Tema 1.
Repaso de Teoría de Circuitos

Joaquín Vaquero López

Repaso de Teoría de Circuitos: índice

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Conceptos preliminares

CIRCUITO: Asociación de elementos activos o pasivos conectados en serie/paralelo por donde puede circular corriente. Modelo matemático simplificado de una instalación real.

Se utiliza para estudiar (análisis y síntesis) la respuesta de un sistema eléctrico ante un estímulo. Señales de entrada, salida y función de transferencia.

Aplicable a circuitos **lineales y cuasilineales**.

VARIABLES FUNDAMENTALES: I, V y P

Convenios de signos. Múltiplos y submúltiplos. Notación (v, V, u, U)

ELEMENTOS DE UN CIRCUITO:

Son los modelos matemáticos de los dispositivos físicos reales de un circuito. Modelos de parámetros concentrados.

Activos: fuente de tensión/corriente - continua/alterna – dependientes/independientes.

Pasivos: R,L,C.

Relación entre voltaje y corriente en cada uno de estos elementos. Potencia y energía.

ASOCIACIÓN DE ELEMENTOS SERIE/PARALELO

Concepto de impedancia-admitancia-immitancia.

Característica I-V. Recta de carga

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Característica I-V de un elemento de un circuito:

Describe la relación entre la corriente que circula por el elemento y el voltaje a través de sus terminales.

Recta de carga:

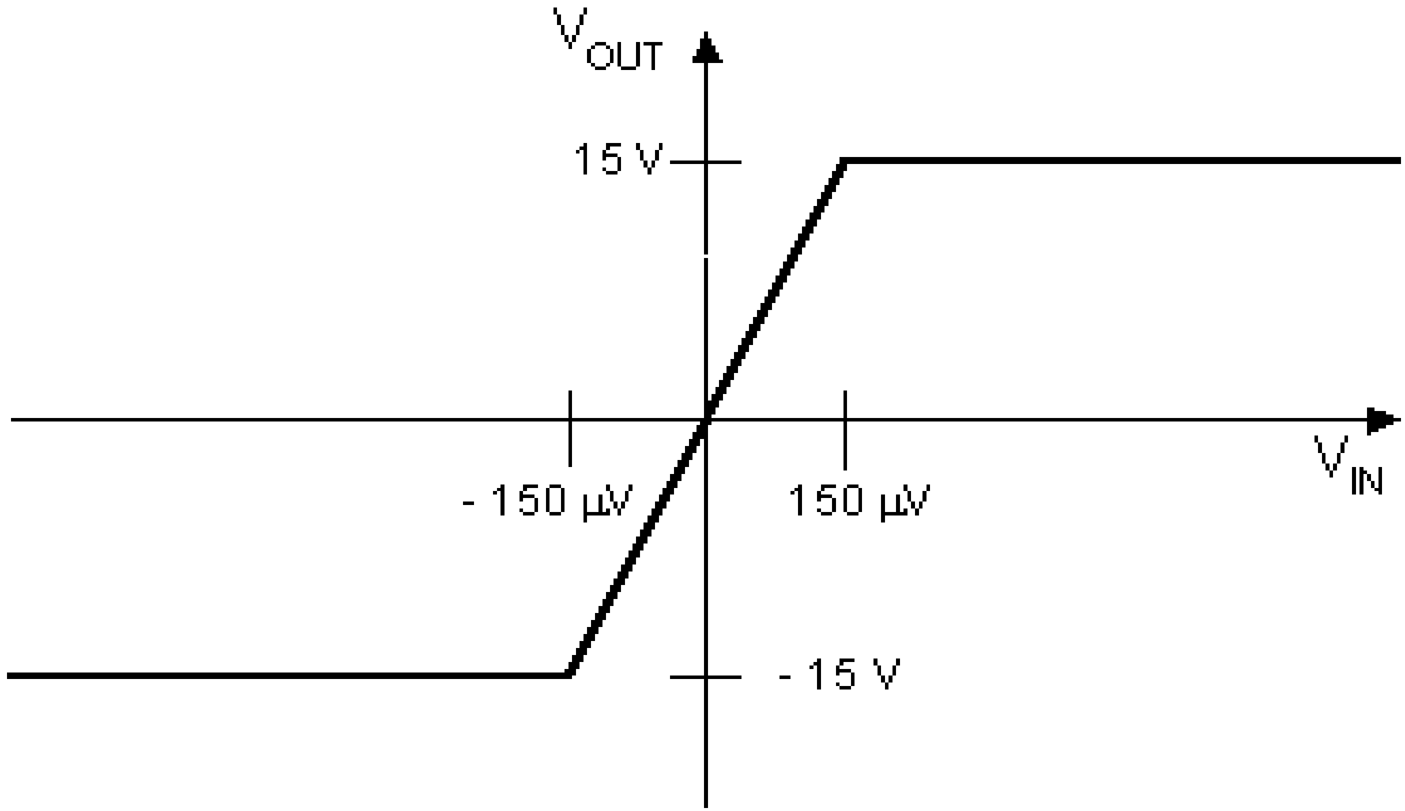
Gráfica I-V **determina todos los puntos de operación permitidos** de dicho dispositivo en el circuito en que se halla.

Fundamental: entender **qué nos dice** una gráfica.

Característica I-V. Recta de carga

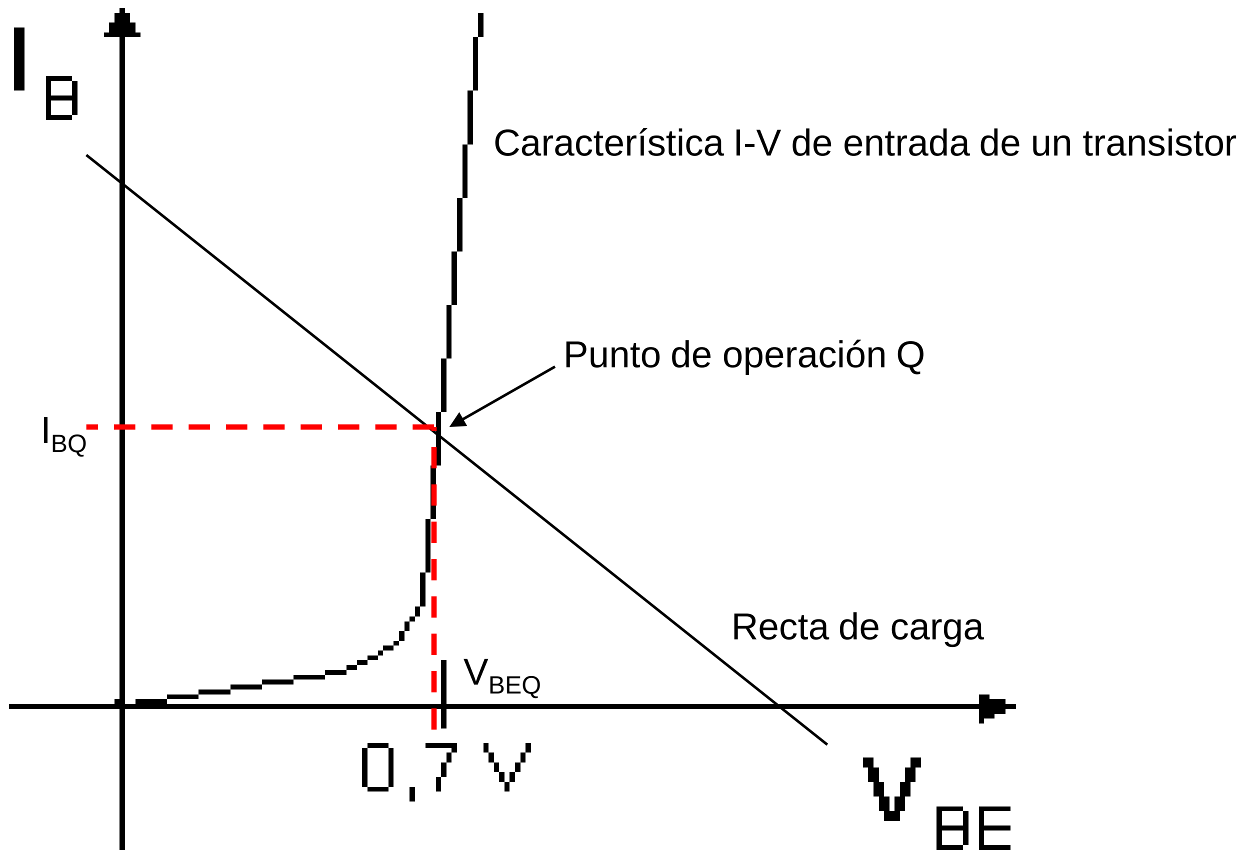
UNIVERSIDAD
REY JUAN CARLOS

Ejemplos:

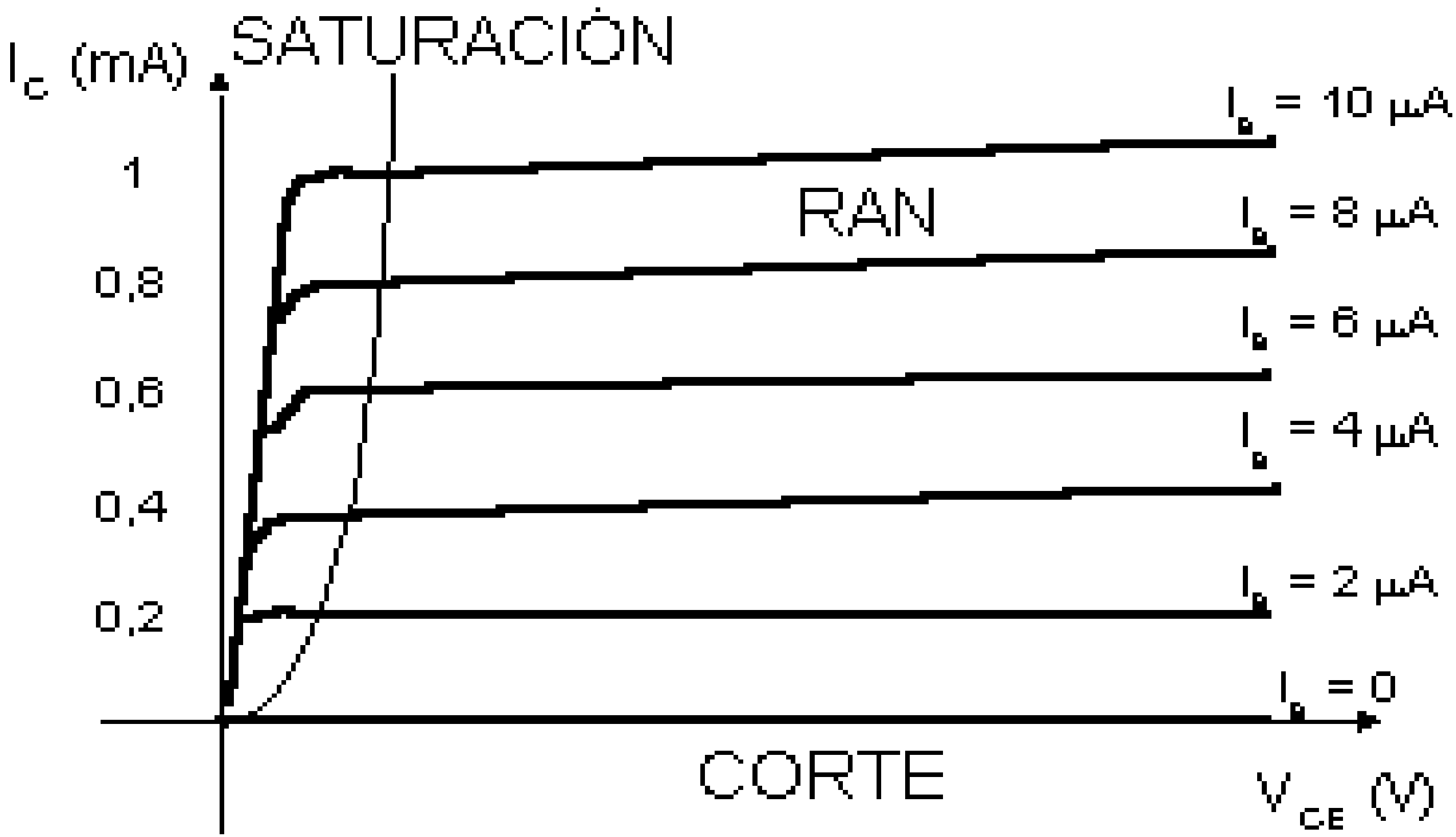


Característica I-V. Recta de carga

Ejemplos:



Ejemplos:



SATURACIÓN
Ic (mA)
1
0,8
0,6
0,4
0,2
RAN
Ib = 10 μA
Ib = 8 μA
Ib = 6 μA
Ib = 4 μA
Ib = 2 μA
Ib = 0
CORTE
VCE (V)

Leyes fundamentales: Leyes de Kirchoff

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ley de conservación de la carga y la energía para describir relación voltaje-corriente en cualquier red, lineal o no:

1ª.- La suma de caídas de voltaje alrededor de cualquier lazo cerrado es cero.

2ª.- La suma de todas las corrientes que entren en cualquier nodo de un circuito es igual a cero.

Nodo: Punto donde se conectan tres o más conductores.

Rama: Elemento o grupo de elementos con 2 terminales. Tramo entre dos nudos

Malla/lazo: cualquier camino cerrado que pueda se definido en el circuito.

Resolver un circuito: calcular todas las *intensidades* que circulan por cada elemento del circuito y las *tensiones* que caen en cada uno de ellos. NO hay una única forma de resolverlo.

Principio de superposición

ELEMENTO LINEAL: aquel cuya característica v-i es de la forma:

$$v = a \cdot i_1 + b \cdot i_2 \quad ó \quad i = c \cdot v_1 + d \cdot v_2$$

con a, b, c, d constantes.

En general a, b, c, d pueden ser operadores lineales (derivada o integral) $\Rightarrow$ la característica v-i es de la forma:

$$v = a\frac{di_1}{dt} + b\int i_2 dt$$

PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN: en todo sistema lineal, la respuesta del circuito debida a una suma de entradas, será igual a la suma de las respuestas de cada una de las entradas aplicadas individualmente.

Notar que podemos aplicar superposición aunque no todas las fuentes se apliquen en la misma localización.

Teoremas de reducción de circuitos

Equivalente de Thévenin:

Cualquier circuito resistivo (contiene únicamente resistencias y fuentes) puede ser representado por un circuito más sencillo, formado sólo por una sola fuente de voltaje y una resistencia en serie. Este circuito se denomina "Equivalente de Thévenin" del circuito original.

V_{th} representa todas las fuentes.
R_{th} representa todas las resistencias.

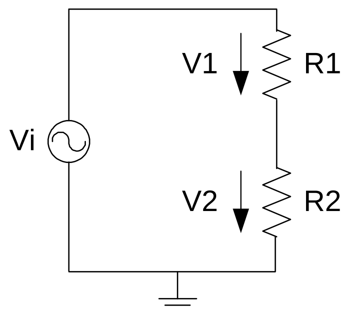
Equivalente de Norton:

Aquí la fuente independiente es una fuente de corriente, I_{th}, y la resistencia equivalente está conectada en paralelo.

Divisores de tensión y corriente

Divisor de tensión:

Las impedancias son atravesadas por la misma corriente

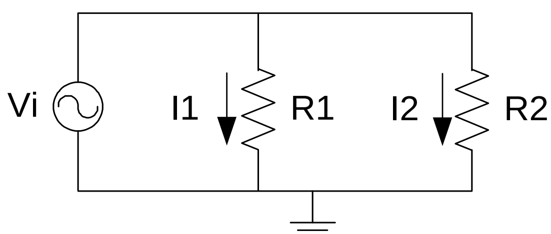


$$I_1 = I_2 = \frac{V_i}{R_1 + R_2} \qquad V_1 = I_1 \cdot R_1 ; V_2 = I_2 \cdot R_2$$

$$V_1 = \frac{R_1 \cdot V_i}{R_1 + R_2}; \qquad V_2 = \frac{R_2 \cdot V_i}{R_1 + R_2}$$

Divisor de corriente:

Las impedancias está sometidas a la misma tensión



$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 ; I_i = I_1 + I_2$$

$$I_1 = I_i - I_2 = I_i - I_1 \frac{R_1}{R_2}$$

$$I_1 = \frac{R_2 \cdot I_i}{R_1 + R_2} \; ; I_2 = \frac{R_1 \cdot I_i}{R_1 + R_2}$$

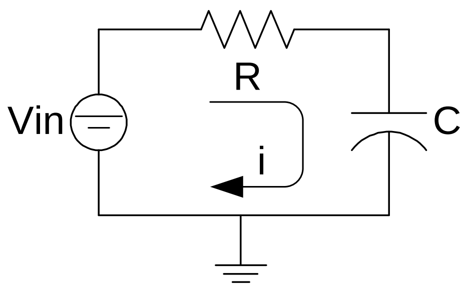
Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Circuitos de primer orden: Son circuitos caracterizados por una ecuación diferencial de primer orden. Cualquier circuito formado por un conjunto cualquiera de resistencias y fuentes independientes y un solo elemento almacenador de energía (L ó C) es de 1er orden.

Régimen transitorio: Solución a la **ec.dif. homogénea**, que es la respuesta natural del sistema.

Régimen permanente: Solución a la **ec.dif. completa**, que es la respuesta del sistema forzada por una excitación exterior.

Ejemplo 1: Circuito RC



Homogénea:

$$R \cdot i(t) + u_C(0) + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt = 0$$

Completa:

$$v_{in}(t) = R \cdot i(t) + u_C(0) + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 1: Circuito RC (C inicialmente cargado)

Solución homogénea: $$R\cdot i(t)+u_C(0)+\frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt=0;$$

Condiciones iniciales: $$u_C(0)=V_0;\ \ v_{in}(t)=0\ \ i(0)=-\frac{V_0}{R}$$

Solución tipo: $$i(t)=K\cdot e^{\lambda t}$$

$$\Rightarrow\ i(t)=-\frac{V_0}{R}\cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Tensión en el condensador:

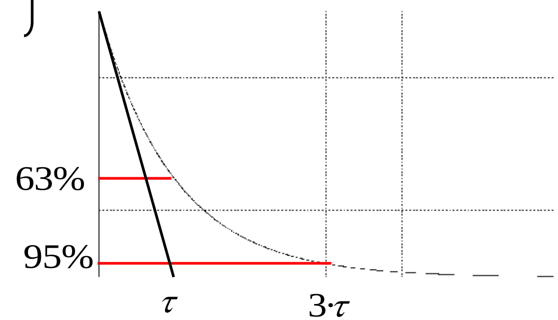
$$u_C(t)=u_C(0)+\frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt\qquad u_C(t)=V_0+V_0\cdot e^{-\frac{t}{RC}}-V_0$$

$$u_C(0)=V_0$$

$$\Rightarrow\ u_C(t)=V_0\cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Constante de tiempo:

$$\tau=RC;\ \ \omega=\frac{1}{\tau}=2\pi\cdot f$$



Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 1: Circuito RC (C inicialmente cargado)

Solución completa. Excitación escalón (habitual en electrónica):

$$v_{in}(t) = R \cdot i(t) + u_C(0) + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt$$

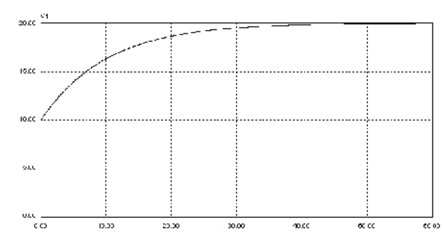
Condiciones iniciales: $u_C(0) = V_0;\ v_{in}(t) = V_{in};\ i(0) = \dfrac{V_{in} - V_0}{R}$

Solución tipo: $i(t) = K \cdot e^{\lambda t}$

$$\Rightarrow \quad i(t) = \frac{V_{in} - V_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Tensión en el condensador:

$$u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt \qquad u_C(t) = \left.(V_0 - V_{in}) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}\right]_0^t + u_C(0) \quad \Rightarrow \quad u_C(t) = (V_0 - V_{in}) \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + V_{in}$$



Solución genérica a los sistemas de 1er orden:

$$f(t) = \left[f(0) - f_\infty(0)\right] e^{-\frac{t}{\tau}} + f_\infty(t)$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Ejemplo 1: Circuito RC

Solución completa. Excitación senoidal. Características de las funciones senoidales:

1.- La respuesta en régimen permanente de un circuito lineal con excitación senoidal es una función senoidal de igual frecuencia. La amplitud y la fase puede variar.

2.- La suma de funciones senoidales de igual frecuencia es una función senoidal de igual frecuencia. La amplitud y la fase puede variar.

3.- La derivada de una senoide es de forma senoidal, y su integral.

4.- Mediante la descomposición en serie de Fourier cualquier función periódica puede representarse como una combinación lineal de un número finito de funciones senoidales.

5.- Los alternadores generan tensión con forma senoidales. Es una forma de onda fácil de obtener.

6.- La respuesta de un sistema ante funciones senoidales de distinta frecuencia nos da información del sistema.

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Ejemplo 1: Circuito RC (C inicialmente cargado)

Solución analítica a la completa. Excitación senoidal:

$$v_{in}(t) = R \cdot i(t) + u_C(0) + \frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt \quad \text{siendo } v_{in}(t) = V_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_v)$$

Solución tipo:

$$i(t) = I_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) \xrightarrow{I_{in}, \varphi_i}$$

$$R \cdot I_{in}\cos(\omega t + \varphi_i) + u_C(0) + \frac{1}{\omega C} I_{in}\sin(\omega t + \varphi_i) = V_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_v)$$

Particularizando para: $\omega t = 0; \ \omega t = \frac{\pi}{2}$

$$\left.\begin{aligned} R \cdot I_{in}\cos(\varphi_i) + u_C(0) + \frac{1}{\omega C} I_{in}\sin(\varphi_i) &= V_{in} \cdot \cos(\varphi_v) \\ R \cdot I_{in}\sin(\varphi_i) + u_C(0) - \frac{1}{\omega C} I_{in}\cos(\varphi_i) &= V_{in} \cdot \sin(\varphi_v) \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

(Ec.trascendentes mediante métodos numéricos, vectorialmente ó mediante complejos)

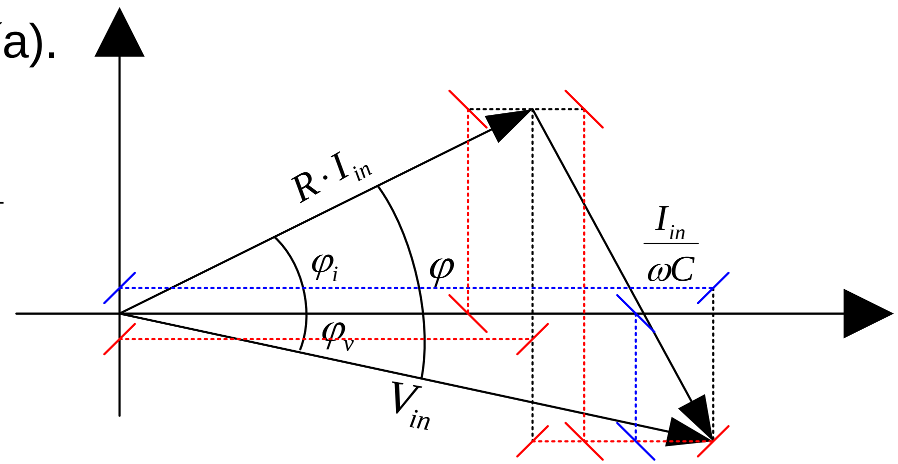
particularizando para $u_C(0) = 0$ por comodidad

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 1: Circuito RC

Resolución vectorialmente (trigonometría).



Módulo:

$$V_{in} = \sqrt{R^2 \cdot I_{in}^2 + \frac{I_{in}^2}{(\omega C)^2}} \Rightarrow I_{in} = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}}$$

Argumento:

$$\varphi_i = \varphi - \varphi_v; \quad \varphi = arctg \frac{1}{\omega RC}$$

Solución:

$$i(t) = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \cdot \cos(\omega t + \varphi - \varphi_v) \Leftrightarrow u_C(t) = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \cdot \frac{1}{\omega C} \cdot sen(\omega t + \varphi - \varphi_v)$$

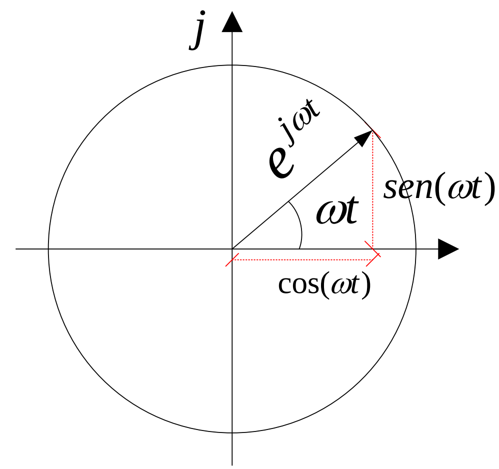
Método muy laborioso y difícil para circuitos más complicados

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 1: Circuito RC

Resolución mediante complejos



Euler: $e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\,sen(\omega t)$ $\qquad \cos(\omega t) = \mathrm{Re}\left[e^{j\omega t}\right]$

$e^{-j\omega t} = \cos(\omega t) - j\,sen(\omega t)$ $\qquad sen(\omega t) = \mathrm{Im}\left[e^{j\omega t}\right]$

Solución tipo:

$$i(t) = I_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) = I_{in} \cdot \mathrm{Re}\left[e^{j(\omega t + \varphi_i)}\right] = I_{in} \cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\varphi_i} \cdot e^{j\omega t}\right]$$

Solución para régimen senoidal permanente

$$R \cdot I_{in} e^{j\varphi_i} e^{j\omega t} + \frac{1}{C}\frac{1}{j\omega} I_{in} e^{j\varphi_i} e^{j\omega t} = V_{in} \cdot e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}$$

$$I_{in} e^{j\varphi_i} = \frac{V_{in}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \cdot e^{j\varphi_V}; \;\; I_{in} e^{j\varphi_i} = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \cdot e^{j(\varphi_V + \frac{\pi}{2} - \varphi)} \;\Rightarrow\; I_{in}\,\mathrm{Re}\left[e^{j\varphi_i}\right] = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}}} \cdot \mathrm{Re}\left[e^{j(\varphi_V + \frac{\pi}{2} - \varphi)}\right]$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Respuesta de los elementos pasivos básicos al régimen senoidal permanente:

$$u(t) = V_{in} \cdot e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}; \quad i(t) = I_{in} \cdot e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

Resistencia

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

$$V_{in} \cdot e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = R \cdot I_{in} \cdot e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

$$\Downarrow$$

$$R = \frac{V_{in}}{I_{in}}$$

$$\varphi_V = \varphi_i$$

Corriente y la tensión en fase

Bobina

$$u(t) = L \cdot \frac{di}{dt}$$

$$V_{in} \cdot e^{j\varphi_V} e^{j\omega t} = j\omega L \cdot I_{in} \cdot e^{j\varphi_i} e^{j\omega t}$$

$$V_{in} \cdot e^{j\varphi_V} = \omega L \cdot I_{in} \cdot e^{j\varphi_i + \pi/2}$$

$$\Downarrow$$

$$V_{in} = \omega L \cdot I_{in}$$

$$Z_L = j\omega L$$

$$\varphi_V = \varphi_i + \pi/2$$

$$\varphi_i = \varphi_V - \pi/2$$

La corriente retrasa 90º a la tensión

Condensador

$$i(t) = C \cdot \frac{du}{dt}$$

$$I_{in} \cdot e^{j\varphi_i} e^{j\omega t} = j\omega C \cdot V_{in} \cdot e^{j\varphi_V} e^{j\omega t}$$

$$I_{in} \cdot e^{j\varphi_i} = \omega C \cdot V_{in} \cdot e^{j\varphi_V + \pi/2}$$

$$\Downarrow$$

$$I_{in} = \omega C \cdot V_{in}$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

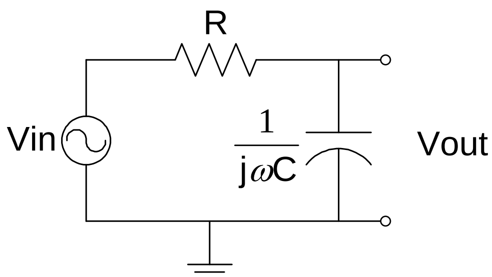
$$\varphi_i = \varphi_V + \pi/2$$

La corriente adelanta 90º a la tensión

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 1: Circuito RC. Función de transferencia.

Resolución directa al régimen senoidal <u>permanente</u> mediante complejos. Función de transferencia.



$$V_{out} = \frac{\frac{1}{j\omega C}\cdot V_{in}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{V_{in}}{1 + j\omega RC} \Rightarrow H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Módulo

$$|H(j\omega)| = \left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$$

Fase o argumento

$$\angle H(j\omega) = \angle \frac{V_{out}}{V_{in}} = \varphi = arctg(0) - arctg(\omega RC)$$

Siendo $v_{in}(t) = V_{in}\cdot\cos(\omega t) = V_{in}\cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\omega t}\right]$

$$V_{out} = V_{in}\cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\omega t}\right]\cdot|H(j\omega)|\cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\varphi}\right] = \frac{V_{in}}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}\cdot\cos(\omega t + \varphi)$$

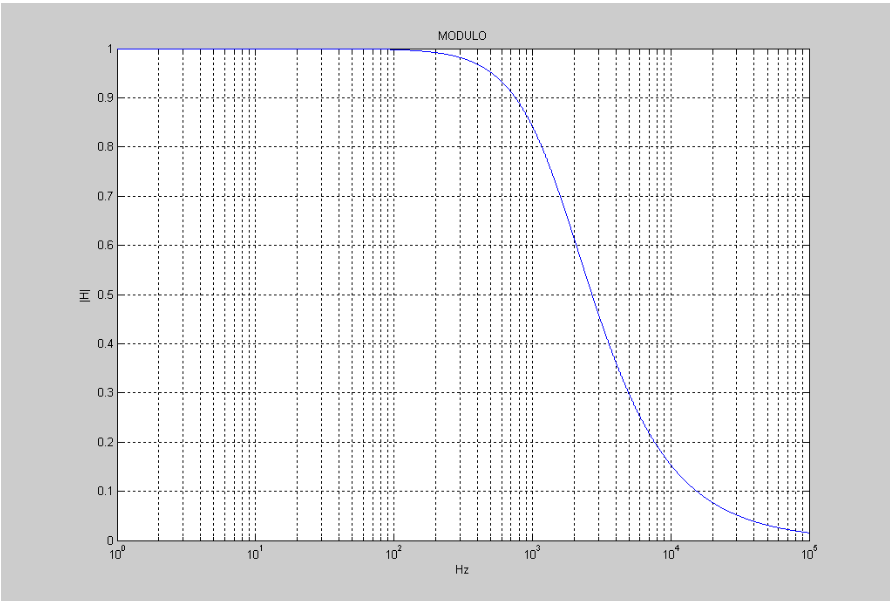
Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

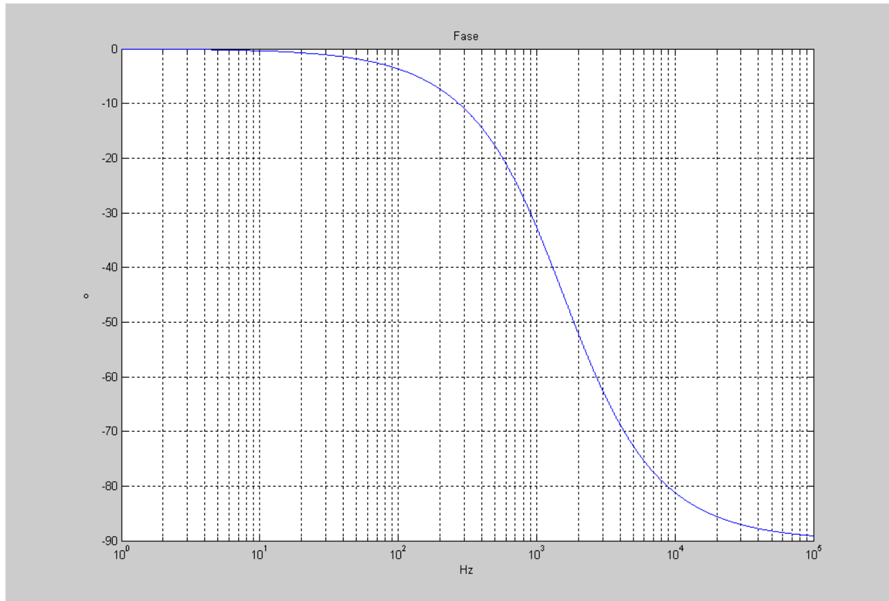
Ejemplo 1: Circuito RC.

Resolución directa al régimen senoidal permanente mediante complejos.
Función de transferencia. Representación gráfica.

Módulo



Fase o argumento



Ejemplo 1: Circuito RC.

Resolución a la completa.
La particular es el régimen permanente, resuelta mediante complejos.
La homogénea es la respuesta transitoria:

Solución tipo $u_C(t) = K \cdot e^{\lambda t} \Rightarrow u_C(t) = K \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

La solución completa resulta $\Rightarrow$ $u_C(t) = \frac{V_{in}}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi) + K \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

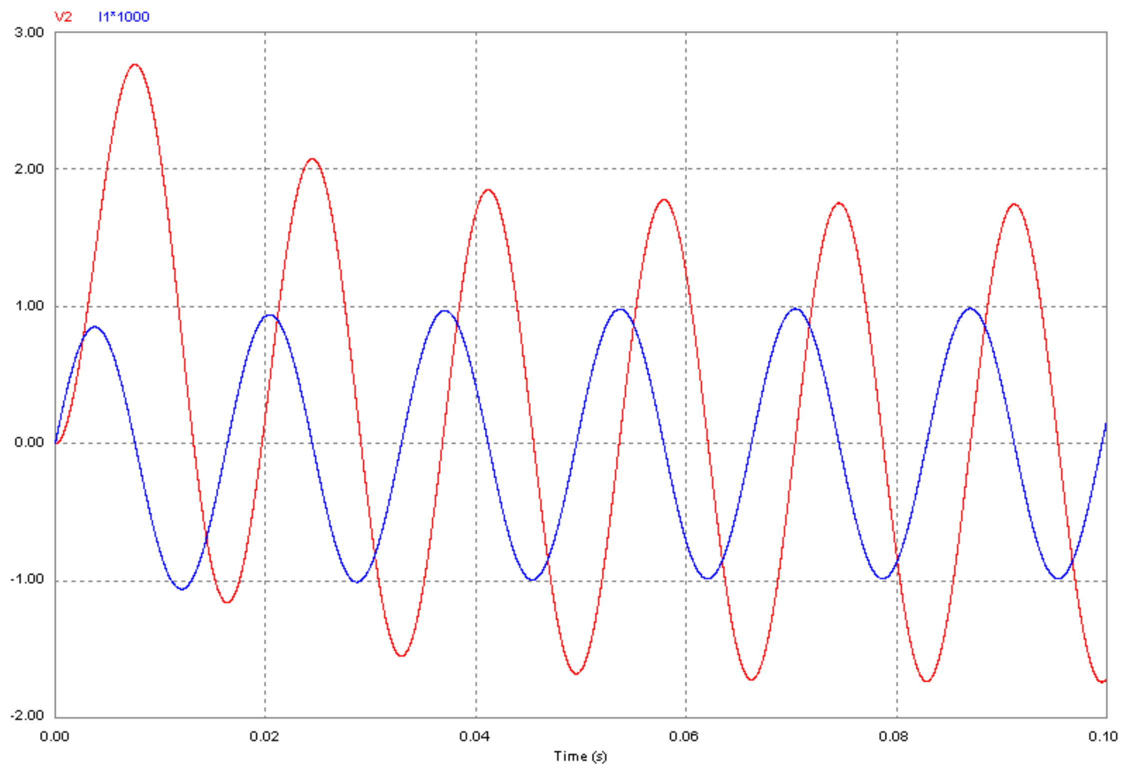
Con la condición inicial $u_C(0) = V_0 \Rightarrow K = V_0 - \frac{V_{in}}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \cdot \cos(\varphi)$

$$u_C(t) = \frac{V_{in}}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi) + \left(V_0 - \frac{V_{in}}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \cdot \cos(\varphi) \right) \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

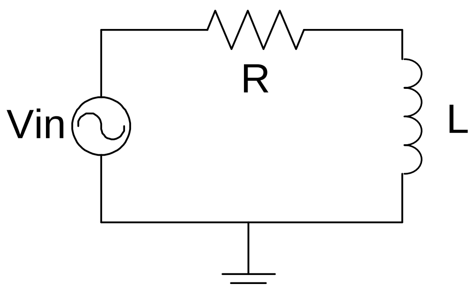
UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 1: Circuito RC. Tensión (rojo) y corriente (azul) en C. F= 60Hz; R=10K; C= 1,5uF



Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Ejemplo 2: Circuito RL



Homogénea:

$$R \cdot i(t) + L\frac{di}{dt} = 0$$

Completa:

$$v_{in}(t) = R \cdot i(t) + L\frac{di}{dt}$$

Solución a la homogénea (transitorio):

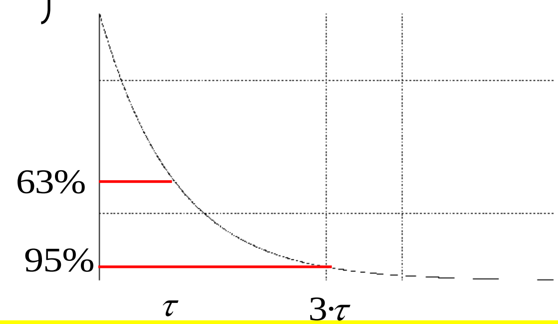
Condiciones iniciales: $i(0) = -I_0;\ v_{in}(t) = 0;\ u_L(0) = I_0 \cdot R$

Solución tipo: $i(t) = K \cdot e^{\lambda t}$

$\Rightarrow$ $i(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}\cdot t}$

Tensión en la resistencia: $u_L(t) = L \cdot \frac{di}{dt} = -I_0 R \cdot e^{-\frac{R}{L}\cdot t}$

Constante de tiempo: $\tau = \frac{L}{R};\ \omega = \frac{1}{\tau} = 2\pi \cdot f$



Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Ejemplo 2: Circuito RL

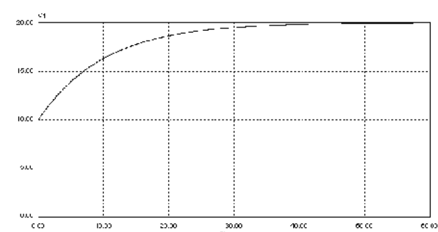
Solución completa. Excitación escalón (habitual en electrónica):

$$v_{in}(t) = R \cdot i(t) + L\frac{di}{dt}$$

Condiciones iniciales y finales: $i(0) = I_0;\ v_{in}(t) = V_{in};\ i(\infty) = \frac{V_{in}}{R}$

Solución genérica a los sistemas de 1er orden: $f(t) = \left[f(0) - f_\infty(0)\right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + f_\infty(t)$

$$i(t) = \left[I_0 - \frac{V_{in}}{R}\right] \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} + \frac{V_{in}}{R}$$



Tensión en la bobina:

$$u_L(t) = L\frac{di}{dt} \qquad u_L(t) = (V_{in} - R \cdot I_{in}) \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 2: Circuito RL

Solución analítica a la completa. Excitación senoidal:

$$v_{in}(t) = R \cdot i(t) + L\frac{di}{dt} \qquad \text{siendo } v_{in}(t) = V_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_v)$$

Solución tipo: $i(t) = I_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i)$

$$R \cdot I_{in} \cos(\omega t + \varphi_i) - \omega L \cdot I_{in} \sin(\omega t + \varphi_i) = V_{in} \cdot \cos(\omega t + \varphi_v)$$

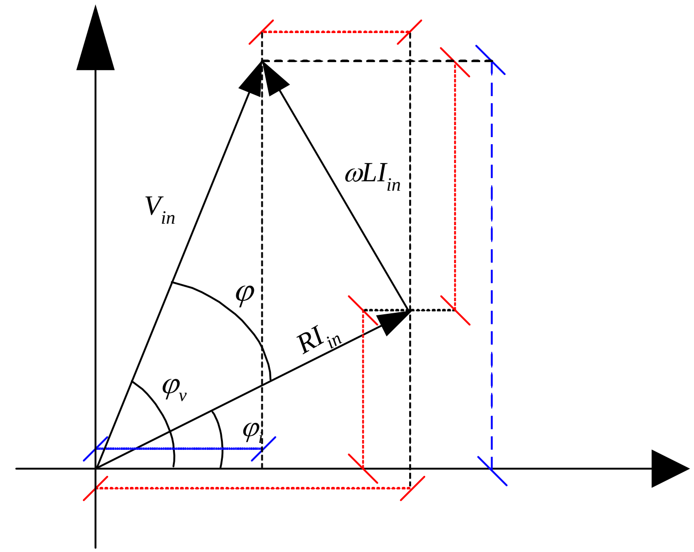
Particularizando para: $\omega t = 0; \ \omega t = \frac{\pi}{2}$

$$\left.\begin{aligned} R \cdot I_{in} \cos(\varphi_i) - \omega L \cdot I_{in} \sin(\varphi_i) &= V_{in} \cdot \cos(\varphi_v) \\ R \cdot I_{in} \sin(\varphi_i) + \omega L \cdot I_{in} \cos(\varphi_i) &= V_{in} \cdot \sin(\varphi_v) \end{aligned}\right\} \Rightarrow I_{in}, \varphi_i$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS

Ejemplo 2: Circuito RL



Resolución vectorialmente.

Módulo:

$$V_{in} = \sqrt{R^2 \cdot I_{in}^2 + (\omega L)^2 \cdot I_{in}^2} \Rightarrow I_{in} = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

Argumento:

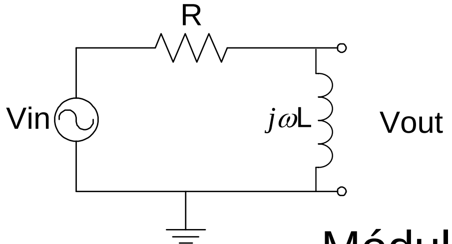
$$\varphi_i = \varphi_v - \varphi; \quad \varphi = arctg\,\frac{\omega L}{R}$$

Solución:

$$i(t) = \frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_v - \varphi) \Leftrightarrow u_L(t) = -\frac{V_{in}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \omega L \cdot sen(\omega t + \varphi_v - \varphi)$$

Ejemplo 2: Circuito RL. Función de transferencia.

Resolución directa al régimen senoidal permanente mediante complejos. Función de transferencia.



$$V_{out} = \frac{j\omega L \cdot V_{in}}{R + j\omega L} \Rightarrow H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{j\omega L}{R + j\omega L}$$

Módulo

$$|H(j\omega)| = \left|\frac{V_{out}}{V_{in}}\right| = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}}$$

Fase o argumento

$$\angle H(j\omega) = \angle\frac{V_{out}}{V_{in}} = arctg(\infty) - arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \frac{\pi}{2} - \varphi$$

Siendo $v_{in}(t) = V_{in} \cdot \cos(\omega t) = V_{in} \cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\omega t}\right]$ y $\varphi = arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right)$

$$V_{out} = V_{in} \cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\omega t}\right] \cdot |H(j\omega)| \cdot \mathrm{Re}\left[e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)}\right] = \frac{V_{in}}{\sqrt{1+\left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2} - \varphi) = \frac{V_{in}}{\sqrt{1+\left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}} \cdot sen(\omega t + \varphi)$$

Circuitos RC: Circuitos de 1er orden

Ejemplo 2: Circuito RL. Tensión (rojo) y corriente (azul) en L. F= 60 Hz; R=10K; L= 1,5mH