

ELECTRONICA APLICADA I

Profesor Titular Ing. Fernando Cagnolo

Profesor Adjunto Dr. Ing. Guillermo Riva

EL DIODO

Contenido:

Nomenclatura

Fuentes

Símbolos de tensión y corriente

Ley de Ohm

Grafica de la ley de Ohm

El diodo ideal

El diodo como llave

El diodo tensión de umbral

El diodo con resistencia interna

Ecuación del diodo

Curva del diodo real

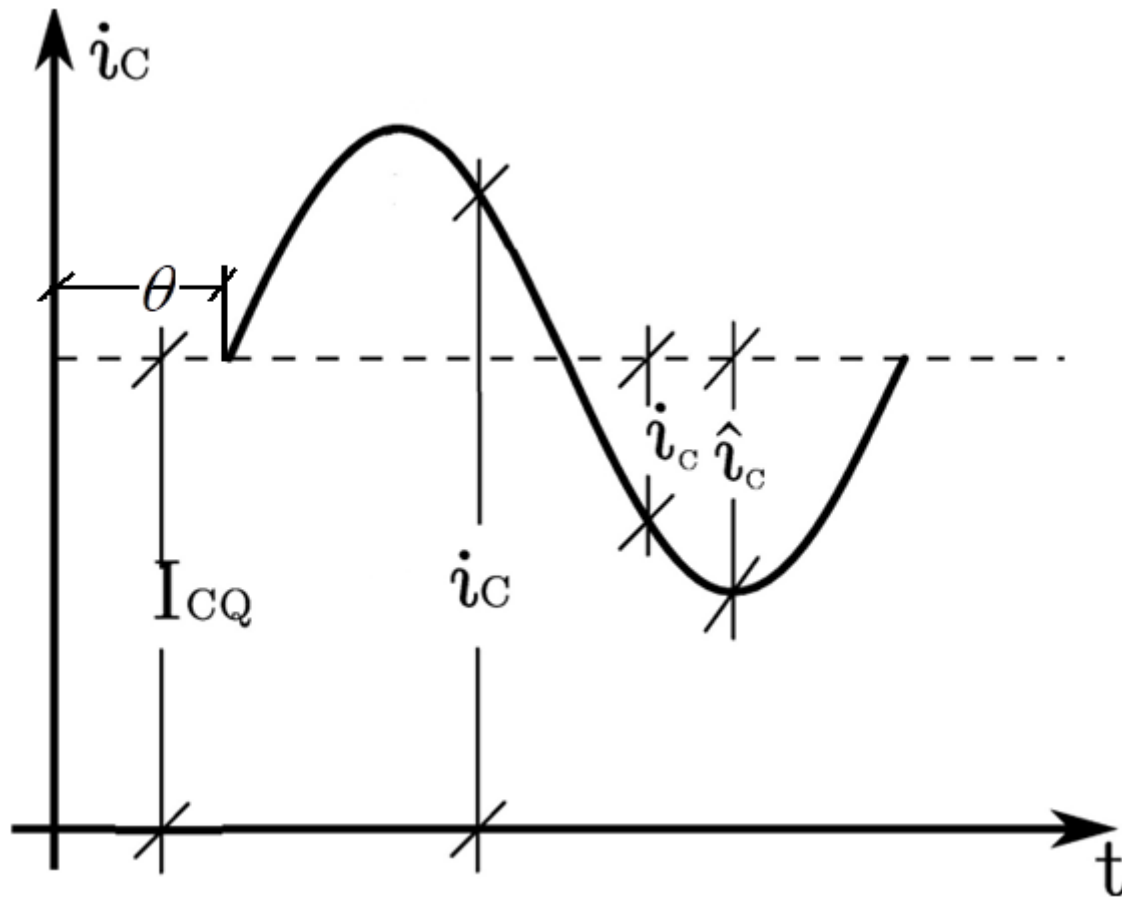
Análisis de circuitos con diodos

Análisis de señal débil

Calculo de resistencia dinámica

Circuitos con elementos reactivos

Nomenclatura



$$i_c = i_c \sin(\omega t - \theta)$$

$$i_C = I_{CQ} + i_c = I_{CQ} + \hat{i}_c \sin(\omega t - \theta)$$

Nomenclatura

i_c : *La i minúscula es la corriente en algún instante del tiempo.*

El subíndice c en minúscula significa que involucra solamente la componente de alterna.

Cuando el subíndice C está en mayúscula significa que involucra la componente de alterna más la de continua.

Nomenclatura

\hat{i}_c : *Es la amplitud pico de la componente de alterna.*

I_{CQ} : *La I en mayuscula significa que es la componente de continua de la corriente (constante).*

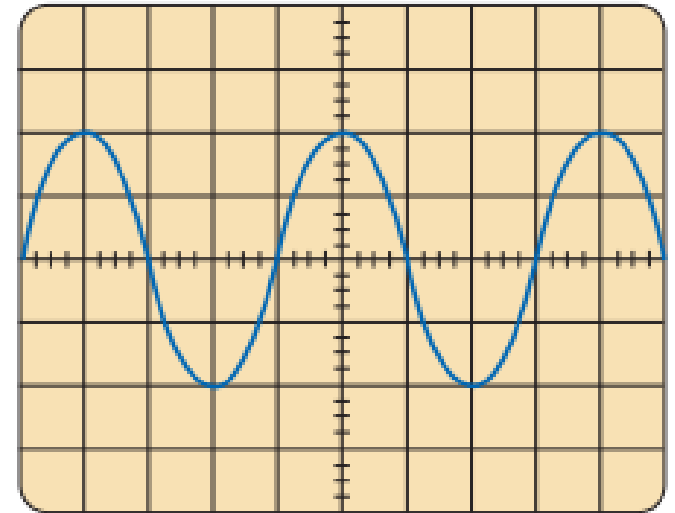
La C del subindice que es de colector.

La Q significa en este caso corriente de reposo proviene de la palabra en ingles quiescent.

Medición con osciloscopio

El osciloscopio es un instrumento que permite visualizar y medir formas de ondas. En la figura se observa una señal en el osciloscopio, además esta la sensibilidad vertical y horizontal.

Ejemplo: Calcular la amplitud pico a pico y la frecuencia de la señal de la figura.



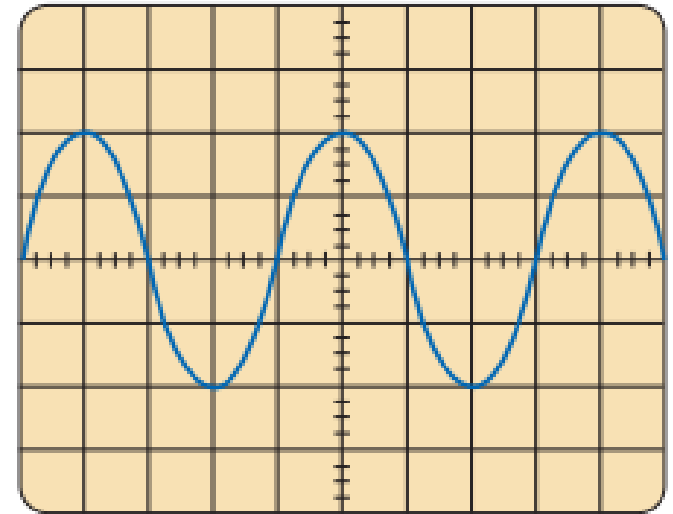
Sensibilidad vertical = 0.1 V/divisiones
Sensibilidad horizontal = 50 μ s/divisiones

Solución

$$V_{p-p} = 4 \text{ div} \times 0.1 \frac{\text{V}}{\text{div}} = 0.4 \text{ V} = 400$$

$$T = 4 \text{ div} \times 50 \frac{\mu\text{s}}{\text{div}} = 200 \mu\text{s} = 0.2 \text{ ms}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{200 \times 10^{-6}} = 5000 \text{ Hz} = 5 \text{ kHz}$$



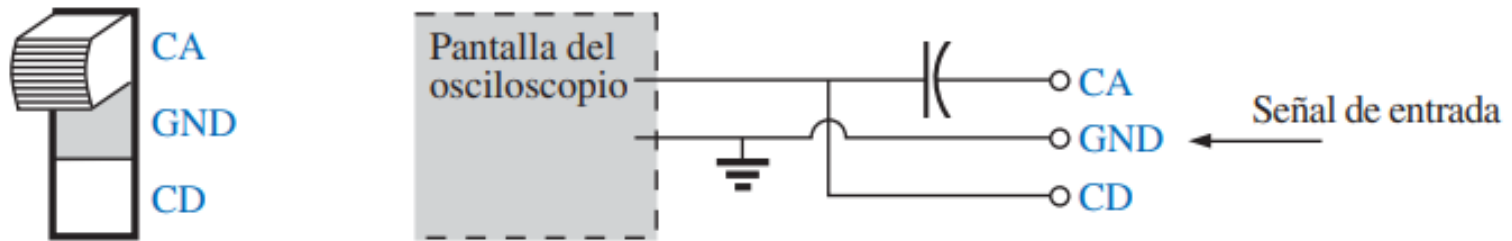
Sensibilidad vertical = 0.1 V/divisiones
Sensibilidad horizontal = 50 μs /divisiones

Nota

$$\text{Subdivisión vertical} = \frac{0.1 \text{ V}}{4 \text{ div}} = 0.025 \text{ V/div} = 25 \text{ mV/div}$$

Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Acoplamiento

Distintas formas de acoplamiento de la señal de entrada.



Interruptor CA-GND-CD para el canal vertical de un osciloscopio.

CA : Acoplamiento en corriente alterna.

GND : Pone la entrada a masa.

CD : Acopla ambas componentes.

Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Acoplamiento

CA : En esta posición solo se visualiza en la pantalla la señal alterna.

GND : En esta posición solo se observa un trazo horizontal que indica donde esta el 0 Volt o referencia.

CD : En esta posición se visualizan ambas componentes. Tener precaución porque la señal se puede salir fuera de los margenes de visualización porque se suman.

Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Atenuación

Punta de osciloscopios

Las puntas tienen dos opciones en su uso.

x1: La señal pasa a través de la punta en forma directa.

x10: La señal es atenuada o dividida por 10

En un osciloscopio analógico la lectura hay que multiplicarla por 10.

En un osciloscopio digital hay que entrar al menú y configurar como estamos usando la punta.

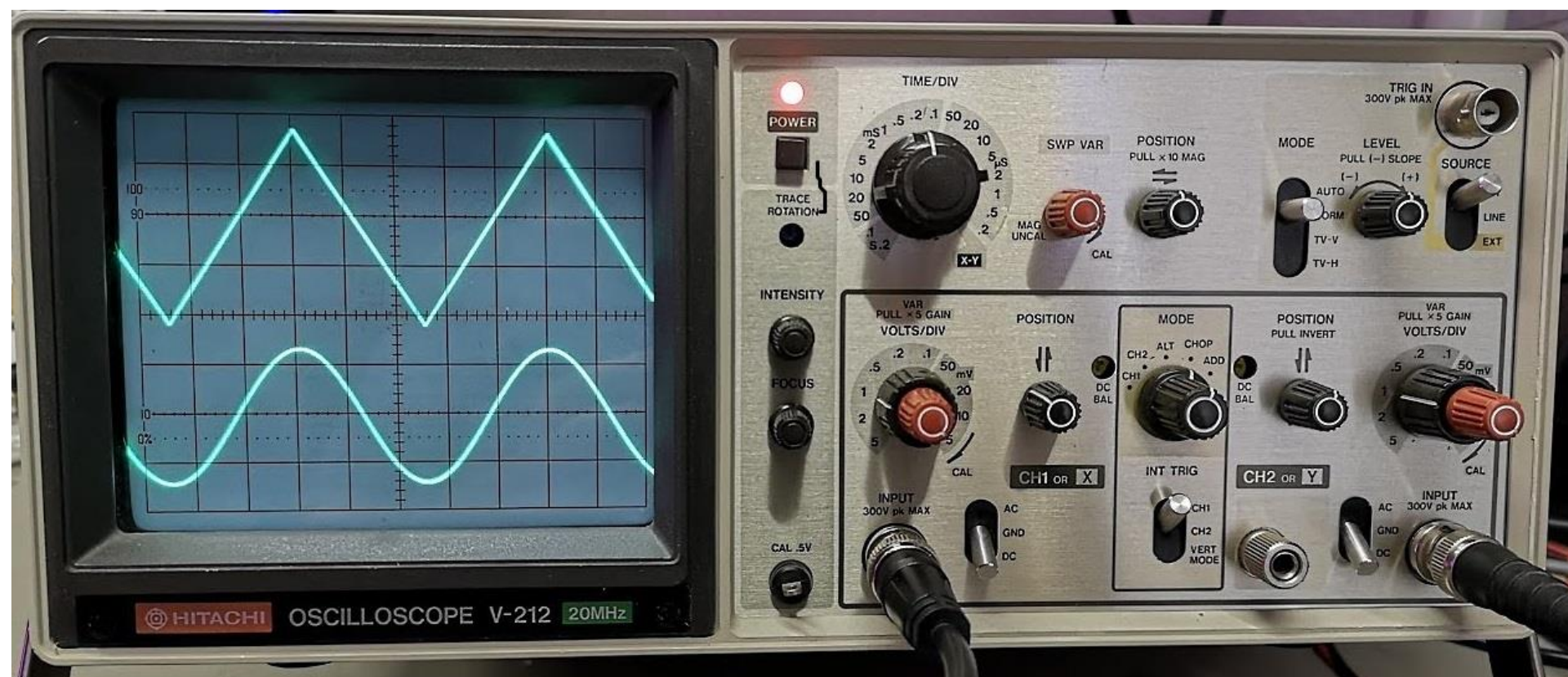
Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Puntas

Punta de osciloscopio



Consideraciones sobre el uso del osciloscopio

Osciloscopio disponible en el laboratorio.



Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Base tiempo y trigger

Base de tiempo : Nos permite variar la velocidad de barrido horizontal.

Trigger : Permite sincronizar el disparo de la señal.

Modos de trigger : Existen varias opciones pero es conveniente en un primer momento que este en "auto" de manera que aparezca el barrido.

Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Trigger

Nivel trigger : Regulando el nivel hace que la señal a visualizar permanezca inmóvil.

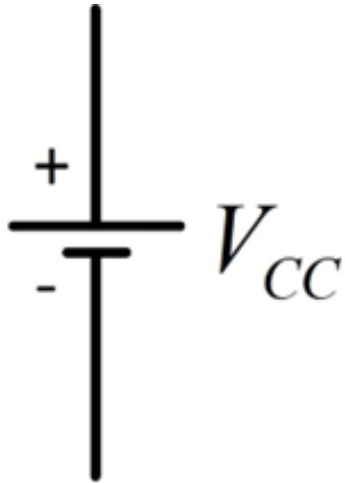
Fuente trigger : Existen tres opciones pero la "interna" es la de uso normal las otras dos opciones son para casos de mediciones especiales.

Consideraciones sobre el uso del osciloscopio: Señal de prueba

Todos los osciloscopios generan internamente una señal de prueba cuya función es verificar el correcto funcionamiento del amplificador vertical y base de tiempo.

En el caso del osciloscopio de la figura se encuentra disponible en el panel frontal y es una onda cuadrada de 0.5 V pico a pico y de una frecuencia de 1 kHz.

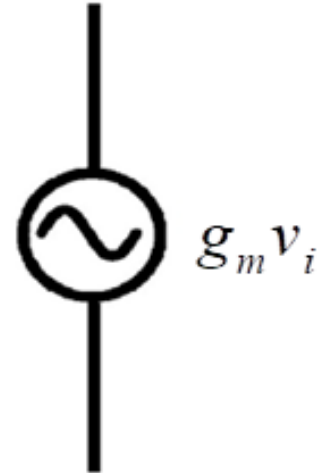
Fuentes de corriente y tensión.



Fuente de tensión continua



Fuente de corriente alterna



Fuente de tensión alterna

Fuentes de corriente y tensión.

V_{CC} : *Fuente de tensión continua normalmente usada para alimentar circuitos con transistores bipolares.*

$h_{fe}i_i$: *Fuente de corriente utilizada para modelar un transistor donde h_{fe} es la ganancia de corriente del transistor bipolar e i_i corriente de entrada.*

g_mv_i : *Fuente de tensión utilizada para modelar transistores de efecto de campo (FET), donde g_m es la transconductancia del FET y v_i es tensión de entrada.*

Ley de Ohm

$$i_R = \frac{v_R}{R}$$

Expresándola de la forma siguiente y relacionándola con la ecuación de la recta.

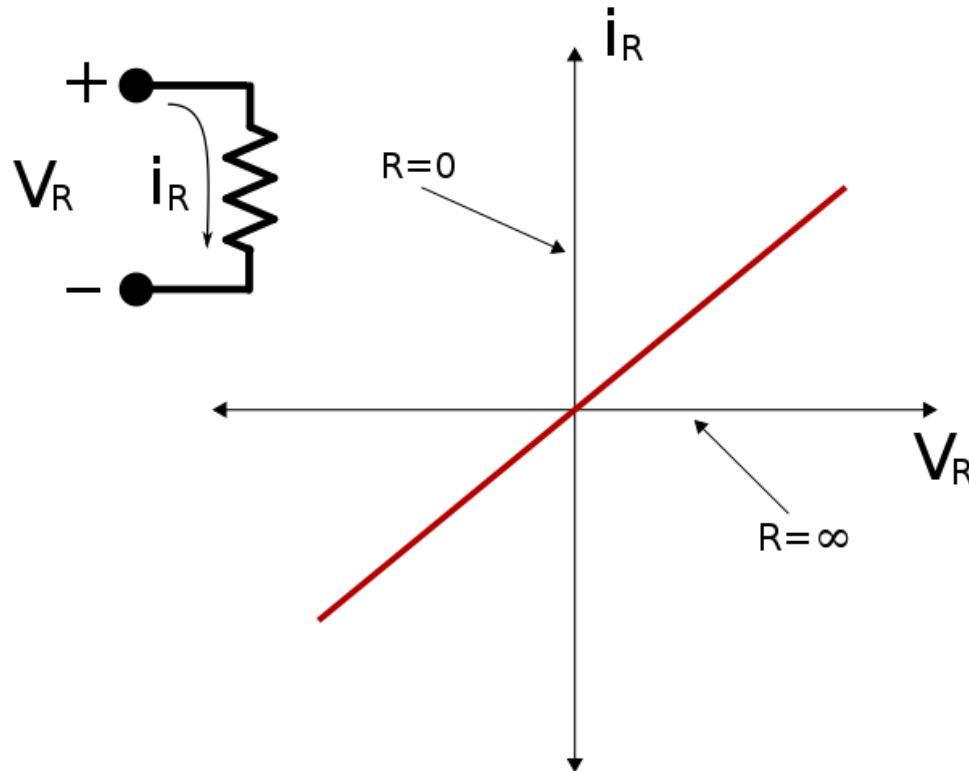
$$i_R = \frac{1}{R} \times v_R + 0$$

↓ ↓ ↓ ↓

$$y = m \times x + b$$

$$m = \text{pendiente} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta i}{\Delta v} = \frac{1}{R}$$

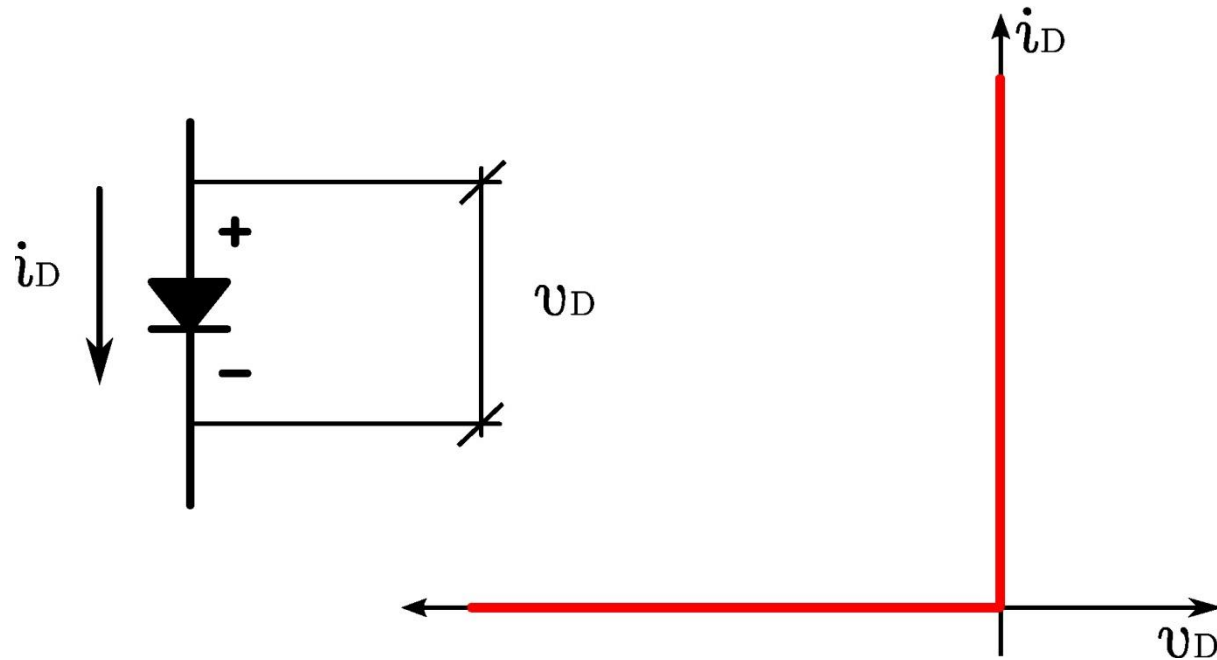
Gráfica de la Ley de Ohm



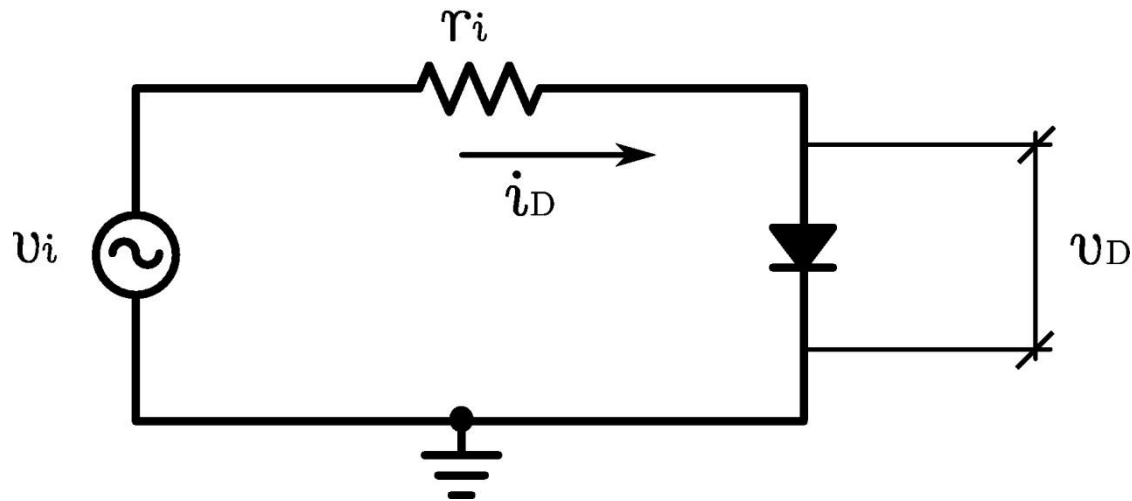
Observamos que:

- Mayor es R menor es la pendiente.
- Menor es R mayor es la pendiente.

El diodo ideal



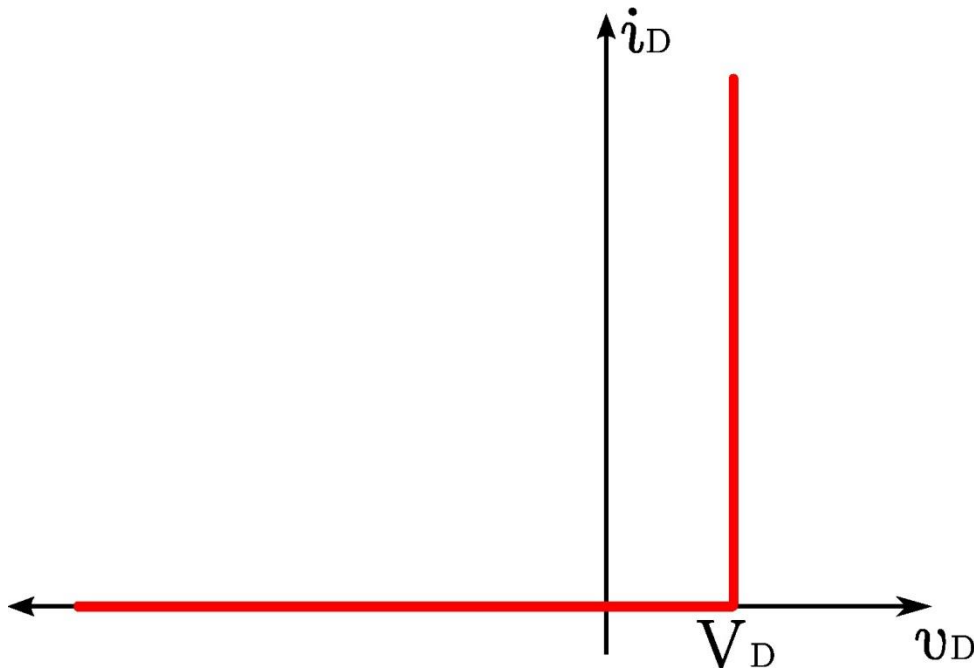
El diodo como llave



$$v_i \leq 0 \quad \Rightarrow \quad i_D = 0 \quad y \quad v_D = v_i - i_D \times r_i = v_i$$

$$v_i > 0 \quad \Rightarrow \quad v_D = 0 \quad y \quad i_D = \frac{v_i}{r_i}$$

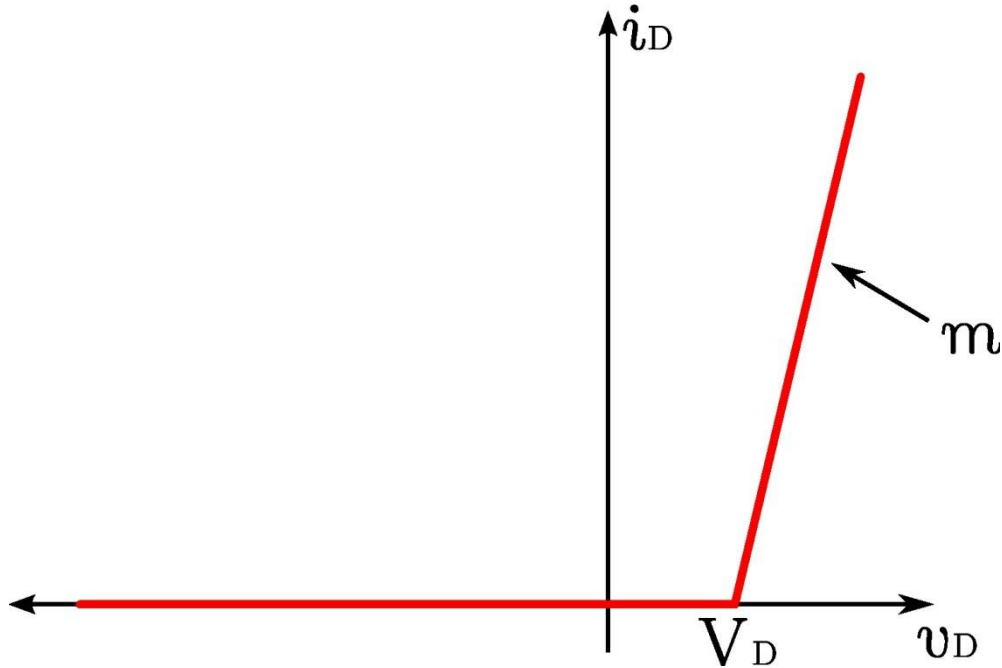
El diodo tensión de umbral.



$$V_D = 0.2 \text{ V}(\text{Ge})$$

$$V_D = 0.7 \text{ V}(\text{Si})$$

El diodo con resistencia interna



$$r_D \neq 0 \quad \text{donde} \quad m = \frac{1}{r_D}$$

Ecuación del diodo

$$i_D = I_S (e^{\frac{q \cdot v_D}{m \cdot k \cdot T}} - 1)$$

i_D : Corriente en el diodo [A]

I_S : Corriente de saturación inversa [A]

q : Carga del electrón 1.69×10^{-19} [C]

v_D : Tension en el diodo [V]

m : Constante empirica $1 < m < 2$

k : Constante de Boltzman $1.38 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{^\circ K} \right]$

T : Temperatura Absoluta [°K]

Ecuación del diodo

A temperatura ambiente

$$T = 300^{\circ}K \quad (26,85^{\circ}C)$$

$$m = 1$$

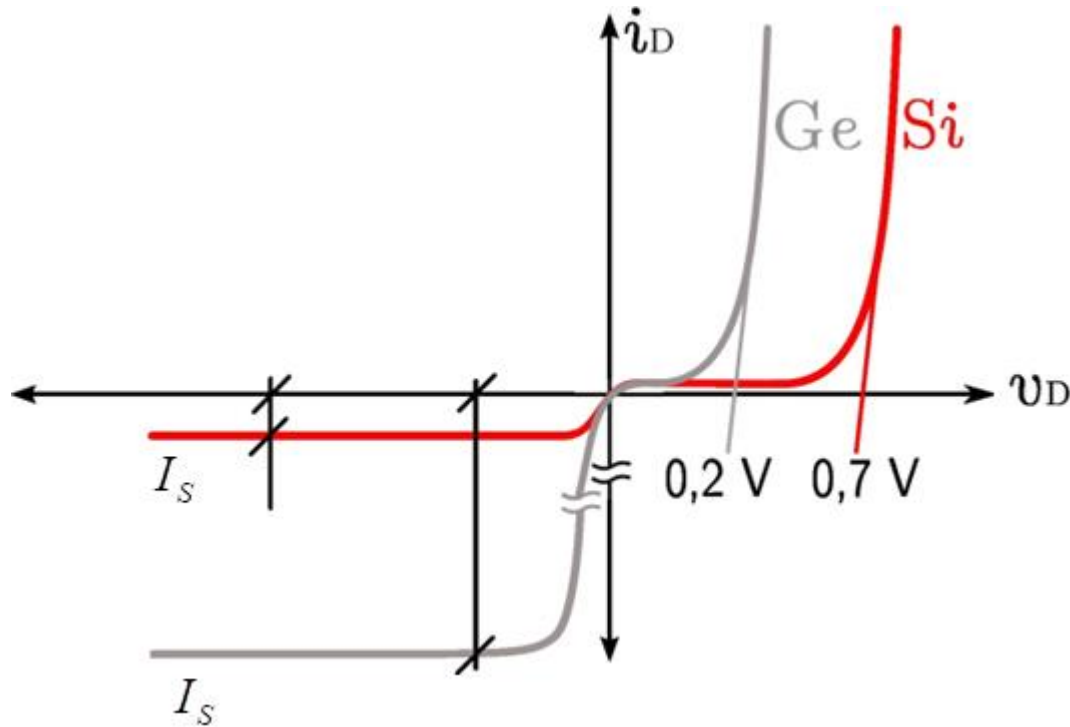
Resolviendo

$$V_T = \frac{m.k.T}{q} = 25mV \quad (\text{voltaje térmico})$$

La ecuación del diodo queda

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$$

Curva del diodo real



$$I_S : \begin{cases} \cong 1\mu A \text{ (Si)} \\ \cong 100\mu A \text{ (Ge)} \end{cases}$$

Aclaración: Las curvas en la zona de polarización inversa están ampliadas.

Ecuación del diodo

Polarización directa

$$\text{Si } v_D > 0 \quad |v_D| \gg V_T \Rightarrow i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - \overbrace{1}^{\text{despreciable}} \right) \cong I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$\text{Por ej: } v_D = 4V_T = 4 \times 0.025 = 0.1 \text{ V}$$

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{4V_T}{V_T}} - 1 \right) = I_S (e^4 - 1) = I_S (54,6 - 1)$$

Ecuación del diodo

Polarización inversa

$$\text{Si } v_D < 0 \quad |v_D| \gg V_T \Rightarrow i_D = I_S \left(\overset{\text{despreciable}}{e^{\frac{-v_D}{V_T}}} - 1 \right) = I_S \left(\overset{\text{despreciable}}{\frac{1}{e^{\frac{v_D}{V_T}}}} - 1 \right) \cong -I_S$$

Por ejemplo:

$$v_D = -4V_T = -4 \times 0.025 = -0.1 \text{ V}$$

$$i_D = I_S \left(\frac{1}{e^{\frac{4V_T}{V_T}}} - 1 \right) = I_S \left(\frac{1}{e^4} - 1 \right) = I_S \left(\frac{1}{54.6} - 1 \right) = I_S (0.018 - 1)$$

Variación del voltaje del diodo en función de la corriente.

Sea $i_{D_1} = I_S e^{\frac{v_{D_1}}{V_T}}$ e $i_{D_2} = I_S e^{\frac{v_{D_2}}{V_T}}$ (hacemos i_{D_2} 10 veces mayor que i_{D_1})

Realizando el cociente de ambas corrientes e igualando a 10

$$\frac{i_{D_2}}{i_{D_1}} = \frac{I_S e^{\frac{v_{D_2}}{V_T}}}{I_S e^{\frac{v_{D_1}}{V_T}}} = \frac{e^{\frac{v_{D_2}}{V_T}}}{e^{\frac{v_{D_1}}{V_T}}} = e^{\frac{v_{D_2}}{V_T} - \frac{v_{D_1}}{V_T}} = e^{\frac{v_{D_2} - v_{D_1}}{V_T}} = e^{\frac{\Delta v}{V_T}} = 10$$

$$\ln e^{\frac{\Delta v}{V_T}} = \ln 10$$

$$\frac{\Delta v_D}{V_T} \times \overset{1}{\ln e} = \overset{2.3}{\ln 10}$$

$$\Delta v_D = 2.3 \times V_T = 2.3 \times 25 \text{ mV} = 57.5 \text{ mV}$$

Conclusión: Si se aumenta 10 veces la corriente la tensión varía unos 57.5 mV.

Efecto de la temperatura en el diodo.

La temperatura tiene un marcado efecto en las características de un diodo como se puede apreciar en la gráfica siguiente.

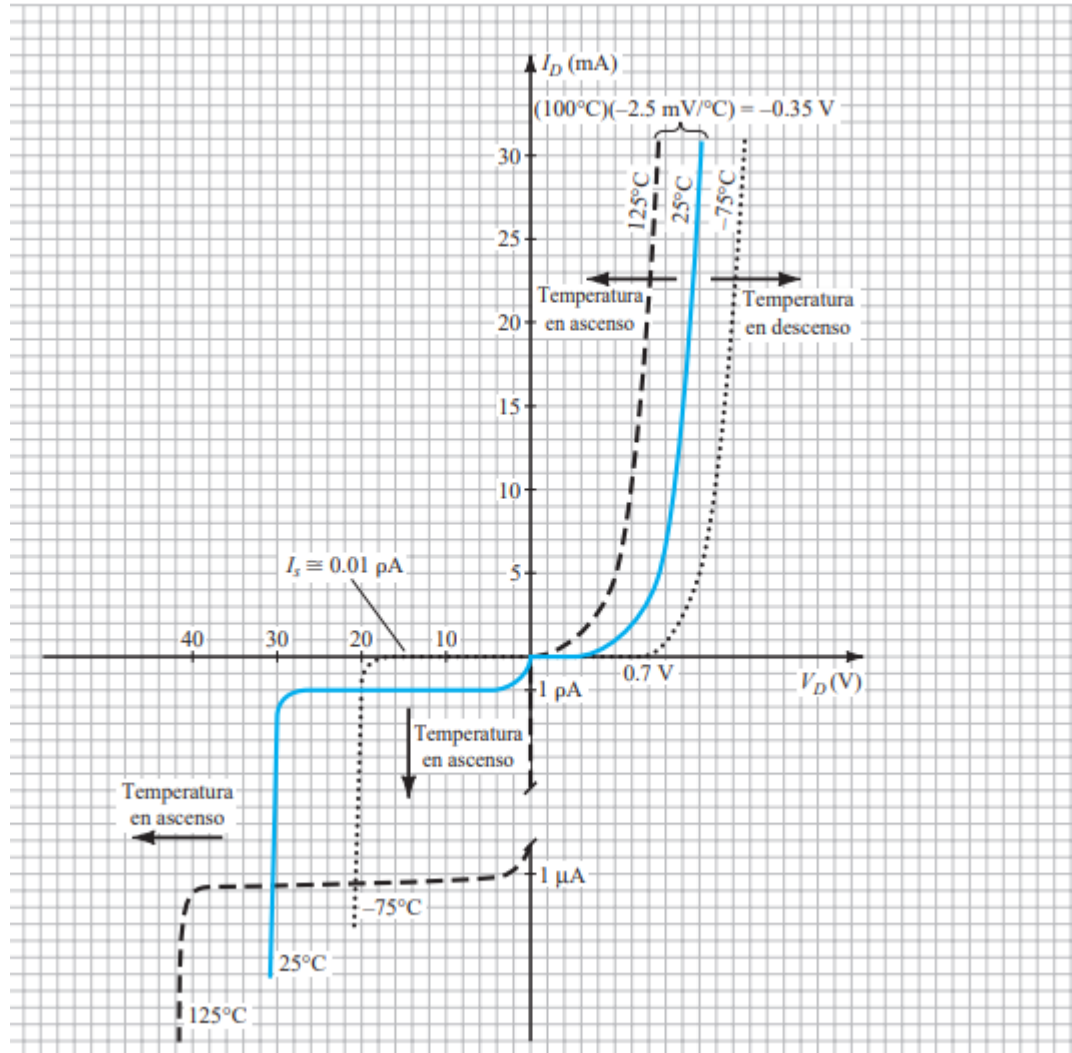
En la region de polarización directa la curva se desplaza hacia la izquierda a razón de 2.5 mV por °C de incremento de la temperatura

Efecto de la temperatura en el diodo.

En la región de polarización inversa la corriente de saturación inversa se duplica por cada 10 °C de incremento de la temperatura.

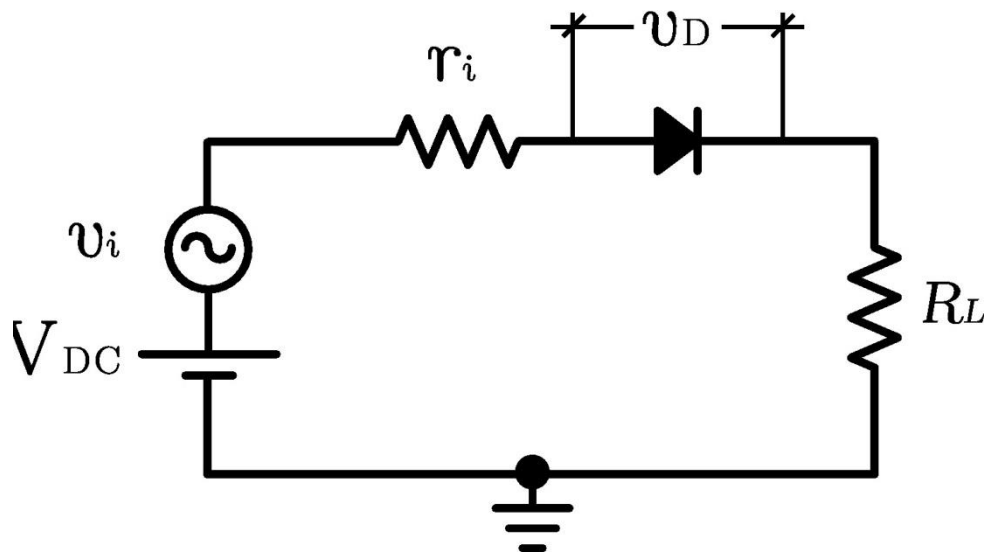
Ademas la tensión de ruptura inversa se incrementara o reducira con la temperatura segun el potencial zener. En la gráfica el voltaje de ruptura se incrementa pero para valores menores de 5 V el voltaje de ruptura se reducira.

Efecto de la temperatura en el diodo.



Análisis de los circuitos simples con diodos.

- Método de resolución gráfico.

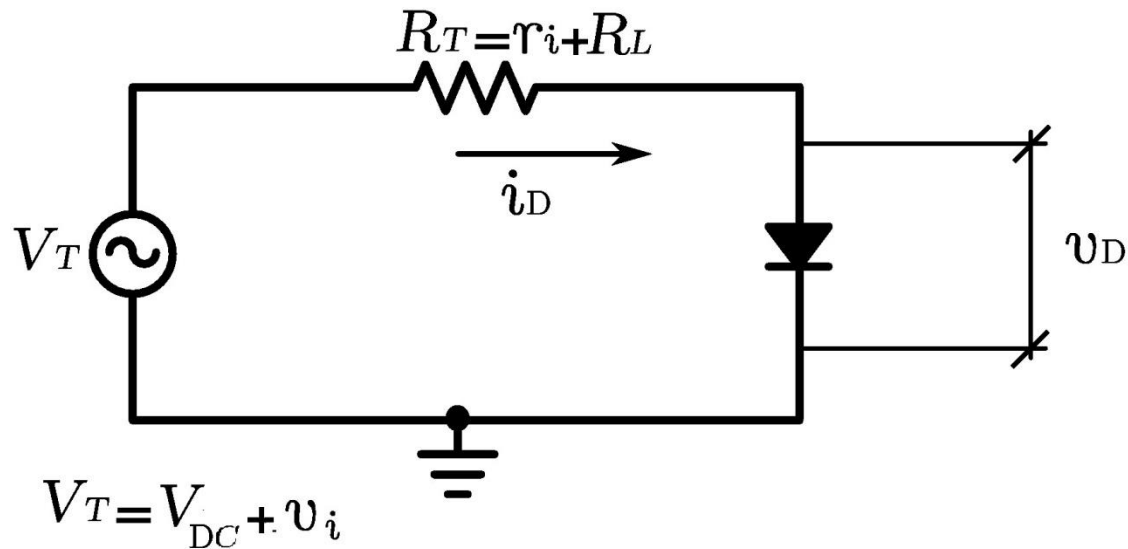


Análisis de los circuitos simples con diodos

- El análisis gráfico se basa en:
 1. El comportamiento del diodo está determinado por su curva característica.
 2. Los demás elementos al ser lineales pueden ser reemplazados por Thevenin visto desde el diodo.

Análisis de los circuitos simples con diodos

Aplicando Thevenin



Análisis de los circuitos simples con diodos

Análisis gráfico

Ecuación no lineal (Diodo) $\Rightarrow i_D = f(v_D)$ (se traza la curva del diodo)

Ecuación Lineal (Thevenin) $\Rightarrow v_D = v_T - i_D R_T$

$$i_D = -\frac{v_D}{R_T} + \frac{V_T}{R_T} = -\frac{1}{R_T} v_D + \frac{V_T}{R_T}$$

$$y = m x + b$$

$$m = -\frac{1}{R_T} \text{ (pendiente)} \quad b = \frac{V_T}{R_T} \text{ (ordenada al origen)}$$

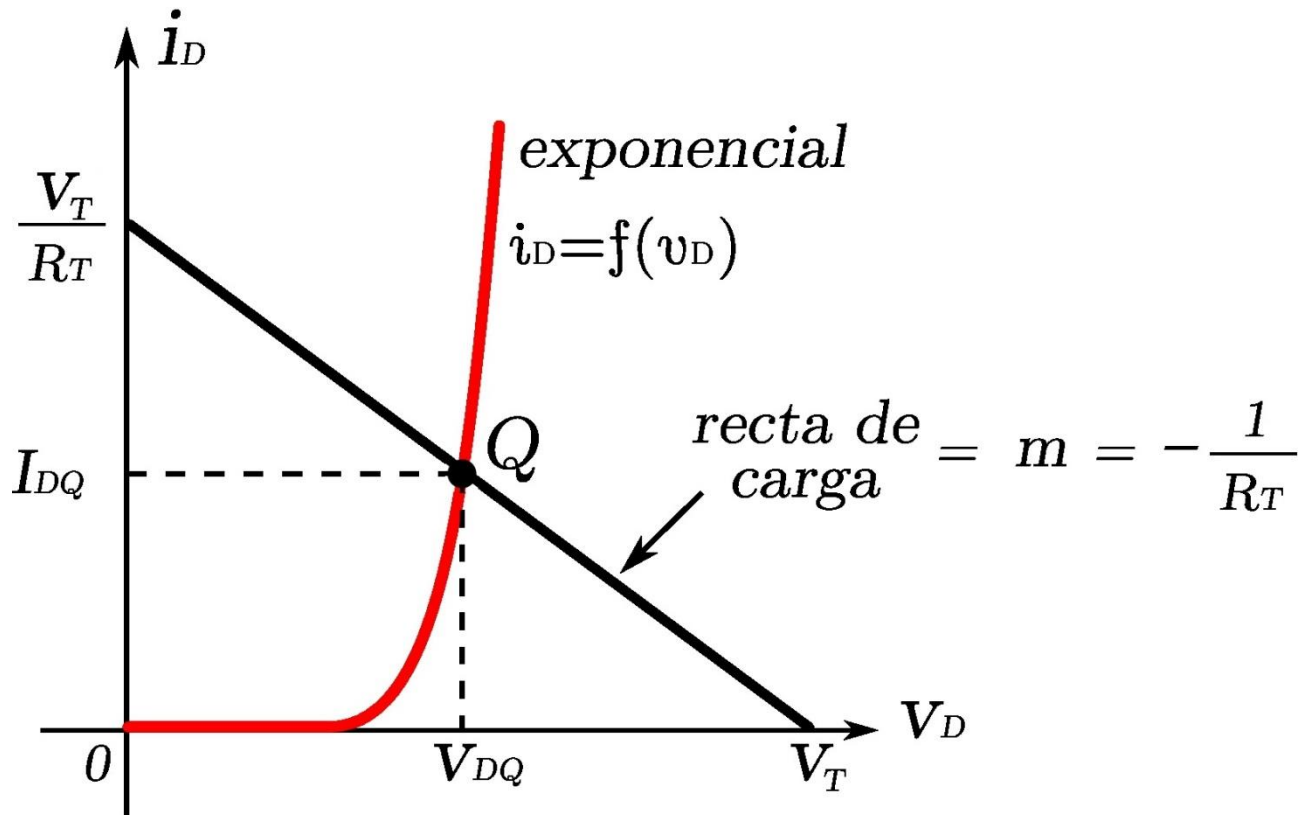
Trazado de la recta

$$\text{Si } v_D = 0 \quad \Rightarrow \quad i_D = \frac{V_T}{R_T}$$

$$\text{Si } i_D = 0 \quad \Rightarrow \quad v_D = V_T$$

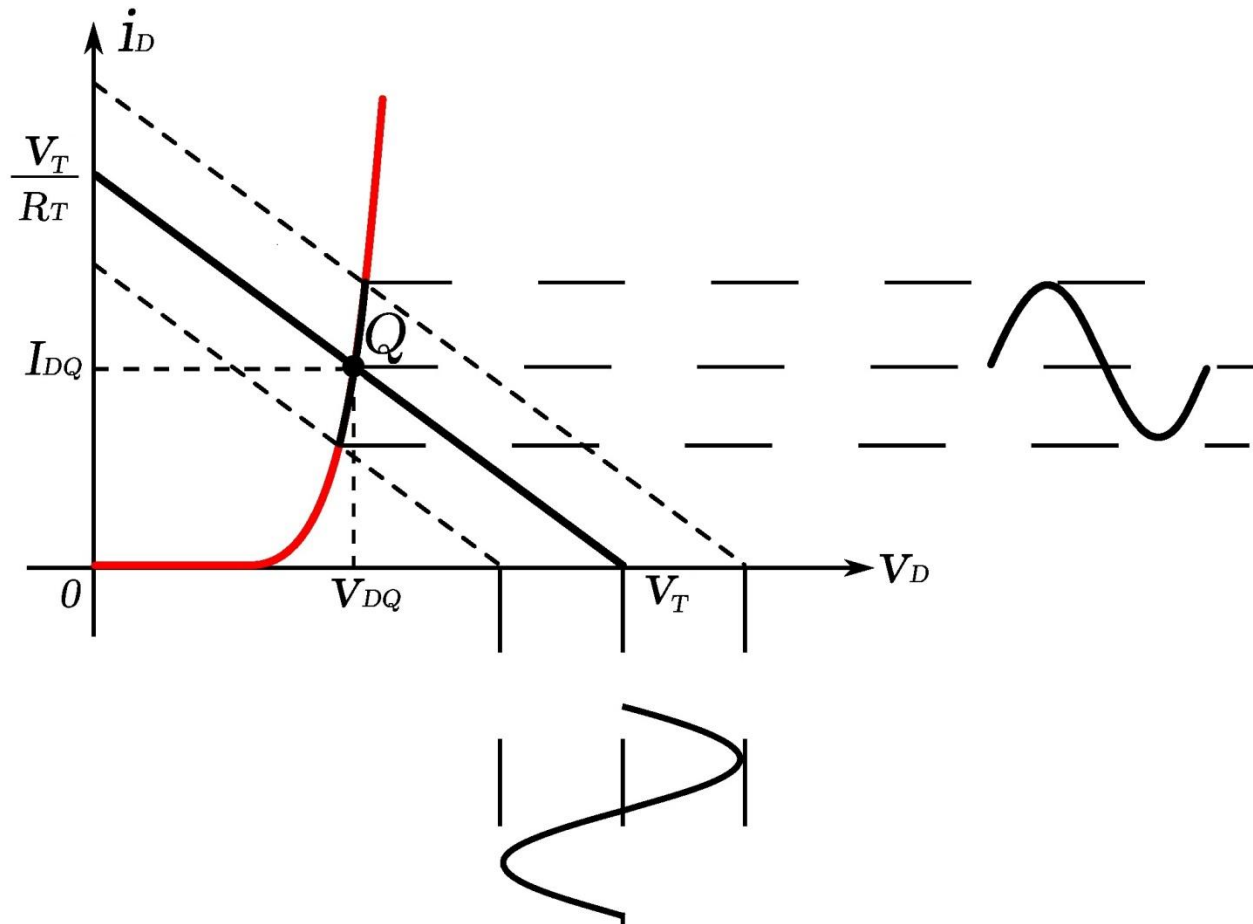
Análisis gráfico.

- Trazado de recta de carga (sin señal)



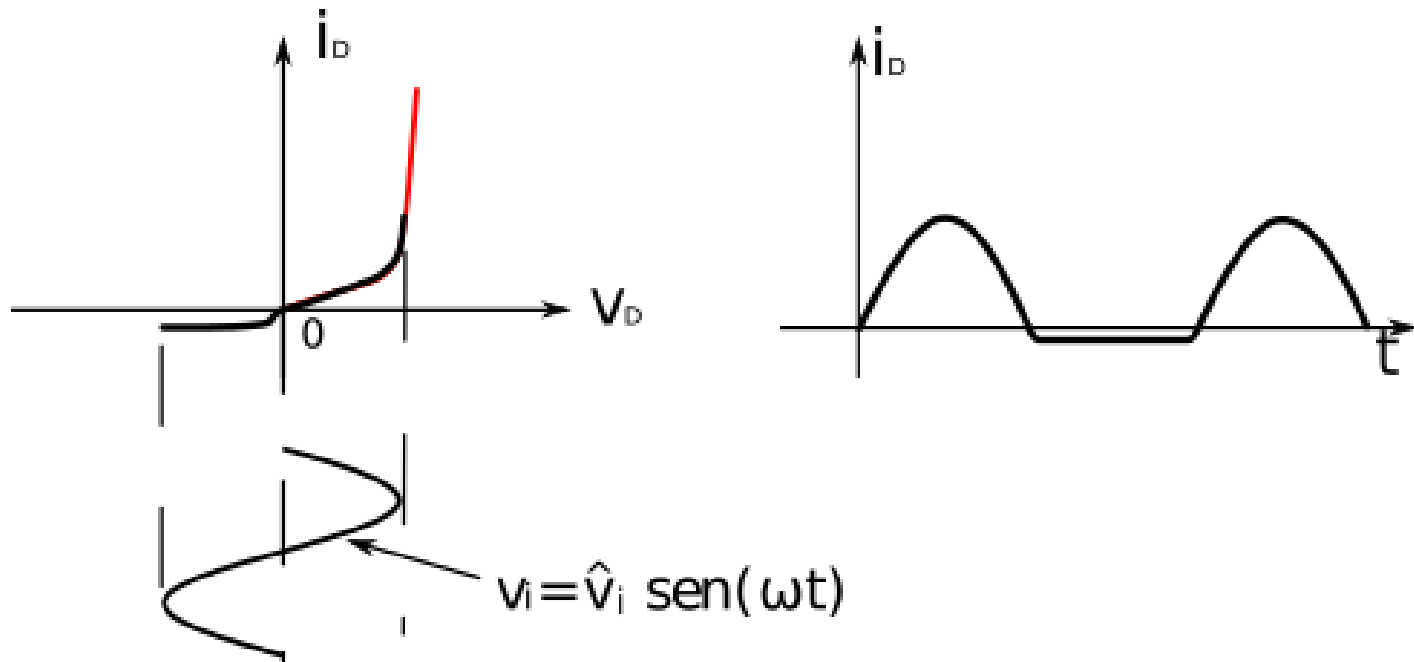
Análisis gráfico.

- Trazado de recta de carga (con señal).



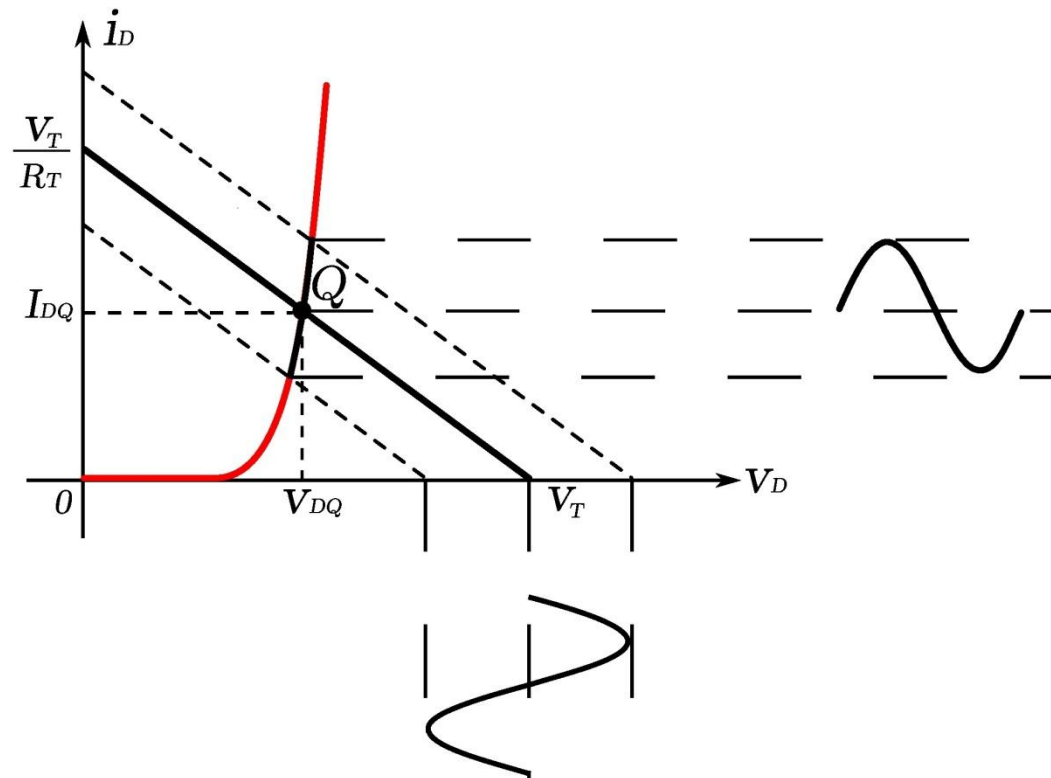
Análisis gráfico.

Trazado de recta de carga (con señal C.A solamente).



Análisis de señal Débil.

- Concepto de señal débil: Cuando la variación pico a pico de la componente de alterna es una fracción muy pequeña de la componente de continua.

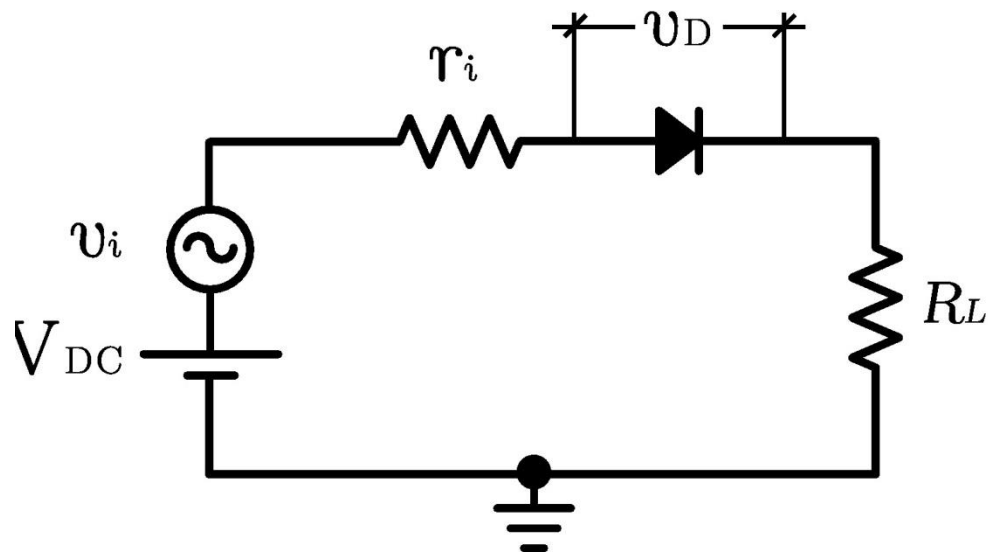


Análisis de señal Débil.

- Resistencia dinámica: El echo de trabajar en una zona pequeña de la curva del diodo se la puede considerar lineal a esta región y al diodo reemplazarlo por una resistencia cuyo valor es la inversa de la pendiente en el punto de trabajo.
- El circuito lineal resultante puede ser tratado con las técnicas de análisis de circuito.

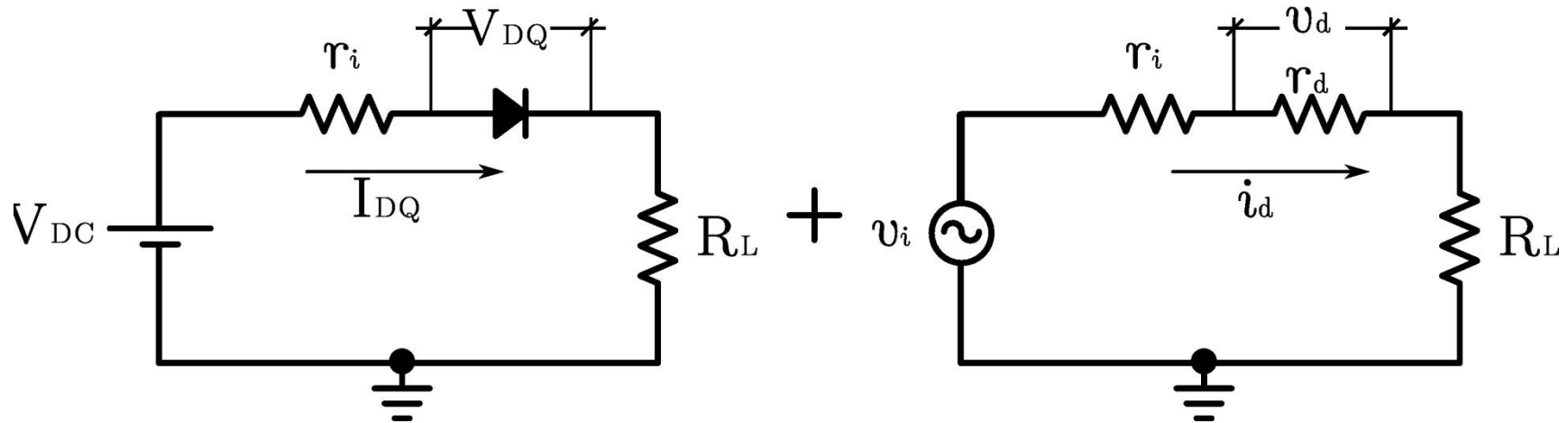
Análisis de señal Débil.

Circuito a analizar.



Análisis de señal Débil.

- Desdoblamiento en dos circuitos uno para CC y otro para CA.



$$I_{DQ} = \frac{V_{DC} - V_{DQ}}{r_i + R_L}$$

$$v_i = V_{im} \sin(\omega t)$$

$$i_d = \frac{V_{im}}{r_i + R_L + r_d} \sin(\omega t)$$

Análisis de señal Débil.

$$i_D = I_{DQ} + i_d = \frac{V_{DC} - V_{DQ}}{r_i + R_L} + \frac{V_{im}}{r_i + R_L + r_d} \text{sen}\omega t$$

$$v_L = i_D \times R_L = \frac{V_{DC} - V_{DQ}}{r_i + R_L} \times R_L + \frac{V_{im}}{r_i + R_L + r_d} \times R_L \times \text{sen}\omega t$$

Cálculo de la resistencia dinámica.

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$$

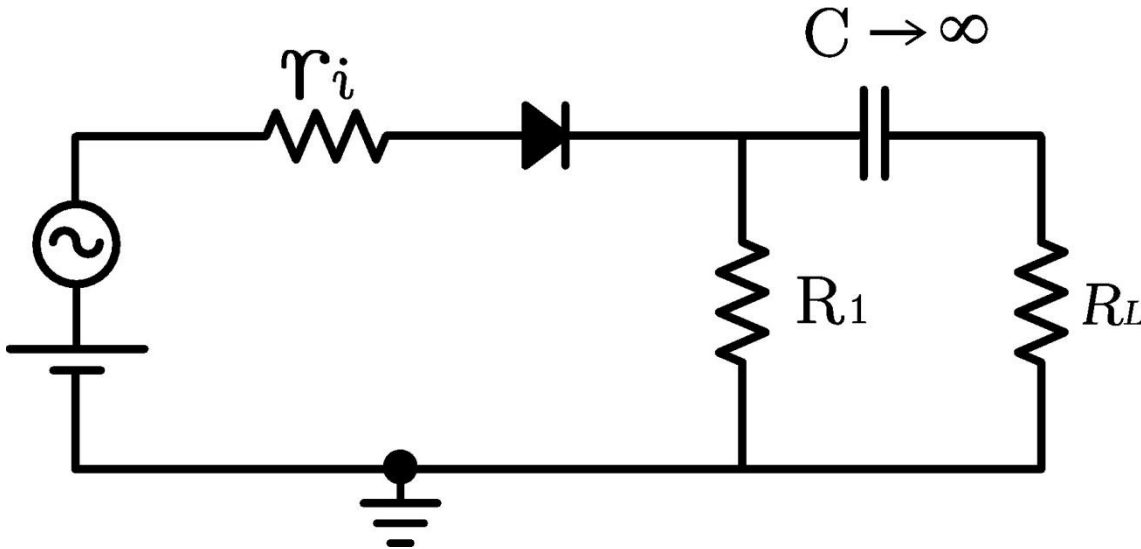
Pero si $|v_D| \gg V_T$

$$i_D = I_S \cdot e^{\frac{v_D}{V_T}}$$

$$\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = I_S e^{\frac{v_D}{V_T}} \times \frac{1}{V_T} = \frac{1}{r_d} = I_{DQ} \times \frac{1}{V_T}$$

$$r_d = \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_Q = \frac{V_T}{I_{DQ}} = \frac{25mV}{I_{DQ}}$$

Circuito con elementos reactivos.



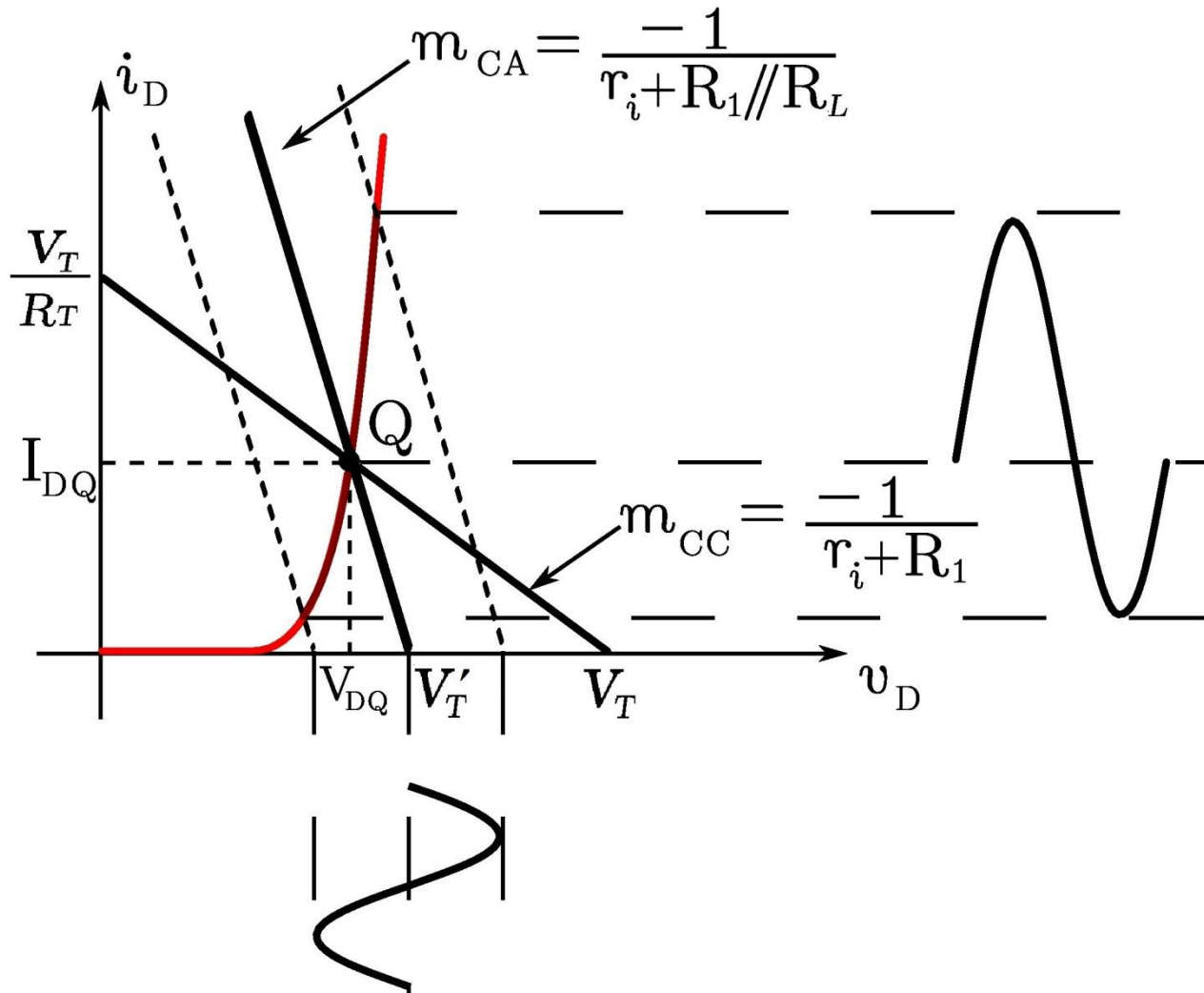
$$R_{T_{CC}} = r_i + R_1$$

$$R_{T_{CA}} = r_i + R_1 // R_L$$

$$R_{T_{CA}} < R_{T_{CC}}$$

$$m_{CA} > m_{CC}$$

Circuito con elementos reactivos.

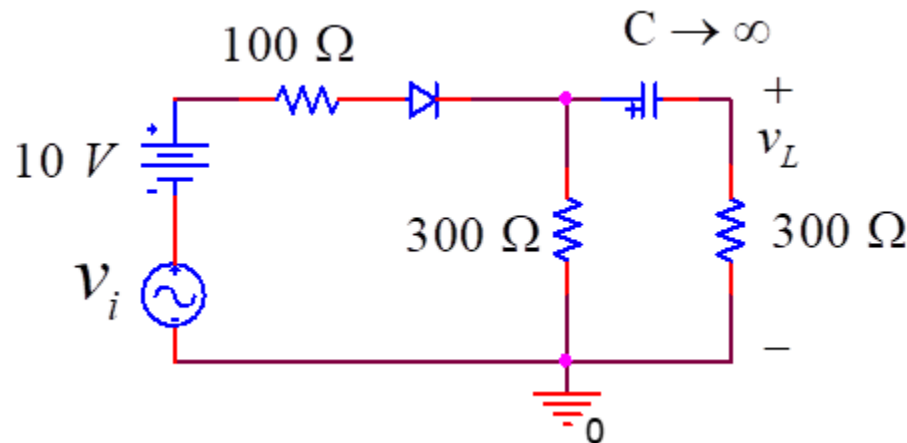


Circuito con elementos reactivos.

Problema

El circuito con diodo de la Figura tiene una señal cuya tensión es $v_i = 0.1 \cos \omega t$ V y la ecuación del diodo es $i_D = 2 \times 10^{-2} \times v_D^2$.

- a) Hallar la tensión y corriente del diodo en reposo.*
- b) Trazar la recta de carga en corriente continua y alterna.*
- c) Determinar la resistencia dinamica del diodo.*
- d) Calcular v_L .*



Circuito con elementos reactivos.

Solución

$$a) \quad V_{CC} = i_D \times 100 + v_D + i_D \times 300$$

$$V_{CC} = i_D \times (100 + 300) + v_D$$

$$V_{CC} = i_D \times (400) + v_D$$

$$V_{CC} - v_D = i_D \times (400)$$

$$\left. \begin{aligned} i_D &= -\frac{1}{400}v_D + \frac{10}{400} \\ i_D &= 2 \times 10^{-2} \times v_D^2 \end{aligned} \right\} \text{Resolvemos}$$

$$2 \times 10^{-2} \times v_D^2 = -\frac{1}{400} \times v_D + \frac{10}{400}$$

$$\frac{2}{100} \times v_D^2 + \frac{1}{400} \times v_D - \frac{10}{400} = 0$$

Circuito con elementos reactivos.

Solución

$${}^A 2 \times v_D^2 + {}^B \frac{1}{4} \times v_D - {}^C \frac{10}{4} = 0$$

$$V_{DQ} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} = \frac{-\frac{1}{4} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{4}\right)^2 - 4 \times 2 \left(-\frac{10}{4}\right)}}{2 \times 2}$$

$$V_{DQ} = \frac{-\frac{1}{4} \pm \sqrt{\frac{1}{16} + \frac{80}{4}}}{4} = \frac{-\frac{1}{4} \pm \sqrt{\frac{321}{16}}}{4} = 1.06 \text{ V } \text{ y } -1.18 \text{ V}$$

$$I_{DQ} = 2 \times 10^{-2} (1.06)^2 = 0.02247 \text{ A} = 22.47 \text{ mA}$$

Circuito con elementos reactivos.

Solución

b) Recta de carga de corriente continua.

$$v_D = V_{CC} - i_D \times 400$$

$$v_D = 10 - i_D \times 400$$

Trazado

$$i_D = 0 \quad \Rightarrow \quad v_D = 10 \text{ V}$$

$$v_D = 0 \quad \Rightarrow \quad i_D = \frac{10}{400} = 0.025 \text{ A} = 25 \text{ mA}$$

Circuito con elementos reactivos.

Solución

Recta de carga de corriente alterna.

$$v_D = V'_{CC} - i_D \times (100 + 300 // 300)$$

$$v_D = V'_{CC} - i_D \times 250$$

En el punto Q tenemos

$$V_{DQ} = V'_{CC} - I_{DQ} \times 250$$

$$V'_{CC} = V_{DQ} + I_{DQ} \times 250 = 1.06 + 22.47 \times 10^{-3} \times 250 = 6.68 \text{ V}$$

$$v_D = 6.68 - i_D \times 250$$

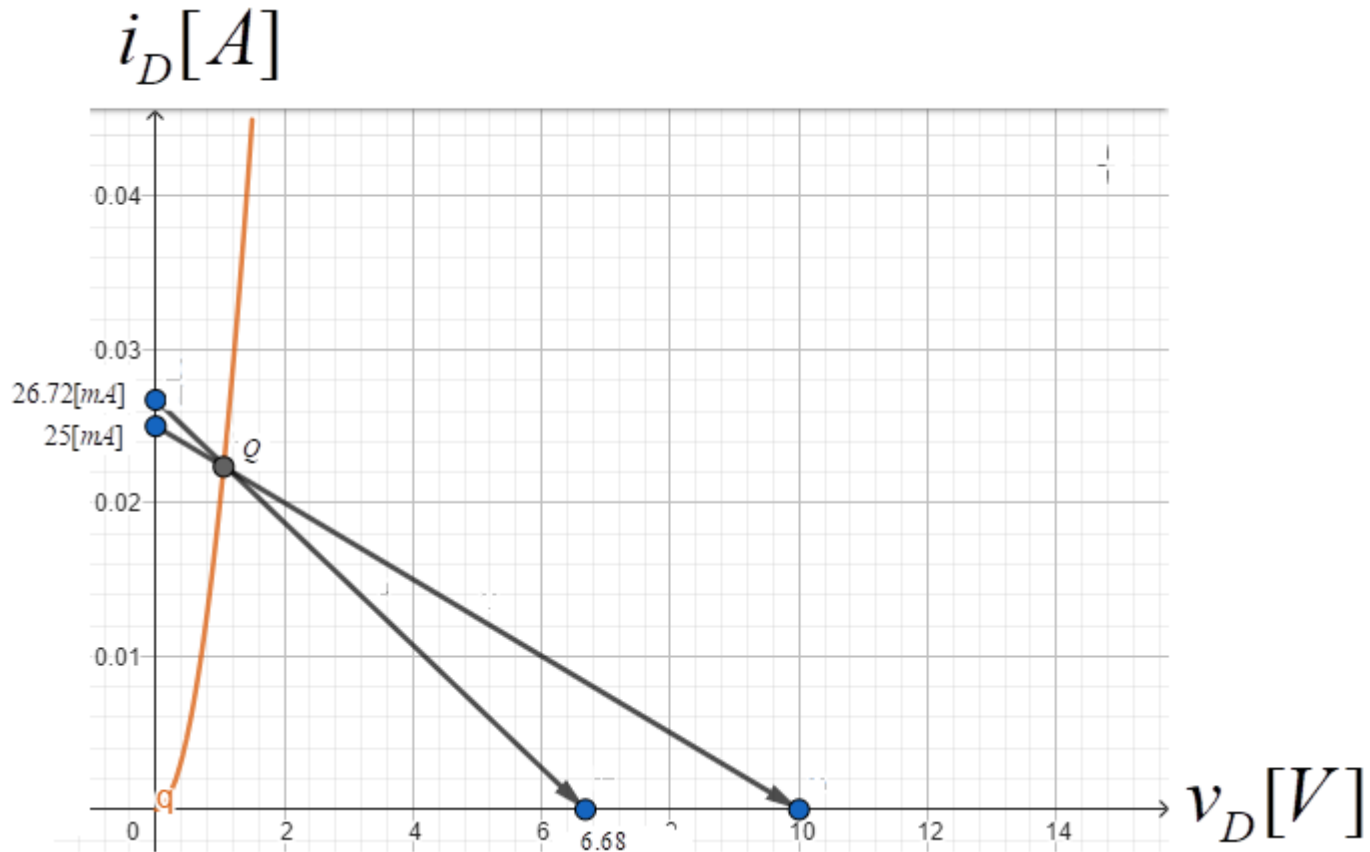
Trazado

$$i_D = 0 \quad \Rightarrow \quad v_D = 6.68 \text{ V}$$

$$v_D = 0 \quad \Rightarrow \quad i_D = \frac{6.68}{250} = 0.02672 \text{ A} = 26.72 \text{ mA}$$

Circuito con elementos reactivos. Solución

Gráficas de las rectas de carga CC y CA.



Circuito con elementos reactivos.

Solución

$$c) i_D = 2 \times 10^{-2} \times v^2$$

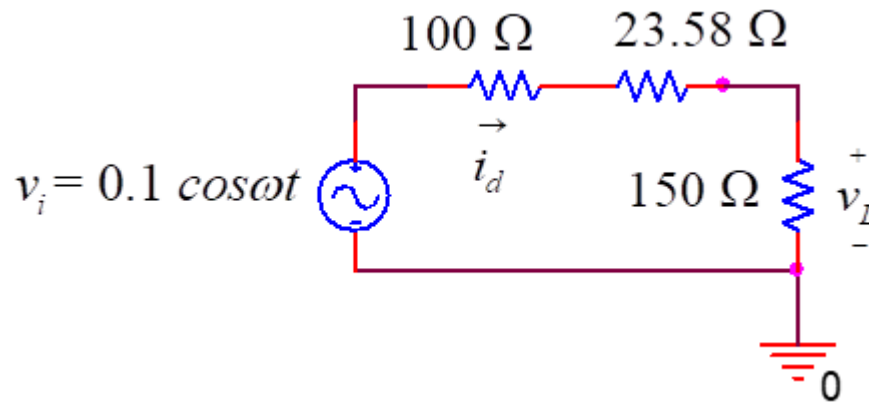
$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = 2 \times 2 \times 10^{-2} \times v_D \Big|_Q = 4 \times 10^{-2} \times V_{DQ} = 4 \times 10^{-2} \times 1.06$$

$$r_d = \frac{1}{4 \times 10^{-2} \times 1.06} = 23.58 \, \Omega$$

Circuito con elementos reactivos.

Solución

d) Circuito para corriente alterna.



$$v_L = i_d \times 150 = \frac{0.1 \cos \omega t}{100 + 23.58 + 150} \times 150 = 0.0548 \cos \omega t \, V$$

$$v_L = 54.8 \cos \omega t \, mV$$

Bibliografía.

- **Circuitos Electrónicos Discretos e Integrados,**
Donald L. Schilling-Charles Belove.
- **Dispositivos Electrónicos,**
Thomas L. Floyd.
- **Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos,**
Robert L. Boylestad-Louis Nashelsky.
- **Hoja de datos 1N5400 – 5408**
- **Hoja de datos 1N4001 – 4007**
- **1100 Problemas de Electrónica Resueltos.**
Ing Alberto Muhana