

## TEMA 2: NOCIONES BÁSICAS DE TEORÍA DE CIRCUITOS

### 2.1. Magnitudes Eléctricas. Circuitos Eléctricos y Electrónicos. Teoría de Circuitos.

2.1.1 *Variables y magnitudes básicas: Carga, Corriente y Tensión eléctricas, Flujo Magnético. Energia y Potencia*

2.1.2 *Sistemas Electrónicos: Circuitos y Teoría de Circuitos. Modelado.*

### 2.2. Definiciones y Leyes Básicas. Elementos Básicos de Circuito.

2.2.1 *Elementos constitutivos de un circuito. Elementos de Circuito.*

2.2.2 *Relaciones fundamentales: Leyes de Kirchoff y Relaciones tensión-corriente. Analisis de Circuitos.*

2.2.3 *Elementos básicas de circuito: resistores, condensadores, inductores, fuentes independientes y controladas*

### 2.3. Análisis de Circuitos: Algoritmo general de análisis y algunos Resultados básicos.

2.3.1 *Algoritmo general de analisis de circuitos.*

2.3.2 *Circuitos equivalentes: Elementos en serie, paralelo. Equivalentes Thevenin y Norton.*

2.3.3 *Relaciones simples, algunos errores frecuentes y circuitos imposibles.*

2.3.4 *Circuitos con elementos dinámicos. Carga y descarga de condensadores.*

## LECTURAS COMPLEMENTARIAS

- **Fernández Ramos, J. y otros, "Dispositivos Electrónicos para Estudiantes de Informática" Universidad de Málaga / Manuales 2002. Tema 1: pag. 1-29.**
- **Johnson, David E, "Análisis básico de circuitos eléctricos", Ed. Prentice-Hall 1996. Tema1, Tema2 y Tema4**
- **Carlson. A.B. "Teoría de Circuitos" Ed. Thomson-Paraninfo. 2002. Tema 1, Tema 2, Tema 3 y Tema 4.**
- **Daza A. y García J. "Ejercicios de Dispositivos Electrónicos" Universidad de Málaga/Manuales 2003. Tema 1: pag 31-38.**

## MAGNITUDES Y VARIABLES IMPLICADAS EN EL ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE CIRCUITOS

### ● ASOCIADAS AL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

- Carga eléctrica,  $q(t)$ , Culombios (C)
- Intensidad de corriente,  $i(t) = \frac{d}{dt}q(t)$ , Amperio (A)
- Flujo magnético,  $\phi(t)$ , Webers (Wb)
- Tensión eléctrica,  $v(t) = \frac{d}{dq}W(t)$  (Trabajo por unidad de carga)  
 Voltio (V)  $v(t) = \frac{d}{dt}\phi(t)$  (Ley de Faraday)

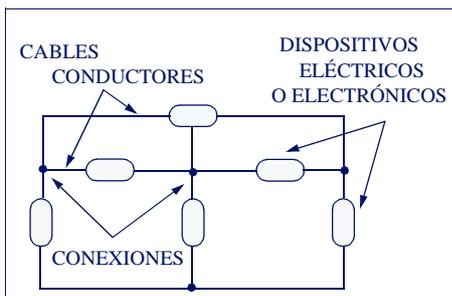
### ● FUNDAMENTALES

- Energía,  $W(t) = \int_{-\infty}^t p(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^t (v(\tau) \cdot i(\tau))d\tau$ , Julios (J)
- Potencia,  $p(t)$ ,  $p(t) = \frac{d}{dt}W(t) = v(t) \cdot i(t)$ , Watos (W)

nombre	símbolo	factor multiplicativo
femto	f	$\times 10^{-15}$
pico	p	$\times 10^{-12}$
nano	n	$\times 10^{-9}$
micro	$\mu$	$\times 10^{-6}$
mili	m	$\times 10^{-3}$
kilo	k	$\times 10^3$
mega	M	$\times 10^6$
giga	G	$\times 10^9$
tera	T	$\times 10^{12}$

## SISTEMAS ELECTRÓNICOS. CIRCUITOS Y TEORÍA DE CIRCUITOS. MODELADO

### ● SISTEMA ELECTRÓNICO REAL



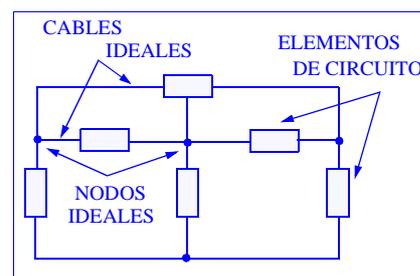
- ▶ Su campo de aplicación abarca un amplio abanico de sistemas en cuanto a:

- Tamaño del circuito
- Magnitud de Tensiones
- Magnitud de intensidades
- Frecuencia de las señales
- Potencia puesta en juego

### ● TEORÍA DE CIRCUITOS

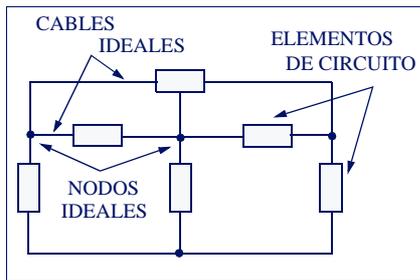
- ▶ Se centra en el estudio del comportamiento eléctrico y trata de establecer relaciones generales entre las magnitudes y variables eléctricas medidas en diferentes puntos de sistema.
- ▶ Trabaja sobre modelos de circuitos, los cuales establecen aproximaciones en términos de elementos ideales, y proporciona las herramientas matemáticas necesarias para realizar predicciones sobre su comportamiento. Si estas predicciones no concuerdan con las medidas realizadas sobre el sistema real, la causa de esta discrepancia hay que buscarla en un modelado deficiente.

### MODELO DE CIRCUITO ELECTRÓNICO



## CIRCUITOS ELECTRÓNICOS Y ELEMENTOS DE CIRCUITO

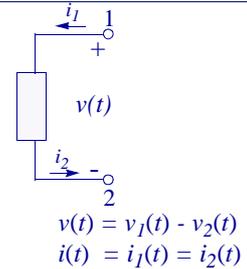
### ● MODELO DE CIRCUITO ELECTRÓNICO



### ● ELEMENTOS DE CIRCUITO

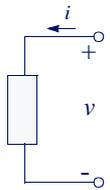
- Son abstracciones que modelan propiedades eléctricas de los dispositivos físicos en términos de:

**Tensión entre sus terminales  $v(t)$**   
**y Corriente que lo atraviesa  $i(t)$**



### ● REFERENCIAS DE CORRIENTE Y TENSIÓN: CRITERIO DEL ELEMENTO PASIVO

**SE ASIGNARÁN REFERENCIAS DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE MANERA QUE SE CUMPLA**



- ELEMENTO PASIVO  $\longrightarrow$   $p(t) = v(t) \cdot i(t) > 0 \quad \forall t$   
 Consume energía  
 o es capaz de almacenarla
- ELEMENTO ACTIVO  $\longrightarrow$   $p(t) = v(t) \cdot i(t) < 0$   
 Todo aquel que no es pasivo  
 Capaz de proporcionar energía

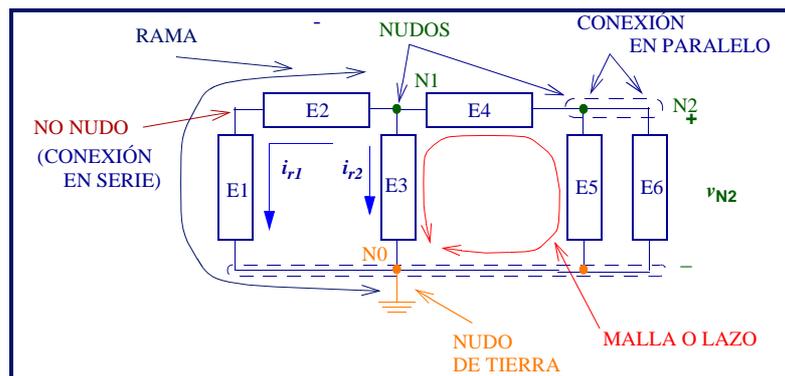
### ● CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

En un circuito siempre se cumple la ecuación

$$\sum \text{Potencia suministrada} = \sum \text{Potencia consumida}$$

## CIRCUITOS ELECTRÓNICOS. DEFINICIONES

### ● CIRCUITO ELECTRÓNICO: ELEMENTOS CONSTITUTIVOS



### ● CIRCUITO ELECTRÓNICO: VARIABLES DE CIRCUITO

- CORRIENTES EN LAS RAMA
- TENSIONES EN LOS NUDOS

## CIRCUITOS ELECTRÓNICOS. ANÁLISIS Y LEYES FUNDAMENTALES

### ● ANÁLISIS DE CIRCUITOS:

#### ▶ OBJETIVO: DETERMINACIÓN DEL VALOR DE LAS VARIABLES DE CIRCUITO:

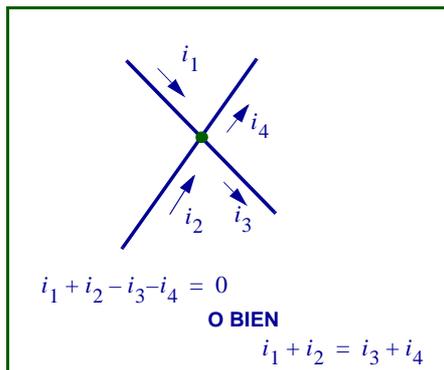
- CORRIENTES Y TENSIONES EN LOS ELEMENTOS DE CIRCUITO
- CORRIENTES EN LAS RAMA Y TENSIONES EN LOS NODOS

#### ▶ PRINCIPALES HERRAMIENTAS:

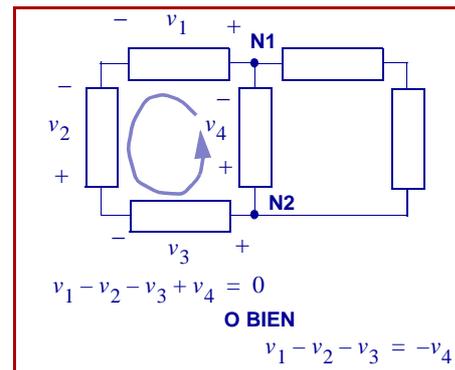
- LEYES DE KIRCHHOFF (LKI) (LKV)
- RELACIÓN TENSION-CORRIENTE EN LOS TERMINALES DE LOS ELEMENTOS DE CIRCUITO

### LEYES DE KIRCHHOFF

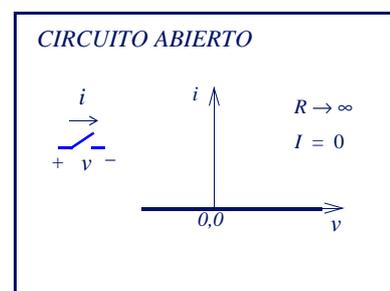
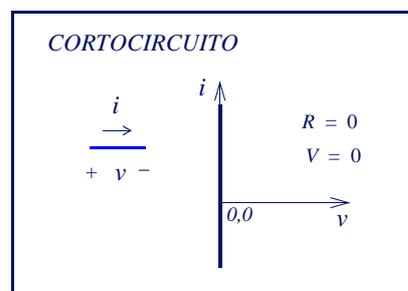
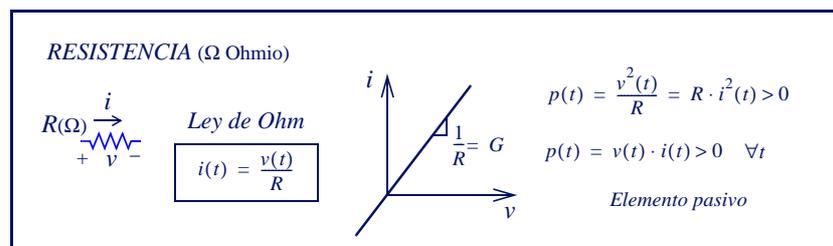
#### LEY DE KIRCHHOFF DE CORRIENTE (LKI)



#### LEY DE KIRCHHOFF DE TENSION (LKV)



### ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSION-CORRIENTE



## ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE

**FUENTE INDEPENDIENTE DE TENSIÓN**

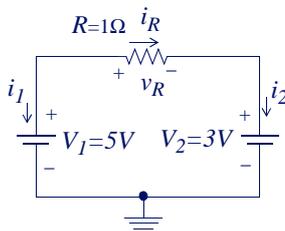
Dado  $V > 0$   $p(t) = V \cdot i(t)$   
 $p(t) > 0$  si  $i > 0 \forall t$  Elemento pasivo  
 $p(t) < 0$  si  $i < 0 \forall t$  Elemento activo

**FUENTE INDEPENDIENTE DE INTENSIDAD**

Dado  $I > 0$   $p(t) = I \cdot v(t)$   
 $p(t) > 0$  si  $v > 0 \forall t$  Elemento pasivo  
 $p(t) < 0$  si  $v < 0 \forall t$  Elemento activo

Ej: Determinar los valores de  $i_1, i_2, v_R$  e  $i_R$ .

¿Qué elementos son pasivos y cuáles activos? Realizar el balance energético



LKV:

Ley de Ohm

LKI:

$$V_1 = v_R + V_2 \quad v_R = R i_R \quad i_1 = -i_R$$

$$v_R = 2V \quad \longrightarrow \quad i_R = 2A \quad \longrightarrow \quad i_1 = -2A$$

$$i_2 = 2A$$

$p_R = v_R i_R = 4W > 0$  Elemento pasivo

$p_{V1} = V_1 i_1 = -10W < 0$  Elemento activo

$p_{V2} = V_2 i_2 = 6W > 0$  Elemento pasivo

## ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE

**FUENTE INDEPENDIENTE DE TENSIÓN**

Dado  $V > 0$   $p(t) = V \cdot i(t)$   
 $p(t) > 0$  si  $i > 0 \forall t$  Elemento pasivo  
 $p(t) < 0$  si  $i < 0 \forall t$  Elemento activo

**FUENTE INDEPENDIENTE DE INTENSIDAD**

Dado  $I > 0$   $p(t) = I \cdot v(t)$   
 $p(t) > 0$  si  $v > 0 \forall t$  Elemento pasivo  
 $p(t) < 0$  si  $v < 0 \forall t$  Elemento activo

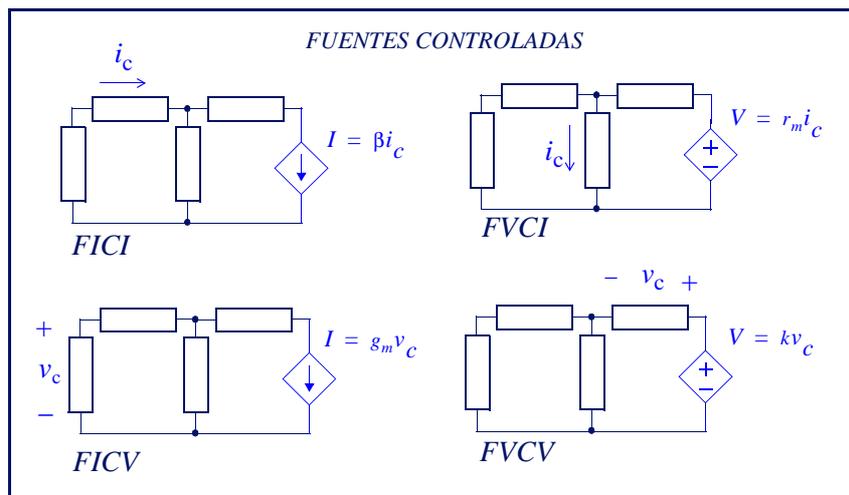
**MODELADO DE UNA FUENTE DE TENSIÓN REAL**

$v = R_s i + E$

**MODELADO DE UNA FUENTE DE INTENSIDAD REAL**

$i = G_s v + I$

## ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSION-CORRIENTE



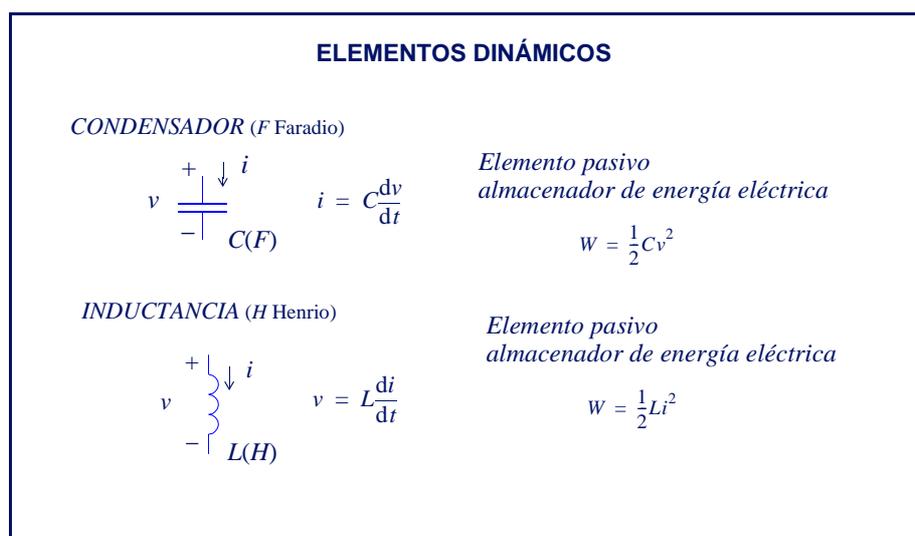
**FICI:** Fuente de Intensidad Controlada por Intensidad

**FVCI:** Fuente de Voltaje Controlada por Intensidad

**FICV:** Fuente de Intensidad Controlada por Voltaje

**FVCV:** Fuente de Voltaje Controlada por Voltaje

## ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSION-CORRIENTE



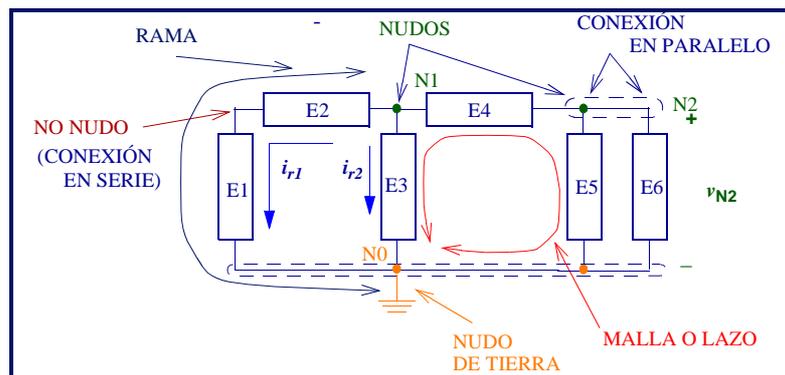
## ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS I

### ● POSIBLES VARIABLES INCOGNITA EN UN CIRCUITO:

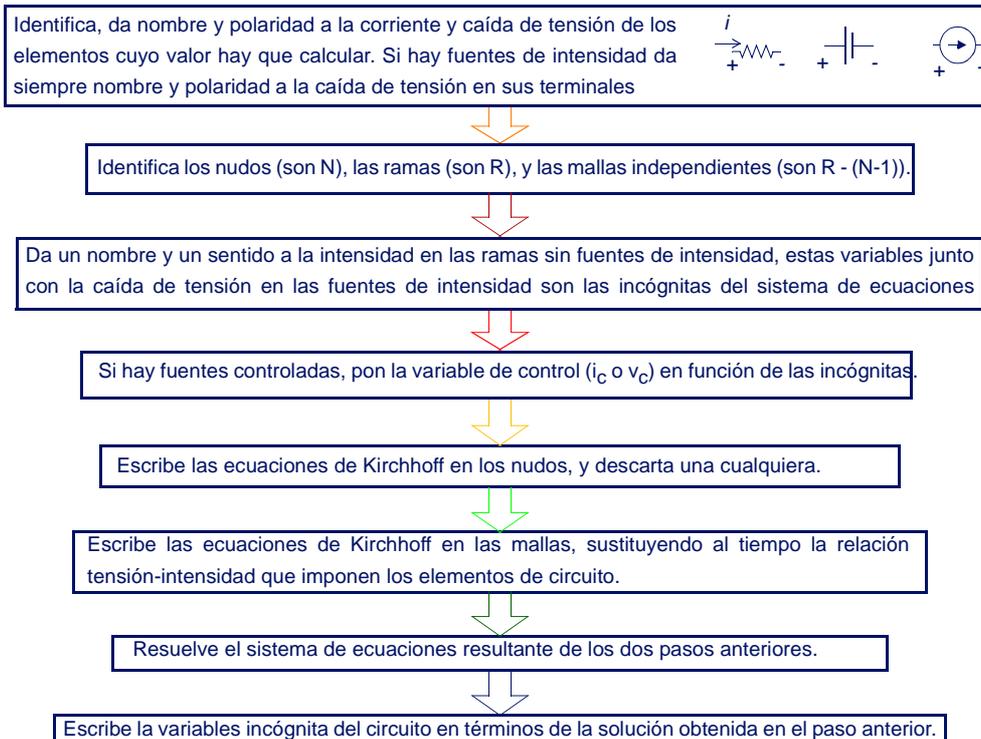
- Intensidades y tensiones en los elementos (en todos o en alguno/os en particular)
- Tensiones entre dos nudos cualesquiera
- Intensidad en cualquiera de las ramas
- Cualquier otra variable o magnitud eléctrica asociada al sistema

### ● ALGORITMOS DE ANÁLISIS:

*Plantear y resolver un sistema con el **mínimo nº de ecuaciones e incógnitas** que permitan calcular cualquiera de las posibles incógnitas en un circuito.*

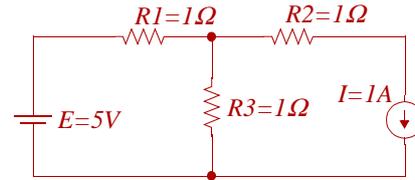


## ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS II



### ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS: EJEMPLO

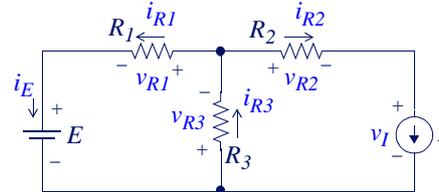
Ej: Determinar los valores de las corrientes y las tensiones en todos los elementos del circuito de la figura.  
(Cálculo del punto de operación o análisis dc).



#### ► Aplicación del algoritmo de resolución de circuitos

1º) Identificación de las variables cuyo valor hay que calcular y elección de la referencia de sus polaridades:

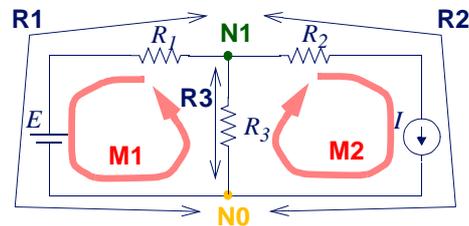
- Tensión e Intensidad en cada una de las resistencias ( $v_{R1}, i_{R1}, v_{R2}, i_{R2}, v_{R3}, i_{R3}$ ).
- Intensidad en la fuente de tensión E, ( $i_E$ )
- Tensión en la fuente de intensidad I, ( $v_I$ ).



2º) Identificación del nº de nodos, ramas y mallas independientes

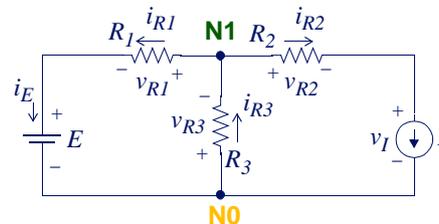
$N = 2$  (N0 y N1) ;  $R = 3$  (R1, R2, R3)

$M = R - (N-1) = 2$  (M1 y M2)



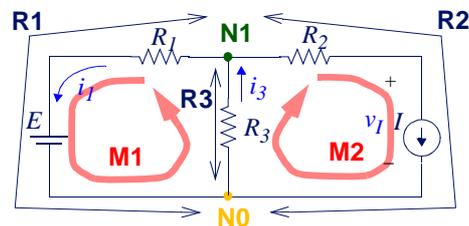
### ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS: EJEMPLO

Ej: Determinar los valores de las corrientes y las tensiones en todos los elementos del circuito de la figura.  
(Cálculo del punto de operación o análisis dc).  
(Continuación)



3º) Selección del conjunto mínimo de variables independientes, nominación y asignación de referencias de polaridad:

- Intensidad en las ramas que no contengan fuentes de intensidad ( $i_1, i_3$ ).
- Tensión en la fuente de intensidad I, ( $v_I$ ).



4º) Planteamiento y resolución del sistema de ecuaciones

$N - 1$  ecuaciones de nudos y  $M$  ecuaciones de malla

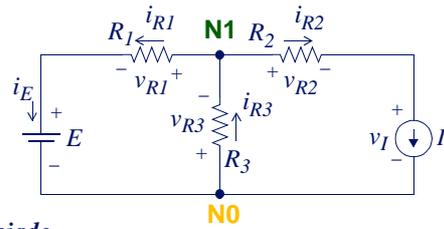
$$\left. \begin{aligned} \mathbf{N1:} \quad & i_1 - i_3 + I = 0 \\ \mathbf{M1:} \quad & R_1 i_1 + E + R_3 i_3 = 0 \\ \mathbf{M2:} \quad & R_2 I + v_I + R_3 i_3 = 0 \end{aligned} \right\}$$

5º) Cálculo de las variables que pide el enunciado en función de las variables calculadas en 4º)

$$\left. \begin{aligned} v_{R1} &= R_1 i_1 & v_{R3} &= R_3 i_3 \\ i_{R1} &= i_1 & i_{R3} &= i_3 \\ v_{R2} &= R_2 I & v_I & \text{Se calcula en 4º)} \\ i_{R2} &= I & i_E &= i_1 \end{aligned} \right\}$$

### ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS: EJEMPLO

Ej: Determinar los valores de las corrientes y tensiones en todos los elementos del circuito de la figura.  
(Cálculo del punto de operación o análisis dc).  
(Continuación)



4°) Sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned} \mathbf{N1:} & i_1 - i_3 + I = 0 \\ \mathbf{M1:} & R_1 i_1 + E + R_3 i_3 = 0 \\ \mathbf{M2:} & R_2 I + v_1 + R_3 i_3 = 0 \end{aligned}$$

5°) Variables que pide el enunciado

$$\begin{aligned} i_{R1} = i_1 \quad i_{R2} = I \quad i_{R3} = i_3 & \Rightarrow v_{R1} = R_1 i_1 \quad v_{R2} = R_2 I \quad v_{R3} = R_3 i_3 \\ i_E = i_1 \quad v_1 & \text{ Se calcula en 4°)} \end{aligned}$$

Solución del sistema de ecuaciones y cálculo numérico

Método de sustitución

De **N1**  $i_1 = i_3 - I \Rightarrow$  sustituyendo en **M1**  $R_1 i_3 - R_1 I + R_3 i_3 = -E \Rightarrow i_3 = \frac{R_1 I - E}{R_1 + R_3}$

De donde  $i_1 = \frac{R_1 I - E}{R_1 + R_3} - I = -\frac{R_3 I + E}{R_1 + R_3}$

De **M2**  $v_1 = -R_2 I - R_3 i_3 \Rightarrow$  sustituyendo  $i_3$   $v_1 = -R_2 I - \frac{R_3 (R_1 I - E)}{R_1 + R_3}$

Sustituyendo valores numéricos

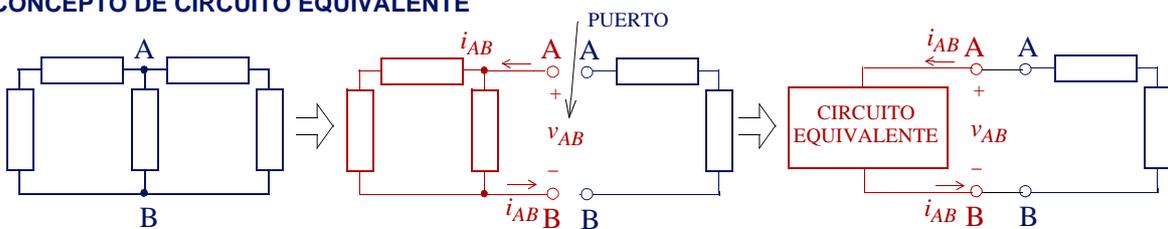
$$\begin{aligned} i_3 &= -2A \\ i_1 &= -3A \\ v_1 &= 1V \end{aligned}$$

y finalmente

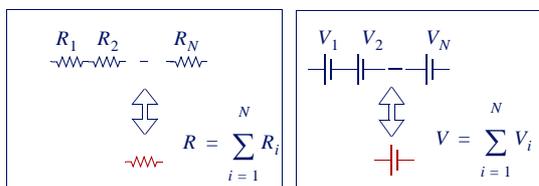
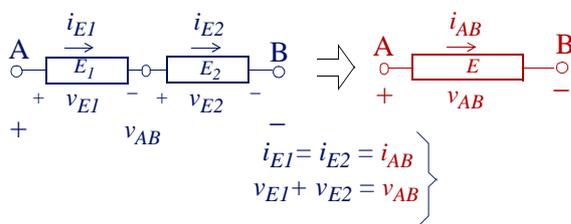
$$\begin{aligned} v_{R1} &= -3V & v_{R2} &= 1V & v_{R3} &= -2V & v_1 &= 1V & E &= 5V \\ i_{R1} &= -3A & i_{R2} &= 1A & i_{R3} &= -2A & I &= 1A & i_E &= -3A \end{aligned}$$

### ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS

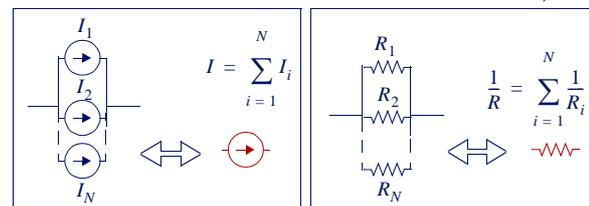
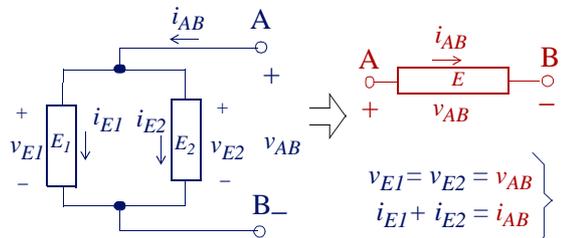
#### CONCEPTO DE CIRCUITO EQUIVALENTE



#### EQUIVALENTE DE ELEMENTOS EN SERIE

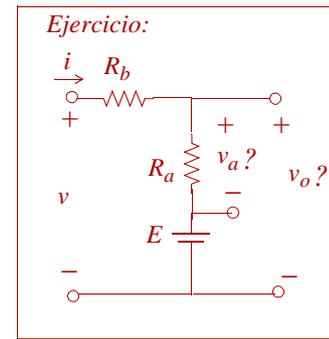
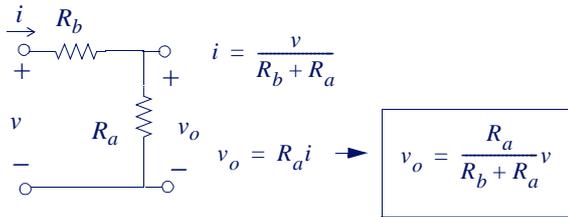


#### EQUIVALENTE DE ELEMENTOS EN PARALELO

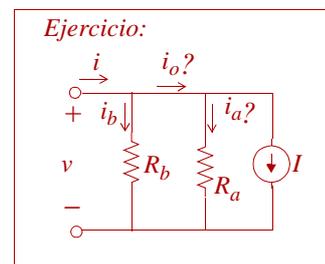
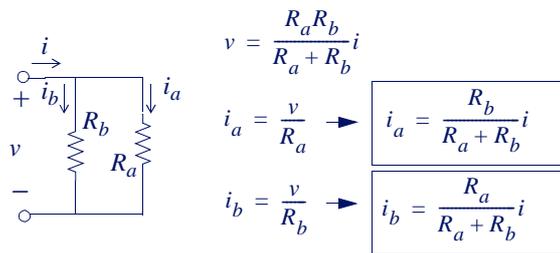


## ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS

### ● DIVISOR DE TENSIÓN

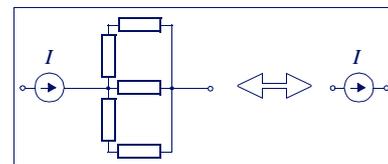
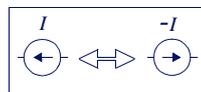
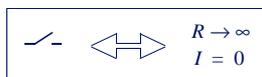
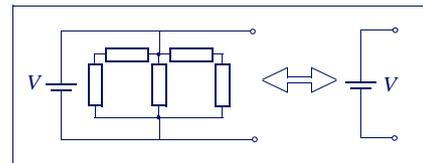
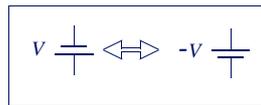
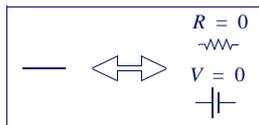


### ● DIVISOR DE INTENSIDAD

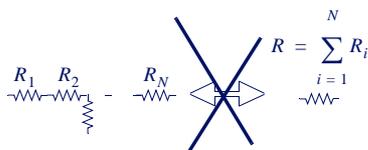


## ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS

### ● EQUIVALENCIAS

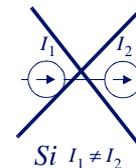
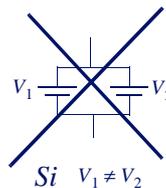


### ● ERRORES



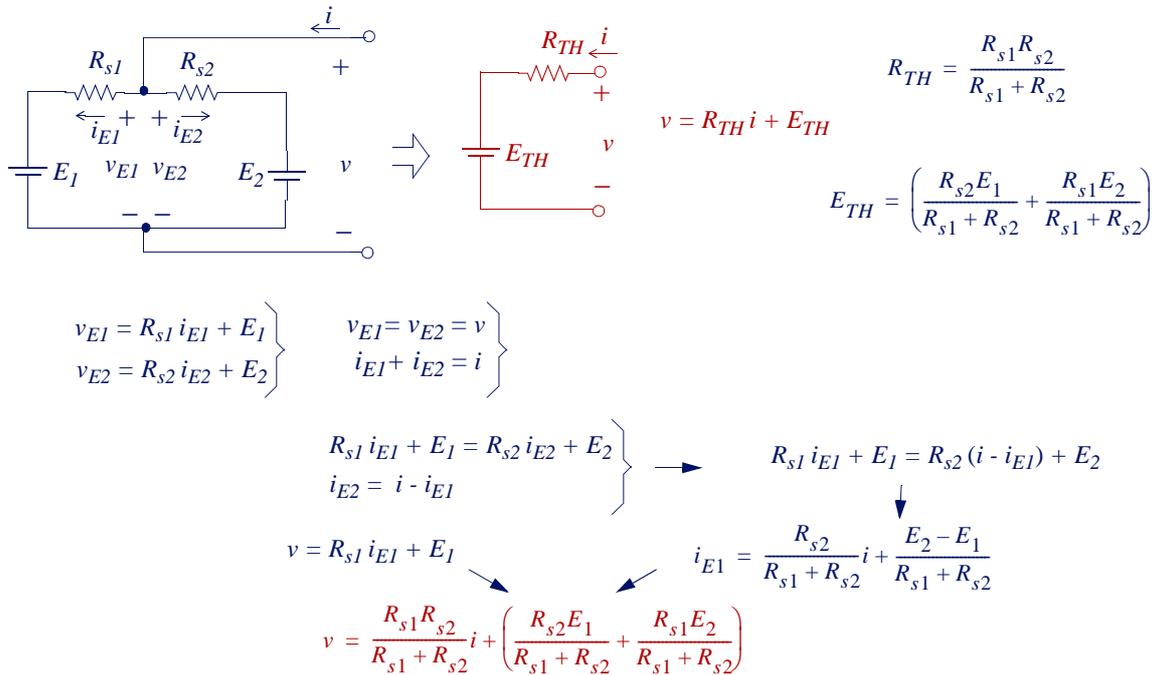
**NO ES UNA ASOCIACION DE RESISTENCIAS EN SERIE**

### ● CIRCUITOS IMPOSIBLES



## ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS

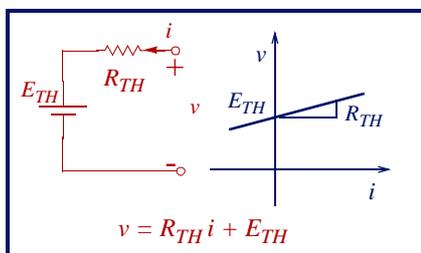
**EJEMPLO:** *Si es posible la asociación y obtener un equivalente en el caso de fuentes reales*  
*El equivalente de dos fuentes reales de tensión en paralelo es otra fuente real de tensión*



## ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS EQUIVALENTES THEVENIN Y NORTON



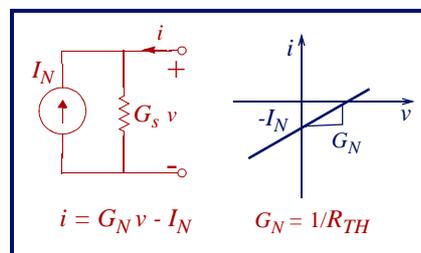
### ● EQUIVALENTE THEVENIN



- $E_{TH}$  TENSIÓN THEVENIN  
 $E_{TH} = v$  cuando  $i = 0$

- $R_{TH}$  RESISTENCIA THEVENIN  
Es la resistencia equivalente vista desde los terminales A y B cuando se anulan las fuentes independientes

### ● EQUIVALENTE NORTON

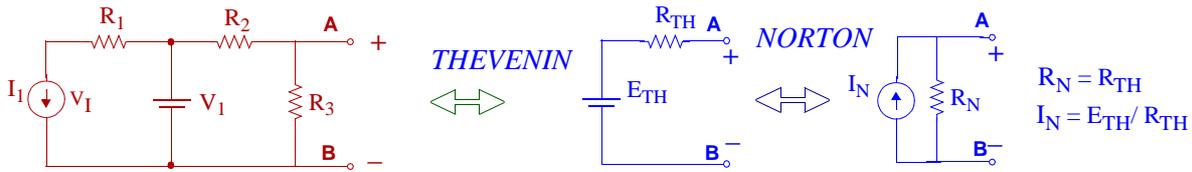


- $I_N$  INTENSIDAD NORTON  
 $I_N = E_{TH}/R_{TH}$

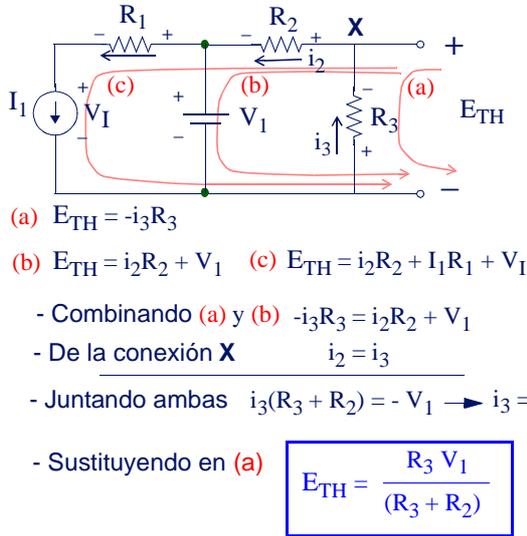
- $R_N$  RESISTENCIA NORTON  
 $R_N = R_{TH}$

### EQUIVALENTES THEVENIN Y NORTON

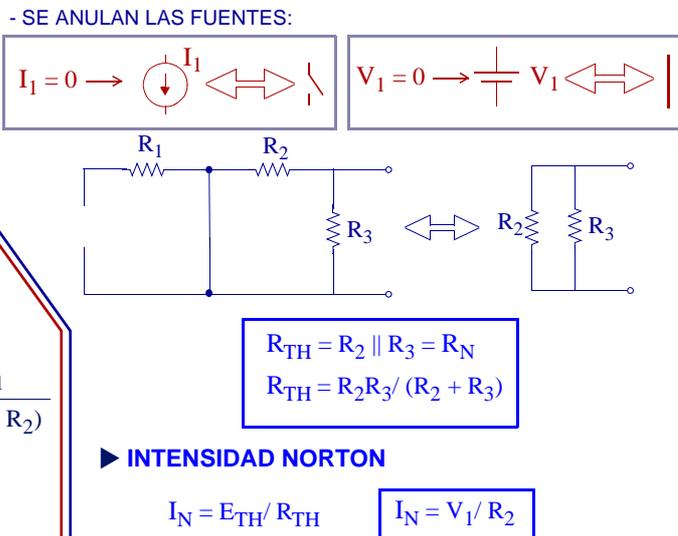
**Ejemplo:** Obtener los equivalentes Thevenin y Norton desde los terminales A(+) y B(-)



► **CÁLCULO DE LA TENSIÓN THEVENIN:**

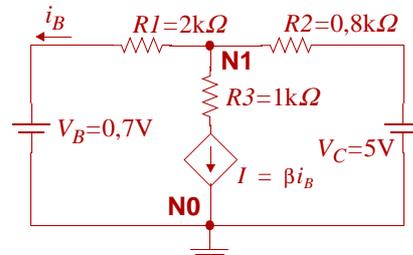


► **CÁLCULO DE LA RESISTENCIA THEVENIN/NORTON:**



### EJEMPLO DE ANÁLISIS: CIRCUITO CON FUENTES DEPENDIENTES

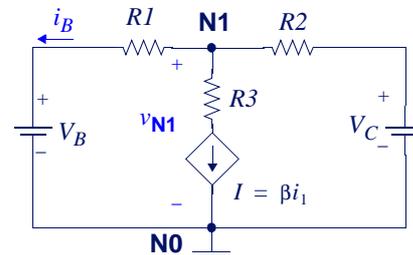
*Ej:* Determinar la tensión en el nudo 1 (N1) y la corriente  $i_B$  en el circuito de la figura.  
 Dato:  $\beta = 50$



► **Aplicación del algoritmo de resolución de circuitos**

1º) Identificación de las variables cuyo valor hay que calcular y elección de la referencia de sus polaridades:

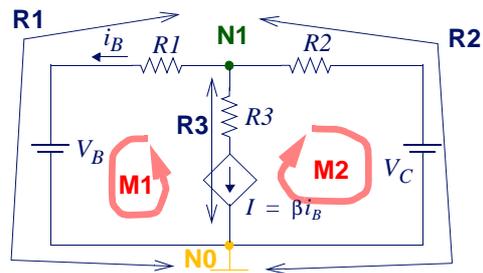
- Tensión en el nudo (N1) ( $v_{N1}$ )
- Intensidad ( $i_B$ )



2º) Identificación del n° de nodos, ramas y mallas independientes

$N = 2$  (N0 y N1) ;  $R = 3$  (R1, R2, R3)

$M = R - (N-1) = 2$  (M1 y M2)

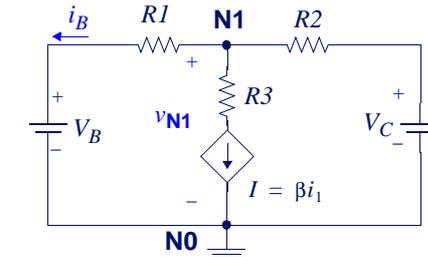


### EJEMPLO DE ANÁLISIS: CIRCUITO CON FUENTES DEPENDIENTES

Ej: Determinar la tensión en el nudo 1 (N1) y la corriente  $i_B$  en el circuito de la figura.

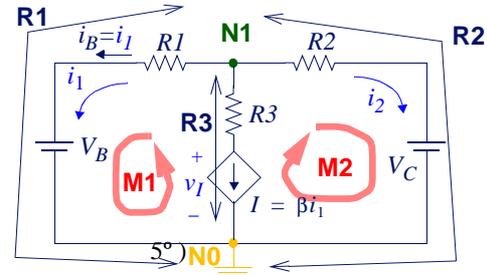
Dato:  $\beta = 50$

(Continuación)



3°) Selección del conjunto mínimo de variables independientes, nominación y asignación de referencias de polaridad:

- Intensidad en las ramas que no contengan fuentes de intensidad ( $i_1, i_2$ ).
- Tensión en la fuente de intensidad I, ( $v_I$ ).
- y sustitución de variables de control de las fuentes dependientes en función de las variables independientes:
- Intensidad de control ( $i_B$ ) sustituida por ( $i_1$ ), dado que  $i_B = i_1$



4°) Planteamiento y resolución del sistema de ecuaciones

N -1 ecuaciones de nudos y  
M ecuaciones de malla

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{N1:} \quad & i_1 + i_2 + \beta i_1 = 0 \\ \mathbf{M1:} \quad & R_1 i_1 + V_B - v_I - R_3 \beta i_1 = 0 \\ \mathbf{M2:} \quad & R_2 i_2 + V_C - v_I - R_3 \beta i_1 = 0 \end{aligned} \right\}$$

5°) Cálculo de las variables que pide el enunciado en función de las variables calculadas en 4°)

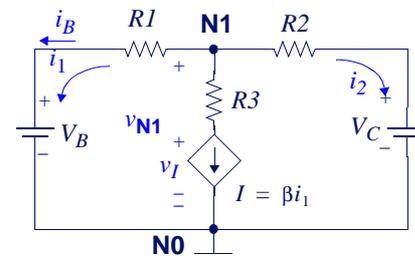
$$\begin{aligned} v_{N1} &= R_3 \beta i_1 + v_I && \text{o bien} \\ i_B = i_1 & && v_{N1} = R_1 i_1 + V_B && \text{o bien} \\ & && v_{N1} &= R_2 i_2 + V_C \end{aligned}$$

### EJEMPLO DE ANÁLISIS: CIRCUITO CON FUENTES DEPENDIENTES

Ej: Determinar la tensión en el nudo 1 (N1) y la corriente  $i_B$  en el circuito de la figura.

(Continuación)

Datos:  $R_1=2k\Omega$   $R_2=0,8k\Omega$   $R_3=1k\Omega$   
 $V_B=0,7V$   $V_C=5V$   $\beta=50$



4°) Planteamiento y resolución del sistema de ecuaciones

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{N1:} \quad & i_1 + i_2 + \beta i_1 = 0 \\ \mathbf{M1:} \quad & R_1 i_1 + V_B - v_I - R_3 \beta i_1 = 0 \\ \mathbf{M2:} \quad & R_2 i_2 + V_C - v_I - R_3 \beta i_1 = 0 \end{aligned} \right\}$$

5°) Cálculo de las variables que pide el enunciado en función de las variables calculadas en 4°)

$$\begin{aligned} i_B = i_1 & && v_{N1} = R_3 \beta i_1 + v_I && \text{o bien} && v_{N1} = R_1 i_1 + V_B \\ & && && \text{Escogiendo} && \text{o bien} && v_{N1} = R_2 i_2 + V_C \end{aligned}$$

Solución

del Sistema de ecuaciones

$$\left. \begin{aligned} \text{(a)} \quad & (\beta + 1) i_1 + i_2 = 0 \\ \text{(b)} \quad & v_I - (R_1 - R_3 \beta) i_1 = V_B \\ \text{(c)} \quad & v_I + R_3 \beta i_1 - R_2 i_2 = V_C \end{aligned} \right\}$$

- De (a)  $\Rightarrow i_2 = -(\beta + 1) i_1$
- Sustituyendo en (c) se obtiene
- (d)  $v_I + [R_2 (\beta + 1) + R_3 \beta] i_1 = V_C$
- Restando (d)- (b) se obtiene
- $\{ [R_2 (\beta + 1) + R_3 \beta] + (R_1 - R_3 \beta) \} i_1 = V_C - V_B$
- Y finalmente  $i_1 = \frac{V_C - V_B}{R_2 (\beta + 1) + R_1}$

¡ Basta con calcular  $i_1$  para evaluar  $i_B$  y  $v_{N1}$  !

Al sustituir los valores numéricos hay que tener cuidado con las unidades en las que vienen expresadas los diferentes elementos

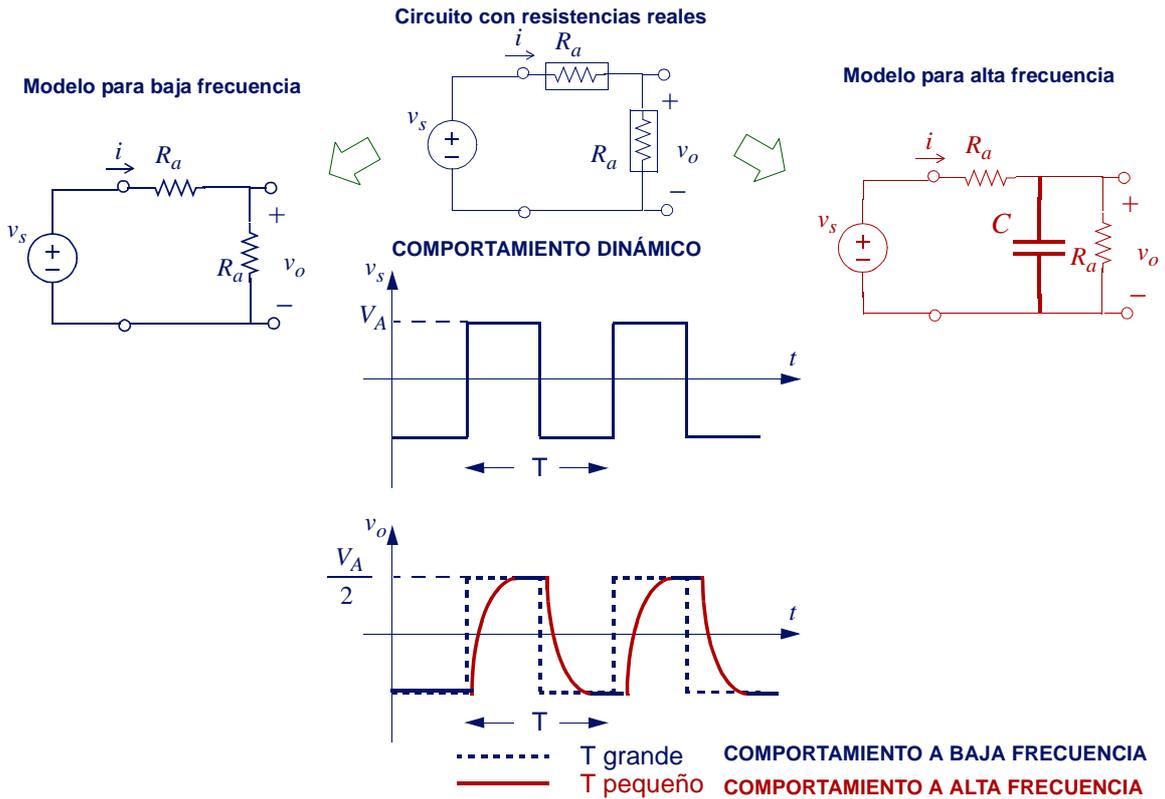
$$i_1 = \frac{5V - 0,7V}{0,8k\Omega \times (50 + 1) + 2k\Omega} = \frac{4,3V}{42,8k\Omega} = 0,10 \text{ mA}$$

Y finalmente

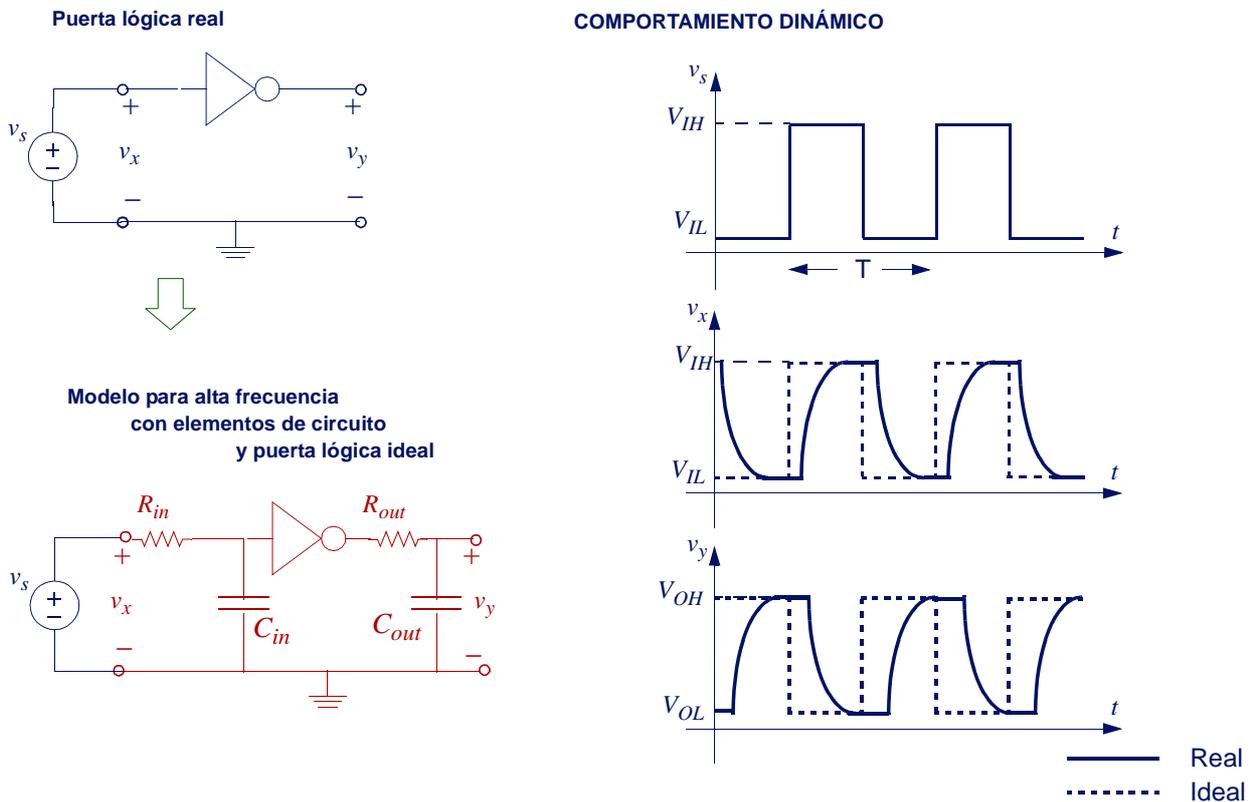
$$i_B = i_1 \quad i_B \cong 0,10 \text{ mA}$$

$$v_{N1} = R_1 i_1 + V_B \quad v_{N1} \cong 2k\Omega \times 0,10 \text{ mA} + 0,7V \cong 0,9V$$

### CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS

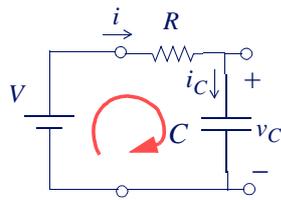


### MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PUERTAS LÓGICAS



### CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS: CIRCUITO RC

#### ● ANÁLISIS TRANSITORIO: CARGA Y DESCARGA DE CONDENSADORES



$$iR + v_C - V = 0 \rightarrow i = \frac{V - v_C}{R}$$

$$i_C = i \rightarrow i_C = C \frac{dv_C}{dt} \rightarrow C \frac{dv_C}{dt} = \frac{V - v_C}{R}$$

Ecuación diferencial lineal de primer orden con coeficientes constantes

$$\frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{RC} - \frac{V}{RC} = 0$$

Solución  $v_C = Ke^{-\alpha t} + \beta$  donde  $K$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes por determinar

Dada esta solución y por tanto que  $\frac{dv_C}{dt} = -\alpha Ke^{-\alpha t}$ , sustituyendo ambas en la ecuación diferencial

$$-\alpha Ke^{-\alpha t} + \frac{Ke^{-\alpha t} + \beta}{RC} - \frac{V}{RC} = 0 \rightarrow \left(\frac{K}{RC} - \alpha K\right)e^{-\alpha t} + \frac{\beta}{RC} - \frac{V}{RC} = 0$$

Esta expresión ha de ser válida para cualquier valor

de la variable  $t$  por lo que se ha de cumplir simultaneamente que

$$\begin{cases} \left(\frac{K}{RC} - \alpha K\right) = 0 & \rightarrow \alpha = \frac{1}{RC} \\ \frac{\beta}{RC} - \frac{V}{RC} = 0 & \rightarrow \beta = V \end{cases}$$

Con lo que hemos determinado el valor de dos de las tres constantes de forma que la solución puede escribirse ahora

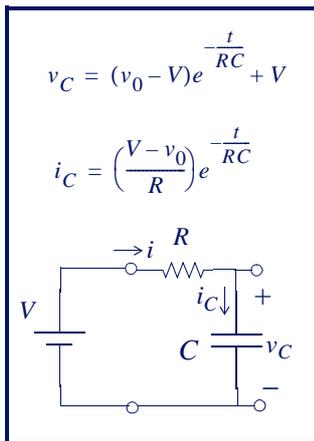
$$v_C = Ke^{-\frac{t}{RC}} + V, K \text{ se calcula a partir de la condición inicial } v_C(t=0) = v_0 \rightarrow K = v_0 - V$$

Finalmente

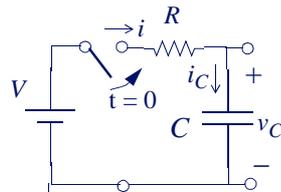
$$v_C = (v_0 - V)e^{-\frac{t}{RC}} + V \quad i_C = \left(\frac{V - v_0}{R}\right)e^{-\frac{t}{RC}}$$

### CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS: CIRCUITO RC

#### ● CARGA Y DESCARGA DE CONDENSADORES



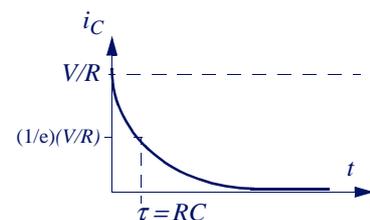
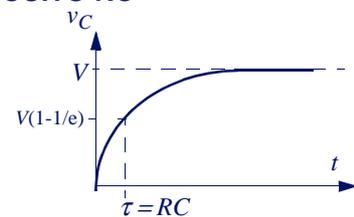
**Carga del condensador**  $v_0 = 0$



$$v_C = V\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

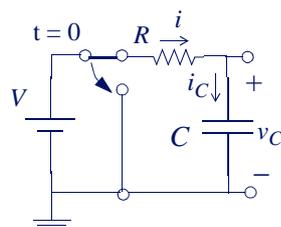
$\tau = RC$  constante de tiempo

$$i_C = \frac{V}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$$



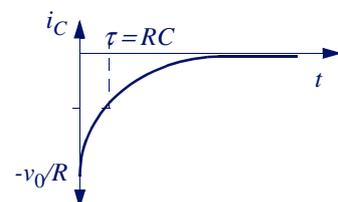
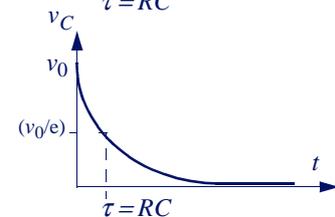
**Descarga del condensador**

$$V = 0 \quad v_C(t=0) = v_0$$



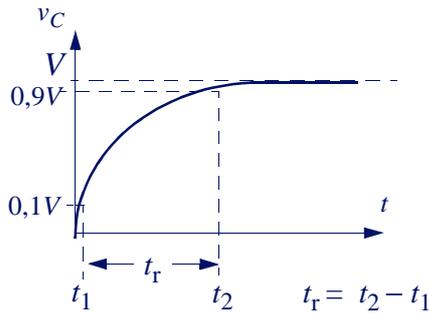
$$v_C = v_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

$$i_C = -\frac{v_0}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$$



### CARGA Y DESCARGA DE CONDENSADORES

- **Tiempo de Subida  $t_r$**   
Carga del condensador



Cálculo de  $t_r$

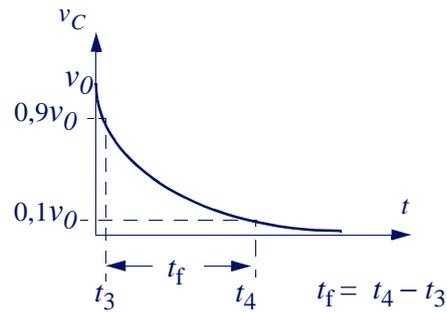
$\tau_r = CR_C$  constante de tiempo durante la carga  $v_C = V \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}} \right)$

$0,1V = V \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_r}} \right) \rightarrow t_1 \approx 0,1\tau_r$

$0,9V = V \left( 1 - e^{-\frac{t_2}{\tau_r}} \right) \rightarrow t_2 \approx 2,3\tau_r$

$t_r \approx 2,2\tau_r$

- **Tiempo de bajada  $t_f$**   
Descarga del condensador



Cálculo de  $t_f$

$\tau_f = CR_D$  constante de tiempo durante la descarga  $v_C = v_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}}$

$0,9v_0 = v_0 e^{-\frac{t_3}{\tau_f}} \rightarrow t_3 \approx 0,1\tau_f$

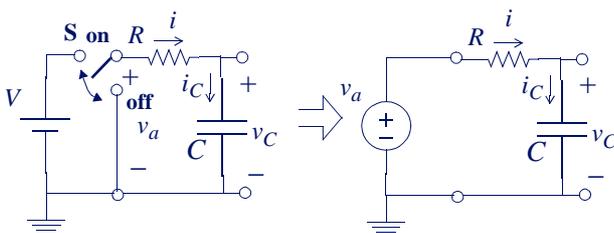
$0,1v_0 = v_0 e^{-\frac{t_4}{\tau_f}} \rightarrow t_4 \approx 2,3\tau_f$

$t_f \approx 2,2\tau_f$

### CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS: CIRCUITO RC

- **RESPUESTA A UN TREN DE PULSOS**

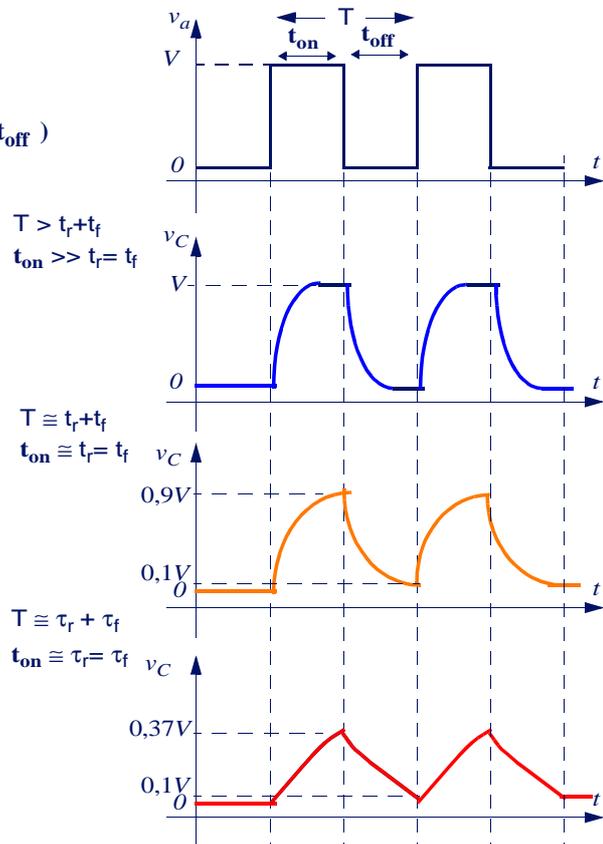
Si el interruptor **S** conmuta con frecuencia  $f = 1/T$   
(supongamos por simplicidad que  $T = t_{on} + t_{off}$  y  $t_{on} = t_{off}$ )



Constante de tiempo  $\tau_f = \tau_r = CR$

Tiempo de bajada  $t_f \approx 2,2\tau_f$

Tiempo de subida  $t_r \approx 2,2\tau_r$



$T > t_r + t_f$   
 $t_{on} \gg t_r = t_f$

$T \cong t_r + t_f$   
 $t_{on} \cong t_r = t_f$

$T \cong t_r + t_f$   
 $t_{on} \cong t_r = t_f$

## BREVE EXPLICACIÓN DE LAS TRANSPARENCIAS TEMA 2: NOCIONES BÁSICAS DE TEORÍA DE CIRCUITOS

### Transparencia 1: ÍNDICE

Como se ha estudiado en el TEMA 1, las puertas lógicas, constituyentes básicos de los sistemas electrónicos digitales, son circuitos electrónicos tales que, interpretando adecuadamente su comportamiento en términos de su característica entrada-salida, esto es, de cuál es su respuesta a excitaciones asociadas a valores lógicos, se hacen corresponder con operadores lógicos del álgebra de Boole y por tanto se emplean para construir circuitos lógicos. Así, tanto esa correspondencia, circuito-operador lógico, como los diferentes parámetros que caracterizan a las puertas y familias lógicas, han de ser evaluados analizando el correspondiente circuito electrónico, y por tanto en base a las técnicas y leyes del análisis de circuitos.

En este tema se trata de resumir los principales aspectos del análisis de circuitos que han de servir para analizar las puertas y familias lógicas básicas que serán estudiadas en posteriores temas, y así poder calcular y evaluar parámetros como: características de transferencia, niveles lógicos, márgenes de ruido, fan-in, fan-out, consumo de potencia, entre otros.

A lo largo de las diferentes transparencias con las que se presenta este tema, se introduce la terminología básica de la Teoría de Circuitos y la idea de modelado de sistemas reales en base a elementos de circuito, las leyes fundamentales y los principales resultados básicos de análisis. Finalmente, se proporciona también un algoritmo sistemático de resolución de circuitos.

Aunque se hace un mayor hincapié en el análisis de circuitos en corriente continua, (análisis DC o de cálculo de punto de operación de circuitos que solo incluyen elementos resistivos), al final del tema se analiza también algún ejemplo de circuito dinámico con el fin de conectar los resultados aquí obtenidos con los parámetros temporales de las puertas lógicas, de forma que el alumno perciba, al menos de forma intuitiva, el por qué de esos aspectos del comportamiento dinámico de las puertas lógicas y por tanto de su limitación en cuanto a velocidad de operación.

Más concretamente, los objetivos fundamentales de este tema son:

- Refrescar conceptos fundamentales de magnitudes y variables eléctricas.
- Resumir los principales resultados de la Teoría de Circuitos y métodos de análisis

### Transparencia 2:

A continuación se relacionan un conjunto de **Lecturas Complementarias** recomendadas, a fin de completar los contenidos desarrollados en estas transparencias:

- **Fernández Ramos, J. y otros, "Dispositivos Electrónicos para Estudiantes de Informática" Universidad de Málaga / Manuales 2002. Tema1: pag. 1-29.**
- **Carlson. A.B. "Teoría de Circuitos" Ed. Thomson-Paraninfo. 2002. Tema 1, Tema 2, Tema 3 y Tema 4.**
- **Johnson, David E, "Análisis básico de circuitos eléctricos", Ed. Prentice-Hall 1996. Tema1, Tema2 y Tema4**
- **Daza A. y García J. "Ejercicios de Dispositivos Electrónicos" Universidad de Málaga/Manuales 2003. Tema 1: pag 31-38.**

### Transparencia 3: MAGNITUDES Y VARIABLES IMPLICADAS EN EL ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE CIRCUITOS

En esta transparencia se resumen las principales **magnitudes y variable eléctricas**, así como sus correspondientes **unidades de medida** en el sistema internacional, empleadas en el **análisis de circuitos** electrónicos. Junto a las variables fundamentales asociadas al campo electromagnético: **carga eléctrica, intensidad de corriente eléctrica, tensión o diferencia de potencial, flujo magnético**, se muestran también las magnitudes fundamentales **energía y potencia**. Todas estas magnitudes y variables deben ser bien conocidas por el alumno, puesto que las ha estudiado en de los cursos básicos de Física, por lo que no se hace aquí mención expresa de su definición, la cual, por otra parte queda claramente establecidas mediante la correspondiente ecuación que recoge la transparencia.

Finalmente cabe destacar el cuadro que aparece en la parte inferior izquierda de la transparencia donde se recogen los principales prefijos empleados junto a la correspondiente unidad de medida, para las correspondientes potencias de diez, múltiplos o divisores. Es conveniente tener a la vista este cuadro al hacer los problemas y realizar cálculos numéricos.

#### Transparencia 4: SISTEMAS ELECTRÓNICOS. CIRCUITOS Y TEORÍA DE CIRCUITOS. MODELADO

Los **circuitos electrónicos** son **sistemas formados** por la **interconexión** de **dispositivos electrónicos**, y cuyo comportamiento se expresa en términos de los valores de las variables eléctricas medidos en ellos, fundamentalmente tensión y corriente eléctricas. Este comportamiento depende tanto de la naturaleza de sus elementos constitutivos, como de su interconexión para formar un circuito dado. Por su parte, **los dispositivos electrónicos, son a su vez elementos**, o subsistemas, **con dos o más terminales accesibles desde el exterior y que exhiben ciertas relaciones entre alguna de las magnitudes electromagnéticas medidas en dichos terminales** (fundamentalmente también, la tensión y corriente eléctricas). En la parte superior izquierda de la transparencia se representa un esquema genérico de un circuito electrónico real y sus principales elementos constitutivos: **dispositivos electrónicos, cables y nodos de interconexión**.

En general el comportamiento eléctrico de un circuito real es complejo y presenta múltiples facetas, dependiendo de su ámbito de operación. La **Teoría de Circuitos** es la disciplina que proporciona el soporte teórico, y las herramientas matemáticas para estudiar estos sistemas. La Teoría de Circuitos **trabaja con** sistemas que constituyen un **modelo idealizado de los circuitos reales**, válido para un entorno de aplicación, en general, limitado, y **su fin último es realizar predicciones sobre el comportamiento de los sistemas reales** en dicho ámbito de aplicación. Así, los circuitos electrónicos que estudia la Teoría de Circuitos son sistemas formados por la interconexión de **elementos de circuito**, entendiéndose por tales, **elementos ideales** de dos o más terminales, **que modelan relaciones simples entre la tensión y la corriente eléctricas presentes en terminales de los dispositivos reales**, y que en general pueden expresarse mediante relaciones algebraicas integro-diferenciales (**relaciones tensión-corriente** referenciadas en la Transparencia 7:). En la parte inferior derecha de la transparencia se representa un esquema genérico de un circuito electrónico que modela a un sistema real, y sus principales elementos constitutivos: **elementos de circuito, cables y nodos de interconexión ideales**.

#### Transparencia 5: CIRCUITOS ELECTRÓNICOS Y ELEMENTOS DE CIRCUITO

Como se ha mostrado en la Transparencia 4:, los elementos de circuito son las piezas básicas utilizadas por la Teoría de Circuitos para elaborar sus modelos y proporcionar resultados. En esta transparencia se incide en su definición y caracterización.

La Teoría de Circuitos establece que **todo elemento de circuito tiene bien definidas, en todo instante de tiempo  $t$ , las variables: tensión eléctrica entre cualquier par de terminales  $v(t)$  e intensidad de corriente que lo atraviesa  $i(t)$** . La tensión eléctrica entre dos de sus terminales se calcula como la diferencia entre los potenciales eléctricos medidos en cada uno de ellos respecto a un nivel de referencia dado; mientras que la corriente eléctrica verifica que la suma de las corrientes que entran y salen por alguno de los terminales del elemento, contabilizando unas y otras con signo contrario, ha de ser nula. Por tanto, en un elemento de dos terminales como el de la figura, la corriente que entra por el terminal 1 es la misma que la que sale por el terminal 2 y por tanto esa es la corriente que atraviesa el elemento.

Los valores numéricos que pueden tomar estas variables al realizar operaciones pueden ser positivos o negativos, por lo que para interpretar correctamente su significado es necesario establecer **un sistema de referencia**. Para fijar la **referencia de tensión** se escriben los **signos más (+) y menos (-)** junto a cada uno de los terminales del elemento, de manera que, si el valor de tensión medido o calculado para dicho elemento es positivo, esto significa que el terminal señalado con el signo más está a mayor potencial eléctrico que el marcado con signo menos, y viceversa, un valor negativo en la medida de tensión significa que el terminal menos está a mayor potencial que el marcado con signo más. Por su parte, para la **referencia de la intensidad de corriente** se emplea **una flecha que apunta hacia el flujo positivo de corriente**, de manera que si el valor de corriente medido o calculado para dicho elemento es positivo, esto significa que el flujo de corriente va en la dirección que indica la flecha, mientras que un valor negativo en la medida de la intensidad de corriente significa que el flujo de corriente va en la dirección contraria a la de la flecha.

Los sistema de referencia se establece por convenio y lo importante es que una vez entendido y aceptado por todos uno de ellos, éste sea bien usado a fin de proporcionar resultados coherentes. En la literatura sobre la Teoría de Circuitos se emplean diversos criterios para establecer un sistema de referencia. En estas transparencias, y a lo largo de este curso se va adoptar el **criterio del elemento pasivo**.

En la parte central de la transparencia se ilustra el significado este criterio, y como se aplica en un elemento de dos terminales. El criterio establece que **las referencias de tensión y corriente en un elemento de circuito se escogerán de forma que para todo** elemento de circuito que consuma energía, **elemento pasivo**, el cálculo de **la potencia consumida resulte ser un número positivo**. En caso contrario, esto es, **si** el elemento no es pasivo, **elemento activo**, el cálculo de **la potencia resultará un número negativo**. En la práctica este criterio lleva a asignar unas referencias para la tensión y la corriente interdependientes, esto es, tal que una vez se escoge una referencia para una de ellas, la referencia para la otra también queda fijada, como muestra la figura en la parte central de la transparencia. Así, si para un elemento de circuito dado se ha fijado una referencia de tensión, aceptamos que la referencia de intensidad de corriente queda fijada también, y de forma que la referencia de corriente es una flecha que apunta desde el terminal marcado con signo más (+) hacia el terminal marcado con signo menos (-); por otra parte, si para un elemento hemos fijado la referencia de intensidad de corriente, aceptamos que la referencia de tensión también ha quedado fijada, de forma que el terminal más (+) se hace corresponder con el origen de la flecha, mientras que el terminal menos (-) corresponderá con el terminal hacia el que apunta la flecha.

Finalmente, en la parte inferior de la transparencia se recoge un resultado básico que no es más que el enunciado de la **ley de la conservación de la energía** en el ámbito de los circuitos electrónicos.

## Transparencia 6: CIRCUITOS ELECTRÓNICOS. DEFINICIONES

En esta transparencia se ilustran, sobre un esquema de circuito genérico, las **definiciones de diversos términos** y algunas de las principales **variables de circuito** que se emplean en la Teoría de Circuitos:

Entre los términos más usuales se tienen:

- **Conexión:** Punto donde se unen dos terminales de elementos de circuito, o subcircuitos con terminales accesibles.
  - **Conexión en serie de elementos de dos terminales:** Conexión entre terminales de dos elementos de circuito, de forma que para cada uno de ellos queda un terminal libre para conectarse a otros elementos de circuito distintos de los anteriores.

- **Conexión en paralelo:** Conexión terminal a terminal de dos elementos de circuito de dos terminales.
- **Nudo:** Punto donde se unen más de dos terminales de elementos. Entre dos nudos debe haber al menos un elemento. (A veces, en la práctica, puede resultar conveniente dar el carácter de nudo a alguna conexión).
- **Nudo de Tierra:** Nudo de un circuito que se toma como referencia para medir el potencial eléctrico de cualquier otro nodo del circuito. Su elección, si no viene determinada por el esquema del circuito es arbitraria, esto es, cualquier nudo del circuito puede ser escogido como nudo de tierra.
- **Rama:** Elemento o conjunto de elementos conectados en serie entre dos nudos.
- **Lazo o Malla:** Camino cerrado a través de elementos de circuito, y donde cada elemento incluido en él es recorrido una sola vez. Es claro que dicho camino comenzará y terminará en un mismo nudo del circuito, e incluirá una o más ramas.

Las principales variables de circuitos son:

- Las **corrientes de rama**. Corriente que circula por los elementos que forman una rama del circuito.
- Las **tensiones de nudo**. Diferencia de potencial eléctrico entre los nudos del circuito y el nudo de referencia.

## Transparencia 7: CIRCUITOS ELECTRÓNICOS. ANÁLISIS Y LEYES FUNDAMENTALES

El fin último de las técnicas de **Análisis de Circuitos** es **evaluar las variables de circuito** a partir del conocimiento de los elementos que lo forman y de su esquema de interconexión. El conocimiento del valor de dichas variables permite determinar, e interpretar en un nivel superior de abstracción, el comportamiento del sistema.

Las variables de circuito más habituales son, junto a las presentadas en la anterior transparencia: **las corrientes en las ramas y las tensiones en los nudos, las corrientes y tensiones en los** diferentes **elementos** que forman el circuito. Obviamente, ambos conjuntos de variables no son independientes, y están relacionadas por las ligaduras que impone la topología, o interconexión de elementos, del circuito.

Las principales **herramienta para el análisis de circuitos** son las **leyes de Kirchhoff** y las **relaciones tensión-corriente** en los terminales de los elementos de circuito. Las primeras son una reformulación de leyes fundamentales del campo electromagnético en el ámbito de la teoría de circuitos, no dependen de los elementos de circuito sino de su interconexión y son por tanto de carácter universal. Ambas proporcionan ecuaciones de ligadura para las corrientes de rama y tensiones en los nudos. Las segundas son relaciones forzadas por los elementos de circuito y tiene un carácter más particular y un ámbito de aplicación más limitado. De la aplicación sistemática de las leyes de Kirchhoff y de las relaciones tensión-corriente se podrá escribir un sistema de ecuaciones linealmente independientes de cuya solución se obtendrá la respuesta al problema de análisis.

En la parte inferior de esta transparencia se enuncian e ilustran las dos Leyes de Kirchhoff:

- **LKI: Ley de Kirchhoff de Intensidades.** Resulta ser una reformulación para los circuitos de la ley de la conservación de la carga. Expresa el hecho experimental de que ningún nodo del circuito acumula carga y proporciona ecuaciones de ligadura para las variables intensidad de corriente de rama. En la transparencia se recogen dos enunciados equivalentes:
  - **"La suma de corrientes que inciden en un nudo es nula"** (Para realizar ese cómputo, se consideran con signo positivo las corrientes referenciadas como entrantes al nudo y con signo negativo las referenciadas como salientes)
  - **"La suma de corrientes referenciadas como entrantes en un nudo ha de ser igual a la suma de las corrientes referenciadas como salientes."**
- **LKV: Ley de Kirchhoff de voltajes.** Expresa en el ámbito de los circuitos el hecho de que el campo eléctrico es conservativo. y proporciona ecuaciones de ligadura para las variables tensión en los nudos. En la transparencia se recogen también dos posibles enunciados equivalentes:
  - **"La suma de las caídas de tensión a lo largo de un camino cerrado en un circuito ha de ser nula."**
  - **"El resultado del cálculo de la diferencia de potencial entre dos nudos de un circuito es el mismo independientemente del camino seguido."**

## Transparencia 8: ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE: RESISTENCIA, CIRCUITO ABIERTO Y CORTOCIRCUITO

Esta transparencia es la primera de una serie que presenta los elementos básicos de circuito y sus relaciones tensión-corriente. Debe hacerse notar que en todas ellas se respeta la referencia de tensión y corriente acordada en la Transparencia 5: (criterio de elemento pasivo).

En concreto en esta transparencia y en las tres siguientes se recogen elementos cuya relación tensión-corriente puede expresarse mediante una relación puramente algebraica, por lo que se les denomina en general como elementos resistivos:

- **Resistencia o resistor lineal.** Es el elemento que cumple la ley de Ohm: La tensión en sus terminales es proporcional a la corriente que circula a través de él. La constante de proporcionalidad  $R$  se denomina **resistencia ohmica** y se mide en ohmios ( $\Omega$ ). En la transparencia se ilustra el símbolo que lo representa como elemento de circuito. Gráficamente la relación tensión-corriente (expresada como gráfica i-v en la figura) es una línea recta que pasa por el origen, cuya pendiente se relaciona con la inversa de la resistencia o **conductancia**, medida en mho ( $\Omega^{-1}$ ) o Siemens. Si  $R$  es positiva, entonces la potencia en este elemento también lo será, por lo que se tendrá entonces que es un elemento pasivo.
- **Circuito abierto.** Es el elemento que verifica que la corriente que circula por sus terminales es nula e independiente de la caída de tensión entre ellos. Es un elemento muy útil, como se verá con posterioridad para modelar el estado de no conducción de ciertos dispositivos que funcionan como interruptores en abierto. En la transparencia se ilustra, junto al símbolo que lo identifica como elemento de circuito, la gráfica de su relación tensión corriente. También puede modelarse como una resistencia de valor infinito, o conductancia nula. Dado que la potencia puesta en juego es nula se dice que este es un elemento no energético.
- **Circuito cerrado.** Es el elemento que verifica que la tensión entre sus terminales es nula e independiente de corriente que circule entre ellos. Es un elemento muy útil, como se verá con posterioridad para modelar el estado de conducción de ciertos dispositivos que funcionan como interruptores cerrados. En la transparencia se ilustra, junto al símbolo que lo identifica como elemento de circuito, la gráfica de su relación tensión corriente. También puede modelarse como una conductancia de valor infinito, o resistencia nula. Dado que la potencia puesta en juego es nula se dice que este es un elemento no energético.

## Transparencia 9: ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE: FUENTES INDEPENDIENTES DE TENSIÓN Y DE INTENSIDAD

- **Fuente independiente de tensión.** Es el elemento que cumple la tensión en sus terminales  $V$ , es constante e independiente de la corriente que circula a través de él. En la parte superior izquierda de la transparencia se ilustra, junto a dos símbolos empleados para identificarlo como elemento de circuito, la gráfica de su relación tensión-corriente. En cuanto al cálculo de la potencia, si suponemos sin pérdida de generalidad, que  $V > 0$ , vemos que se tienen dos posibilidades dependiendo del signo de la intensidad de corriente. Por tanto una fuente de tensión puede ser tanto un elemento pasivo como un elemento activo y su carácter va a depender del circuito del que forme parte. (En la parte inferior de esta transparencia se estudia un ejemplo que ilustra esta idea.)
- **Fuente independiente de intensidad de corriente.** Es el elemento que cumple la intensidad de corriente  $I$  que circula a su través es constante e independiente de la tensión entre sus terminales. En la parte superior derecha de la transparencia se ilustra, junto al símbolo empleado para identificarlo como elemento de circuito, la gráfica de su relación tensión-corriente. En cuanto al cálculo de la potencia, si suponemos sin pérdida de generalidad que  $I > 0$ , vemos que se tienen dos posibilidades dependiendo del signo de la tensión. Por tanto una fuente de intensidad puede ser tanto un elemento pasivo como un elemento activo y su carácter va a depender del circuito del que forme parte.

Es conveniente hacer notar que aunque una fuente independiente fija el valor de la tensión o la corriente entre sus terminales, esto no significa que dicho valor no pueda ser variante con el tiempo. De hecho, las fuentes independientes son los elementos de circuito empleados para modelar los generadores de señales o fuentes de información, que como hemos visto son magnitudes variantes con el tiempo. (Para distinguir este hecho a veces se emplean dos símbolos distintos para las fuentes independiente de tensión, como ilustra la transparencia)

## Transparencia 10: ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE: MODELADO DE FUENTES INDEPENDIENTES REALES

En esta transparencia se presentan dos ejemplos de modelado de elementos reales. El modelo de la fuente alimentación de tensión incluye el efecto, observado en las fuentes reales, de dependencia de la tensión en sus terminales con la corriente suministrada al sistema que alimenta. Este efecto se modela añadiendo una resistencia en serie a una fuente independiente de

tensión. Para el caso de una fuente real de intensidad, el efecto modelado es la variación de la intensidad proporcionada por la fuente con la tensión en sus bornes. Este efecto se modela conectando una resistencia en paralelo a la fuente independiente de intensidad de corriente.

## Transparencia 11: ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE: FUENTES CONTROLADAS

- **Fuentes de tensión controladas:** Al igual que las correspondientes fuentes independientes, son elementos capaces de **fijar la tensión en sus terminales independientemente de la corriente que circula a través de ellos**. Sin embargo, a diferencia de aquellas, dicho valor constante, es proporcional al valor de otra variable de circuito, denominada variable de control. Si la **variable de control es una tensión** se tiene una **fuentes de tensión controlada por tensión (FVCV)**. Si la **variable de control es una corriente**, se tiene una **fuentes de tensión controlada por corriente (FVCI)**.
- **Fuentes de intensidad de corriente controladas:** Al igual que las correspondientes fuentes independientes, son elementos capaces de **fijar la corriente que circula a su través, independientemente de la diferencia de potencial entre sus terminales**. Sin embargo, a diferencia de aquellas, dicho valor constante, es proporcional al valor de otra variable de circuito, denominada variable de control. Si la **variable de control es una tensión** se tiene una **fuentes de intensidad controlada por tensión (FICV)**. Si la **variable de control es una corriente**, se tiene una **fuentes de intensidad controlada por corriente (FICI)**.

En la transparencia se recogen los diferentes símbolos empleados para la representación de cada una de ellas, y sus variables de control.

Las fuentes controladas juegan un importante papel en el modelado de dispositivos electrónicos como se verá en temas posteriores. Nótese que una FVCV funciona como un amplificador de tensión, o que una FICI como un amplificador de corriente.

## Transparencia 12: ELEMENTOS DE CIRCUITO BÁSICOS: RELACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE: ELEMENTOS DINÁMICOS: CONDENSADOR Y BOBINA

En esta transparencia se muestran elementos cuya relación tensión-corriente se expresa mediante una ecuación diferencial, por lo que reciben el nombre de **elementos dinámicos**.

- **Capacitor o condensador.** Se caracteriza por que la **intensidad que circula a su través es proporcional a las variaciones temporales de la tensión en sus terminales**. Esto supone que si la tensión en sus terminales es constante, la corriente será nula, por lo que se comportará como un circuito abierto. La constante de proporcionalidad se denomina **capacidad C** y **se mide en Faradios (F)**. Los condensadores son **elementos pasivos**, sin embargo, a diferencia de las resistencias, son elementos **almacenadores** de carga y por tanto de **energía eléctrica**, la cual son capaces también de devolver al circuito del que forman parte. La máxima energía que almacena un condensador depende de la tensión en sus terminales, como expresa la correspondiente ecuación aparece en la transparencia.
- **Inductores o bobinas.** Se caracterizan por que la tensión en sus terminales depende de las variaciones temporales de la intensidad de corriente que circula a su través. Esto supone que si la intensidad de corriente es constante, la tensión en sus terminales es nula, por lo que se comportará como un cortocircuito. La constante de proporcionalidad se denomina **inductancia C** y **se mide en Henrios (H)**. Las bobinas son **elementos pasivos**, sin embargo, a diferencia de las resistencias, son elementos **almacenadores energía en el campo magnético inducido**, la cual son capaces también de devolver al circuito del que forman parte. La máxima energía que almacena un condensador depende de la corriente que circule a su través, como expresa la correspondiente ecuación aparece en la transparencia.

## Transparencia 13: ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS I

En esta transparencia se resumen las posibles variables incógnita en términos de las cuales se puede formular el problema del análisis de un circuito, así como el objetivo primordial de cualquier algoritmo que trata de resolver dicho problema.

## Transparencia 14: ANÁLISIS DE CIRCUITOS: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS II

En la Teoría de Circuitos se proponen diferentes algoritmos para abordar el análisis de circuitos. Independientemente de aquellos que el alumno pueda conocer según su formación previa, en esta transparencia se recoge uno que resulta especialmente adecuado para resolver problemas de circuitos electrónicos en general, y los que el alumno va a encontrar a lo largo de esta asignatura en particular.

## Transparencia 15: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS: EJEMPLO

En esta transparencia y en las dos siguientes se ilustra la aplicación del algoritmo presentado en la Transparencia 14: mediante un ejemplo en el que se pide calcular los valores de la corriente y tensión en todos los elementos del circuito, y en el caso en el que las fuentes son estáticas, es decir no varían con el tiempo. Este tipo de problemas reciben el nombre genérico de problemas de cálculo del punto de operación o análisis en DC.

## Transparencia 16: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS: EJEMPLO (CONTINUACIÓN)

Esta transparencia continúa con el ejemplo hasta plantear el sistema de ecuaciones que permitirá responder al enunciado.

## Transparencia 17: ALGORITMO GENERAL DE ANÁLISIS: EJEMPLO (CONTINUACIÓN)

En esta transparencia se concluye el ejemplo desarrollado en las dos transparencias anteriores, abordando los cálculos finales que dan respuesta al enunciado del problema. Cabe destacar aquí que una vez planteado el sistema de ecuaciones, su solución puede abordarse por cualquiera de los métodos que el alumno pueda conocer a tal efecto, de modo que en esta transparencia el método empleado (de *sustitución*), ha sido escogido por simple comodidad en este caso. Finalmente, resulta conveniente señalar cómo, en este ejemplo, la solución al enunciado del problema no se obtiene directamente de la solución del sistema de ecuaciones, sino que esa solución es el paso intermedio necesario para evaluar las incógnitas que propone dicho enunciado. A veces también puede ocurrir que no sea necesario resolver el sistema completo de ecuaciones, debido a que la incógnita de enunciado pueda ser obtenida a partir de un subconjunto de las variables del sistema de ecuaciones planteado.

### Transparencia 18: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS: CIRCUITO EQUIVALENTE. EQUIVALENTE SERIE. EQUIVALENTE PARALELO.

En esta transparencia y en las cinco siguientes se presentan algunos resultados básicos del análisis de circuitos que, en ciertas circunstancias, sugerirán simplificaciones en circuitos complejos, que nos permitirán resolver el problema directamente o aplicar el algoritmo general más cómodamente.

En la parte superior de esta transparencia se ilustra el concepto de **circuito equivalente**. Este concepto resulta de gran utilidad cuando se trata de analizar circuitos de cierta complejidad, en los que, como es el caso en muchas situaciones prácticas, sólo se está interesado en conocer detalles en una cierta región del circuito; o bien cuando se quiere disponer de un modelo simplificado de un circuito, o subcircuito, que, orillando su complejidad interna, resume su comportamiento respecto al resto del sistema desde un cierto número de nodos de conexión. Se trata pues de ampliar el viejo concepto bélico de *divide y vencerás*.

La idea básica consiste en escoger, de forma arbitraria, y a conveniencia, ciertos nodos de un circuito, o subcircuito, y considerarlos como terminales externos, a partir de los cuales se supone que el circuito equivalente se conectará a otros sistemas, o al resto del circuito original, si lo que se hace es construir el equivalente de un subcircuito. En terminología de la Teoría de Circuitos esta acción se denomina definir un puerto. Un **puerto** es pues una pareja de terminales de un circuito a la que se le asigna una variable intensidad de corriente que lo atraviesa, y que verifica que esta es igual a la corriente que entra al circuito por uno de los terminales que forma el puerto, e igual a la intensidad de corriente que sale por el otro; además la diferencia de potencia entre dichos terminales también es una variable de circuito. A continuación, se construye un modelo simplificado cuyo comportamiento se expresa mediante una la relación entre las variables tensión-corriente de puerto. Así a todos los efectos el circuito equivalente se comporta de forma idéntica al circuito original al que sustituye en cualquier otra situación, aunque sólo a efectos del cálculo de variable del propio puerto o externas a él.

En la parte inferior de la transparencia se muestran dos ejemplos sencillos de obtención de circuitos equivalentes, se trata de los casos de conexión en serie o en paralelo de elementos de circuito. En ambos casos se explica la idea general que permite la asociación, así como dos ejemplos concretos de asociaciones de elementos idénticos.

### Transparencia 19: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS: DIVISOR DE TENSIÓN. DIVISOR DE CORRIENTE

En esta transparencia se analizan dos situaciones que proporcionan resultados generales y que son muy útiles para simplificar cálculos sobre circuitos.

### Transparencia 20: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS: EQUIVALENCIAS, ERRORES Y CIRCUITOS IMPOSIBLES

En esta transparencia se ilustran algunas equivalencias sencillas, algunos errores frecuentes y dos circuitos imposibles, conexión en paralelo de fuentes de tensión de distinto valor y conexión en serie de fuentes de intensidad de distinto valor, porque violan las leyes de Kirchhoff.

### Transparencia 21: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS: EJEMPLO

En esta transparencia se muestra un ejemplo de análisis de circuitos, que además sirve para ilustrar el hecho de que sí es posible la asociación en paralelo de fuentes reales, y cómo su equivalente es otra fuente real.

### Transparencia 22: ALGUNOS RESULTADOS BÁSICOS: EQUIVALENTES THEVENIN Y NORTON

En esta transparencia se presenta un resultado básico, y muy general, de la Teoría de Circuitos y que da la receta para construir circuitos equivalentes de sistemas muy complejos. Son los denominados teoremas de Thévenin y Norton que establecen que **cualquier circuito formado por elementos de circuito tales como resistencias, fuentes de tensión y /o fuentes de intensidad puede modelarse desde cualquier pareja de nudos mediante cualquiera de los dos circuitos equivalentes que se muestran en la transparencia**. El procedimiento para determinar los valores de sus elementos se describe en la parte inferior.

### Transparencia 23: EQUIVALENTES THEVENIN Y NORTON: EJEMPLO

En esta transparencia se muestra un ejemplo de cálculo de equivalentes Thévenin y Norton.

## Transparencia 24: EJEMPLO DE ANÁLISIS: CIRCUITO CON FUENTES DEPENDIENTES

En esta transparencia y en las dos siguientes se ilustra otro ejemplo de análisis DC y aplicación sistemática del algoritmo presentado en la Transparencia 14: En este nuevo ejemplo se pide calcular sólo algunas variables de un circuito además presenta la novedad de incluir fuentes dependientes.

## Transparencia 25: EJEMPLO DE ANÁLISIS: CIRCUITO CON FUENTES DEPENDIENTES (CONTINUACIÓN)

Esta transparencia continúa con el ejemplo hasta plantear el sistema de ecuaciones que permitirá responder al enunciado.

## Transparencia 26: EJEMPLO DE ANÁLISIS: CIRCUITO CON FUENTES DEPENDIENTES (CONTINUACIÓN)

En esta transparencia se concluye el ejemplo desarrollado en las dos transparencias anteriores, abordando los cálculos finales que dan respuesta al enunciado del problema. Cabe destacar aquí que una vez planteado el sistema de ecuaciones, y analizadas las diferentes posibilidades que se tienen para dar respuesta al enunciado del problema, se observa que no es necesario resolver el sistema de ecuaciones para todas sus incógnitas, sino calcular solamente el valor de una de ellas, con lo cual la aplicación del método correspondiente de resolución de sistemas de ecuaciones irá encaminado a obtener el valor de esa incógnita en primer lugar, sin necesidad de abordar su solución completa.

## Transparencia 27: CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS

Dado que queda fuera del objetivo de este curso abordar el análisis en general de circuitos con elementos dinámicos, con esta transparencia y las siguientes se trata de ilustrar cual es el papel que desempeñan elementos como el condensador en relación a los circuitos empleados en el diseño y modelado de puertas lógicas.

En esta transparencia se ilustra un efecto de los circuitos reales que es necesario modelar con elementos dinámicos como son, por ejemplo los condensadores, y que no es explicable en un modelo que emplee únicamente elementos resistivos.

Consideremos un experimento en el que un circuito divisor de tensión construido con resistencias reales es excitado mediante una señal  $v_s(t)$  como se ilustra en la parte superior de la transparencia. La señal de excitación  $v_s(t)$  es una señal periódica binaria como la que aparece en la parte superior de la figura central, conocida con tren de pulsos; por lo que el experimento va encaminado a estudiar el comportamiento dinámico de dicho circuito.

Si consideramos que la frecuencia de  $v_s(t)$  es baja, la señal a la salida, dada por la tensión  $v_o(t)$ , resulta ser la representada mediante la línea punteada en la parte inferior de la figura central. Como puede observarse, se trata de una señal de aspecto idéntico al de la señal de entrada, salvo en lo que respecta a valor máximo de los pulso que es la mitad del de la señal de entrada. Este comportamiento es el que cabría esperar en un divisor de tensión como se ha visto en la Transparencia 19: Por tanto el circuito formado por resistencias se modelará adecuadamente por medio del circuito que se muestra en la parte superior izquierda de la transparencia.

Sin embargo, a medida que se incrementa la frecuencia de la señal  $v_s(t)$  se observa que la salida  $v_o(t)$  empieza a deformarse respecto a la salida a baja frecuencia y su aspecto se parece más al que aparece sobreimpreso con trazo continuo en la figura central. Este comportamiento, no puede ser explicado con el modelo de baja frecuencia. Para modelar este efecto se hace necesario incluir un elemento adicional, en este caso un condensador, como muestra el modelo de alta frecuencia del circuito de la parte superior derecha de la transparencia. Con este experimento hemos comprobado por una parte, que los modelos que proporciona la teoría de circuitos tienen unas condiciones de validez en lo que respecta a su capacidad de representar a los sistemas reales; y por otra parte, que los condensadores permiten modelar efectos de comportamiento dinámico de los sistemas, esto es, el comportamiento cuando las señales de entrada cambian rápidamente.

## Transparencia 28: MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE PUERTAS LÓGICAS

Consideremos ahora un experimento con un inversor real, el cual es excitado con una señal semejante a la del experimento descrito en la transparencia anterior. (La única diferencia respecto aquella esta en que aquí los niveles alto y bajo de tensión se han hecho corresponder con los respectivos niveles lógicos) el esquema del circuito se muestra en la parte superior izquierda de la transparencia.

Si consideramos que la frecuencia de  $v_x(t)$  es baja, tanto la señal a la entrada del inversor, dada por la tensión  $v_x(t)$ , como la señal a la salida, dada por la tensión  $v_y(t)$ , resultan ser las representadas mediante líneas discontinuas en figura que ocupa el lateral derecho de la transparencia. Como puede observarse, a la entrada del inversor se tiene una señal de aspecto idéntico al de la señal de entrada, mientras que a la salida se tiene la señal complementaria, con los niveles lógicos adecuados, como correspondería según comportamiento de un inversor ideal. Por tanto el circuito formado por resistencias se modelará adecuadamente por medio del circuito que se muestra en la parte superior izquierda de la transparencia, donde el inversor real se correspondería con uno ideal.

Sin embargo, a medida que se incrementa la frecuencia de la señal  $v_x(t)$  se observa que, tanto la señal a la entrada del inversor, dada por la tensión  $v_x(t)$ , como la señal a la salida, dada por la tensión  $v_y(t)$ , empiezan a deformarse respecto del resultado obtenido para baja frecuencia y su aspecto se parece más al que aparece sobreimpreso con trazo continuo en la figura de la derecha. Este comportamiento, no puede ser explicado con el modelo de baja frecuencia. Dada la semejanza entre las formas de onda obtenidas en este experimento y la obtenida en el experimento anterior, cabe imaginar que en este caso también podría modelarse este efecto incluyendo elementos capacitivos, tanto en la entrada como en la salida del inversor ideal. En la parte inferior izquierda se muestra un esquema de un posible modelo de alta frecuencia. Con este experimento volvemos a poner de manifiesto como los modelos que proporciona la teoría de circuitos tienen unas condiciones de validez en lo que respecta a su capacidad de representar a los sistemas reales; y por otra parte, que los condensadores permiten modelar efectos de comportamiento dinámico.

### Transparencia 29: CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS: CIRCUITO RC

En esta transparencia y en las siguientes se analiza de forma cuantitativa un circuito dinámico simple. El circuito RC. Se observará como la forma de onda obtenida para la tensión de salida del circuito en los casos de carga y descarga del condensador se asemejan a las formas de onda presentadas en los experimentos descritos en la anteriores transparencias, lo que justifica, al menos, cualitativamente la incorporación de condensadores a los modelos de baja frecuencia para modelar los efectos de alta frecuencia y obtener los correspondientes modelos.

De la aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito RC, y de la relación tensión-corriente en el condensador se obtiene una ecuación diferencial de primer orden. En la transparencia se aborda su solución general, de forma que se obtiene una expresión para la tensión y la corriente eléctrica en el condensador.

### Transparencia 30: CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS: CARGA Y DESCARGA DE CONDENSADORES

En esta transparencia se estudian dos casos particulares de la solución general y que corresponden a la carga y descarga del condensador. En la transparencia se obtiene la expresión analítica de la tensión y de la corriente en el condensador para ambos casos. Además se realiza un esbozo de la evolución temporal de ambas variables de forma que queda patente su parecido con las formas de onda obtenidas en los experimentos anteriormente descritos. Un parámetro interesante de este circuito es la denominada **constante de tiempo  $\tau$** , que da una medida de la rapidez con la que se produce la carga y descarga del condensador, y por tanto de la velocidad del circuito para seguir cambios en la señal de entrada.

### Transparencia 31: CARGA Y DESCARGA DE CONDENSADORES: TIEMPO DE SUBIDA Y TIEMPO DE BAJADA

En esta transparencia se determinan los tiempos de subida y de bajada de las transiciones de carga y descarga de un condensador y se ponen en relación con la constante de tiempo  $\tau$  del circuito RC. Nótese la semejanza con los tiempos de subida y bajada estudiados en el Tema 1 como parámetros que caracterizan temporalmente a las puertas lógicas.

### Transparencia 32: CIRCUITOS CON ELEMENTOS DINÁMICOS: CIRCUITO RC: RESPUESTA A UN TREN DE PULSOS

En esta transparencia se describe un experimento que pretende ilustrar cómo influye en la forma de onda de la respuesta de un circuito RC a un tren de pulsos, la relación que mantengan entre sí la frecuencia del tren de pulsos y la constante de tiempo del circuito, o lo que es lo mismo entre la frecuencia del tren de pulsos y los tiempos de subida y de bajada en los procesos de carga y descarga del condensador. Con este experimento se pretende sugerir e ilustrar cómo los parámetros temporales de las puertas lógicas limitan su comportamiento ideal, degradando la información que procesan.

Consideremos un experimento en el que un circuito RC es excitado como se muestra en la figura superior izquierda de la transparencia. Cuando el interruptor **S** esté en la posición **S<sub>on</sub>**, se tendrá un circuito de carga del condensador, mientras que cuando

el interruptor **S** esté en la posición **S<sub>off</sub>**, se tendrá un circuito de descarga del condensador, ambos como los ya estudiados. Si hacemos conmutar al interruptor **S** con una frecuencia  $f=1/T$ , esto será equivalente a excitar el circuito RC con una señal tipo tren de pulsos  $v_a(t)$ , como la que se muestra en la parte superior de la figura de la derecha. En este experimento consideraremos, sin pérdida de generalidad, que el tiempo que está el interruptor en la posición **S<sub>on</sub>**, que llamaremos **t<sub>on</sub>**, es el mismo que el que está en la posición **S<sub>off</sub>**, que llamaremos **t<sub>off</sub>**. La suma de ambos será entonces el periodo T del tren de pulsos. Por tanto se tendrá que durante el semiperiodo correspondiente a **t<sub>on</sub>** tendremos la carga del condensador, mientras que durante el semiperiodo **t<sub>off</sub>** tendremos la descarga. Por otra parte la constante de tiempo del circuito  $\tau$  es la misma tanto para la carga, como para la descarga del condensador, por lo que también lo serán los correspondientes tiempos de subida y de bajada.

Si consideramos que la frecuencia de  $v_a(t)$  es tal que su periodo T es mucho mayor que la suma de los tiempos de subida y de bajada, y que además **t<sub>on</sub>**, es también mucho mayor que cualquiera de estos. Entonces, en cada periodo se completará de forma holgada una carga y descarga del condensador, con lo que la forma de onda de la señal de salida, esto es, la tensión  $v_C(t)$ , tendrá el aspecto mostrado en la segunda de las curvas de la figura de la derecha. Esta forma de onda es suficientemente parecida al tren de pulsos original como para poder ser reconocido, por ejemplo su amplitud máxima sigue siendo V; por lo que podemos concluir que la información del tren de pulsos original se mantiene.

Si consideramos a continuación el caso en que la frecuencia de  $v_a(t)$  es tal que su periodo T coincide aproximadamente con la suma de los tiempos de subida y de bajada, por lo que además se cumplirá que **t<sub>on</sub>** es también aproximadamente igual a estos. Entonces, en el semiperiodo de carga, el condensador lo hará hasta que su tensión alcance aproximadamente el 90% del valor de carga completa, mientras que en el semiperiodo de descarga se descargará por completo. La forma de onda de la señal de salida, tendrá ahora el aspecto mostrado en la tercera curva de la figura de la derecha, donde puede observarse cómo la máxima amplitud alcanzada por la señal corresponde con el 90% de V. En esta forma de onda, aunque ya bastante deformada, todavía es reconocible el tren de pulsos original; por lo que podemos concluir que la información del tren de pulsos original, aunque degradada, es recuperable.

Finalmente consideraremos el caso en que la frecuencia de  $v_a(t)$  es tal que su periodo T coincide aproximadamente con el doble de la constante de tiempo  $\tau$  del circuito, por lo que además se cumplirá que **t<sub>on</sub>** será también aproximadamente igual a ésta.

Entonces, en el semiperiodo de carga, el condensador lo hará tan sólo hasta el 0,37% del valor de carga completa ( $1/e$  veces el máximo valor V), mientras que en el semiperiodo de descarga se descargará por completo. La forma de onda de la señal de salida muestra en este caso el aspecto de la curva inferior de la figura de la derecha, donde la máxima amplitud alcanzada por la señal corresponde con el 0,37% de V. En esta forma de onda deja de ser reconocible el tren de pulsos original; por lo que podemos concluir que la información de este se ha degradado y no es recuperable.

Piense que una situación similar es la que se da en los circuitos lógicos reales, para los que la relación entre la frecuencia de cambio de las señales de entrada y los parámetros temporales de estos, influyen directamente en la degradación de la información a procesar, por lo que constituyen una limitación en cuanto a su velocidad de operación.