo general uno de los materiales está mucho más dopado que el otro.

La zona de vaciamiento se extenderá mas en el más ligeramente dopado.

Para que se cumpla la condición de igualdad de carga:

$$qx_p AN_A = qx_n AN_D$$

De donde

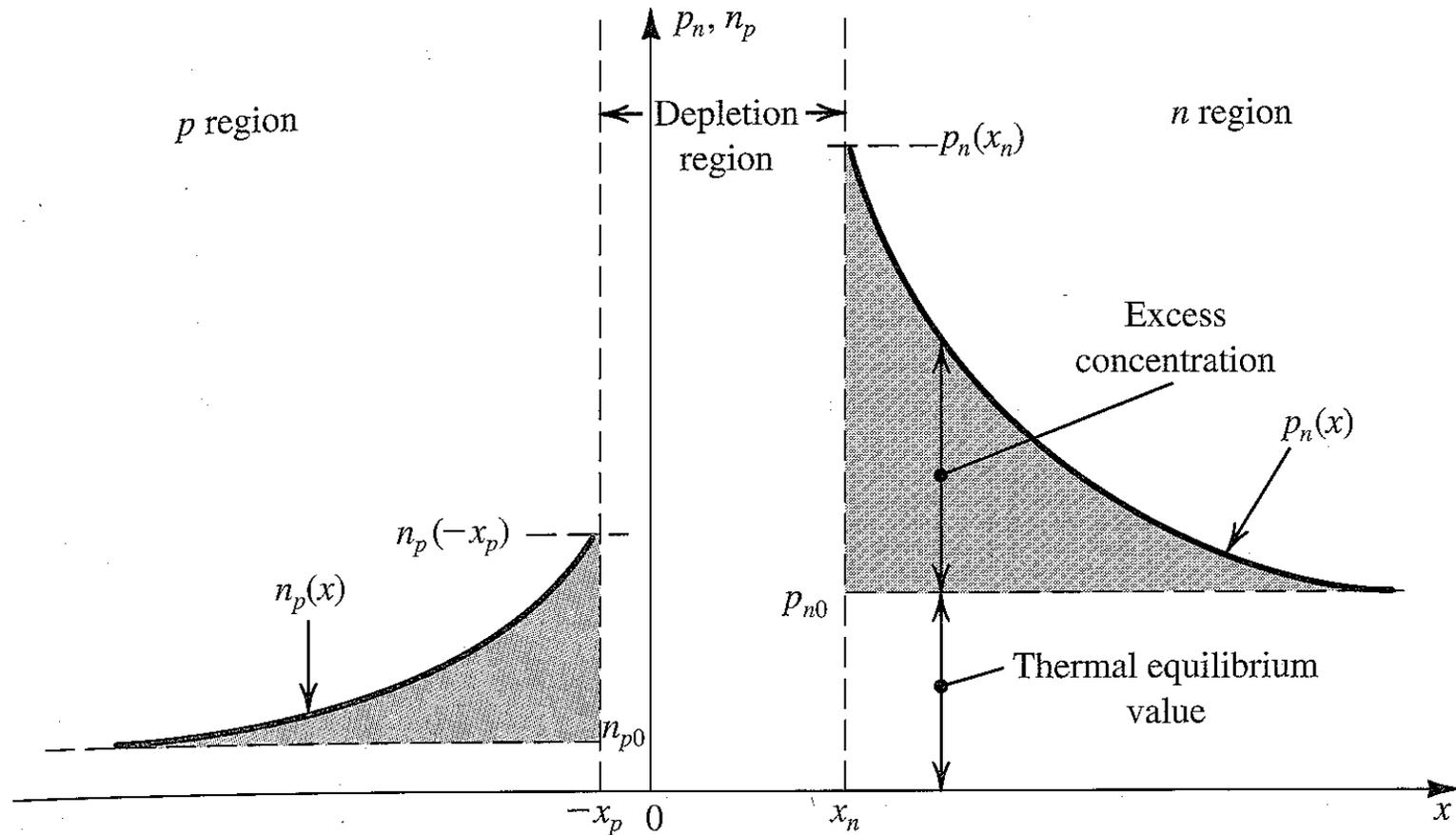
$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

El ancho de la región de carga espacial está dado por:
(Rango de 0,1 μm a 1 μm)

$$W_{dep} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_0}$$

ε_s : Permitividad eléctrica

ECUACIÓN DE LA JUNTURA EN LA REGIÓN DIRECTA



Distribución de los portadores minoritarios en una juntura PN polarizada directamente. La región P está mucho más dopada que la región N

RELACIONES

Ley de la juntura: Relaciona las concentraciones de los portadores minoritarios con el voltaje directo V .

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{V/V_T}$$

La distribución del exceso de concentración de huecos en la región N es una función exponencial que decae con la distancia x

$$p_n(x) = p_{n0} + [p_n(x_n) - p_{n0}] e^{-(x-x_n)/L_p}$$

L_p es la longitud de difusión de los huecos en la región N, relacionada con el tiempo de vida del exceso de portadores minoritarios τ_p

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

Valores típicos para L_p : 1 a 100 μm

Valores típicos para τ_p : 1 a 10.000 ns

CORRIENTES DE DIFUSIÓN EN LA JUNTURA

Los huecos que se difunden en la región N dan lugar a una corriente de difusión que puede expresarse como:

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1) e^{-(x-x_n)/L_p}$$

J_p decae con la distancia debido a la recombinación de los huecos con los electrones. En estado estacionario el circuito externo proporciona los electrones necesarios para que la corriente se mantenga constante.

La densidad de corriente debida a la inyección de huecos en la región N a través de la zona de carga espacial es:

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} (e^{V/V_T} - 1)$$

La densidad de corriente debida a la inyección de electrones en la región P a través de la zona de carga espacial es:

$$J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} (e^{V/V_T} - 1)$$

ECUACIÓN DE LA CORRIENTE TOTAL

Dado que J_p y J_n tienen el mismo signo, pueden sumarse y multiplicarse por el área A transversal de la juntura para obtener la corriente total:

$$I = A \left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \right) (e^{V/V_T} - 1)$$

Sustituyendo $p_{n0} = n_i^2 / N_D$ y $n_{p0} = n_i^2 / N_A$ queda:

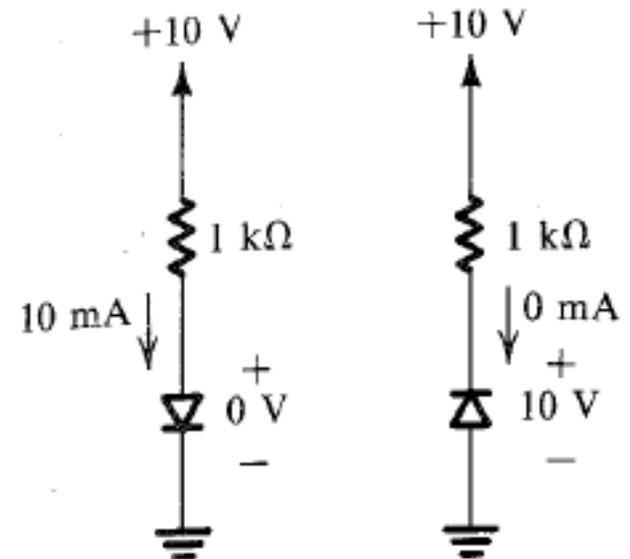
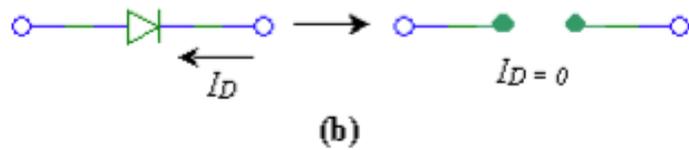
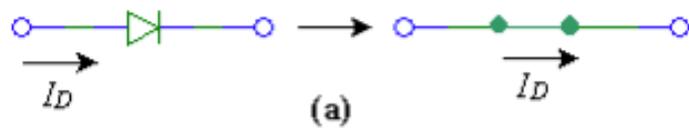
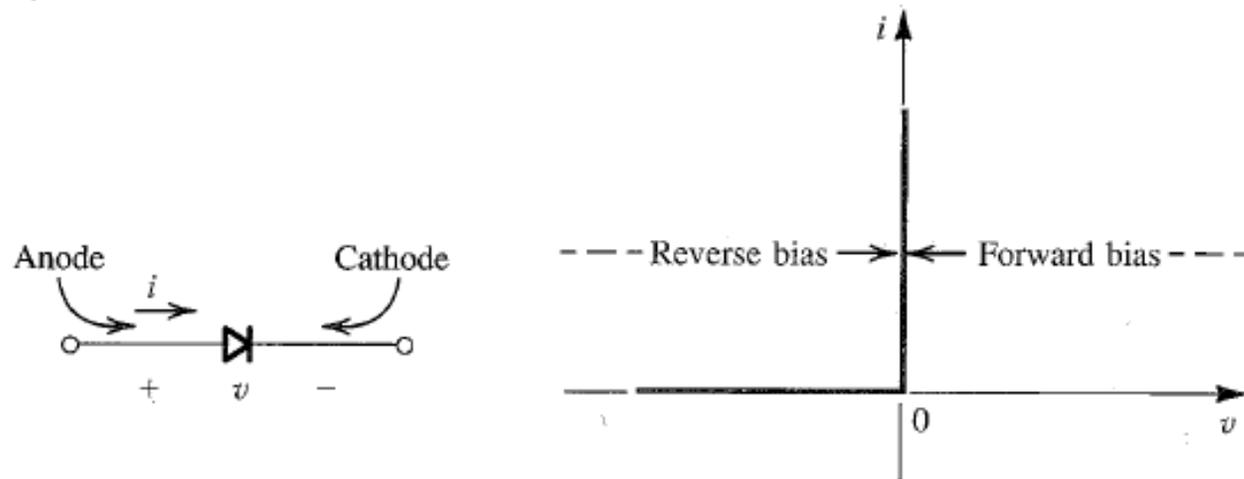
$$I = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) (e^{V/V_T} - 1) \quad I_S = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right)$$

Y la ecuación del diodo es:

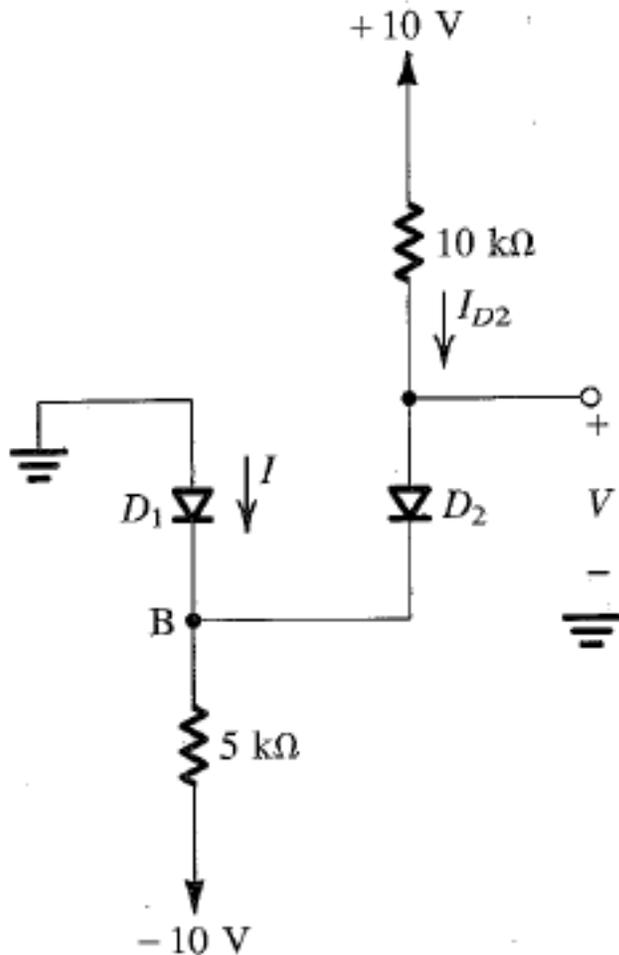
$$I = I_S \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$$

DIODOS

EL DIODO IDEAL



ANÁLISIS DE CIRCUITOS DE DIODOS (EJEMPLO 1)



Hallar V e I suponiendo que al menos un diodo conduce.

Suponemos inicialmente que ambos conducen.

Si D_1 conduce el voltaje en B es cero. Si D_2 conduce, la corriente I_{D2} es:

$$I_{D2} = (10V - 0) / 10k\Omega = 1mA$$

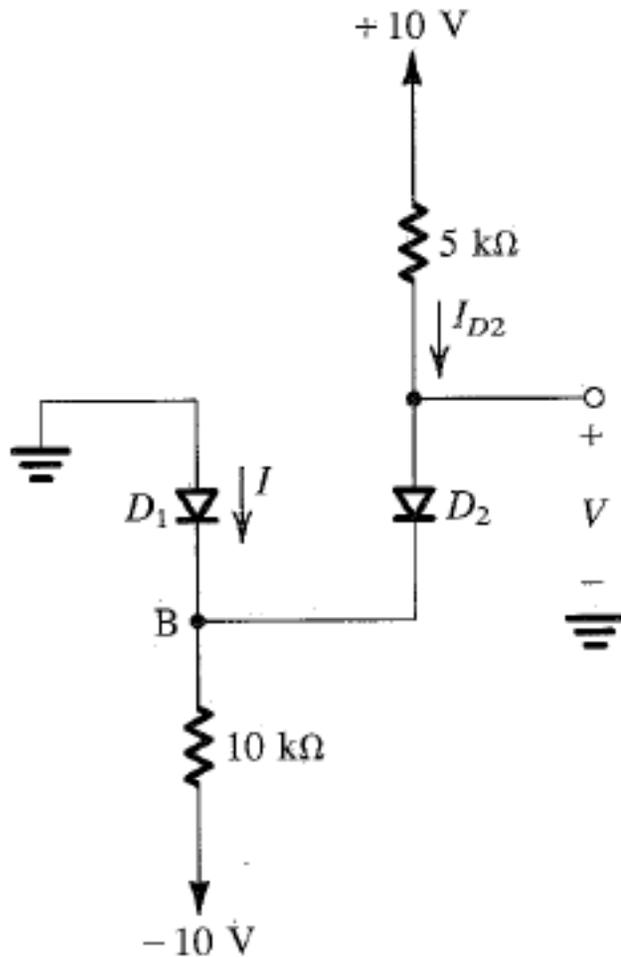
La corriente por la resistencia de $5k\Omega$ es:

$$(0 - (-10V)) / 5k\Omega = 2mA$$

$$I + I_{D2} = 2mA \quad I = 1mA$$

$$V = 0V$$

ANÁLISIS DE CIRCUITOS DE DIODOS (EJEMPLO 2)



Hallar V e I suponiendo que al menos un diodo conduce.

Suponemos inicialmente que ambos conducen, por lo tanto el voltaje en B y el voltaje de salida V son cero.

$$I_{D2} = (10V - 0) / 5k\Omega = 2mA$$

$$I + I_{D2} = (0 - (-10V)) / 10k\Omega = 1mA$$

$$I = 1mA - I_{D2} = 1mA - 2mA = -1mA$$

Dado que esto no es posible, el diodo D_1 no conduce y por lo tanto $I = 0$.

$$I_{D2} = ((10V - (-10V)) / 15k\Omega = 1,33mA$$

$$V = V_B = 10k\Omega \times 1,33mA - 10V = 3,3V$$